

УДК 620.172.21:621.396.6.019.5  
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-5

КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В.  
Хмельницький національний університет

## ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛУВАННІ

Стаття присвячена розробці методу діагностування міцності компандованих конструкцій електронної техніки при термоциклуванні. Об'єктом дослідження представлено керамічні конденсатори полімеризовані компаундом. Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення між керамікою та компаундом під впливом термоударів з'єднання кераміки і компаунду зазнає термічних напружень, що при несприятливому поєднанні цих коефіцієнтів та механічних характеристик обох матеріалів може спричинити розтріскування компаунду або кераміки та руйнування всієї конструкції. В рамках представленого дослідження було визначено температурні межі роботи датчиків акустичної емісії, проведено відбір хвилеводу акустичної емісії, що дозволило розширити межі температурного діапазону вимірювань, створена вакуумна установка, яка перешкоджала утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі, здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції та запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів в умовах термоциклування від +60 °С до -50 °С.

Ключові слова: керамічний компаундований конденсатор, акустична емісія, термоциклування, неруйнівна діагностика.

KOVTUN I., BOIKO J., BATOVSKY V.  
Khmelnitskyi National University

## STRENGTH DIAGNOSTICS OF COMPOUNDED STRUCTURES IN ELECTRONICS UNDER THERMAL IMPACTS

The assembly of ceramic compounded capacitor, such as K 15-5, represents a ceramic disc polymerized by compound. Due to difference in linear expansion coefficients between ceramics and compound when subjected to thermal impacts ceramic-compound joint undergoes a thermal stresses, which under unfavorable combination of these coefficients and mechanical characteristics of both materials may cause cracking of compound or ceramics and destruction of the joint structure. The following tasks were accomplished in the current research. Thermal limits have been specified for operation of acoustic emission sensors made as an assembly of different materials, such as steel, ceramics, plastics, which are also capable of emitting acoustic emission signals during thermal cycling. The waveguide is selected and used for transmitting acoustic emission signals from the object in the thermal chamber to the acoustic emission sensor outside the thermal chamber, what expanded the temperature range by increasing positive temperatures up to +90 deg C and negative temperatures down to -60 deg C. To eliminate hindrances associated with formation and cracking of ice during transition from positive temperatures to negative and reverse, the vacuum chamber was created. The frequency separation of acoustic emission is accomplished for ceramic and compound parts of capacitor. The frequency bands are: 650-1000 kHz for ceramic component K-15 using sensor P113 (0.5-1.0 MHz); 130-300 kHz for compound component using sensor P113 (0.2-0.5 MHz). The method has been designed for non-destructive strength diagnostics of non-detachable assemblies of ceramics and compound, such as capacitors K-15-5, subjected to thermal impacts in the temperature range from +60 to -50 deg C. Manifestation of the Kaiser effect after first two thermal impacts indicates of compliance with acceptable strength condition of tested assembly, appearance of acoustic emission on N-th thermal cycle detects beginning of destructive process and indicates that such assembly will be destroyed in 5-10 cycles.

Keywords: ceramic compounded capacitor, acoustic emission, thermal impact, non-destructive diagnostics.

**Вступ.** Конденсатори типу К 15-5 представляють собою керамічний диск полімеризований компаундом (рис. 1). Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення кераміки і компаунда при зміні температури в з'єднанні кераміка-компаунд виникають температурні напруження, які при особливо несприятливих поєднаннях цих коефіцієнтів і механічних характеристик обох матеріалів можуть призвести до розтріскування компаунда або кераміки і руйнування всієї конструкції.

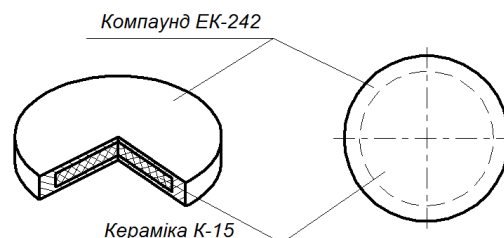


Рис. 1. Конструкція керамічного компаундованого конденсатора К 15-5

З попередніх робіт інших авторів [1-3] встановлено, що руйнування кераміки в конструкції К 15-5 при термоциклуванні відбувається від її розтягування в напрямку поздовжніх осей дисків і по ділянкам,

нахиленим до торців дисків під кутом  $45^\circ$ , через стиск в радіальних напрямках від дії компаунда.

Візуальним оглядом конденсаторів, які зруйнувалися при термоударі, було встановлено, що розтріскування кераміки відбувається в шарах, що прилягають до компаунду, з розташуванням тріщин в площинах, паралельних торцевим або нахиленим до них під кутом  $45^\circ$ . На рис. 2 наведені фотографії розтріскування конденсаторів.

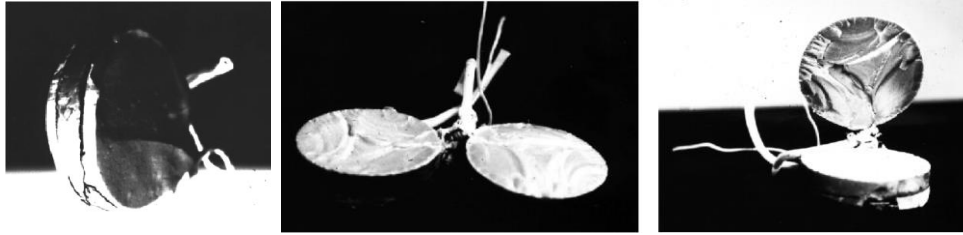


Рис. 2. Рельєф поверхні руйнування конденсатора

Також було виявлено [4, 5], що значення напружень і деформацій в кераміці і компаунді значно залежать від розкиду фізико-механічних характеристик  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $E$ , як кераміки, так і компаунда. Так наприклад, можливий розкид коефіцієнтів лінійного розширення для кераміки і компаунда  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  може перебувати в межах від  $-30\%$  до  $+50\%$ . Що призводить до розкиду розрахункових значень напружень більш ніж на  $300\%$ . Наявність цих та багатьох інших важко прогнозованих факторів ускладнює розрахунок міцнісного стану з'єднання.

У даній ситуації для забезпечення міцності як окремих особливо відповідальних деталей, так і партій виробів, слід було вдатися до створення методики неруйнівного контролю міцності нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів кераміки і компаунда на основі методу акустичної емісії (АЕ), який відображаючи фізико-механічні властивості матеріалів, дозволяє стежити за станом їх мікроструктури і фіксувати її порушення ще на ранніх етапах розвитку [6, 7].

Відомі роботи [8, 9] з акустико-емісійного дослідження складових керамічних конденсаторів під впливом механічних навантажень, таких як розтяг і згин. В результаті цих робіт були отримані методики неруйнівного контролю та діагностування міцності матеріалів складових керамічних конденсаторів.

Однак, як було зазначено вище, поломки самих конденсаторів відбуваються в основному не від механічних, а від термічних навантажень, особливо при перепадах температур. Тому в даній роботі вирішувалося завдання діагностування міцності готових виробів в експлуатаційних умовах, тобто при термоциклованні від  $+60^\circ\text{C}$  до  $-50^\circ\text{C}$ .

При розробці методики неруйнівного діагностування і контролю міцності натурних конденсаторів в зазначених експлуатаційних умовах довелося знайти відповіді на наступні питання.

1. Які температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклованні?
2. Як позбутися сигналів АЕ, що випромінюються утворенням на конденсаторі і датчику льоду при переході від додатних температур до від'ємних і навпаки?
3. Як розділити сигнали АЕ, що випромінюються керамічною основою конденсатора, від сигналів, що випромінюються компаундною оболонкою, як при нормальних, так і при від'ємних температурах?

**Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклованні.** До проведення випробувань компаундованих керамічних конденсаторів при термоциклованні необхідно було перевірити роботу датчиків акустичної емісії в умовах низьких від'ємних і високих додатних температур, при яких вони самі можуть стати джерелами сигналів АЕ, бо містять у своїй конструкції деталі з різномірних матеріалів: металу, пластмаси, кераміки, компаунда, з відмінними значеннями коефіцієнтів лінійного розширення.

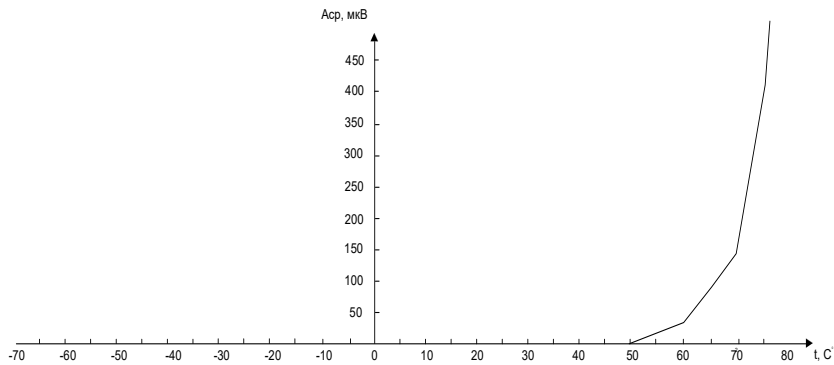
З цією метою датчик П113, підключений до комп'ютерного вимірювального комплексу акустичної емісії [10], поміщався у термокамеру Файтрон 3526/51. Джерелом сигналів АЕ служив імітатор сигналів АЕ СМА-04. Випробування показали, що датчик П113 працездатний в інтервалі температур від  $+50^\circ\text{C}$  до  $-50^\circ\text{C}$ , графік залежності чутливості датчика від температури показаний на рис. 3.

Однак при температурах від  $+50^\circ\text{C}$  до  $+85^\circ\text{C}$  на показання датчика впливали перешкоди, пов'язані з різницею в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових частин самого датчика рис. 4.

При переході до від'ємних температур через це ж, а також і через обмерзання в районі  $+5^\circ\text{C}$  також виникали помилкові сигнали АЕ. Щоб не піддавати датчики дії несприятливих для них температур, було вирішено випробувати передачу сигналів АЕ через хвилеводи.



**Рис. 3. Залежність чутливості датчика П113 від температури**



**Рис. 4. Залежність появи сигналів АЕ датчика від температури**

**Перевірка можливості використання хвилеводів.** Випробуванню піддавалися такі хвилеводи: кварцові, свинцеві, титанові, бронзові і залізні. З цих хвилеводів найбільш ефективним виявився сталевий розміром 500x25x30мм (табл. 1).

Таблиця 1.

**Визначення коефіцієнтів загасання для хвилеводів з різних матеріалів на проходження сигналів АЕ при частотах 0,02-2,0 МГц і вхідному сигналі випромінювача 300 мВ**

Тип хвилеводу	Розмір хвилеводу	Сигнал на виході, мВ	Коефіцієнт затухання, К
Кварц	$l = 500, d = 10$	126	0,42
Свинець	$l = 500, d = 10$	30	0,1
Титан	$l = 500, d = 10$	129	0,43
Бронза	$l = 500, d = 10$	90	0,3
Сталь	$l = 500, d = 10$	210	0,7
Сталь	$l = 500, b = 30, h = 25$	240	0,8

Експеримент проводився в нормальних умовах за допомогою генератора ГЗ-112/1 використаного для збудження перетворювача-датчика П113 (1). Другий перетворювач П113 (2) виконував роль приймача сигналів АЕ. Перетворювачі кріпилися до торців хвилеводу через контактний шар-клей ВК-1.

Контроль радіоімпульсів, які подавалися з генератора здійснювався: за напругою – мікрвольтметром, по частоті – частотоміром, за формою сигналу – осцилографом (канал 1). Вихідні сигнали перевірялися: за рівнем – мікрвольтметром, за формою – осцилографом (канал 2).

Використання осцилографа дозволяло порівнювати форму сигналів на вході і виході, зміщення фаз, коефіцієнт загасання, що вносяться хвилеводами і контактними шарами.

Параметри хвилеводу підбиралися таким чином, щоб в ньому виникали тільки поздовжні хвилі. Коефіцієнт проходження  $K$  визначався відношенням показань мікрвольтметра на виході та вході системи.

Випробування показали, що при переході від додатних температур до від'ємних і назад все ж виникають перешкоди за рахунок обмерзання хвилеводу і контактних шарів. Для усунення обмерзання проводилися випробування при зануренні хвилеводу з перетворювачем в ванну зі спиртом. Однак цей метод виявився неефективним, тому що спирт розчиняє контактний шар, через що втрачається акустична зв'язок.

Проте застосування хвилеводів дозволяє розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до  $+90\text{ }^\circ\text{C}$  і від'ємних до  $-60\text{ }^\circ\text{C}$ , якщо не враховувати АЕ при утворенні льоду.

**Допоміжні пристосування підвищення достовірності проведених випробувань.** Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних і назад, було вирішено поставити експеримент в вакуумі. Для цього була виготовлена невелика вакуумна установка, всередині якої розміщувався випробуваний об'єкт із закріпленими на ньому датчиком АЕ і датчиком температури.

Ця установка поміщалася в термокамеру Файтрон. Вакуумний насос забезпечував підтримку рівня розрідження в камері (740 мм.рт.ст.), при якому був відсутній лід.

Термоцикловання здійснювалося при температурах від +60 °С до -50 °С і назад, по термодатчику, установленому всередині вакуумної камери. При цих умовах не з'являлося обмерзання і датчик нормально працював у всьому діапазоні температур від +60 °С до -50 °С.

На жаль, цей метод вимагав багато часу на проведення термоцикловання, тому що перехід від -50 °С до +60 °С у вакуумній камері відбувався протягом 180-190 хв. Звичайно, при бажанні цей процес можна було б прискорити, вводячи в вакуумну камеру нагрівальну і охолоджуючу системи, однак це вимагало б подолання нових труднощів.

#### **Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ при руйнуванні зразків кераміки і компаунда.**

При проведенні цього експерименту зразки кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 встановлювалися консольно в спеціальному тестовому пристосуванні (рис. 5).

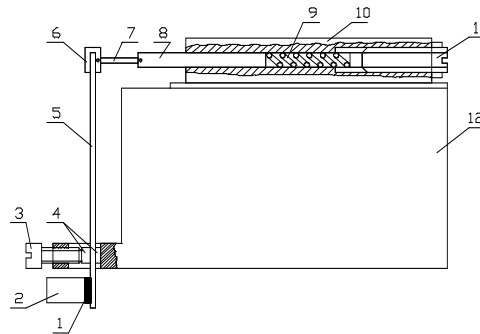


Рис. 5. Пристрій для навантаження зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242: 1 - акустичний шар, 2 - датчик акустичної емісії П113, 3 - гвинт, 4 - фторопластова прокладка, 5 - випробуваний зразок, 6 - фторопластова петля, 7 - тяга, 8 - сердечник, 9 - пружина, 10 - електромагніт, 11 - регулювальний гвинт, 12 - основа

На один кінець випробувального зразка через акустичне мастило кріпилися датчики АЕ з різними смугами пропускання сигналів АЕ. Інший кінець зразка кріпився до сердечника електромагніту, який втягувався через пружину. Датчик П113 підключався через попередній підсилювач до комп'ютерного вимірювального комплексу АЕ. Зібрана система, що складається з навантажувального пристосування, із закріпленим в ньому зразком кераміки або компаунда і датчиком АЕ П113 містилася в вакуумну камеру, в якій створювалося розрідження, рівне 740 мм.рт.ст. Апаратура запису сигналів АЕ налаштовувалася таким чином, щоб пропускати лише сигнали, що лежать в заданій смузі частот.

Потім дистанційно через трансформатор на електромагніт подавалася напруга і сердечник втягувався. Це призводило до деформації і руйнування випробуваного зразка, а апаратура при цьому реєструвала сигнали АЕ. Таким випробуванням на руйнування в вакуумі при кімнатній температурі піддавалися по 30 зразків кераміки і компаунда при різних смугах пропускання частот вимірювального комплексу АЕ.

Проведені випробування показали, що для дослідження керамічної складової краще використовувати датчик П113 (0,5-1,0) і смугу робочих частот комплексу АЕ – 650-1000 кГц, а для дослідження компаундною складовою – датчик П113 (0,2-0,5) з смугою робочих частот комплексу АЕ – 130-300 кГц.

Аналогічні результати були отримані при випробуваннях у відємних температурах. При охолодженні зразків, починаючи з температури -35 °С з'являлися сигнали акустичної емісії, що доходять до суми подій, що дорівнює 200 одиницям для керамічних зразків, і 120 - для компаундних. Ці сигнали при сталій температурі зникали через 5-6 сек. Навантаження і руйнування зразків проводилося до досягнення температури -50 °С після припинення сигналів акустичної емісії, викликаних впливом відємних температур.

Надалі виявилось можливим замість двох датчиків АЕ використовувати один - широкосмуговий П113 (0,2-2,0 МГц), сигнали якого передавалися на два прилади АФ-15, один з яких налаштовувався на смугу частот 650-1000 кГц і контролював керамічну частину конденсатора, а другий - на пропускання смуги частот 150-300 кГц і контролював компаундну частину.

**Акустична емісія конденсаторів К15-5 при їх термоциклованні.** Запис корисних сигналів акустичної емісії здійснювався при термоциклованні натурних конденсаторів К15-5. Ці конденсатори мають номінальну постійну напруга 50 кВ, номінальну ємність 470 пФ, допустиму реактивну потужність 10 Вт, масу 80 г.

Перші 10 конденсаторів піддалися термоциклованню у вакуумній камері при температурах +60 °С -50 °С із застосуванням хвилеводу, датчика П113 (0,2-2,0 МГц) і двох акустико-емісійних приладів АФ-15 у складі вимірювального комплексу АЕ.

Цей експеримент показав, що для всіх конденсаторів в області додатних температур сигнали АЕ відсутні і з'являються лише при температурі -14 °С і нижче. Це дало підставу подальші випробування

проводити в діапазоні від кімнатних температур до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  без застосування вакуумної камери і хвилеводів, а виникаючі сигнали АЕ від обмерзання датчика і конденсатора при температурі близько  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  просто не враховувати і не реєструвати, що значно спростило експеримент і скоротило час на його проведення.

У подальших експериментах з'єднаний кабелем датчик АЕ через попередній підсилювач підключався до двох приладів акустичної емісії, один з яких був налаштований на прийом сигналів АЕ лише компаундної частини, а інший – керамічної частини конденсатора. Обидва прилади синхронізувалися за часом.

Термоударам в термокамері піддавалися 30 штук конденсаторів К15-5. Середні значення параметрів АЕ (суми подій, максимальні амплітуди) при перших трьох термоударах представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 6.

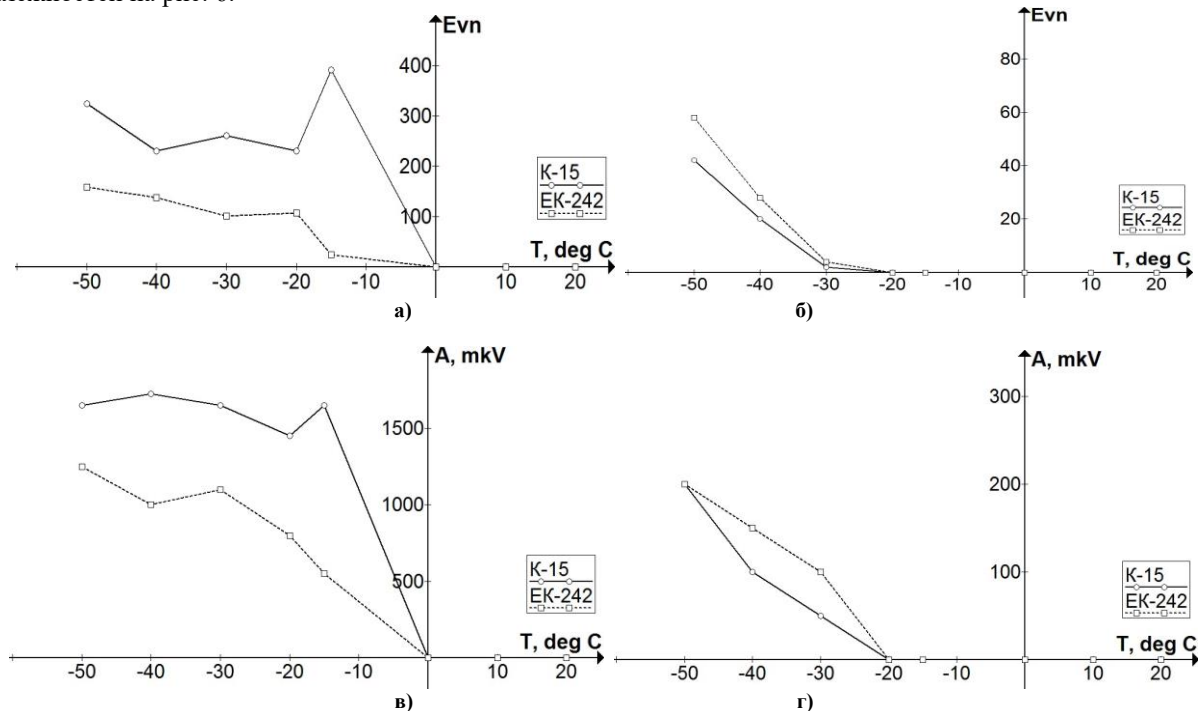


Рис. 6. Параметри акустичної емісії виміряні протягом двох температурних циклів: загальна кількість подій для циклу 1 (а) та 2 (б); максимальна амплітуда для циклу 1 (в) та 2 (г)

Аналіз матеріалів, що містяться на графіках, показує, що сигнали АЕ набагато сильніше проявляються в керамічній частини конденсатора, ніж в компаундній, вони відсутні у всьому діапазоні додатних температур і починають з'являтися приблизно з температури  $-12 \dots -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , досягаючи максимуму при найбільшому значенні від'ємної температури  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Слід зазначити, що після витримки протягом 10-15 секунд при заданій температурі сигнали припинялися у всіх 30 конденсаторів. При зміні температури від  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до кімнатної сигнали АЕ не з'являлися. При другому термоударі сигнали АЕ не спостерігалися приблизно до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при більш низьких температурах їх прояв був в 5-10 разів слабшим, ніж при першому термоударі. Це свідчить про прояв ефекту Кайзера, а значить, про малість хибних сигналів і про міцність випробовуваних конденсаторів [11-15].

**Висновки.** Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклованні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$  і від'ємних до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскування льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм.рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі.

Здійснено розділення сигналів АЕ, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конденсатора К 15-5, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 –  $650-1000\text{ кГц}$ ; для компаунда ЕК-242 –  $130-300\text{ кГц}$ .

Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К 15-5, які працюють в умовах термоцикловання від  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до

–50 °С. Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n-му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5-10 циклів.

### Література

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G.Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. KoriPELLa, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

### References

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G.Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. KoriPELLa, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

Надійшла / Paper received: 23.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020