

УДК 621.307.13

М. О. МАРКІН, О. М. МАРКІНА, С. М. КУЩОВИЙ, К. О. БУТЕНКО

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЗОНДІВ ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ

В роботі описано принцип побудови інформаційно-вимірювальної системи, яка основана на базі оптичного мікроскопу й передавальної камери типу Novus NVC-130BH а також її налаштувань, визначення характеристик та їх робочих діапазонів. Експериментальні дослідження визначення геометричних розмірів та дефектів зондів атомно-силового мікроскопу NanoEducator (виробник NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) інформаційно-вимірювальною системою показали, що розмір дефектів у виготовлених зондах становить 1 мкм.

Ключові слова: контроль, інформаційно-вимірювальна система, геометричні розміри, атомно-силова мікроскопія, зонд атомно-силового мікроскопа, контраст, штрихова міра, дефект

В работе описан принцип построения информационно-измерительной системы, которая основана на базе оптического микроскопа и передающей камеры типа Novus NVC-130BH а также ее настройки, определения характеристик и их рабочих диапазонов. Экспериментальные исследования определения геометрических размеров и дефектов зондов атомно-силового микроскопа NanoEducator (производитель NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) информационно-измерительной системой показали, что размер дефектов в изготовленных зондах составляет 1 мкм.

Ключевые слова: контроль, информационно-измерительная система, геометрические размеры, атомно-силовая микроскопия, зонд атомно-силового микроскопа, контраст, штриховая мера, дефект

Each type of microscopic investigation is inherent exceptional features sensing element that interacts with the surface of the measurement object. For example, atomic force microscopy inherits individual geometric features of the probes, limiting maximum dimensional resolution. Feature probe for atomic force microscopy is mainly determined by the radius of curvature, geometric dimensions, so to eliminate the effect of measurement error should be used as sharper and thinner probe.

This paper describes the principle of information-measuring system, which is based at the optical microscope and transmission camera type Novus NVC-130BH. It was determined the operating range of signal lighting system characteristics, established experimentally. Determined modulation transfer function that is associated with the quality of the frontiers probe atomic force microscope. It produced probes for atomic force microscope by electrochemical etching of a wolfram wire in a medium of sodium hydroxide. Experimental researches determining the geometric dimensions and defects probe of atomic force microscope NanoEducator (producer NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) by information-measuring system is revealed that the size of defects in the produced probes is 1 micron.

Keywords: control, information-measuring system, geometrical sizes, atomic force microscopy, the probe atomic force microscope, contrast, dashed measure, defect

Вступ. Більш детальне пізнання структурних зв'язків, клітинного складу аж до відокремлення атомних одиниць об'єкту дослідження є унікальною, однак реальною можливістю, при дослідженні об'єктів з застосуванням атомної силової, флуоресцентної, тунельної й скануючої мікроскопії. Реалізація кожного з видів мікроскопічного дослідження потребує спеціалізованого технічного й інженерного забезпечення, що утворює унікальний симбіоз процесу вимірювання й дослідження геометричних розмірів та особливостей клітинного зв'язку об'єктів контролю. Кожному виду мікроскопічного дослідження притаманні виняткові особливості чутливого елементу, який взаємодіє з поверхнею об'єкту вимірювання. Наприклад, атомно-силова й скануюча тунельна мікроскопії відрізняються за методом взаємодії зонду з поверхнею об'єкту, тому кожному з цих видів мікроскопії властиві індивідуальні геометричні особливості зондів, що обмежують граничну просторову роздільну здатність. Особливість зонду атомно-силової мікроскопії визначається в основному радіусом заокруглення [1, 2]. А от в скануючій тунельній мікроскопії зонд відіграє роль провідника і його геометричні розміри й конфігурація можуть бути різноманітні, однак для усунення впливу похибки вимірювання необхідно застосовувати якомога гостріший й тонший зонд. Такі особливості конфігурації зондів атомної мікроскопії пов'язані з його утриманням за рахунок силової взаємодії між зразком і вістря зонду. Однак, через занадто тонкий зонд, сили взаємодії мають незначні показники, тому сигнали швидко згасають не доходячи по п'єзодатчика, в наслідок чого система не відстежує захват зворотного зв'язку й не формує зображення. Для забезпечення високої точності відстеження поверхні

об'єкту, необхідно застосовувати такі показники конфігурації зонду, щоб інформативний сигнал передавався з мінімальними втратами. Тому збільшують кут заточування зонду до таких значень, щоб забезпечити надійну реєстрацію захвату зворотного зв'язку. Однак, при занадто великому куті заточування зонду, збільшується вплив форми на зображення, в наслідок чого погіршуються результати сканування й відповідно збільшується похибка вимірювання геометричних розмірів об'єктів дослідження [3]. З чого можна зробити висновок, що контроль за геометричними розмірами зонду атомно-силової мікроскопії є важливим і необхідним дослідженням.

Звісно вибір оптимальних розмірів й куту заточування зонду було виконано на етапі його виготовлення, однак, під час сканування поверхні об'єктів дослідження виникає порушення цілісності поверхні зонду й утворення дефектів. В даній роботі наведено результати експериментальних досліджень зондів до атомно-силового мікроскопу NanoEducator (виробник NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) (Ірландія), який зображено на рис. 1.



Рис. 1 – Зображення атомно-силового мікроскопу NanoEducator

© М. О. Маркін, О. М. Маркіна, С. М. Кущовий, К. О. Бутенко. 2016

Це пов'язано з особливостями хімічного складу металів, з яких їх виготовлено, від чого також залежить термін їх експлуатації. Оскільки не завжди існує можливість застосовувати зонди, що виготовлені з металів з додаванням хімічних сполук, що збільшують міцність й стійкість від крихкості, існує необхідність мати простий й доступний засіб контролю цілісності поверхні зонду. Пропонуємо для виконання такої задачі простий й доступний засіб вимірювання, як інформаційно-вимірювальна система (ІВС).

Експериментальні дослідження. Інформаційно-вимірювальна система для визначення геометричних розмірів об'єктів побудовано на основі сукупності оптичних, електричних та обчислювальних засобів, за допомогою яких інформація про структуру, стан та властивості об'єкту, що міститься в його випромінюванні, перетворюється в вимірювальний сигнал.

Загальна методика роботи інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометрич-

них розмірів полягає в формуванні зображення об'єкту, перетворенні його в цифровий код та застосуванні алгоритмів обробки, що забезпечують необхідну точність визначення параметрів зображення. Зображення об'єкту утворюються розподілом власного випромінювання, відбитого та того, що пройшло через середовище. Зазначимо цифрове зображення інформаційно-вимірювальної системи як сукупність відліків сигналу з прив'язкою до координат мішені світло-електричного перетворювача, де значення відліків сигналів характеризують освітленість пікселів, а їх координати визначають геометричні розміри цифрового зображення об'єкту. В основі даної задачі лежить формування відліків з їх координатною прив'язкою до геометричних розмірів об'єкту. Узагальнену структурну схему інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометричних розмірів наведено на рис. 2.

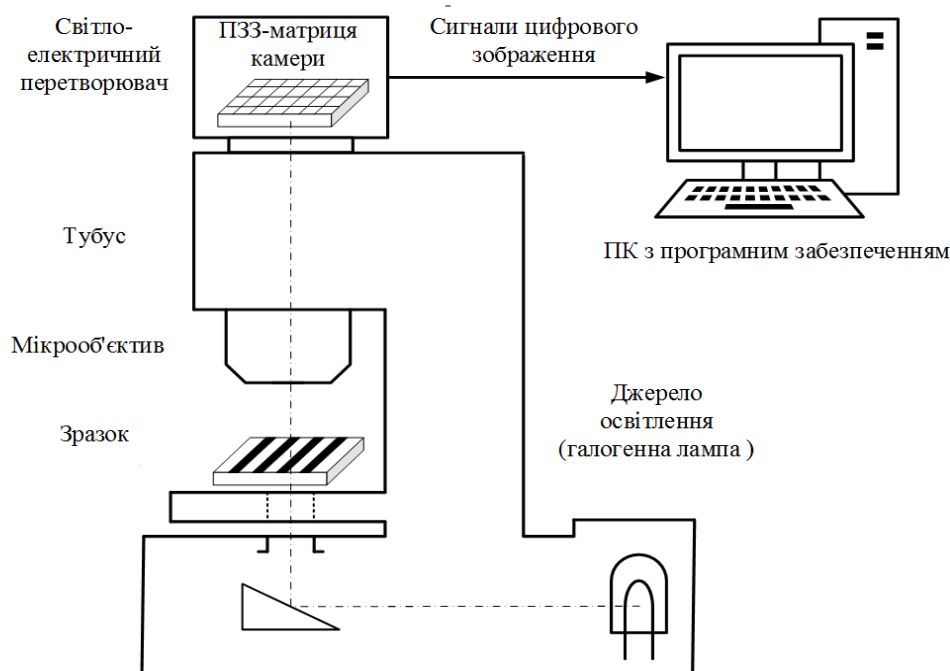


Рис. 2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення геометричних розмірів зондів АСМ

Інформаційно-вимірювальні системи викликають особливу зацікавленість як технічний засіб з потенційно високою роздільною здатністю, що має значні перспективи щодо зменшення похибок вимірювання лінійних розмірів. Дослідження роздільної здатності вимірювальної системи виконують завдяки оцінюванню контрасту зображення з функцією передачі модуляції [2]. При кількісному визначенні контрасту можливе використання різних співвідношень екстремальних значень освітленості $E_{\max}$ і $E_{\min}$, наприклад $E_{\max}/E_{\min}$, $E_{\min}/E_{\max}$, $(E_{\max} - E_{\min})/E_{\max}$. Вважаємо, що найбільш доцільно визначати контраст за формулою $(E_{\max} - E_{\min})/(E_{\max} + E_{\min})$. При такому співвідношенні контраст кількісно співпадає з функцією передачі модуляції в теорії сигналів, тобто $K = \Delta E/E_0$ (ΔE – перевищення основного значення освітленості над середнім; E_0 – середнє значення освітленості).

Зазначимо, що перед початком експериментальних досліджень вимірювання геометричних розмірів будь-якого об'єкту необхідно провести налаштування вимірювальної системи. По-перше, визначити світлосигнальну характеристику, за якою визначається діапазон робочих сигналів властивих саме цій системі. Експериментальні дослідження по визначенню світлосигнальної характеристики дозволили встановити, що діапазон робочих сигналів становить 30...120 у. о. По-друге необхідно визначити функцію передачі модуляції властиву вимірювальній системі. Адже функція передачі модуляції пов'язана з якістю визначення границь об'єкту дослідження, а саме з контрастом. Зображенню з максимальним контрастом властива висока роздільна здатність, а саме цей показник дозволяє детально вивчити особливості конструкції й форму об'єкту дослідження [4]. Зауважимо, що жодна з поширених в світовій практиці мір щодо визначення контрасту не може задовольнити всіх поставлених технічних вимог (рис. 3).

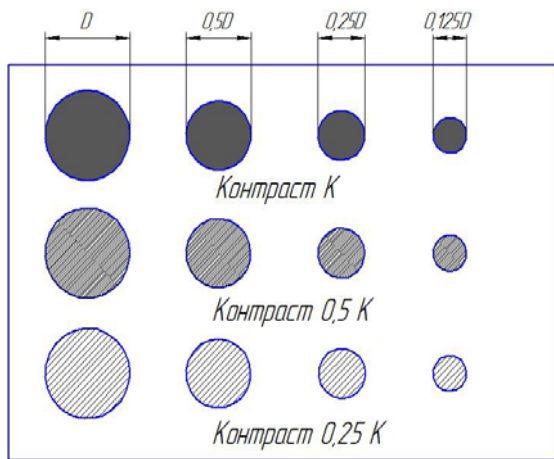


Рис. 3 – Міра для визначення контрасту [4]

Зауважимо, найголовнішими серед цих вимог є забезпечення відповідного діапазону просторових частот, невеликий крок дискретизації та зручність в експлуатації. Від типу мір залежать результати вимірювань. В практиці найчастіше використовують штрихові міри (рис. 4). При експериментальних дослідженнях калібрування інформаційно-вимірювальної системи проводили з застосуванням комплексу штрихових мір ГОСТ 15114-78.

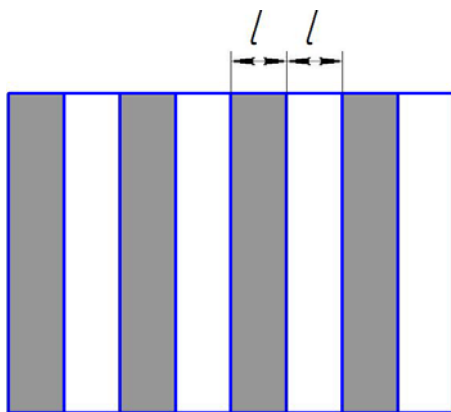


Рис. 4 – Зовнішній вигляд штрихової міри (ГОСТ 15114-78)

Штрихова міра з шириною смуги l розрізняється при заданому значенні контрасту, але це не значить, що за таких умов буде розрізнятися і окремий елемент з характерним розміром l . Тому для дослідження роздільної здатності запропоновано використовувати міру зображену на рис. 2. Вона складається з круглих об'єктів, діаметри яких зменшуються по горизонталі, наприклад, у математичній прогресії із знаменником n , а контраст змінюється за таким же законом по вертикалі. Для кожного значення контрасту буде своя просторово-частотна характеристика, яка і визначатиме роздільну здатність, про що й було сказано раніше. Зокрема, потрібно удосконалювати підходи відповідно до поставлених технічних вимог при кількісному аналізі контрасту зображення об'єкту вимірювання [4, 5].

Освітлення об'єкту інформаційно-вимірювальною системою забезпечує рівномірний і

достатній розподіл світла на поверхні зонду, що розміщується на предметному столику оптичного мікроскопу та надає можливість його переміщення п'єзоелектричним двигуном з кроком 2 мкм в перпендикулярних напрямках щодо оптичної осі мікрооб'єктиву. Мікрооб'єктив формує збільшене зображення на ПЗЗ-матриці відеокамери. Формування вимірювального сигналу відбувається в такій послідовності. Від джерела освітлення (галогенної лампи) з яскравістю $L(\lambda)$ на об'єкт вимірювання надходить енергетичний потік Φ . Після його проходження крізь об'єкт, отримуємо потік $\Phi'(x, y, \lambda)$, що несе інформацію про кожен координату його вимірювальної площини. Інформативний потік Φ' проходить через світлофільтр, на виході з якого отримуємо інформативний потік $\Phi'(x, y, \lambda_1)$, що надходить до об'єктиву ІВС. Одночасно з цим здійснюється формування функції розподілу освітленості матриці $E(\lambda_1)$, яка перетворюється у масив зарядів пікселів $q(\lambda_1)$, формує масив струму $i(\lambda_1)$ в кожному пікселі, утворює матрицю струмів, що надходить до резистору ПЗЗ-матриці і перетворюється у напругу $U(\lambda_1)$. Зазначені перетворення в ПЗЗ-матриці формують аналоговий сигнал, що надходить до плати вводу відеосигналу до персонального комп'ютеру, де він з аналогового перетворюється у цифровий сигнал, пропорційний значенню вхідного вимірювального сигналу [6–8].

Монітор відтворює збільшене зображення мікрооб'єкту на екрані. До характеристик ІВС слід також віднести ефективне лінійне збільшення та роздільну здатність в площині мікрооб'єкту. Збільшення ІВС визначається відношенням розміру зображення предмету на екрані монітора l'_m (мм) до розміру самого предмету l_n (мм).

Для обробки зображень зонду було використано програмне забезпечення "OwlEye", інтерфейс якого складається з 5 вікон. Вікно "ПЕРЕГЛЯД" відображає отримане з телевізійної камери зображення в реальному масштабі. Вікно "ВИМІРЮВАННЯ" відображає попередньо оброблене зображення, а також вимірювальні маркери "точка" та "лінія". Вікно "КЕРУВАННЯ" має елементи керування, які стосуються первинної обробки зображення, параметрів його вводу і передачі для подальшого обчислення, а також координати та режим відображення маркерів. Вікно "РЕЗУЛЬТАТИ" відображає виміряні значення сигналів, а також елементи керування для здійснення геометричних обчислень. Вікно "РОЗПОДІЛ" в графічному вигляді відображає розподіл отриманих або обчислених даних у просторі вздовж маркеру "лінія". Використовується для побудови графіків сигналів геометричних розмірів та відношень [8–10].

Результати та обговорення. Проведено дослідження геометричних параметрів вольфрамових зондів АСМ за допомогою ІВС, що дозволила сформувати зображення випромінювання зондів та з допомогою ПЗ "OwlEye" оцінити геометричні розміри дефектів (рис. 5, а, б).

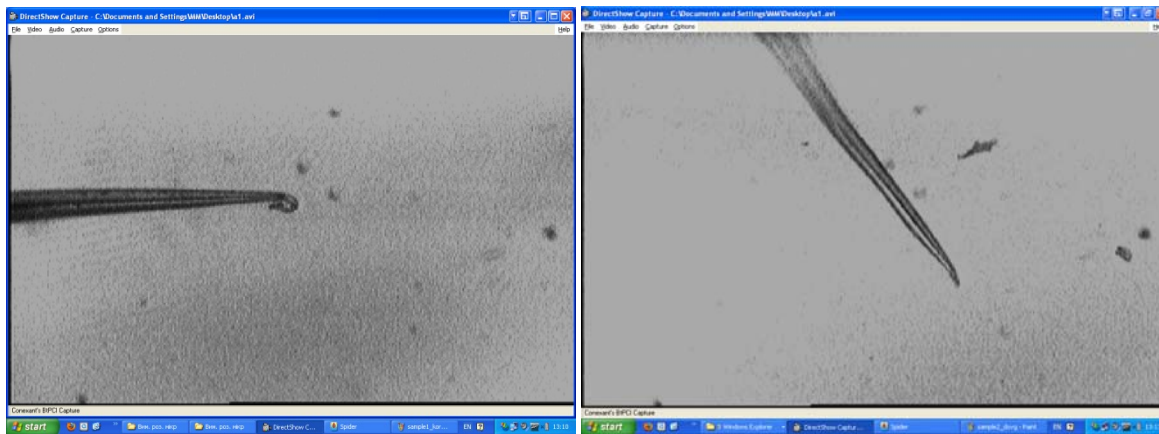


Рис. 5 – Зображення зондів АСМ, які отримані з допомогою ІВС: а – зонд з дефектом; б – зонд без дефекту

Розмір дефекту зонду АСМ становить 3 мкм (рис. 5, а) та не є придатним до застосування в АСМ, а для (рис. 5, б) дефекти знаходяться в допустимих межах 1 мкм, що прописані в технічних вимогах до АСМ 0,5...2 мкм.

Висновки. Основними конструктивними особливостями при побудові інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання геометричних розмірів дефектів зонду АСМ є:

1. Побудова інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометричних розмірів дефектів зонду АСМ, з застосуванням оптичного мікроскопу, передавальної камери типу Novus NVC-130BH та спеціалізованого програмного забезпечення розробленого під конкретну задачу вимірювання.

2. Визначення робочого діапазону сигналів системи за світлосигнальною характеристикою, що встановлюється експериментальним шляхом.

3. Визначення функції передачі модуляції, що пов'язана з якістю визначення границь зонду АСМ.

4. Вимірювання геометричних розмірів дефектів зондів АСМ дало наступні результати по-перше, розмір дефекту зонду АСМ для зразку № 1 становить 3 мкм і він є непридатним для застосування атомно-силовою мікроскопією. По-друге, розмір дефекту зонду АСМ для зразку № 2 становить 1 мкм, що є допустимим за технічними вимогами до АСМ.

Список літератури:

1. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
2. Giessibl, F. J. Advances in Atomic Force Microscopy [Text] / F. J. Giessibl / Reviews of Modern Physics. – 2003. – No. 75 (3). – P. 949–983. doi: [10.1103/revmodphys.75.949](https://doi.org/10.1103/revmodphys.75.949)
3. Eibl, R. H. Atomic Force Microscopy Measurements of Protein-Ligand Interactions on Living Cells [Text] / R. H. Eibl, V. T. Moy / Protein-Ligand Interactions. – 2005. – P. 439–450. doi: [10.1385/1-59259-912-5.439](https://doi.org/10.1385/1-59259-912-5.439)
4. Маркін, М. О. Особливості визначення контрасту при формуванні зображення телевізійною інформаційно-вимірювальною системою [Електронний ресурс] / М. О. Маркін, С. М. Кушчовий // ФИЗИКА/2. Оптика – 2015 – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/22_APSN_2015/Phisica/7_196388.doc.htm
5. Маркін, М. О. Визначення геометричних розмірів мікрооб'єктів за допомогою телевізійних вимірювальних систем [Текст] / М. О. Маркін, О. М. Маркіна, Ю. А. Агінський /

Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія Приладобудування. – 2013. – № 46. – С. 64–70

6. Маркіна, О. М. Вплив поверхні об'єкта на вимірювання геометричних розмірів цифровою оптичною мікроскопією [Текст] / О. М. Маркіна, О. І. Сингаївська, В. П. Маслов, Н. В. Качур // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/5 (72). – С. 59–64. doi: [10.15587/2313-8416.2014.31948](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.31948)
7. Маркіна, О. Н. Исследование особенностей использования галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе [Текст] / О. Н. Маркіна // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 5. – С. 6–8.
8. Маркін, М. О. Оцінка похибки вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем [Текст] / М. О. Маркін, О. М. Маркіна // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2009. – № 38. – С. 102–106.
9. Пат. № 95615, UA. Спосіб визначення геометричних розмірів мікромасштабних прозорих об'єктів. МПК G01N 15/10 [Текст] / Маркіна О. М., Качур Н. В., Маслов В. П.; заявники Маркіна О. М., Качур Н. В., Маслов В. П. – № u 2014 08497, заявл. 25.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. – 4 с.
10. Порєв, В. А. Імовірнісний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю [Текст] / В. А. Порєв, Г. В. Порєв, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 8. – С. 40–43.

Bibliography (transliterated):

1. Mironov, V. L. (2004). Osnovy skanirujushhej zondovoj mikroskopii. Nizhnij Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 110.
2. Giessibl, F. J. (2003). Advances in atomic force microscopy. Reviews of Modern Physics, 75 (3), 949–983. doi: [10.1103/revmodphys.75.949](https://doi.org/10.1103/revmodphys.75.949)
3. Eibl, R. H., Moy, V. T. (2005). Atomic Force Microscopy Measurements of Protein-Ligand Interactions on Living Cells. Protein-Ligand Interactions, 439–450. doi: [10.1385/1-59259-912-5.439](https://doi.org/10.1385/1-59259-912-5.439)
4. Markin, M. O., Kushchoviy, S. M. (2015). Osoblyvosti vyznachennia kontrastu pry formuvanni zobrazhennia televiziinoiu informatsiino-vymiruvalnoiu systemoiu. FYZYKA/2. Optyka, Available at: http://www.rusnauka.com/22_APSN_2015/Phisica/7_196388.doc.htm
5. Markin, M. O., Markina, O. M., Ahinskyi, Iu. A. (2013). Vyznachennia heometrychnykh rozmiriv mikroob'iektiv za dopomohoiu televiziinykh vymiruvalnykh system. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya Pryladobuduvannia, 46, 64–70.
6. Markina, O. M., Synhaivska, O. I., Maslov, V. P., Kachur, N. V. (2014). Vplyv poverkhni ob'iektu na vymiruvannia heometrychnykh rozmiriv tsyfrovoi optychnoi mikroskopieiu. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (72)), 59–64. doi: [10.15587/2313-8416.2014.31948](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.31948)
7. Markina, O. N. (2015). Issledovanie osobennostey ispol'zovaniya galogennykh lamp JC v televizionnoy izmeritel'noy sisteme. Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii, 5, 6–8.

8. Markin, M. O., Markina, O. M. (2009). Otsinka pokhybky vymiruvannya heometrychnykh parametrov za dopomohoiu televiziynykh informatsiino-vymiruvalnykh system. Visnyk NTUU "KPI". Seriya pryladobuduvannya, 38, 102–106.
9. Markina, O. M., Kachur, N. V., Maslov, V. P. (2014). Pat. No. 95615, UA. Sposib vyznachennia heometrychnykh rozmiriv mikromasshtabnykh prozorykh ob'ektiv. MPK G01N 15/10. № u 2014 08497; declared: 25.07.2014; published: 25.12.2014, Bul. No. 24, 4.
10. Poriev, V. A., Poriev, H. V., Kisil, R. I. (2002). Imovimosnyi pidkhd do vyznachennia rozdilnoi zdatnosti televiziynykh zasobiv kontroliu. Metody ta prylady kontroliu yakosti, 8, 40–43.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контроль геометричних розмірів зондів для атомно-силової мікроскопії інформаційно-вимірювальною системою/ М. О. Маркін, О. М. Маркіна, С. М. Кущовий, К. О. Бутенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С90–94.. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Контроль геометрических размеров зондов для атомно-силовой микроскопии информационно-измерительной системой/ М. А. Маркин, О. Н. Маркина, С. М. Кущовый, Е. А. Бутенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.90–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Control of geometric sizes atomic force microscopy probe for information-measuring system/ М. О. Markin, O.M. Markina, S. M. Kushchovyi, K. O. Butenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.90–94. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маркін Максим Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; доцент кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Маркіна Ольга Миколаївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; асистент кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Кущовий Сергій Миколайович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; аспірант кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Бутенко Катерина Олександрівна – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; аспірант кафедри біоінформатики; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.

Маркин Максим Александрович – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; доцент кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Маркина Ольга Николаевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; ассистент кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Кущовый Сергей Николаевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; аспирант кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Бутенко Екатерина Александровна – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; аспирант кафедры биоинформатики; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.

Markin Maksym – PhD, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; associate professor of scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Markina Olha – PhD, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; Assistant Department of Scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Kushchovyi Serhii – graduate student, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; graduate student of scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Butenko Kateryna – graduate student, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; graduate student of Department of Bioinformatics; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.