

В.О. ПАРХОМЕНКО, В.П. РОЙЗМАН, А.В. ГОРОШКО  
Хмельницький національний університет

## АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

*В роботі запропоновано методи і засоби неруйнівного контролю і прогнозування міцності компаундованих конденсаторів, які піддають перепадам температури від +60 °C до -50 °C, що базуються на використанні методу акустичної емісії. Представлені дослідження поведінки кераміки і компаунда під дією механічного навантаження та в умовах термоцилювання. Обґрунтовано застосування методу акустичної емісії як ефективного засобу попередження про накопичення пошкодженості матеріалу конденсаторів. Встановлено, що показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява ж акустичної емісії на n-му термоциклі є попередженням про катастрофічне руйнування конструкції конденсатора через п'ять-десять циклів.*

*Ключові слова: конденсатор, компаунд, кераміка, міцність, термоцикл, акустична емісія, неруйнівний контроль, прогнозування міцності.*

V.O. PARKHOMENKO, V.P. ROYZMAN, A.V. GOROSHKO  
Khmelnitskyi National University

## ACOUSTICAL-EMISSION METHOD OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND FORECASTING STRENGTH OF COMPOUND CAPACITORS

*The methods and means of non-destructive testing and strength prediction of compound capacitors, which are subject to temperature fluctuations from +60 °C till -50 °C, are based on the use of the acoustic emission method. Studies of the behavior of ceramics and compounds under the influence of mechanical loading and in the conditions of thermal cycling are presented. The use of acoustic emission method as an effective means of preventing the accumulation of capacitor material damage is substantiated. Extended temperature range limits by increasing positive temperatures to +90 °C and negative to -60 °C. Separation of AE signals emitted by the compound and ceramic components of the K15-5 capacitor structure by frequency. It is established that the indication of the solid state of the structure is the manifestation of the Kaiser effect after the first two thermocycles, the appearance of the same acoustic emission on the nth thermocycler is a warning of the catastrophic destruction of the design of the capacitor after five to ten cycles.*

*Keywords: capacitor, compound, ceramics, strength, thermocycling, acoustic emission, non-destructive testing, strength prediction.*

**Постановка проблеми.** Якість і надійність виробів електронної техніки (ВЕТ) у значній мірі залежить від механічної міцності елементів, компонентів, друкованих плат і функціональних вузлів. Залежно від призначення ВЕТ можуть піддаватись різноманітним видам навантаження. Зокрема, виробі військової техніки експлуатуються у жорстких умовах теплових змін, механічних навантажень (статичних, динамічних та ударних), а також змін атмосферного тиску (ВЕТ, що експлуатуються на ракетах і літальних апаратах). Тенденція до зниження ваги і отримання великої щільності монтажу в малих габаритах ВЕТ, яка застосовується у виробках спеціального призначення, призвела до того, що деякі з елементів і компонентів ВЕТ, зокрема конденсатори і резистори, маючи високі радіотехнічні характеристики, виявилися недостатньо механічно міцними. Піддаючись впливу температурних статичних і динамічних навантажень, вони руйнуються, що призводить до відмов окремих вузлів або апаратури в цілому. Поряд з вдосконаленням конструкції функціональних вузлів ВЕТ і елементів, таких як широко поширені керамічні конденсатори, перспективним видається розробка методів і засобів аналізу і прогнозування їх механічної міцності як на етапі виробництва, так і під час експлуатації. Оцінку міцності матеріалу можна давати, використовуючи методи неруйнівного контролю під час випробувань. Такими методами можна також виявляти потенційно ненадійні з точки зору механічної точності ВЕТ, що у перспективі знизить рівень браку і зменшить витрати на ліквідацію наслідків відмов ВЕТ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світі проблема механічної міцності ВЕТ є актуальною і вирішується в основному конструкторськими і технологічними методами на етапі виготовлення. Наприклад, у роботі [1] автори застосовують лазерні методи підвищення надійності деяких електричних і електронних компонентів, що включають технологію з'єднання, модифікації поверхні, точного формування і лазерного зварювання. У роботі [2] автори досліджують міцність гнучких елементів ВЕТ і методи забезпечення стійкості до деформації цих гнучких пристроїв, а також шляхи підвищення їх довговічності. В роботі [3] автори пропонують методи розрахунку і оцінювання пошкоджень в електронних паяних з'єднаннях за умов дії випадкової вібрації на друкованій платі. Результати досліджень вітчизняних і закордонних вчених, висвітлені у останніх публікаціях, показують, що на сьогодні відсутні надійні методи неруйнівного контролю і технічного діагностування компаундованих конденсаторів. Існують лише окремі дослідження, направлені на підвищення надійності виготовлення плівкових конденсаторів [4], підвищення міцності на відрив конденсаторів з високою щільністю електричної енергії [5]. У роботах [6, 7] автор на базі накопиченого досвіду у вивченні і усуненні дефектів міцності електронних виробів через механічний вплив розкриває проблеми механічної міцності під час проектування, виготовлення та випробування цих виробів, в тому числі силової електроніки. Представлені теоретичні та експериментальні дослідження статистичної та

динамічної прогнозики типових компонентів: резисторів, конденсаторів, мікросхем друкованої плати та діодів мікромодулів у робочих умовах, запропоновані неруйнівні методи контролю, діагностування та прогнозування міцності елементів ВЕТ з використанням методу акустичної емісії (АЕ). Над цими проблемами працювали також вчені: Цасюк В.В., Ковтун І.І., Петрашук С.А., Горошко А.В. [8, 9].

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Під неруйнівним контролем (НК) розуміються такі види контролю, які, не змінюючи якості, параметрів і характеристик виробів, дозволяють за непрямыми «вторинними» ознаками виявляти приховані дефекти або такі особливості, які тягнуть за собою потенційну ненадійність виробів. Методи НК, що використовуються для контролю якості та прогнозування надійності ВЕТ, умовно поділяють на дві групи: загальні методи НК, широко використовувані в різних областях сучасної техніки, і спеціальні методи, пов'язані зі специфічними особливостями і характеристиками ВЕТ, що базуються на деяких особливостях фізичних процесів, що мають місце при їх роботі [8]. Для оцінювання і контролю пошкодження кераміки конденсатора і компаунда в поточний момент часу і для діагностування їх міцності з урахуванням заданого режиму експлуатації був обраний метод АЕ, що встановлює взаємозв'язок кінетики накопичення пошкодження матеріалу зі зміною параметрів сигналів АЕ внаслідок силового впливу. Отже, мета роботи полягала у розробці методики дослідження і прогнозування механічної міцності ВЕТ на основі використання явища АЕ. При цьому необхідно було виявити характерні для керамічних матеріалів джерела АЕ, оцінити вплив низки факторів на параметри АЕ, виявити найінформативніший параметр АЕ крихких керамічних матеріалів, знайти надійний спосіб визначення границі їх міцності  $\sigma_b$ , виявити закономірності деформування і руйнування крихких керамік за допомогою методу АЕ, розробити ефективний метод розрахунку полів напружень по всьому об'єму або поверхні виробу і провести самі розрахунки.

**Результати досліджень.** Для досягнення мети необхідно було експериментально встановити область використання методу АЕ для виявлення дефектів в керамічних конденсаторах К15-5 (рис. 1), розробити методи і засоби НК і прогнозування міцності конденсаторів з використанням явища АЕ. Конденсатори, які використовувалися для досліджень, мали номінальну постійну напругу 50 кВ, номінальну ємність 470 пФ, допустиму реактивну потужність 10 ВАр, масу 80 г.

В роботі [7] науково обгрунтовано, що однією з основних причин відмови керамічних конденсаторів К10-17 і К15-5 є розтріскування в результаті дії термосилового навантаження, що виникає при різкому перепаді температур. Встановлено, що руйнування кераміки в конструкції К15-5 при термоциклюванні походить від її розтягування в напрямку поздовжніх осей дисків і по майданчиках, нахилених до торців дисків під кутом 45°, через стиснення в радіальних напрямках від дії компаунда (рис. 2, 3). Для глибшого розуміння процесів руйнування компаундів застосовувався метод фрактографії, виконаної за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМП-6 (рис. 4). Розрахунки методом скінчених елементів показали, що максимальні еквівалентні напруження в керамічному блоці конденсатора К10-17 дорівнюють при герметизації компаундом ЕК-23 98 МПа; компаундом УП2191 – 190 МПа; компаундом ЕФП-СБ – 115 МПа.

Випробування зразків компаундів ЕК-23 і ЕК-50, які використовуються для виготовлення конденсаторів, здійснювали з реєстрацією сигналів АЕ і з використанням розривної машини. Для реєстрації та обробки сигналів АЕ використовувалася програмно-апаратна система реєстрації АЕ.

Обробивши експериментальні дані методами математичної статистики, були встановлені порогові рівні напружень у компаунді і кераміці, які є безпечними для конструкції конденсатора.



Рис. 1. Конденсатор К15-5

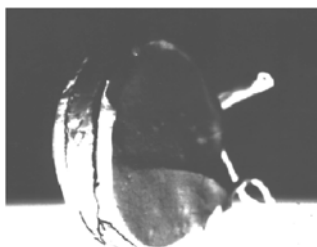


Рис. 2. Вигляд руйнування кераміки конденсатора

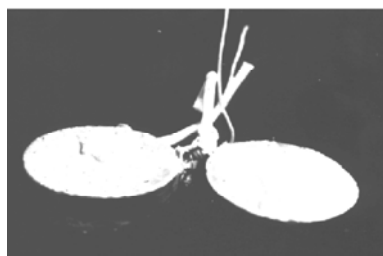


Рис. 3. Рельєф поверхні руйнування конденсатора

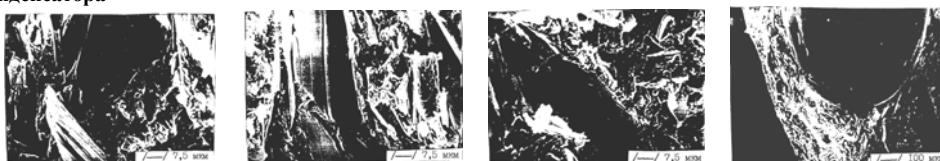
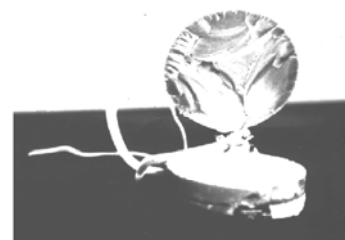


Рис. 4. Фрактографія компаунда ЕК-50

На рис. 5 представлена типова тривимірна діаграма залежності активності сигналів АЕ від часу і координати при розтягуванні зразків компаундів.

Результати випробування конденсаторів навантаженням із записом АЕ представлені на рис. 6–9.

Додатково встановлено, що кераміка і компаунд під час навантаження випромінюють сигнали АЕ

різних частот, а саме кераміка – 650...1000 кГц, компаунд – 130...300 кГц. Цей факт дає змогу диференціювати за частотою сигнали від кераміки і компаунда.

Попередні випробування показали, що датчик П113 працездатний в інтервалі температур від +50°C до -40°C.

Проте при температурах від +50°C до +85°C на покази датчика впливали завади, пов'язані з різницею у коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових датчика. При переході до від'ємних температур через це ж, а також і через обмерзання в районі від +1,2°C до +5°C також виникали помилкові сигнали АЕ. Щоб не піддавати датчики дії несприятливих для них температур, було вирішено використати хвилеводи.

Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від позитивних температур до від'ємних і назад, було вирішено поставити експеримент в вакуумі. Для цього була виготовлена невелика вакуумна установка (рис. 10), всередині якої розміщувався випробуваний об'єкт із закріпленими на ньому датчиком АЕ і датчиком температури. Розрідження, яке дорівнює 740 мм ртутного стовпа, що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестованому зразку і хвилеводі.

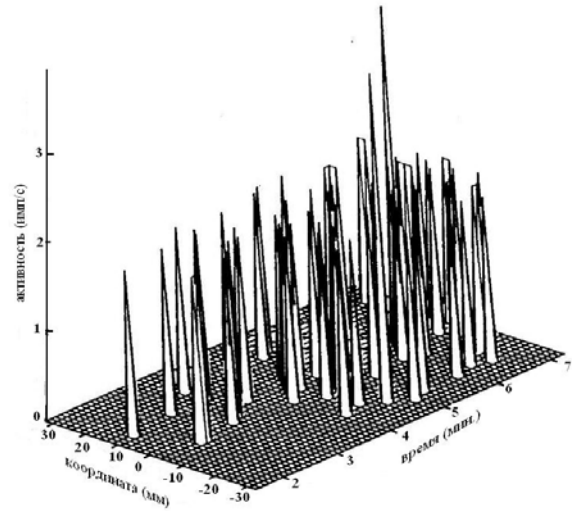


Рис. 5. 3-D діаграма АЕ

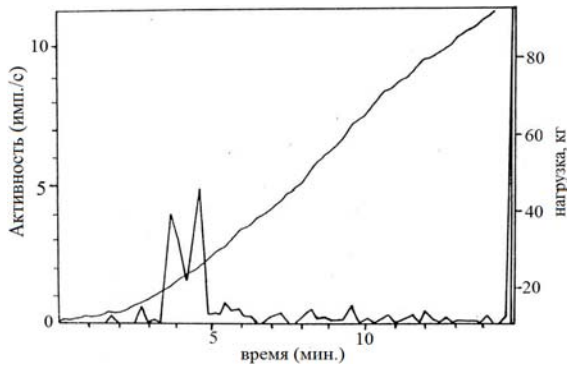


Рис. 6. Залежність активності сигналів АЕ від часу і навантаження при згині зразка конденсатора

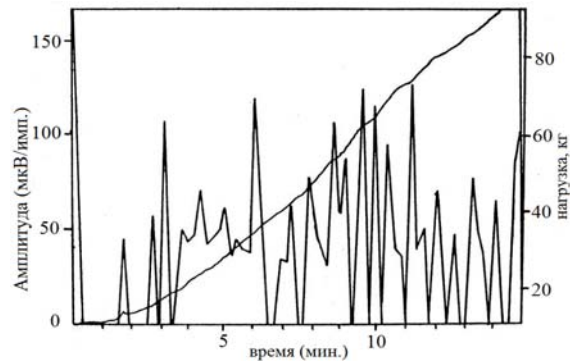


Рис. 7. Зміна амплітуди сигналів АЕ від часу і навантаження при згині зразка конденсатора

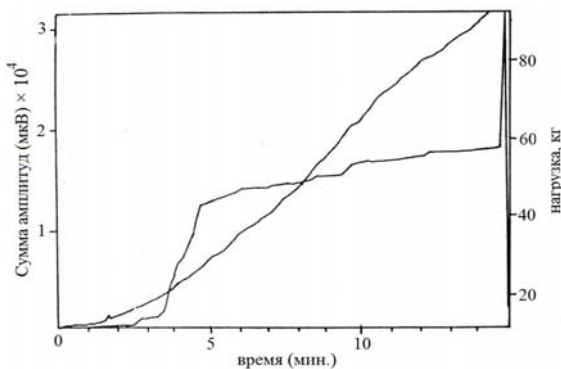


Рис. 8. Сума амплітуд сигналів АЕ при згині зразка конденсатора

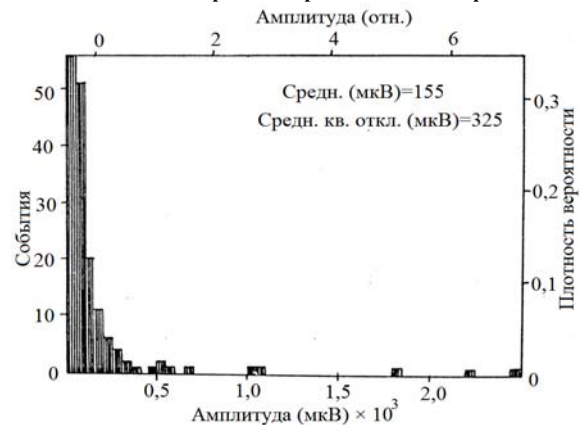


Рис. 9. Амплітудний розподіл сигналів АЕ при згині зразка конденсатора

В результаті досліджень було сформовано методику НК і прогнозування міцності конденсаторів К15-5:

1) прояв ефекту Кайзера, тобто відсутність сигналів АЕ після перших двох термоударів свідчить про нормальний міцний стан конструкції;

2) якщо на  $n$ -му термоциклі знову з'являються сигнали АЕ, порівнювані з сигналами, отриманими при першому циклі, це є попередженням про початок процесу катастрофічного руйнування і така конструкція буде зруйнована через п'ять-десять циклів;

3) якщо при підвищенні температури від -50°C до -10°C з'являються сплески АЕ, то це свідчить про наявність і розвиток тріщини в конструкції.

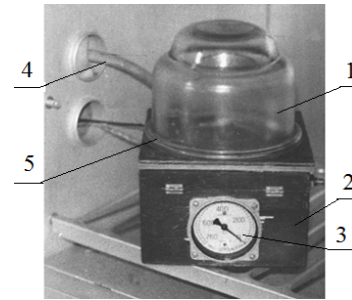
В останніх двох випадках конструкція визнається дефектною.

**Висновки**

1. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які містять сталеві, керамічні, пластмасові деталі, здатні випромінювати АЕ при термоциклюванні. Датчик П113 працездатний у діапазоні від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Підібрано хвилевод для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза неї, що дозволило розширити границі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до  $+90^{\circ}\text{C}$  і від'ємних до  $-60^{\circ}\text{C}$ .

2. Здійснено поділ сигналів АЕ, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конденсатора К15-5 за частотою. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає для кераміки К-15 650...1000 кГц; для компаунда ЕК-242 – 130...300 кГц.

3. Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К15-5, що працюють в умовах термоциклювання від  $+60^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ . Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на  $n$ -му термоциклі є попередженням про катастрофічне руйнування конструкції конденсатора через п'ять-десять циклів.



1 – вакуумна камера; 2 – основа камери; 3 – вакууметр; 4 – вакуумний шланг; 5 – кабель датчика АЕ

**Рис. 10. Вакуумна установка**

**Література**

1. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. – 2017. – P. 459–462.
2. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H-J. Chung // Journal of materials science. – 2016. – P. 2771–2805.
3. Grieu M. et al. Durability modelling of a BGA component under random vibration / Grieu M. et al. // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. – 2008. – P. 1–8.
4. Samant S. P. et al. Directed self-assembly of block copolymers for high breakdown strength polymer film capacitors / Samant S. P. et al. // ACS applied materials & interfaces. – 2016. – P. 7966–7976.
5. Wen R. et al. Nanocomposite capacitors with significantly enhanced energy density and breakdown strength utilizing a small loading of monolayer titania / W. Rongmei, G. Junmeng, Zh. Chunlin, L. Yanqing // Advanced Materials Interfaces. – 2018. – Т. 5. – № 3. – P. 1701088.
6. Royzman V. Ways to improve strength reliability of electronics elements and systems / Vilen Royzman // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE Cat. No. 02EX542). IEEE. – 2002. – P. 187–190.
7. Ройзман В. П. Механика в электронике : [в 3 т.] / В. П. Ройзман. – Хмельницький : ХНУ, 2015.
8. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET2012, February 21–24, Lviv-Slavske, Ukraine. – 2012.
9. Goroshko A. V. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics / A. V. Goroshko, V. P. Royzman, A. Bubulis, K. Juzėnas // Journal of Vibroengineering. Vol. 16. Issue 5. – 2014. – P. 2178–2187.

**References**

1. Pawlak R. Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies / R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak // 2017 MIXDES-24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. IEEE. – 2017. – P. 459–462.
2. Harris K. D. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies / K. D. Harris, A. L. Elias, H-J. Chung // Journal of materials science. – 2016. – P. 2771–2805.
3. Grieu M. et al. Durability modelling of a BGA component under random vibration / Grieu M. et al. // EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. IEEE. – 2008. – P. 1–8.
4. Samant S. P. et al. Directed self-assembly of block copolymers for high breakdown strength polymer film capacitors / Samant S. P. et al. // ACS applied materials & interfaces. – 2016. – P. 7966–7976.
5. Wen R. et al. Nanocomposite capacitors with significantly enhanced energy density and breakdown strength utilizing a small loading of monolayer titania / W. Rongmei, G. Junmeng, Zh. Chunlin, L. Yanqing // Advanced Materials Interfaces. – 2018. – Т. 5. – № 3. – P. 1701088.
6. Royzman V. Ways to improve strength reliability of electronics elements and systems / Vilen Royzman // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE Cat. No. 02EX542). IEEE. – 2002. – P. 187–190.
7. Roizman V. P. Mekhanyka v elektronikyke : [v 3 t.] / V. P. Roizman. – Khmelnytskyi : KhNU, 2015.
8. Royzman V. Diagnosing of Technical State of the Products of Electronics by Acoustic Emission method / Vilen Royzman, Andrii Goroshko, Oleg Shinkaruk // TCSET2012, February 21–24, Lviv-Slavske, Ukraine. – 2012.
9. Goroshko A. V. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics / A. V. Goroshko, V. P. Royzman, A. Bubulis, K. Juzėnas // Journal of Vibroengineering. Vol. 16. Issue 5. – 2014. – P. 2178–2187.