

Д. В. Тичков
О. С. Басараб

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЇВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Черкаський державний технологічний університет

Доведена необхідність проведення імітаційного моделювання інформаційно-вимірювальних систем фізичних характеристик пристроїв мікросистемної техніки та показані особливості такого моделювання. Показано, що застосування методів математичного моделювання для пристроїв мікросистемної техніки не є коректним через невідповідність класичних фізичних законів для мікро- та нанорозмірних об'єктів. При цьому встановлено, що саме застосування імітаційних моделей та сучасних комп'ютерних засобів, які можуть якісно реалізувати ці методи, дозволяє провести високоякісне моделювання пристроїв мікросистемної техніки на якісно новому рівні в режимі реального часу. З'ясовано, що перевагами таких імітаційних моделей (реалізованих на базі математичного процесору MatLab Simulink) є можливість урахування процесів та явищ, що мають місце на мікрометричному рівні (мікрокапілярні явища, поверхневий мікрострум та трибозаряд, екзодифузія електронів з поверхні, міжмолекулярна взаємодія тощо). В процесі проведеного моделювання, побудовані та досліджені імітаційні моделі інформаційно-вимірювальних систем різних фізичних характеристик (поверхневого заряду, мікронерівностей, мікротвердості, зносостійкості, градієнту температур), що можуть виникати на стаціонарних та динамічних поверхнях мікросистемних компонентів пристроїв. Проведена верифікація отриманих результатів моделювання показала високу їх збіжність з результатами експерименту (розбіжність між результатами моделювання та експериментально отриманими даними не перевищувала 8,5%), а також точність (відносна похибка при визначенні таких характеристик становила 4,5-11,2%) та надійність (ймовірність отримання адекватних результатів, не менше 0,996) отриманої моделі. Авторами запропоновано використовувати отримані внаслідок імітаційного моделювання результати при проектуванні інформаційно-вимірювальних систем фізичних характеристик пристроїв мікросистемної техніки різного призначення.

Ключові слова: імітаційне моделювання, інформаційно-вимірювальна система, MatLab Simulink, пристрій мікросистемної техніки, фізичні характеристики.

Вступ

Розвиток та застосування пристроїв мікросистемної техніки останнім часом знаходить усе більшу популярність майже в усіх областях науки та техніки [1]. Основними перевагами таких пристроїв, які й визначають сильні сторони їх застосування є їх висока функціональність та надійність, що посилюються їхніми мініатюрністю, технологічністю, малою ресурсоемісністю та економічністю [2]. Проте, перепонами на шляху подальшого удосконалення та масового виробництва пристроїв мікросистемної техніки виступає складність оперативного визначення та контролю функціональних характеристик цих пристроїв, оскільки визначення таких характеристик обмежене технологічною складністю виготовлення інформаційно-вимірювальних систем та неможливістю урахування факторів, які мають вплив на точність визначення даних характеристик [3]. Вирішення такого проблемного питання бачиться у застосування сучасних методів і комп'ютерних засобів моделювання, які дозволяють швидко, точно та ефективно визначати основні технічні параметри розроблюваних інформаційно-вимірювальних систем, а також встановлювати найбільш раціональні режими їх використання.

Проте, ряд проведених авторами робіт [4-6] досліджень показав, що застосування методів математичного моделювання для пристроїв мікросистемної техніки не є коректним через невідповідність класичних фізичних законів для мікро- та нанорозмірних об'єктів. Тому такі методи не можуть бути використані при моделюванні та розробленні й інформаційно-вимірювальних систем характеристик пристроїв мікросистемної техніки. Моделювання ж таких систем з використанням системи аналітичних рівнянь обмежене тривалістю та складністю розрахунків (використовуються системи інтегральних та/або диференціальних рівнянь), низькою їх точністю та неможливістю урахування в

останніх непередбачуваних чинників оточуючого середовища та стану досліджуваних поверхонь, а також ефекту «старіння» вимірювальних систем та їх інструментів.

Основними перевагами імітаційних моделей є їх можливість урахування процесів та явищ, що мають місце на мікрометричному рівні (мікрокапілярні явища, поверхневий мікрострум та трибозаряд, екзодифузія електронів з поверхні, міжмолекулярна взаємодія тощо). В той же час встановлено, що застосування таких моделей, реалізація яких відбувається на сучасних комп'ютерних засобах, дозволяє якісно реалізувати методи імітаційного моделювання, а також проводити високоякісне моделювання пристроїв мікросистемної техніки на якісно новому рівні в режимі реального часу [7].

Метою статті є дослідження методів та засобів імітаційного моделювання інформаційно-вимірювальних систем фізичних характеристик пристроїв мікросистемної техніки, що дозволяє покращити збіжність змодельованих результатів з результатами експерименту, а також підвищити точність та надійність отриманих моделей.

Постановка задачі

В даній роботі наводяться приклади імітаційної моделі інформаційно-вимірювальної системи фізико-механічних характеристик пристроїв мікросистемної техніки, а основною метою, що переслідувалась у статті було визначення раціональних параметрів вимірювання цих систем, що дозволить спростити процес налаштування інформаційно-вимірювальної системи, а також дослідити динамічні режими її роботи [8]. На етапі проектування для реалізації процесу імітаційного моделювання такої системи, авторами використовувався сучасний засіб імітаційного моделювання “MATLab Simulink”, який дозволяє значно спростити аналіз сучасних автоматизованих систем за різних алгоритмів їх роботи. Така імітаційна модель запропонована з метою визначення раціональних параметрів вимірювання та контролю, а розроблена авторами на її основі інформаційно-вимірювальна система дозволила спростити процес налагодження такої системи, а також дослідити динамічні режими її роботи та дає змогу суттєво спростити аналіз сучасних інформаційно-вимірювальних систем із різними алгоритмами їх роботи.

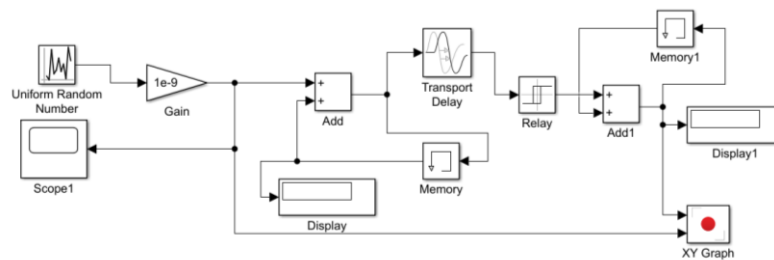


Рис. 1. Імітаційна модель інформаційно-вимірювальної системи характеристик поверхневого заряду. “MATLab Simulink”

Модель на рис.1 представляє собою сукупність блоків, які імітують роботу інформаційно-вимірювальної системи характеристик поверхневого заряду. Модель складається з наступних блоків: блоку імітації випадкового електричного заряду по поверхні (Uniform Random Number та Gain) та індикації останнього вимірюного заряду (Scope), з блоку вимірювання та накопичення електричного заряду (Add та Memory) з якого отримуємо результат на індикатор максимального накопиченого заряду (Display), блок визначення розподілу електричного заряду по поверхні з часом складається з блоків (Transport Delay, Relay, Add1 та Memory1) з якого отримуємо результат на індикатор сумарного заряду розподіленого по одній лінії вздовж поверхні (Display1). Після всього отримуємо оозподіл електричного заряду по досліджуваній поверхні (XY Graph)

Іншим прикладом інформаційно-вимірювальної системи вже фізико-механічних характеристик (мікронерівностей поверхні, її мікротвердості та зносостійкості, поверхневого трибоелектричного заряду, градієнтів локальної теплопередачі поверхні та інші) мікросистемних пристроїв є інформаційно-вимірювальна система наведена на рис.2.

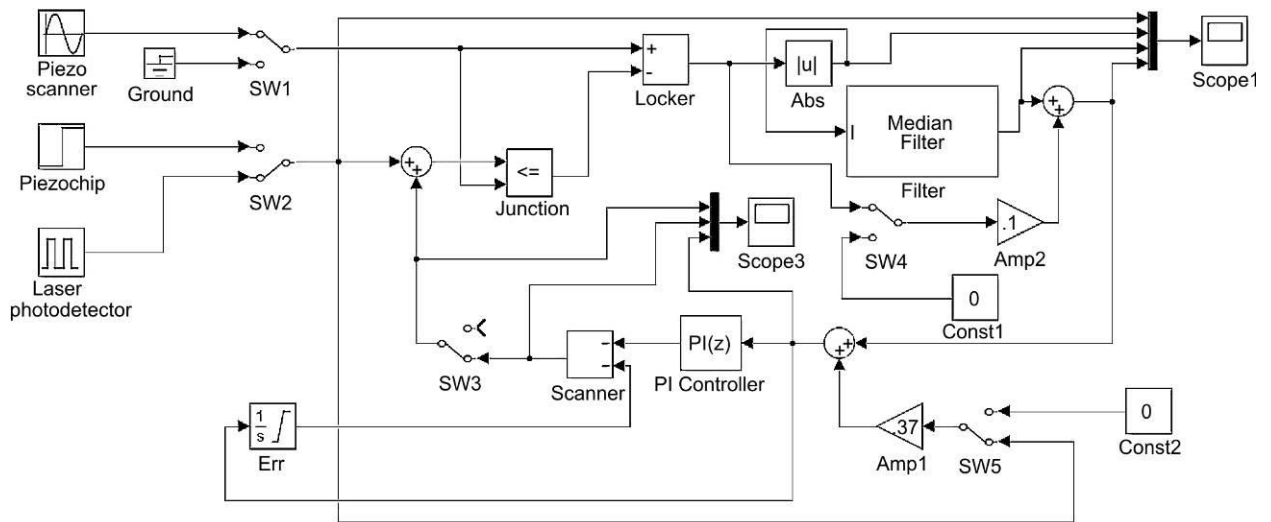


Рис. 2. Імітаційна модель інформаційно-виміральної системи фізико-механічних характеристик мікросистемних пристроїв. "MATLab Simulink"

Представлена на рис.2 модель представляє собою сукупність блоків, які імітують роботу автоматизованої системи контролю на базі атомно-силового мікроскопу. Модель складається з наступних блоків: блоку запуску та керування п'єзосканером (Piezo scanner), а саме: генератора гармонійних сигналів, блоку керування п'єзочипом (Piezochip), а саме: генератора дискретних сигналів та лазерного позиціонера детектору положення зонду (Laser photodetector), ПІ-контролер зворотного зв'язку (PI Controller), блок керування процесом сканування (Scanner), блокатору положення крокових двигунів, що не дозволяє здійснювати швидке позиціонування в момент коли зонд наближається до поверхні (Locker), блоки побудови залежностей відстаней "підведення-відведення" (Filter) від точності та чутливості процесу вимірювання, а також блок виведення інформації на екран (Scope).

Для проведення налаштування автоматизованої системи наведеної на рис.2 відповідають блоки: Const1 – давач збудження постійного впливу, Const2 – давач постійних обертів п'єзодвигуна, Err – пропорційно-інтегральна ланка оброблення помилок. Блоки давачів з'єднані з підсилювачами Amp, які дозволяють налаштувати перетворення їх сигналів. Змінюючи значення величини посилення можна отримати заплановану поведінку системи.

Для зручного і швидкого налагодження системи в моделі передбачено два ключа, керованих вручну. SW4 дозволяє включати або відключати зв'язок по давачу Const1. SW2 дозволяє включати або відключати зворотний зв'язок по давачу Const2.

Паралельно з цим, блок Err здійснює контроль виміральної системи за лінійністю. Якщо система набуває нелінійного вигляду, тоді симуляція припиняється, а на інформаційне табло Scope3 видається повідомлення про відповідну помилку.

Результати дослідження

В процесі проведеного імітаційного моделювання були отримані та досліджені моделі інформаційно-виміральних систем характеристик, що можуть виникати на стаціонарних та динамічних поверхнях мікросистемних компонентів пристроїв.

Так, як можна побачити, розподіл електричного заряду при вздовж досліджуваної поверхні, який був отриманий в результаті імітаційного моделювання за запропонованою моделлю (рис.1) сильно корелює з результатами експериментальних вимірювань, рис.3. Встановлено, що для певних режимів і моментів часу вимірювання такі розподіли мають розбіжність до 11,5%, що доводить правильність та адекватність складеної імітаційної моделі.

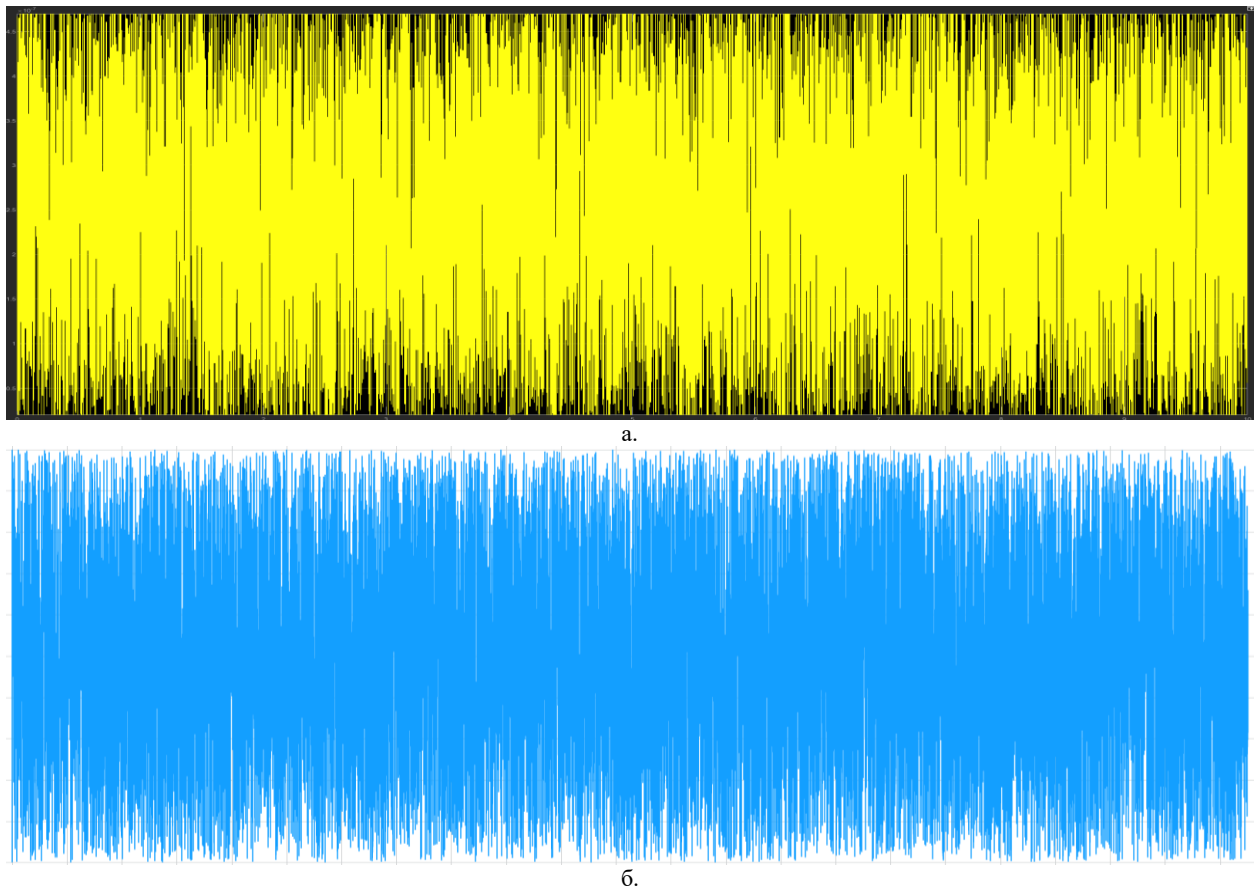


Рис. 3. Розподіл електричного заряду вздовж досліджуваної поверхні, отримані внаслідок імітаційного моделювання (а) та в процесі експериментального дослідження (б)

В той же час, результати роботи імітаційної моделі інформаційно-виміральної системи фізико-механічних характеристик мікросистемних пристроїв (рис.2) дозволили встановити залежності параметрів робочих режимів: кутової швидкості від струму на п'єзосканері системи вимірювання поверхневих мікронерівностей (рис.4а), зміни різниці потенціалів зворотного зв'язку вимірювального зонду в процесі вимірювання (рис.4б), зміни різниці потенціалів при вимірюванні поверхневого трибозаряду (рис.4в), а також порівняти ці параметри, отримані в результаті імітаційного моделювання з експериментально отриманими даними.

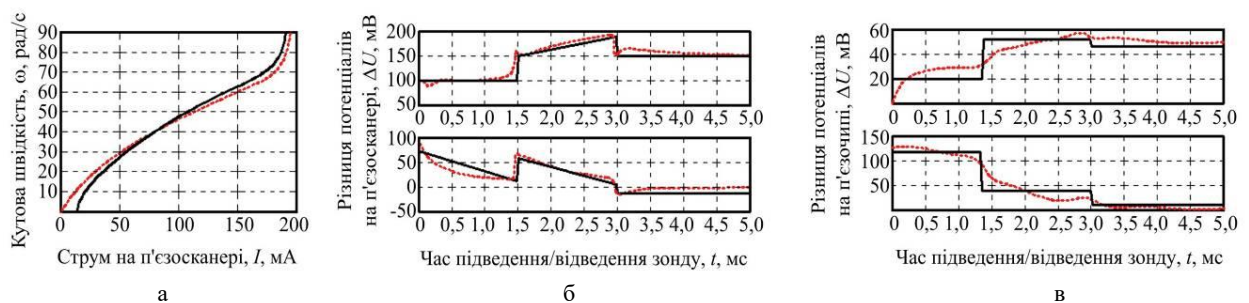


Рис. 4. Залежності параметрів робочих режимів інформаційно-виміральної системи, отримані в процесі імітаційного моделювання: а – характеристика керування п'єзосканером; б – зміна різниці потенціалів зворотного зв'язку вимірювального зонду в процесі вимірювання; в – зміна різниці потенціалів при вимірюванні поверхневого трибозаряду; суцільна лінія – дані, отримані при моделюванні системи; штрихова лінія – експериментально отримані дані

У процесі дослідження, аналізу та подальшого порівняння результатів наведеної імітаційної моделі інформаційно-виміральної системи фізико-механічних характеристик пристроїв мікросистемної техніки з даними, отриманими експериментальним шляхом в роботі [9] для певних режимів і моментів часу вимірювання, встановлена розбіжність цих результатів не більше ніж на 8 – 11,5%, що доводить правильність та адекватність складеної імітаційної моделі. Таким чином, проведена верифікація отриманих результатів моделювання показала високу їх збіжність з результатами екс-

перименту (так, розбіжність між результатами моделювання та експериментально отриманими даними не перевищувала 11,5%), а також точність (відносна похибка при визначенні таких характеристик становила 4,5-11,2%) та надійність (ймовірність отримання адекватних результатів, не менше 0,996) отриманої моделі.

В якості перспективи виконання досліджень розглянутих в даній роботі, авторами пропонується використовувати отримані внаслідок імітаційного моделювання результати для проектування інформаційно-вимірювальних систем направлених на моніторинг та встановлення фізичних характеристик широкої номенклатури пристроїв мікросистемної техніки.

Висновки

Виконані дослідження розроблених імітаційних моделей інформаційно-вимірювальних систем для визначення характеристик різної фізичної природи (електростатика, капілярна та міжмолекулярна взаємодія, термодинаміка тощо), які можуть мати місце на стаціонарних та динамічних поверхнях компонентів мікросистемних пристроїв.

Проведена верифікація отриманих результатів моделювання, яка показала підвищення: збіжності цих результатів з результатами експерименту (так, розбіжність між такими даними не перевищувала 8,5%); точності (відносна похибка при визначенні таких характеристик становила 4,5-11,2%) та надійності (ймовірність отримання адекватних результатів, не менше 0,996) отриманої моделі.

Запропоновано використовувати отримані результати імітаційного моделювання при проектуванні інформаційно-вимірювальних систем фізичних характеристик пристроїв мікросистемної техніки різного призначення

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Sotnik, S. & Lyashenko, V. & Shakurova, T.. (2021). Nano Devices and Microsystem Technologies: Brief Overview. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*. 5 (11). 74-82. <http://www.ijeais.org/ijeais>
- [2] Khan, Sanowar & Finkelstein, L.. (2011). Mathematical Modelling in Measurement and Instrumentation. *Measurement and Control*. 44. 277-282. 10.1177/002029401104400904.
- [3] N. Maluf, An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. London, UK: Artech House, 2004.
- [4] An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems). Loughborough, UK: PRIME Faraday Partnership, 2002.
- [5] Shabana, A.A. Dynamics of Multibody Systems. Cambridge, England: Cambridge University Press.2003.
- [6] Il'kiv, V.s & Nytrebych, Zinovii & Pukach, Petro & Kohut, Ihor & Pakholok, B.. (2019). Analysis of measurement systems mathematical models by using the comparison of functions. *Mathematical Modeling and Computing*. 6. 268-275. 10.23939/mmc2019.02.268.
- [7] Tytarenko, V. & Tychkov, D. & Bilokin, S. & et al. (2020). Development of a simulation model of an information-measuring system of electrical characteristics of the functional coatings of electronic devices. *Intern. Scien. Journal "Mathematical modeling"*. IV. 2. 68 – 71.
- [8] Bondarenko M.A. Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials / M.A.Bondarenko // System analysis and information technologies SAIT 2011: thesis Intern. conf. of science and technology, (Kyiv, May 23-28, 2011). – Kyiv: ESC "IASA" NTUU "KPI". – 2011. – P. 404.
- [9] Andriienko, O. & Bondarenko, M. & Antonyuk, V. "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in: 19 Intern. scientific-practical. Conf. "Quality, standardization, control: theory and practice" (Odesa, Sept. 9 – 13, 2019).

REFERENCES

- [1] Sotnik, S. & Lyashenko, V. & Shakurova, T.. (2021). Nano Devices and Microsystem Technologies: Brief Overview. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*. 5 (11). 74-82. <http://www.ijeais.org/ijeais>
- [2] Khan, Sanowar & Finkelstein, L.. (2011). Mathematical Modelling in Measurement and Instrumentation. *Measurement and Control*. 44. 277-282. 10.1177/002029401104400904.
- [3] N. Maluf, An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. London, UK: Ar-tech House, 2004.
- [4] An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems). Loughborough, UK: PRIME Faraday Partnership, 2002.
- [5] Shabana, A.A. Dynamics of Multibody Systems. Cambridge, England: Cambridge University Press.2003.

- [6] Il'kiv, V.s & Nytrebych, Zinovii & Pukach, Petro & Kohut, Ihor & Pakholok, B.. (2019). Analysis of measurement systems mathematical models by using the comparison of functions. *Mathematical Modeling and Computing*. 6. 268-275. 10.23939/mmc2019.02.268.
- [7] Tytarenko, V. & Tychkov, D. & Bilokin, S. & et al. (2020). Development of a simulation model of an information-measuring system of electrical characteristics of the functional coatings of electronic devices. *Intern. Scien. Journal "Mathematical modeling"*. IV. 2. 68 – 71.
- [8] Bondarenko M.A. Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials / M.A.Bondarenko // *System analysis and information technologies SAIT 2011: thesis Intern. conf. of science and technology*, (Kyiv, May 23-28, 2011). – Kyiv: ESC "IASA" NTUU "KPI". – 2011. – P. 404.
- [9] Andriienko, O. & Bondarenko, M. & Antonyuk, V. "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in: 19 Intern. scientific-practical. Conf. "Quality, standardization, control: theory and practice" (Odesa, Sept. 9 – 13, 2019).

Тичков Дмитро Володимирович – здобувач освітньо-наукового рівня доктора філософії кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, e-mail: dmytro.tychkov@gmail.com;

Басараб Ольга Станіславівна – здобувач освітнього рівня бакалавра кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, e-mail: olya.olya.basarab@gmail.com.

Черкаський державний технологічний університет

D. V. Tychkov

O. S. Basarab

FEATURES OF SIMULATION OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS CHARACTERISTICS OF MICROSYSTEM TECHNOLOGY DEVICES

Cherkasy State Technological University

The necessity of simulation modeling of information and measurement systems of physical characteristics of microsystem technology devices is proven and the features of such modeling are shown. It is shown that the application of mathematical modeling methods for microsystem technology devices is not correct due to the inconsistency of classical physical laws for micro- and nano-sized objects. At the same time, it was established that the use of simulation models and modern computer tools, which can qualitatively implement these methods, allows for high-quality modeling of microsystem technology devices at a qualitatively new level in real time. It was found that the advantages of such simulation models (implemented on the basis of the MatLab Simulink mathematical processor) are the possibility of taking into account processes and phenomena that take place at the micrometric level (microcapillary phenomena, surface microcurrent and tribocharge, exodiffusion of electrons from the surface, intermolecular interaction, etc.). In the course of the simulation, simulation models of information and measurement systems of various physical characteristics (surface charge, capillary and intermolecular interaction, temperature gradient) that can occur on stationary and dynamic surfaces of microsystem components of devices were built and investigated. The verification of the obtained simulation results showed their high convergence with the experimental results (the discrepancy between the simulation results and the experimentally obtained data did not exceed 8.5%), as well as accuracy (the relative error in determining such characteristics was 4.5-11.2%) and reliability (probability of obtaining adequate results, not less than 0.996) of the obtained model. The authors suggested using the results obtained as a result of simulation modeling in the design of information and measurement systems of physical characteristics of microsystem technology devices for various purposes.

Keywords: simulation modeling, information and measurement system, MatLab Simulink, device of microsystem technology, physical characteristics

Tychkov Dmytro Volodymyrovych – holder of the educational and scientific level of Doctor of Philosophy of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies, e-mail: dmytro.tychkov@gmail.com;

Olha Stanislavivna Basarab – bachelor's degree holder of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies, e-mail: olya.olya.basarab@gmail.com.

Cherkasy State Technological University