

Порев В. А.,  
Божко К. М.,  
Сидоренко С. Ю.

## ЗБУДЖЕННЯ КОРОННОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

*Досліджено умови та параметри збудження негативного імпульсного коронного розряду у повітрі. Запропоновано конструкцію газорозрядного пристрою із діелектричною пластиною та прозорим тонкоплівковим електродом для візуалізації дефектів в коронному розряді. Отримано стійке збудження коронного розряду при амплітуді імпульсів 1–1,5 кВ. Наведено результати контролю дефектів пластини кристалічного кремнію, призначеної для виготовлення фотоелектричного сонячного елемента, телевізійною інформаційно-вимірною системою.*

**Ключові слова:** імпульсний коронний розряд, газорозрядна візуалізація, телевізійна інформаційно-вимірною системою.

### 1. Вступ

Традиційно для збудження коронного розряду використовують схему Тричела, в якій подають однополярну високовольтну напругу на один із електродів розрядного пристрою. Другий електрод є низьковольтним, на нього подають нульовий потенціал. При імпульсному збудженні корони коло розряду замикають через високовольтний електронний ключ [1].

Схему Тричела використовують до нашого часу при вимірюванні електричних і часових параметрів коронного розряду. В результаті отримують імпульси розрядного струму. Струм вимірюють через додавання до кола розряду послідовного резистору, з якого знімають вимірювальний сигнал. Одночасно вимірюють напругу в паралельному до розрядного проміжку колі на резисторах із великим опором (більше 10 МОм). Через конденсатор зв'язку вимірювальний сигнал струму подають до входу осцилографу.

Розрядний проміжок утворюють два електроди, один з яких є загостреним, інший — плоским (система вістря — площина). Така конструкція дозволила дослідити властивості коронного розряду, виміряти його параметри, побудувати математичну модель розрядного струму та отримати для неї аналітичне розв'язання [2].

Відома також система на плоско-паралельних електродах [3]. Газ, який знаходиться у розрядному проміжку, може бути відділеним від електродів діелектричним шаром (система неконтактних електродів).

Важливим результатом досліджень коронного розряду є розробка методів і засобів контролю дефектів об'єктів, які розміщують в розрядному проміжку. При цьому неоднорідності поверхні об'єкту в дефектних місцях є причиною виникнення великої напруженості електричного поля, що і призводить до збудження корони. Таким чином, створюються умови для газорозрядної візуалізації дефектів і їх наступного контролю телевізійною інформаційно-вимірною системою [4, 5].

Цим і обґрунтовується актуальність даного напрямку, тому предметом авторської статті є дослідження процесу збудження коронного розряду в повітрі. В даній роботі автори обмежуються розглядом способу імпульсного

збудження коронного розряду в системі плоско-паралельних електродів, один з яких є неконтактним. Автори сподіваються, що їх скромний внесок буде корисним для розробки пристроїв збудження корони та вдосконалення на їх основі телевізійних методів і засобів контролю.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз фізичних процесів при збудженні коронного розряду в системі електродів вістря-площина можна знайти в [3]. Там же наведено способи збудження імпульсної корони та вимірювання струму, напруги та часових параметрів розряду. Корона може розвинути у іскровий розряд та пробій.

Експериментальні дослідження коронного розряду останнім часом зосереджені на залученні нових методів і засобів та створення на їх основі лабораторних комплексів. Так, цифровий осцилограф і цифровий фотоапарат стали основою для стенду [6] з дослідження динаміки розвитку негативної корони в системі електродів голка-сфера. Разом з ними був також задіяний фотоелектронний підсилювач для вимірювання часових параметрів випромінювання корони. Об'єктом дослідження були імпульси Тричела, які виникають при збудженні негативної корони у вигляді періодичних сплесків розрядного струму. При збільшенні напруги імпульси зникають і через розрядний проміжок починає текти постійний струм [3].

З'ясовано, що імпульси Тричела мають тривалість 250 нс, а їх період зменшується від 16 мкс для струму 5 мкА до 1,6 мкс для струму 31 мкА. Напругу подавали від стабілізованого джерела 30 кВ, а фото отримували в площині руху лавин з витримкою 15–120 с на розрядному проміжку 10 мм. Досліджено також тонку структуру випромінювання корони. При цьому виявлені два світлових сполохи, які рознесені у часі один від одного на 150 нс. Автори пояснюють це існуванням в розрядному проміжку двох осередків — один біля катоду, інший біля аноду. Часова затримка між двома світловими сполохами зростає із збільшенням міжелектродної відстані та зменшується із зростанням прикладеної напруги [6].

Дослідженню імпульсів Тричела присвячено роботи [7–9], а особливостям збудження негативної імпульсної корони в повітрі — [10, 11]. Негативний імпульсний коронний розряд в системі електродів голка-площина із діелектричною пластинкою досліджено в [12, 13].

Конструкції розрядних пристроїв можна поділити на три великі групи — із системою циліндричних електродів, системою типу голка-площина та системою з двома плоско-паралельними електродами [3]. Для задач візуалізації дефектів придатною є остання з названих систем. Система із плоско-паралельних електродів може мати додаткову прозору діелектричну пластину, яка ізолює високовольтний електрод від повітря. При розряді в такому пристрої може утворюватись поверхневий струм, які обтікає діелектрик і замикає електричне коло [3]. Іноді для візуалізації дефектів в коронному розряді застосовують конструкцію із рідким електродом [14].

На основі цього короткого огляду можливе окреслення проблеми: створити придатну для застосування в телевізійному контролі дефектів конструкцію розрядного пристрою із контрольованими параметрами імпульсного коронного розряду.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — процес збудження коронного розряду для візуалізації та телевізійного контролю дефектів.

*Мета дослідження* — вдосконалення конструкції газорозрядного пристрою та пошук оптимального режиму збудження коронного розряду.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *задачі*:

1. На основі системи плоско-паралельних електродів із діелектричним бар'єром створити розрядно-оптичний пристрій, який надасть можливість спостерігати збуджений на поверхні об'єкту контролю коронний розряд у фронтальній площині.

2. Знайти режими збудження імпульсної корони із пониженою напругою.

3. Розробити лабораторний стенд телевізійного контролю дефектів на основі імпульсного коронного розряду.

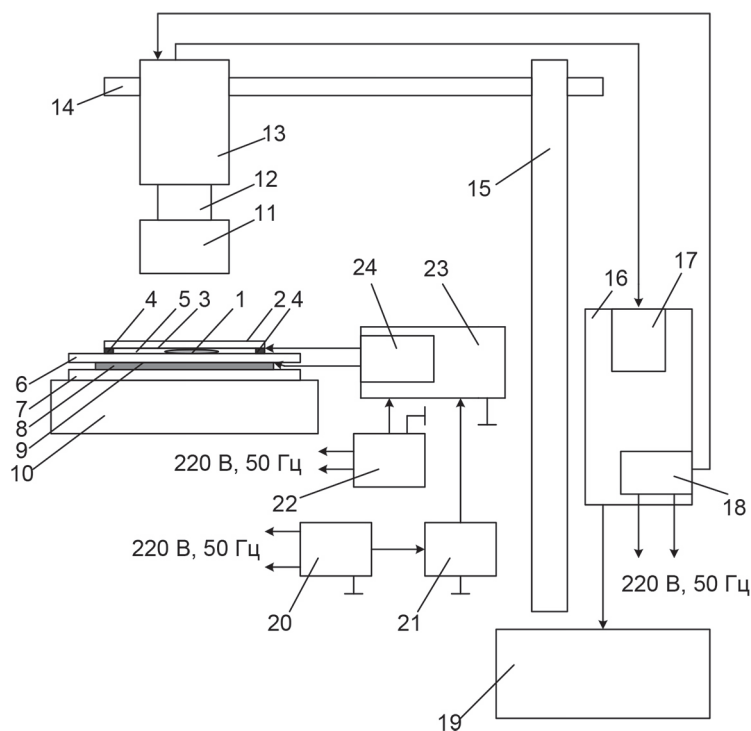
4. Експериментально перевірити конструктивні і схемні рішення.

### 4. Стенд телевізійного контролю на основі розрядно-оптичного пристрою імпульсної негативної корони

Для телевізійного контролю дефектів із їх візуалізацією в імпульсному коронному розряді розроблено лабораторний стенд (рис. 1).

В конструкції стенду використано скляну касету із прозорою верхньою поверхнею. На нижню сторону покривельного скла нанесено прозорий електрод (ІТО). Нижня поверхня касети є непрозорою, оскільки проходженню

світла заважає другий електрод, утворений пластинкою фольгованого текстоліту марки СТ-1-50. Електроди розділені додатковою скляною пластинкою, яка виконує роль електричного ізолятора. Ще одна скляна пластина ізолює другий електрод від предметного столика, на якому розташована касета. Касету можна приводити в рух за допомогою ручних приводів предметного столика.



**Рис. 1.** Структурна схема телевізійного стенду для дослідження коронного розряду:

1 — об'єкт дослідження; 2 — покривельне скло; 3 — прозорий електрод (ІТО); 4 — суцільні бокові доріжки припою; 5 — повітряний зазор; 6 — скло для електричної ізоляції об'єкту дослідження; 7 — скло для ізоляції нижнього електроду; 8 — склотекстоліт; 9 — нижній непрозорий мідний електрод; 10 — предметний столик; 11 — об'єктив; 12 — оптичні кільця; 13 — телевізійна камера; 14 — рухома балка для кріплення телевізійної камери; 15 — стійка; 16 — персональний комп'ютер; 17 — відеоадаптер із телевізійним входом; 18 — блок живлення АТХ; 19 — монітор; 20, 22 — лабораторне джерело живлення; 21 — генератор імпульсів управління; 23 — формувач імпульсів високої напруги; 24 — вихідний трансформатор

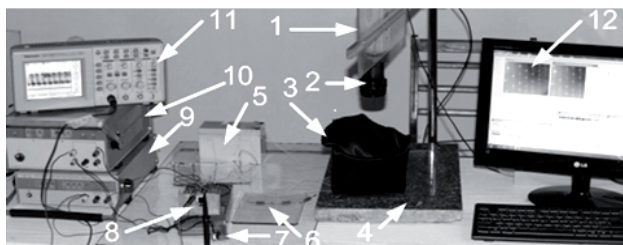
При подачі на електроди касети високочастотних імпульсів високої напруги виникає коронний розряд, структура якого відображає топологічні особливості об'єкту дослідження. Густина та яскравість розрядних ниток завжди збільшена в місцях дефектів та загострень поверхні об'єкту. Оптико-електронна система у складі об'єктиву типу Helios, оптичних кілець та телевізійної камери типу Novus NVC-130BH формуює зображення коронного розряду та перетворює його у телевізійний композитний сигнал (аналогового типу).

Телевізійний сигнал за допомогою радіочастотного коаксіального кабелю типу РК-70 надходить до телевізійного входу адаптера типу Aver TV, який встановлено у слот материнської плати персонального комп'ютера. Телевізійна камера отримує живлення від блоку живлення АТХ персонального комп'ютера. Монітор забезпечує виведення на екран зображення та результати вимірювання в числовій та графічній формі.

Спеціальне програмне забезпечення OWLEYE дозволяє виконувати циклічні вимірювання яскравості об'єкту по окремих пікселях, а також по перерізах площини

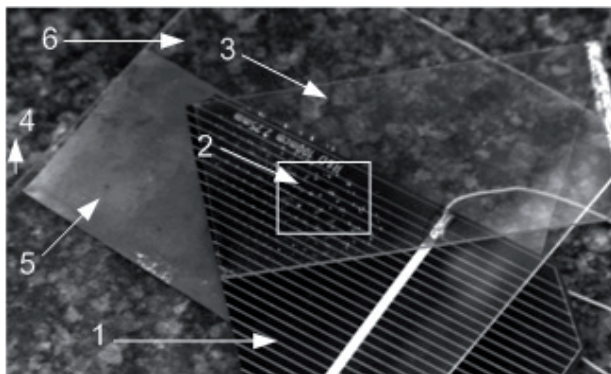
зображення та вимірювати геометричні розміри. Вимірювання яскравості відбуваються у відносних одиницях. До складу телевізійного стенду додано цифровий осцилограф для вимірювання амплітудних і часових параметрів сигналів пристрою збудження імпульсного коронного розряду. Таким чином, утворено телевізійну інформаційно-вимірну систему (ТІВС).

Процес контролю в ТІВС дефектів монокристалічної кремнієвої пластини для фотоелектричної сонячної батареї наведено на рис. 2. Предметний столик тут не використовувався, а об'єкт контролю був розташований на гранітній плиті. Касета розрядного пристрою була замінена на сукупність пластин для експериментів із склом різної товщини.



**Рис. 2.** Телевізійна інформаційно-вимірвальна система контролю дефектів: 1 — телевізійна камера NOVUS; 2 — об'єктв HELIOS; 3 — екран у вигляді ширми; 4 — гранітна плита; 5 — акумулятор 12 В — джерело темного струму для кремнієвої пластини; 6 — вимірвальні резистори; 7 — генератор імпульсів; 8 — силовий ключ IGBT; 9 — блок живлення генератора імпульсів; 10 — блок живлення транзисторного ключа; 11 — осцилограф Tektronix 1002 із відображенням вихідного сигналу генератора імпульсів; 12 — телевізійне зображення поверхні кремнієвої пластини із збудженням коронним розрядом над місцями розташування дефектів

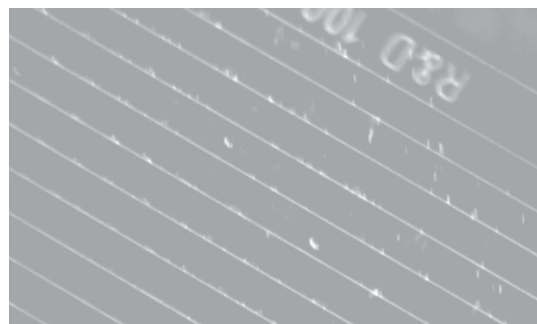
Розрядно-оптичний пристрій для візуалізації дефектів кремнієвих пластин, з якої виготовляють сонячний елемент наведено на рис. 3. Об'єкт контролю, кремнієва плита 1, розташована в розрядному просторі. Осередок контролю 2 має прямокутну форму. Коронний розряд збуджується у проміжку між прозорим позитивним електродом 3 (тонка плівка окису індію на склі) та негативним електродом 5 (мідна фольга). В проміжок між електродами введено додатковий прозорий ізолятор 6 (скло товщиною 1,3 мм). Гранітна основа 4 забезпечує вібраційну стійкість конструкції.



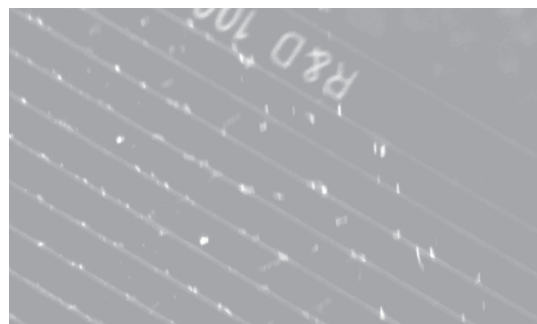
**Рис. 3.** Контроль дефектів пластини із монокристалічного кремнію в коронному розряді

Більш детальні зображення осередку контролю пластини наведені на рис. 4. Для стимуляції прихованих

дефектів через пластину пропускали темновий зворотний струм від гальванічної батареї 12 В.



а

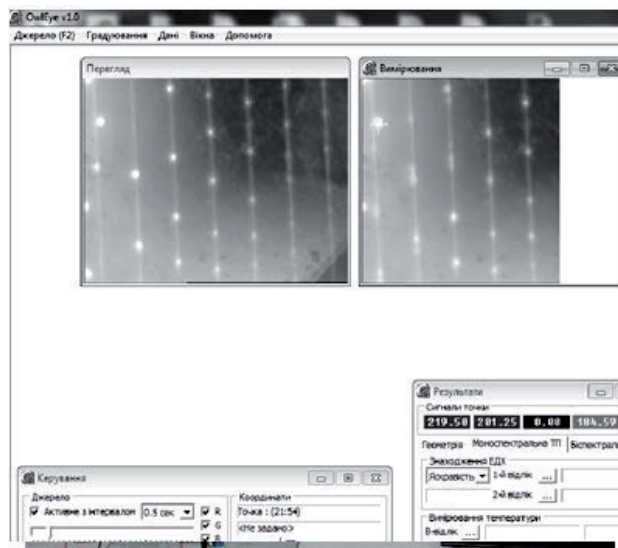


б

**Рис. 4.** Частина осередку контролю (із збільшенням 2): дефекти мають вигляд крапок і плям, що світяться; а — плита без підключення до зовнішнього джерела; б — через пластину тече темновий зворотний струм 0,3 А від зовнішнього джерела, яскравість дефектів зросла, збуджено розряд над прихованими дефектами

Попередні дослідники [14] використовували коронний розряд для контролю дефектів кремнієвих пластин із застосуванням рідкого електроду (електроліт у прозорій кюветі із кварцового скла), що є більш складним і малопродуктивним способом.

На екрані монітору зображення об'єкту формує програма Owley (рис. 5), яка надає можливість вимірювати його геометричні та яскравісні характеристики на основі піксельної обробки даних.



**Рис. 5.** Робочі вікна програми Owley: часова затримка зображення праворуч дорівнює 4 с відносно зображення ліворуч; помітні рухоми яскраві об'єкти — це нові місця іскрового пробую

## 5. Обговорення результатів дослідження процесу збудження негативного імпульсного коронного розряду в повітрі

Результатом дослідження є створення діючого стенду телевізійного контролю дефектів на основі їх візуалізації у негативному імпульсному коронному розряді. Важливою особливістю способу збудження корони є зменшення амплітуди анодної напруги до 1–1,5 кВ. Осцилографічний канал забезпечує вимірювання струму та напруги розряду з відносною похибкою в 1 %. Застосування прозорого електроду на основі оксиду індію в конструкції розрядно-оптичного пристрою дозволило замінити складну систему із рідким електродом. Це, в свою чергу, надає можливість наблизити розрядний модуль до поверхні об'єкту контролю і створити мобільний варіант засобу контролю. Для уникнення поверхневих струмів обтікання до міжелектродного простору введено додатковий діелектричний бар'єр із скляної пластини.

Пошук нових конструктивних рішень для розрядного пристрою мають супроводжувати дослідження режимів збудження корони та протікання розрядного струму. Схема збудження має бути доповнена вузлами обмеження і регулювання процесом виникнення і розвитку стримерів та переходу корони в іскровий розряд.

Відкритим питанням, на погляд авторів статті, залишається створення математичної моделі електродної системи «сукупність голів — площина» для адекватного до об'єкту контролю опису залежності розрядного струму від параметрів збудження коронного розряду.

## 6. Висновки

В результаті проведених досліджень авторами були отримані такі результати:

- створено пристрій газорозрядної візуалізації дефектів в коронному розряді на основі плоских електродів, один з яких є прозорим, та діелектричним бар'єром;
- експериментально визначені параметри збудження негативного імпульсного коронного розряду, зокрема отримано стійкий розряд при амплітуді імпульсів в 1–1,5 кВ;
- побудовано лабораторний стенд на основі телевізійної інформаційно-вимірювальної системи із пристроєм газорозрядної візуалізації;
- експериментально досліджено візуалізацію дефектів кремнієвої пластини, призначеної для виготовлення фотоелектричного сонячного елемента, при збудженні над ними коронного розряду.

### Література

1. Мик, Дж. Электрический пробой в газах [Текст]: пер. с англ. / Дж. Мик, Дж. Крэгс. — М.: Издательство иностранных литератур, 1960. — 608 с.
2. Болтачев, Г. Ш. Аналитическая модель коронного разряда с конического электрода в режиме насыщения [Текст] / Г. Ш. Болтачев, Н. М. Зубарев // Журнал технической физики. — 2012. — Т. 82, Вып. 11. — С. 28–37.
3. Reizer, Ju. P. Gas Discharge Physics [Text] / Ju. P. Reizer; by ed. J. E. Allen. — Springer, 2001. — 449 p.
4. Порев, В. А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів [Текст] / В. А. Порев, Г. В. Порев // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — № 1. — С. 56–61.
5. Порев, В. А. Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи — стан і перспективи розвитку [Текст] / Г. В. Порев // Методи та прилади контролю якості. — 2005. — № 13. — С. 71–74.
6. Завада, Л. М. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов

Тричела [Текст] / Л. М. Завада, Б. Б. Кадома, О. В. Болотов, И. А. Панченко, С. Г. Пугач, С. Н. Маньковский // Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». — 2007. — № 777, Вип. 2/34. — С. 67–72.

7. Zhang, Y. Trichel Pulse in Negative DC Corona discharge and Its Electromagnetic Radiations [Text] / Y. Zhang, L.-J. Liu, J.-S. Miao, Z.-L. Peng, J.-T. Ouyang // Journal of Electrical Engineering and Technology. — 2015. — Vol. 10, № 3. — P. 1174–1180. doi:10.5370/jeet.2015.10.3.1174
8. Sattari, P. Numerical Simulation of Trichel Pulses in a Negative Corona Discharge in Air [Text] / P. Sattari, G. S. P. Castle, K. Adamiak // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2011. — Vol. 47, № 4. — P. 1935–1943. doi:10.1109/tia.2011.2156752
9. Amirov, R. H. Nanoparticles formation and deposition in the trichel pulse corona [Text] / R. H. Amirov, A. A. Petrov, I. S. Samoylov // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — Vol. 418. — P. 012064. doi:10.1088/1742-6596/418/1/012064
10. Афанасьев, С. Б. Некоторые особенности развития коронного разряда в воздухе [Текст] / С. Б. Афанасьев, Д. С. Лавренко, И. Н. Петрушенко, Ю. К. Стишков // Журнал технической физики. — 2008. — Т. 78, Вып. 7. — С. 30–34.
11. Петров, А. А. Исследование эрозии катода в отрицательном коронном разряде [Текст] / А. А. Петров, Р. Х. Амиров, Е. В. Коростылев, И. С. Самойлов // Труды МФТИ. — 2013. — Т. 5, № 1. — С. 72–79.
12. Akishev, Y. S. Comparison of the AC barrier corona with DC positive and negative coronas and barrier discharge [Text] / Y. S. Akishev, A. V. Dem'yanov, V. B. Karal'nik, A. E. Monich, N. I. Trushkin // Plasma Physics Reports. — 2003. — Vol. 29, № 1. — P. 82–91. doi:10.1134/1.1538505
13. Стишков, Ю. К. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе [Текст] / Ю. К. Стишков, В. Б. Козлов, А. Н. Ковалев, А. В. Самусенко // Электронная обработка материалов. — 2010. — № 4. — С. 31–40.
14. Добровольский, Ю. Г. Использование эффекта Кириана для контроля качества полупроводниковых пластин [Текст] / Ю. Г. Добровольский // ТКЭА. — 1999. — № 5–6. — С. 22–24.

### ВОЗБУЖДЕНИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Исследованы условия и параметры возбуждения отрицательного импульсного коронного разряда в воздухе. Предложена конструкция газоразрядного устройства с диэлектрической пластиной и прозрачным тонкопленочным электродом для визуализации дефектов в коронном разряде. Получено устойчивое возбуждение коронного разряда при амплитуде импульсов 1–1,5 кВ. Приведены результаты контроля дефектов пластины кристаллического кремния, предназначенной для изготовления фотоэлектрического солнечного элемента, телевизионной информационно-измерительной системой.

**Ключевые слова:** импульсный коронный разряд, газоразрядная визуализация, телевизионная информационно-измерительная система.

*Порев Володимир Андрійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Божко Костянтин Михайлович, старший викладач, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: bozhkonew@mail.ru.*

*Сидоренко Сергій Юрійович, аспірант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Порев Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Божко Константин Михайлович, старший преподаватель, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Сидоренко Сергей Юрьевич, аспирант, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Porev Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.*

*Bozhko Konstantin, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: bozhkonew@mail.ru.*

*Sydorenko Sergey, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine*