

**Е. А. Хом'як<sup>1</sup>**  
**П. Ф. Буданов<sup>1</sup>**  
**К. Ю. Бровко<sup>1</sup>**  
**І. Г. Кирисов<sup>1</sup>**

## **СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ВИМОГИ ДО МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДІЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА**

<sup>1</sup>Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

*Важливе місце в ядерному реакторі атомної електростанції займає контроль герметичності оболонок тепловидільних елементів реактора. Проаналізовано наявні методи неруйнівного контролю герметичності тепловидільних елементів ядерного реактора атомної електростанції. Сучасні методи контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів дозволяють відстежувати розвиток дефекту в оболонці тепловидільного елемента та виявляти їхню розгерметизацію, тим самим запобігаючи аварії. Аналіз сучасних методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента для виявлення негерметичності оболонки тепловидільного елемента є актуальним питанням для підвищення надійності та безпеки експлуатації атомної електростанції. Відомо, що взаємодія нейтронного потоку з оболонкою тепловидільного елемента, викликає корозійні процеси на її поверхні з утворенням локальних неоднорідностей. Аналіз розглянутих методів контролю герметичності тепловидільного елемента показав, що вони побудовані на виявленні відсоткового вмісту радіоактивних речовин та інертних газів, які спостерігаються у теплоносії після розгерметизації тепловидільного елемента. Встановлено, що досліджувані методи контролю не дозволяють визначити критерії розгерметизації або герметизації оболонки тепловидільного елемента. Залишається відкритим питання оснащення атомної електростанції сучасними методами контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів, що забезпечують безпеку експлуатації технологічного обладнання атомної електростанції, і мають високий ступінь надійності і оперативності у виявленні аварійних ситуацій в режимі реального часу. Запропоновано метод контролю пошкодження зовнішньої та внутрішньої структури оболонки тепловидільного елемента на основі застосування апарату фрактальної геометрії, який дозволяє визначити ступінь герметичності тепловидільного елемента у режимі реального часу.*

**Ключові слова:** метод контролю герметичності оболонки, розгерметизація тепловидільного елемента, критерії стану оболонки.

### **Вступ**

Одним з основних параметрів безпеки ядерного реактора (ЯР) атомних електростанцій (АЕС), є порушення герметичності оболонок тепловидільного елемента (ТВЕЛ), який є основним елементом активної зони ЯР. Як показав аналіз робіт [1]—[6], сучасні методи контролю не відстежують динаміку процесу пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ та не визначають критерії розгерметизації оболонки, тому запропоновано метод контролю пошкодження зовнішньої та внутрішньої структури оболонки тепловидільного елемента на основі застосування апарату фрактальної геометрії, який дозволяє визначити ступінь герметичності тепловидільного елемента у режимі реального часу. Це є актуальним завданням, що і зумовило вибір напрямку дослідження [1].

*Метою статті є підвищення надійності та безпеки ядерних реакторів атомних електростанцій на основі удосконалених методів контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів.*

*Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються завдання:*

1. Аналіз існуючих методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента.
2. Розроблення нових підходів та вимог до методів контролю ступеня герметичності ТВЕЛ.

### Результати досліджень

Для контролю оболонки ТВЕЛ застосовуються руйнівні та неруйнівні методи контролю [2], [4]. Руйнівні методи в процесі контролю руйнують оболонку ТВЕЛ та застосовуються тільки на виробництві. Тому в роботі розглянуто неруйнівні методи, які контролюють зовнішню та внутрішню структуру оболонки ТВЕЛ під час їхньої експлуатації [2], [3].

Позаяк до причин розгерметизації ТВЕЛ відносяться: гідрування оболонки ТВЕЛ через наявність вологи у паливі; корозія оболонки ТВЕЛ; взаємодія оболонки зі сторонніми предметами, що знаходяться в теплоносії реактора; взаємодія оболонки з паливними таблетками, — то необхідно ці фактори враховувати у методах контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, до яких відносяться:

1. *Капілярні методи* основані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин в порожнини поверхневих дефектів. В процесі контролю цими методами на очищену поверхню деталі наносять проникну рідину, яка заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а частину що залишилася в порожнинах дефектів виявляють за допомогою проявника, який утворює індикаторний малюнок. Капілярну дефектоскопію не можливо використовувати у моніторингу ТВЕЛ в процесі експлуатації [2], [3]. Процес виявлення поверхневих дефектів капілярним методом, показано схематично у динаміці на рис. 1.

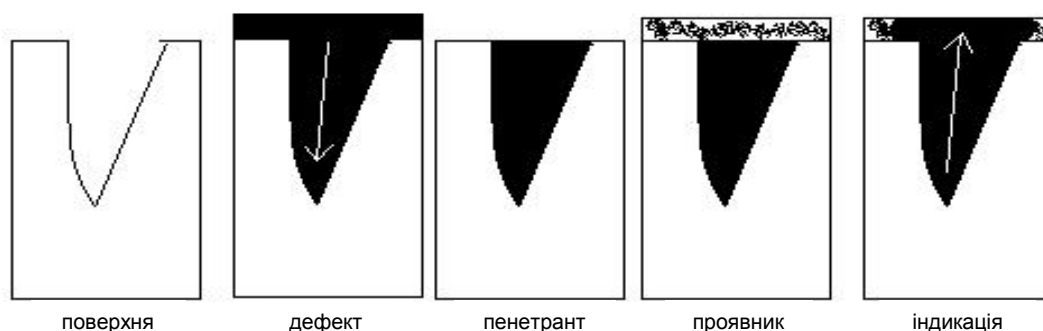


Рис. 1. Схема послідовності контролю капілярним методом

2. *Радіографічний метод* контролю оснований на здатності рентгенівських променів проникати через метал і впливати на світлочутливу рентгенівську плівку, розташовану зі зворотного боку зварного шва дозволяє контролювати дефекти матеріалу (наприклад: мікропори, макротріщини) [3].

Під час просвічування оболонки ТВЕЛ  $\beta$ -випромінювання та рентгенівське випромінювання по-різному поглинаються різними речовинами [3].

Інтенсивність рентгенівського випромінювання під час проходження через речовину змінюється відповідно до виразу

$$I = I_0 \epsilon^x,$$

де  $I$  — інтенсивність випромінювання після проходження шару поглиначя;  $I_0$  — початкова інтенсивність випромінювання, імп./с;  $\epsilon$  — нелінійний коефіцієнт поглинання речовиною;  $x$  — товщина шару поглиначя [3].

З виразу (1) випливає, що інтенсивність випромінювання залежить від товщини шару оболонки ТВЕЛ, яка змінюється в процесі експлуатації ТВЕЛ.

3. *Радіохвильові методи* полягають в реєстрації змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону у разі взаємодії з матеріалом поверхні оболонки ТВЕЛ [4]—[7].

Зазвичай використовуються хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1...100 мм для контролю ТВЕЛ. Позаяк радіохвильовий метод полягає в реєстрації змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, то необхідно у разі їхньої взаємодії з поверхнею матеріалу оболонки ТВЕЛ враховувати появу мікропор та макротріщин у структурі поверхні в оболонки ТВЕЛ [4]—[7].

4. *Мас-спектрометричний метод* оснований на використанні гелію як і індикаторного газу, що вводиться під оболонку ТВЕЛ, тому за його допомогою можна виявити процес розгерметизації оболонки за відсотковим вмістом газу у теплоносії [5]—[12]. Принцип контролю герметичності ТВЕЛ за допомогою методу газонаповненої камери показано на рис. 2.

З рис. 2. бачимо, що за допомогою течешукача можна визначити відносну кількість гелію, що виходить з ТВЕЛ, таким чином можна виявити дрібні отвори, тріщини в оболонках і зварних швах ТВЕЛ. Як недолік необхідно відмітити, що за наявності значних за розмірами скрізних дефектів в оболонках ТВЕЛ, цей метод контролю може не дати правильних показів, тому що під час вакуумування весь гелій може вийти з під оболонки ТВЕЛ [5]—[12].

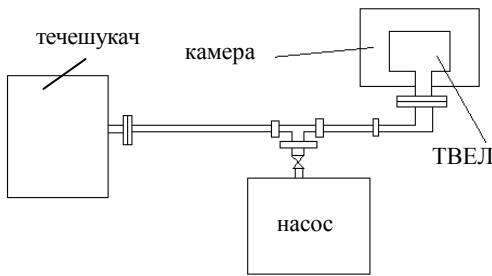


Рис. 2. Структурно-функціональна схема методу газонаповненої камери

локацій, цифрових індикацій, на основі яких оператор може оцінити стан і поведінку структури матеріалу під напругою, виявити і визначити місцезнаходження дефектів.

Акустико-емісійний контроль: виявляє ті дефекти, що розвиваються, тобто найнебезпечніші дефекти. Цей метод є дистанційним, він не вимагає сканування поверхні об'єкта для пошуку локальних дефектів, а лише правильного розміщення датчиків на поверхні об'єкта для здійснення локації джерела акустичної емісії.

#### Переваги:

- дистанційне виявлення і визначення координат дефектів;
- проведення неруйнівного контролю всього об'єкта цілком за один цикл навантаження;
- швидка установка датчиків;
- висока чутливість;
- вимагає локального доступу до об'єкта;
- визначає ті дефекти, що розвиваються;
- вимагає відносно невеликого навантаження.

#### Обмеження:

- конструкцію необхідно навантажувати;
- активність АЕ значно залежить від матеріалу і акустичного контакту;
- під час АЕ-контролю, зазвичай присутні помилкові сигнали АЕ;
- важко відрізнити помилкові сигнали від корисних сигналів АЕ;
- АЕ-контроль дає обмежену інформацію про тип дефекту;
- для проведення акустико-емісійного контролю ізоляційне покриття (якщо воно є) знімається тільки в місцях установки АЕ-датчиків;

– штатні методи НК використовуються для вибіркового контролю в сумнівних місцях, визначених за результатами акустико-емісійного контролю [12].

6. *Метод вихрострумової дефектоскопії.* ТВЕЛ виймається з тепловидільної збірки (ТВЗ) за допомогою спеціального інструмента, встановлюється в пенал і проходить через вихрострумний перетворювач. При цьому проводиться дефектоскопія оболонки ТВЕЛа.

Аналіз результатів контролю здійснюється порівнянням параметрів відгуків від штучних дефектів контрольного зразка та аномалій, виявлених під час вихрострумного (ВС) сканування досліджуваного ТВЕЛ. Для первинної оцінки стану ТВЕЛ використовується скан головного вікна програми з результатами ВС сканування, показаний на рис. 3а, що дозволяє швидко виявити ділянки оболонки з дефектами. Характеристики виявленої аномалії оцінюються за міццю (сканограми рис. 3б) та згина-

Коливання поширюються від джерела випромінювання до датчика (датчиків), де вони перетворюються в електричні сигнали. АЕ-прилади реєструють ці сигнали і відображають дані на екрані у вигляді осцилограм,

5. *Метод акустико-емісійного контролю оболонки ТВЕЛ.* Акустична емісія (АЕ) — явище поширення пружних коливань (акустичних хвиль), що генеруються раптовою деформацією напруженого матеріалу.

Коливання поширюються від джерела випромінювання до датчика (датчиків), де вони перетворюються в електричні сигнали. АЕ-прилади реєструють ці сигнали і відображають дані на екрані у вигляді осцилограм,

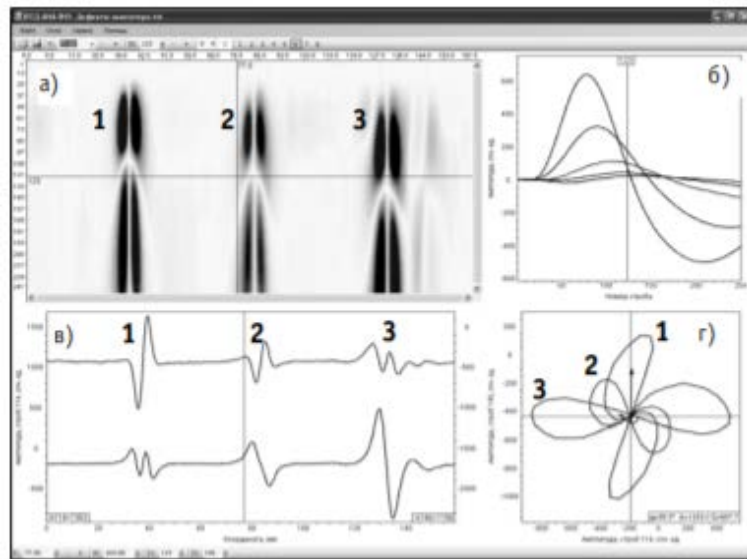


Рис. 3. Головне вікно програми з результатами ВС-контролю фрагмента імітатора з: 1 — зовнішнім; 2 — наскрізним; 3 — внутрішнім дефектами; а — D-скан; б — А-сканограми в околиці наскрізного дефекту; в — обвідні сигнали ВСП; г — годографи

льними характеристиками, отриманими для різних моментів стробування вихідного сигналу вихростумового перетворювача (ВСП) (рис. 3в). Ці згинальні характеристики використовуються також для побудови годографів дефектів та подання результатів контролю у традиційному вигляді (рис. 3г).

За параметрами годографа (форма, амплітуда, кут нахилу) оцінюють стан оболонки на аномальній ділянці. По фазі та амплітуді годографи імпульсного сигналу для різних дефектів оболонки якісно співвідносяться між собою аналогічно годографам гармонічного сигналу.

Імпульсна вихростумова дефектоскопія вже тривалий час використовується як експресний метод контролю стану оболонок ТВЕЛ для досліджень ОТВС ВВЕР-440 і ВВЕР-1000.

На рис. 4а показано приклад ВС-діаграми (однієї з обвідних) негерметичного ТВЕЛа ВВЕР-1000, у нижній частині якого виявлено наскрізний дефект з площею пошкодження зовнішньої поверхні близько  $0,5 \text{ мм}^2$  (рис. 4б). Разом з первинними наскрізними дефектами імпульсний метод дозволяє ідентифікувати різноманітні вторинні аномалії у вигляді підвищеного окислення, гідридних утворень та здуття оболонки, що виникають внаслідок попадання води всередину ТВЕЛ через первинний дефект. Вид одного з аномальних ВС-сигналів масивного гідриду, виявленого в оболонці ТВЕЛ, показаний на рис. 4.

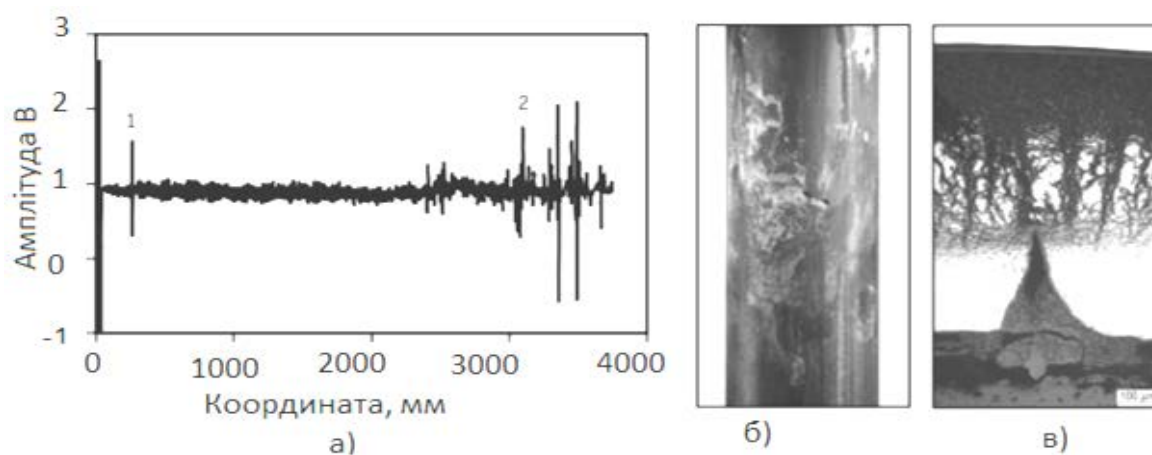


Рис. 4. Результати вихростумової дефектоскопії негерметичного ТВЕЛ: *a* — обвідна сигналу ВСП; *б* — зовнішній вигляд наскрізного дефекту; *в* — мікроструктура оболонки у місці розташування вторинного дефекту; 1 — сигнал від наскрізного дефекту; 2 — сигнал від вторинного дефекту

Апробація прийнятих рішень показала високу надійність обладнання та інформативність отриманих результатів. Можливості створеної системи не обмежуються контролем стану ТВЕЛ ТВСА ВВЕР-1000 і можуть бути розширені за рахунок підключення інших первинних перетворювачів. В результаті такої модифікації система може бути використана для діагностики стану ВВЕР-1000 та інших елементів ТВС, інших типів реакторів (ВВЕР 440, РБМК-1000) [13].

### Обговорення отриманих результатів

Аналіз існуючих методів контролю герметичності тепловидільних елементів тепловидільних збірок ядерного реактора атомної електростанції показав, що вони застосовуються для контролю тільки зовнішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, але не враховують зміни внутрішньої структури поверхні оболонки ТВЕЛ.

Запропоновано метод контролю на основі апарату фрактальної геометрії, який дозволяє враховувати зміни геометричних параметрів (зовнішньої, внутрішньої, діаметр и товщину оболонки) внутрішньої структури оболонки ТВЕЛ.

### Висновки

1. Розглянуті сучасні методи контролю, які не відстежують динаміку процесу пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ та не визначають критерії розгерметизації оболонки.

2. Запропоновано новий перспективний метод контролю пошкодження зовнішньої та внутрішньої структури оболонки тепловидільного елемента на основі застосування апарату фрактальної геометрії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, Е. А. Хом'як, і О. А. Тимошенко, «Удосконалення методу контролю оболонки тепловидільного елемента для підвищення безпеки ядерного реактора,» *Вісник Харківського політехнічного інституту*, № 1, с. 26-31, 2020.
- [2] Д. Г. Герасимов, «Разработка технической идеологии построения системы для проверки герметичности тепловыделяющих элементов,» *Путь науки*, с. 52-56, 2017.
- [3] J. V. Michael, “Nuclear control rod position indication system,” U.S. Patent, no.: US 10, 020, 081 B2, December 2018.
- [4] В. И. Богорад, Т. В. Литвинская, А. В. Носовский, и А. Ю. Слепченко, *Вопросы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов при внедрении новых видов ядерного топлива на АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000*, Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, с. 29-30, 2014.
- [5] А. С. Курский, В. В. Калыгин, и И. И. Семидоцкий, «Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на корпусном кипящем реакторе ВК-50,» *Вестник ИГЭУ*, № 1, с. 1-6, 2014.
- [6] Ю. К. Кимович, и В. К. Кулешов, «Комплексный контроль дефектов внешнего вида ТВЕЛ ВВЭР-1000,» *Приборы*, № 10, с. 21-25, 2013.
- [7] И. Н. Юдин, и А. А. Персинен, «Радиационные технологии, как ключевой элемент сквозных технологий,» *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института*, с. 7-11, 2016.
- [8] А. В. Алексеев, А. В. Горячев, и О. И. Дреганов, «Изучение поведения ТВЕЛ реактора ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя,» *Сборник трудов по АО ГНЦ НИИАР*, с. 12-20, 2017.
- [9] J. I. S. Cho, T. P. Neville, and P. Trogadas, “Capillaries for water management in polymer electrolyte membrane fuel cells,” *International journal of hydrogen energy*, pp. 21949-21958, 2018.
- [10] С. К. Манкевич, Е. П. Орлов, «Метод бесконтактного контроля установки ТВС в ВВЭР,» *Атомная энергия*, № 1, т. 122, с. 33-37, 2017.
- [11] D. M. Stănică, and G. R. Şişman, “Trends in computation a intelligence applied in nuclear engineer in gandnon-destructive examination techniques of nuclear units,” in *7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, 2015, pp. 21-24.
- [12] M. Trojanowicz, “A review of flow analysis methods for determination of radionuclides in nuclear wastes and nuclear reactor coolants,” *Talanta*, vol. 183, pp. 70-82, 2018.
- [13] С. В. Павлов, С. С. Сагалов, и С. В. Амосов, «Система неразрушающего контроля облученных ТВЕЛ для стенда инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок ВВЭР,» *Известия вузов Ядерная энергетика*, № 3, с. 5-11, 2010.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

**Хом'як Едуард Анатолійович** — аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: eakhomiak@gmail.com ;

**Буданов Павло Феофанович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: ravelfeofanovich@ukr.net ;

**Бровко Костянтин Юрійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: brovkokonstantin@gmail.com ;

**Кирисов Ігор Геннадійович** — старший викладач кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: kirisovuipa1980@gmail.com .

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

**E. A. Khomiak<sup>1</sup>**  
**P. F. Budanov<sup>1</sup>**  
**K. Yu. Brovko<sup>1</sup>**  
**I. H. Kyrsov<sup>1</sup>**

## Modern Approaches and Requirements for Methods of Controlling the Leakage of the Fuel Element Cladding

<sup>1</sup>Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv

*An important place in the nuclear reactor of a nuclear power plant is the control of the tightness of the shells of the fuel elements of the nuclear reactor. Therefore, a review of existing methods of non-destructive testing of the tightness of fuel elements of fuel assemblies of a nuclear reactor of a nuclear power plant was conducted. Modern methods of control of tightness of shells of fuel elements allow to trace development of defect in a shell of fuel element and to reveal depressuri-*

zation of fuel elements thereby preventing accidents. In connection with the single-circuit system of coolant circulation and in case of an accident by increasing the emission of radionuclides directly into the atmosphere, it is necessary to detect leaky fuel elements at nuclear power plants. In this regard, the analysis of modern methods of control of the tightness of the shell of the fuel element to detect the tightness of the shell of the fuel element is a topical issue that significantly increases the reliability and safety in the operation of a nuclear power plant. It is known that the interaction of the neutron flux with the shell of the fuel element causes corrosion processes on its surface with the formation of local inhomogeneities. The analysis of the considered methods of control of tightness of a fuel element showed that they are based on detection of percentage of radioactive substances and inert gases which are observed in the heat carrier after depressurization of a fuel element. It is established that the studied control methods do not allow to determine the criteria for depressurization or sealing of the shell of the fuel element. The question of equipping a nuclear power plant with modern methods of controlling the tightness of the shells of fuel elements that ensure the safe operation of technological equipment of a nuclear power plant, and have high degrees of reliability and efficiency in detecting emergencies in real time is open. A method of controlling damage to the outer and inner structure of the fuel element shell based on the use of a fractal geometry apparatus is proposed, which allows to indicate the degree of tightness of the fuel element in real time.

**Keywords:** method of shell tightness control, depressurization of fuel element, shell condition criteria.

**Khomiak Eduard A.** — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: eakhomiak@gmail.com ;

**Budanov Pavlo F.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

**Brovko Kostiantyn Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: brovkokonstantin@gmail.com ;

**Kyrysov Ihor H.** — Senior Lecturer of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: kirisovuipa1980@gmail.com