

**Димко Єгор Павлович** – Заступник начальника експлуатаційно-технічного відділу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Юрченко Владислав Віталєвич** – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Шамрай Андрій Вікторович** – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

**Кіяшко Сергій Юрійович** – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

**Дьоміна Аліна Вікторівна** – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

**Макаренко Дмитро Миколайович** – старший викладач, Кафедра хімії, екології та експертних технологій, Національний Аерокосмічний Університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070; e-mail: d.makarenko@khai.edu

**Думко Ієгор** – Deputy Head of Technical Department, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

**Yurchenko Vladyslav** – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

**Shamrai Andrii** – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

**Kiiashko Serhii** – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

**Domina Alina** – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

**Makarenko Dmytro** – Senior lecturer, Department of Chemistry, ecology and expertise technologies, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070.

УДК 620.179.148

**В. Г. БАЖЕНОВ, І. І. ІВІЦЬКИЙ, Д. К. ІВІЦЬКА**

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ У ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛАХ

Досліджено застосування електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах. Створена лабораторна установка, яка складається з джерела живлення Б5-7, осцилографа С1-64, генератора Г3-118 та фазометра Ф2-34. В якості дослідного матеріалу застосовувався зразок з поліметилметакрилату з габаритами 40x38x400 мм. Було побудовано амплітудно-частотну характеристику сенсора та зроблено висновок що отримані сенсори перевершують заявлені параметри. Можна стверджувати що верхня полоса частоти пропускання сигналу лежить в межах 20кГц.

**Ключові слова:** електростатичний метод, ємнісний метод, неруйнівний контроль, контроль дефектів, полімерні матеріали.

Исследовано применение электростатического метода неразрушающего контроля для определения наличия дефектов в полимерных композиционных материалах. Создана лабораторная установка, состоящая из источника питания Б5-7, осциллографа С1-64, генератора Г3-118 и фазометра Ф2-34. В качестве исследовательского материала применялся образец из полиметилметакрилата с габаритами 40x38x400 мм. Была построена амплитудно-частотная характеристика сенсора и сделан вывод, что полученные сенсоры превосходят заявленные параметры. Можно утверждать, что верхняя полоса частоты пропускания сигнала лежит в пределах 20 кГц.

**Ключевые слова:** электростатический метод, емкостный метод, неразрушающий контроль, контроль дефектов, полимерные материалы.

Electrostatic method of nondestructive testing to determine the presence of defects in polymer composite materials is investigated. A laboratory installation consisting of a power supply B5-7, an oscilloscope C1-64, a generator G3-118 and a phase meter F2-34. As a research material was used a sample of polymethylmethacrylate with dimensions of 40x38x400 mm. During the research, the installation proved to be workable. The amplitude of the signal was proportional to the change in potentials. A phase change indicated a change in the direction of the gradient of the electric field. This result can be repeated, the signal is predictable. The amplitude-frequency characteristic of the sensor was constructed and it was concluded that the received sensors exceeded the declared parameters. It can be argued that the upper frequency band of the signal is within 20 kHz.

**Keywords:** electrostatic method, capacitive method, non-destructive testing, control of defects, polymer materials.

**Вступ.** Останнім часом у промисловості значно підвищився інтерес до створення методів контролю структури об'єкту без використання щільного контакту з ним. При неперервному технологічному процесі виготовленні полімерних композиційних матеріалів методом екструзії існує необхідність постійного контролю наявності дефектів. Проте, контакт сенсора з полімерним матеріалом небажаний, у зв'язку з

вірогідністю деформації ще не до кінця охолодженого виробу [1].

Електростатичний метод неруйнівного контролю дозволяє визначати наявність дефектів у широкому спектрі матеріалів, без застосування контакту сенсора та об'єкту контролю [2].

© В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька. 2017

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Традиційно, взаємодія твердотільних пристроїв з електромагнітним полем здійснювалося, головним чином, шляхом виявлення збурень у магнітному полі [3-8]. Сенсори Холла, наприклад, забезпечують надійну роботу в багатьох аналогових і цифрових застосуваннях [9].

Електрометри вимірюють електричний заряд або різницю потенціалів і, по суті, є вольтметрами з таким високим вхідним імпедансом, що їх вхідний струм можна вважати рівним нулю. До недавнього часу електрометри користувалися репутацією неточних приладів, в яких часто використовувалися компоненти, чутливі до механічних ударів. Останні технології були втілені у сенсорі Electric Potential Integrated Circuit (EPIC), на базі якого побудовано дослідну установку.

Сенсор EPIC є дуже надійним твердотільним електрометром з високим вхідним імпедансом, завдяки чому цей прилад можна вважати ідеальним вольтметром. Він являє собою мікросхему з сенсором для вимірювання електричного потенціалу. EPIC - безконтактний електрометр, електрод якого захищений шаром діелектрика для ізоляції від вимірюваного об'єкта. Смуга пропускання сенсора за рівнем -3 дБ лежить в діапазоні від декількох десятих Гц до 20 кГц. Ця характеристика підлаштовується під потреби конкретного застосування. У несиметричному режимі цей пристрій застосовується для визначення електричного потенціалу, а в диференціальному режимі сенсор вимірює локальне електричне поле або використовується для відображення просторового розподілу потенціалу.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою дослідження є застосування електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах. Відповідно до мети поставлені такі задачі:

- створення макету експериментальної установки;
- розробка методики проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів;
- проведення експериментальних досліджень та отримання вихідних даних;
- обробка результатів та їх верифікація.

**Матеріали та методи експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів.** Для експериментальних досліджень застосовувалася лабораторна база кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Джерело живлення Б5-7, зображене на рис. 1, призначене для живлення низьковольтної радіоапаратури в процесі її налаштування або виробництва. Вихідна напруга приладу ступінчасто і плавно регулюється від 0 до 30 В при струмі навантаження до 3 А.

Для контролю наявності сигналу використовувався осцилограф С1-64 (рис. 2). Високоімпедансний вхід якого дає можливість контролювати сигнал в будь-якій точці схеми. Діапазон вимірюваних напруг від 28 мВ до 30 В. Смуга пропускання сигналу від 0 до 50 МГц.



Рис. 1 – Джерело живлення Б5-7



Рис. 2 – Осцилограф С1-64

Джерелом синусоїдального сигналу слугував генератор Г3-118 (рис. 3), що являє собою RC-генератор з частотним діапазоном від 10 Гц до 100 кГц, з дискретною установкою частоти і системою стабілізації рівня вихідної напруги.

Для прецензійних вимірювань фазових зсувів та їх приростів між двома синхронними гармонійними сигналами в широкому діапазоні частот застосовувався фазометр Ф2-34 (рис. 4).



Рис. 3 – Генератор Г3-118



Рис. 4 – Фазометр Ф2-34

В якості дослідного матеріалу застосовувався зразок з поліметилметакрилату (ПММА, плексиглас) з габаритами 40x38x400 мм (рис. 5).

Дослідження проводились наступним чином: на лабораторний стіл кладеться мідна пластина, яка виступає екраном. На мідну пластину накладається діелектрик, щоб унеможливити неконтрольоване замикання джерела сигналу на землю. Випромінювач електричних сигналів, металева пластина, кладеться на діелектричну підкладку, яка відділяє його від контакту із землею, земля від генератора сигналу підключена до одної пластини, а сигнальний провід до другої мідної пластини.



Рис. 5 – Дослідний зразок з ПММА

На рис. 6 представлена базова структурна схема сенсора ЕРІС [9]. Розмір його електрода вибирається довільно і залежить від вхідної ємності, яка визначається конкретним застосуванням. Для пристроїв, що знаходяться в декількох метрах від вимірюваного об'єкта, ємнісний зв'язок визначається тільки власною ємністю електрода, а їх характеристика в значній мірі залежить від вхідного імпедансу при взаємодії об'єкта з полем. При цьому слід врахувати, що в активному режимі сенсор ЕРІС забирає у поля дуже малу кількість енергії.

Вхідний опір пристрою підвищується з допомогою зворотного зв'язку, а зниження вхідної ємності досягається за рахунок методів захисту. Вхідну ємність можна знизити до 10-17 Ф, а вхідний опір збільшити до 1015 Ом, звівши взаємодію з вимірюваним полем до абсолютного мінімуму, коли залишаються тільки малі струми зміщення. Вхідний каскад підсилювача зображено на рис. 7.

Схема підключення сенсора зображена на рис. 8, а вигляд плати з сенсорами на рис. 9.

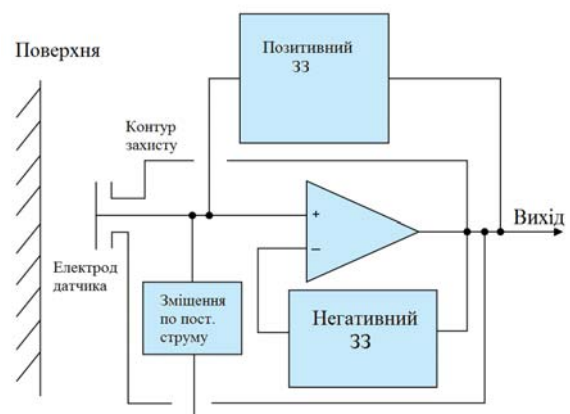


Рис. 6 – Базова структурна схема сенсора ЕРІС

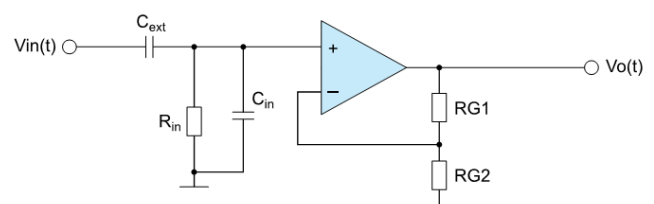


Рис. 7 – Вхідний каскад підсилювача сенсора ЕРІС

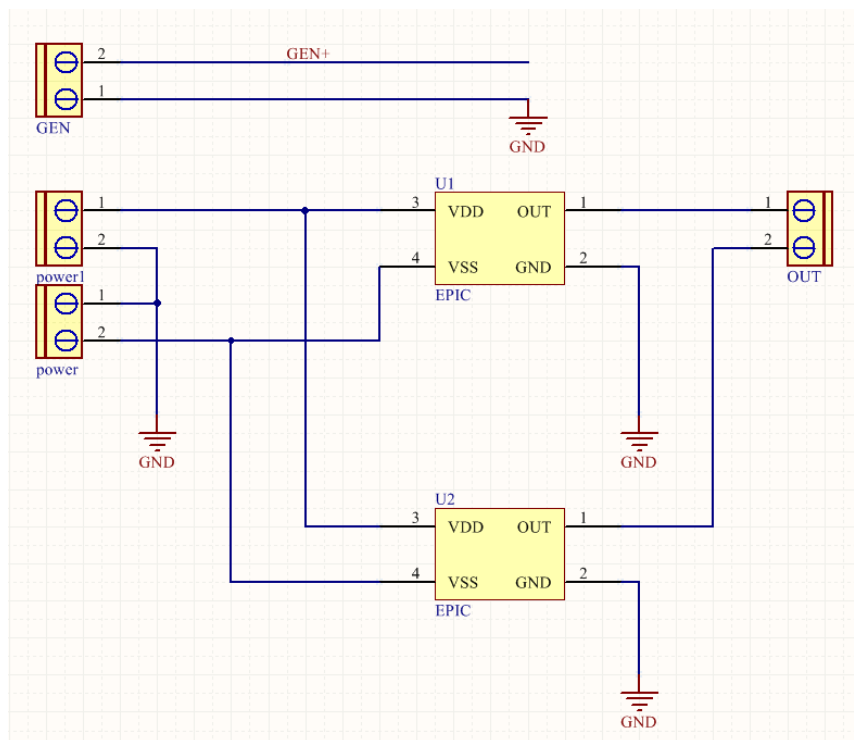


Рис. 8 – Електрична схема плати

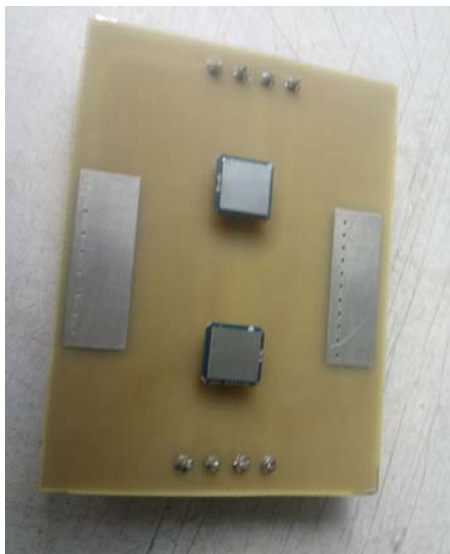


Рис. 9 – Вигляд плати с сенсорами

**Результати дослідження експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів.** При проведенні дослідження із сенсорами EPIC в лабораторних умовах необхідне пам'ятати наступне:

Кожний прилад який підключається до мережі змінного струму є джерелом наводки.

Людське тіло чудовий провідник будь-яких електричних сигналів. Тіло людини має порівняно малий опір і слугує джерелом сигналу.

Для усунення наводок мережі (або інших сторонніх сигналів) всі прилади/пристрої які стоять поруч або увімкнені повинні мати спільне з'єднання (заземлені).

Столи на яких виконуються дослідницькі роботи повинні бути підключенні до спільної системи приладів (заземлені).

При досліджах необхідно правильно прикладати/формулювати поле щоб результати вимірювання відображали реальний стан об'єкту контролю.

Від точності позиціонування сенсорів залежить отриманий результат.

Для первинної верифікації роботи приладу було проведено тестування запропонованого авторами способу подавлення завад з використанням двох сенсорів. Результати зображено на рис. 10.

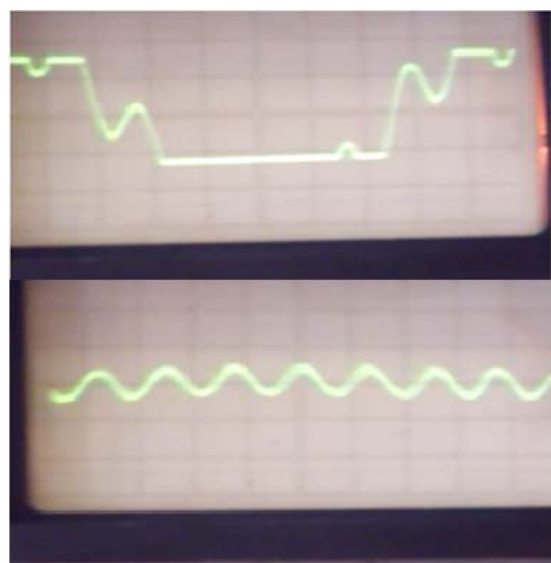


Рис. 10 – Осцилограма сигналу з одним та двома сенсорами

При проведенні досліджень макет виявився працездатним. Амплітуда сигналу була пропорційна зміні потенціалів. А зміна фази вказувала на зміну напрямку градієнту електричного поля. Даний результат можна повторити, сигнал є прогнозованим.

**Обговорення результатів дослідження експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів.** Було побудовано амплітудно-частотну характеристику сенсора, рис. 11, та зроблено висновок що отримані сенсори перевершують заявлені параметри. Можна стверджувати що верхня полоса частоти пропускання сигналу лежить в межах 20кГц.

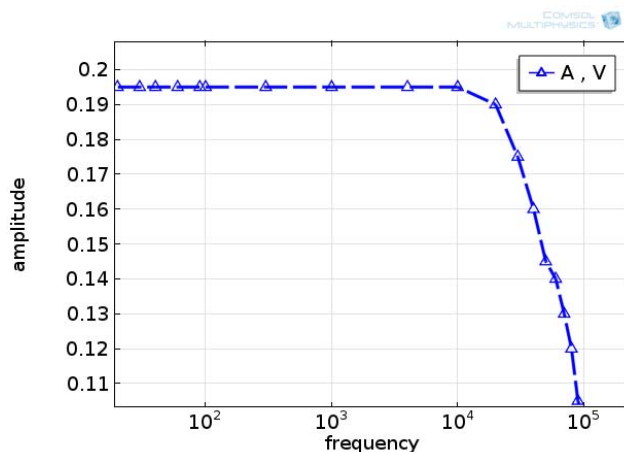


Рис. 11 – Амплітудно-частотна характеристика сенсора

Таким чином установка може застосовуватися для контролю дефектів у діелектричних зразках з достатнім ступенем достовірності, зокрема при виготовленні полімерних композиційних матеріалів з детермінованими властивостями [10–11].

**Висновки.** В результаті дослідження створено експериментальну установку для реалізації електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах, розроблено методику проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів, проведено експериментальні дослідження та здійснено обробку результатів та їх верифікацію. Перевірено на практиці запропонований авторами спосіб подавлення зовнішніх завад (з частотою 50 Гц), який підтвердив свою ефективність, і дав можливість проведення реальних високочастотних вимірювань в звичайній неекранованій лабораторії.

#### Список літератури

1. *Ivitskiy, I. I.* Polymer wall slip modelling [Text] / *I. I. Ivitskiy* // Technology Audit and Production Reserves. – 2014. – № 5/3 (19). – P. 8–11. doi: [10.15587/2312-8372.2014.27927](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27927)
2. *Sun, H.* Electromagnetic methods for measuring material properties of cylindrical rods and array probes for rapid flaw inspection [Text] / *H. Sun*. – Iowa State University, 2005. – 138 p. doi: [10.2172/850045](https://doi.org/10.2172/850045)
3. *Baxter, L. K.* Capacitive Sensors: Design and Applications [Text] / *L. K. Baxter*. – Wiley-IEEE Press, 1997. – 302 p. doi: [10.1109/9780470544228](https://doi.org/10.1109/9780470544228)
4. *Клюев, В. В.* Неразрушающий контроль и диагностика:

- Справочник / *В. В. Клюев, Ф. П. Соснин*. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
5. *Watson, P.* Imaging electrostatic fingerprints with implications for a forensic timeline [Text] / *P. Watson, R. J. Prance, S. T. Beardsmore-Rust, H. Prance* // Forensic Science International. – 2011. – Vol. 209, № 1-3. – P. e41–e45. doi: [10.1016/j.forsciint.2011.02.024](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.024)
6. *Ditchburn, R. J.* Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection [Text] / *R. J. Ditchburn, S. K. Burke* // NDT & E International. – 2005. – Vol. 38, № 8. – P. 690–700. doi: [10.1016/j.ndteint.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001)
7. *Fava, J. O.* Multilayer planar rectangular coils for eddy current testing: Design considerations [Text] / *J. O. Fava, L. Lanzani, M. C. Ruch* // NDT & E International. – 2009. – Vol. 42, № 8. – P. 713–720. doi: [10.1016/j.ndteint.2009.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.06.005)
8. *Aydin, A.* A high sensitivity calibrated electric field meter based on the electric potential sensor [Text] / *A. Aydin, P. B. Stiffell, R. J. Prance, H. Prance* // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21, № 12. – P. 125901. doi: [10.1088/0957-0233/21/12/125901](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125901)
9. *Connor, S.* EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing [Electronic resource] / *S. Connor*. – Available at: <http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing-8961>
10. *Ivitskiy, I.* Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material [Text] / *I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1/5 (85). – P. 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91659](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91659)
11. *Ivitskiy, I. I.* Simulation of intelligent sensors dipping into the melting polymer composite [Text] / *I. I. Ivitskiy, O. L. Sokolskiy, V. M. Kurylenko* // Technology audit and production reserves. – 2016. – № 5/3 (31). – C. 22–26. doi: [10.15587/2312-8372.2016.81236](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81236)

#### Bibliography (transliterated):

1. *Ivitskiy, I. I.* (2014). Polymer wall slip modelling. Technology Audit and Production Reserves, 5 (3 (19)), 8–11. doi: [10.15587/2312-8372.2014.27927](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27927)
2. *Sun, H.* (2005). Electromagnetic methods for measuring materials properties of cylindrical rods and array probes for rapid flaw inspection. Iowa State University, 128. doi: [10.2172/850045](https://doi.org/10.2172/850045)
3. *Baxter, L. K.* (1997). Capacitive Sensors: Design and Applications. Wiley-IEEE Press, 302. doi: [10.1109/9780470544228](https://doi.org/10.1109/9780470544228)
4. *Klyuyev, V. V., Sosnin, F. R.* (2003). Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik, Moscow: Mashinostroyeniye, 656.
5. *Watson, P., Prance, R. J., Beardsmore-Rust, S. T., Prance, H.* (2011). Imaging electrostatic fingerprints with implications for a forensic timeline. Forensic Science International, 209 (1-3), e41–e45. doi: [10.1016/j.forsciint.2011.02.024](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.024)
6. *Ditchburn, R. J., Burke, S. K.* (2005). Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection. NDT & E International, 38 (8), 690–700. doi: [10.1016/j.ndteint.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001)
7. *Fava, J. O., Lanzani, L., Ruch, M. C.* (2009). Multilayer planar rectangular coils for eddy current testing: Design considerations. NDT & E International, 42 (8), 713–720. doi: [10.1016/j.ndteint.2009.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.06.005)
8. *Aydin, A., Stiffell, P. B., Prance, R. J., Prance, H.* (2010). A high sensitivity calibrated electric field meter based on the electric potential sensor. Measurement Science and Technology, 21 (12), 125901. doi: [10.1088/0957-0233/21/12/125901](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125901)
9. *Connor, S.* EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing. Available at: <http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing-8961>
10. *Ivitskiy, I., Sivetskiy, V., Bazhenov, V., Ivitska, D.* (2017). Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5 (85)), 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91659](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91659)
11. *Ivitskiy, I. I., Sokolskiy, O. L., Kurylenko V. M.* (2016). Simulation of intelligent sensors dipping into the melting polymer composite. Technology Audit and Production Reserves, 5 (3 (31)), 22–26. doi: [10.15587/2312-8372.2016.81236](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81236)

Надійшла (received) 27.04.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах/ В. Г. Баженов, І. І. Івицький, Д. К. Івицька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 34–39.– Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Экспериментальное исследование электростатического метода неразрушающего контроля дефектов в полимерных материалах/ В. Г. Баженов, И. И. Ивицкий, Д. К. Ивицкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 34–39.– Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Experimental study of electrostatic method of nondestructive testing of defects in polymeric materials/ V. Bazhenov, I. Ivitskiy, D. Ivitska //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 34–39. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Баженов Віктор Григорович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент приладів і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

**Івицький Ігор Ігорович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

**Івицька Дар'я Костянтинівна** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри приладів і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: d.k.ivitskaya@gmail.com.

**Баженов Віктор Григорьевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

**Ивицкий Игорь Игоревич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», старший преподаватель кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

**Ивицкая Дарья Константиновна** – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: d.k.ivitskaya@gmail.com.

**Bazhenov Victor** – PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", assistant professor in devices and systems for non-destructive testing department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

**Ivitskiy Igor** – PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", senior lecturer in chemical, polymer and silicate engineering department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

**Ivitska Darya** – postgraduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", post-graduate student in devices and systems for non-destructive testing department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: [d.k.ivitskaya@gmail.com](mailto:d.k.ivitskaya@gmail.com).