измерениях и в результатах обработки возможно минимизировать только с применением 3D-КИМ и 3D-моделей.

## Список использованных источников

1. *Веремей Г. А.* Математическое моделирование формообразования восстанавливаемых поверхностей седла клапана в газораспределительном механизме / Г. А. Веремей // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки” : наук. зб. – 2014. – № 1(71). – С. 127–134.

2. *Дефектация* деталей автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.irsautoyoucar.ru/car_dismantlin/142.html.

3. *Дефектация* деталей и сопряжений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mehanik-ua.ru/lektsii-rmo/109-defektatsiya-detalej-i-sopryazhenij.html.

4. *Дунин-Барковский И. В.* Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.

5. *Дьяконов В.* MATHCAD 8/2000 : специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2000. – 592 с.

6. *Кашуба Л. А.* Геометрия реальных поверхностей деталей изделий машиностроения / Л. А. Кашуба, Д. М. Жук, В. Б. Маничев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 72–79.

7. *Порошин В. В.* Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей : монография / В. В. Порошин. – М., 2007. – 196 с.

8. *Профилометры* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovatosti-profilometri-profilemeri.htm.

9. *Ремонт* головки блока цилиндров – профессионально и доступно [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.motortehn.ru/News/Message/ORR1PYA.html.

10. *Хусу А. П.* Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 438 с.

11. *International* ISO Standard 4287 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ebookspdfs.org/download/iso-4287.

*УДК 620.179:534.6*

**О.П. Космач**, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

# СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗПОДІЛУ МОДЕЛЬНИХ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ЗМІНІ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ВУЗЛА ТЕРТЯ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

**А.П. Космач**, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ УЗЛА ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Oleksandr Kosmach**, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

# STATISTICAL CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTION OF MODEL ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AT CHANGES OF ROTATIONAL SPEED OF FRICTION UNIT OF COMPOSITE MATERIALS

*Проведено моделювання результуючих сигналів акустичної емісії при зміні швидкості обертання вузла тертя із композиційних матеріалів. Проведено оброблення модельних сигналів акустичної емісії з визначенням статистичних моментів третього та четвертого порядків для кожного прийнятого значення швидкості обертання пари тертя із композиційних матеріалів. Показано, що у разі збільшення швидкості обертання вузла тертя із композиційних матеріалів відбувається зростання значень статистичних моментів третього та четвертого порядків як амплітуди, так і енергії сигналу акустичної емісії на стадії нормального зношування поверхонь вузла тертя. При цьому найбільший приріст значень статистичних моментів третього та четвертого порядків спостерігається для кое-*

*фіцієнта ексцесу енергії результуючих сигналів акустичної емісії, а найменший приріст відповідає коефіцієнту ексцесу амплітуди результуючих сигналів акустичної емісії.*

***Ключові слова**: акустична емісія, амплітуда, аналіз, асиметрія, енергія, коефіцієнт, композиційний матеріал, обертання, приріст, статистичний момент, швидкість.*

*Проведено моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменении скорости вращения узла трения из композиционных материалов. Проведена обработка модельных сигналов акустической эмиссии с определением статистических моментов третьего и четвертого порядков для каждого принятого значения скорости вращения пары трения из композиционных материалов. Показано, что при увеличении скорости вращения узла трения из композиционных материалов происходит рост значений статистических моментов третьего и четвертого порядков как амплитуды, так и энергии сигнала акустической эмиссии на стадии нормального износа поверхностей узла трения. При этом наибольший прирост значений статистических моментов третьего и четвертого порядков наблюдается для коэффициента эксцесса энергии результирующих сигналов акустической эмиссии, а наименьший прирост соответствует коэффициенту эксцесса амплитуды результирующих сигналов акустической эмиссии.*

***Ключевые слова:** акустическая эмиссия, амплитуда, анализ, асимметрия, энергия, коэффициент, композиционный материал, прирост, статистический момент, скорость.*

*The simulation results of acoustic emission signals at change of rotational speed of friction unit of composite materials were conducted. Were carried out the processing of model acoustic emission signals with definition of statistical moments of the third and fourth order for each assumed value of rotational speed of friction unit of composite materials. It was shown that that by increasing of rotational speed of friction unit of composite materials occurs growth of statistical moments of third and fourth orders values of amplitude and energy of the acoustic emission signal at stage of normal wear of friction surfaces of unit. The greatest increase in values of statistical moments of third and fourth order values was observed for coefficient of energy kurtosis of resultant acoustic emission signals, and the smallest increase corresponds to amplitude of coefficient of kurtosis of resultant acoustic emission signals.*

***Key words**: acoustic emission, amplitude, analysis, asymmetry, energy, coefficient, composite material, increase, statistical moment, speed.*

**Постановка проблеми.** Використання композиційних матеріалів (КМ) у різних галузях виробництва та транспорту дозволяє суттєво підвищити довговічність рухомих з'єднань машин за рахунок створення зносостійких покриттів на поверхнях основних матеріалів. При цьому варіація фізико-механічних властивостей КМ дозволяє адаптувати їх до екстремальних умов роботи рухомих з'єднань, що є надзвичайно актуальним з погляду терміну експлуатації та утилізації машини.

Основні напрямки наукових досліджень з використанням КМ пов'язані саме з оптимізацією вибору марок та типів КМ, оптимізацією режимів роботи самого вузла тертя, дослідження мікроструктурних перетворень, які утворюються в поверхневих шарах КМ, виявлення та ідентифікація мікро- та макродефектів поверхонь фрикційного контакту та ін. Водночас з цим у процесі використання таких матеріалів виникає необхідність у достовірному визначенні та виявлення мікро- та макропроцесів, які призводять до утворення необоротних змін або катастрофічного руйнування поверхневих шарів КМ.

З цією метою використовуються традиційні методи контролю вузлів тертя поверхонь із КМ, які основані на аналізі механічних показників, наприклад, коефіцієнта тертя, температури, втрат потужності тощо. Проте слід зазначити, що група цих методів дозволяє визначити лише макропроцеси катастрофічного зношування поверхонь, що значно збільшує часові та фінансові витрати, які пов'язані з подальшими ремонтними та відновлювальними роботами вузла тертя із КМ. Тому з позиції контролю та діагностики поверхневих шарів вузлів тертя із КМ ключовим завданням є фіксація саме мікропроцесів, які формуються та протікають на поверхнях фрикційного контакту і є початковими етапами зародження необоротних мікроструктурних процесів руйнування поверхневих шарів із КМ. Слід також відзначити, що таке дослідження процесів тертя та зношування КМ у першу чергу повинно ґрунтуватися на використанні високочутливих методів, які дозволяють отримати великі об'єми інформації про процеси контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту.

Останніми роками під час дослідження процесів взаємодії поверхневих шарів фрикційного контакту з традиційних матеріалів та КМ використовуються методи неруйнівного контролю, які мають високу чутливість до мікропроцесів, що постійно змінюються та розвиваються. До таких методів відносять вихрострумовий метод, вібраційний

метод, методи вимірювання трибоелектрорушійної сили та опору провідності, а також метод акустичної емісії (АЕ). До основних переваг методу АЕ можна віднести його високу чутливість до процесів контактної взаємодії поверхонь, які протікають на мікрорівні; відсутність впливу власних вібрацій елементів вузла тертя на параметри формованого сигналу; інформування в режимі реального часу; інтегральність та висока проникаюча здатність; можливість автоматизації, а також безпечність.

Низька інерційність та висока чутливість методу АЕ потребує встановлення залежностей між параметрами акустичного випромінювання та характеристиками процесів, які формуються під час тертя поверхонь із КМ. Розв'язання цієї задачі повинно ґрунтуватися, у першу чергу, на результатах теоретичних досліджень на основі моделювання акустичного випромінювання з залученням статистичних методів та методів обробки сигналів. Такі дослідження дозволяють провести інтерпретацію акустичного випромінювання, визначити залежності параметрів акустичного випромінювання при дії різних факторів. Комплекс теоретичних досліджень є основою при удосконаленні методів АЕ контролю та діагностики вузлів тертя із КМ.

Результати багатьох досліджень показують, що експлуатаційні показники вузла тертя, зокрема, швидкість обертання вузла тертя є одним з факторів, який впливає на динаміку процесу тертя та зношування, а отже, як результат, і на формований сигнал АЕ, а також його основні параметри. При цьому найчастіше аналізується середній рівень та величина розкиду формованого сигналу АЕ, тобто визначаються статистичні моменти першого та другого порядків. Слід зазначити, що статистичні моменти вищих порядків також несуть у собі інформацію про процеси, які формуються та протікають у поверхневих шарах вузла тертя із КМ. Дослідження таких параметрів сигналів АЕ практично не проводилися в науковій літературі.

З урахуванням вищевикладеного, а також з метою подальшого розвитку методу АЕ в контролі та діагностуванні вузлів тертя із КМ, актуальним напрямком досліджень є аналіз статистичних моментів третього та четвертого порядків модельних результуючих сигналів АЕ, які формуються при зміні швидкості обертання вузла тертя із КМ на стадії його нормального зношування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод АЕ знаходить своє використання під час дослідження процесів контактної взаємодії поверхонь матеріалів з кристалічною структурою та КМ [1–3]. Результати досліджень показують, що формовані сигнали АЕ мають складний характер зміни на різних стадіях взаємодії поверхонь фрикційного контакту. Така видозміна акустичного випромінювання свідчить у першу чергу про низьку інерційність методу та його високу чутливість до мікропроцесів, які протікають у поверхневих шарах матеріалів. Однак при цьому на сьогодні інтерпретація цих процесів є ключовою проблемою, яка обмежує використання методу АЕ в діагностуванні фрикційних вузлів з як традиційних матеріалів, так і КМ. При цьому завдання ускладнюється через великі обсяги теоретичних та експериментальних досліджень, а також специфіку експериментального обладнання. Завдання інтерпретації акустичного випромінювання знаходять свої часткові вирішення завдяки розробленню стохастичних моделей сигналів АЕ, проте визначення об'єктивно наявних зв'язків між параметрами акустичного випромінювання та фізичними процесами, які протікають у поверхневих шарах фрикційного контакту, такі моделі не дозволяють отримати.

У працях [4–6] були розглянуті результати моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, яка враховує імпульсний характер формування сигналу АЕ з окремих джерел та неперервну послідовну зміну елементарних площадок контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту, який має визначені фізико-механічні характеристики та розміри. При цьому результуючий сигнал АЕ [7]

представляється як сума імпульсних сигналів АЕ, які формуються на окремих елементарних площадках контактної взаємодії у вигляді виразу виду

$$U_p(t) = \sum_{j=1} U_j(t - t_j) = U_1(t - 1 \cdot \Delta t_1 - \delta_1) + U_2(t - 2 \cdot \Delta t_2 - \delta_2) + ... + U_m(t - m \cdot \Delta t_m - \delta_m), \quad (1)$$

де $j$ – порядковий номер площадки контактної взаємодії ( $j$ = 1, 2, 3, ..., $m$); $U_j(t_j)$ – $j$-ий імпульсний сигнал АЕ, який формується на $j$-ій площадці контактної взаємодії; $t_j$ – момент часу появи $j$-го сигналу АЕ; $m$ – загальна кількість імпульсних сигналів АЕ, які формуються за визначений період роботи вузла тертя згідно з прийнятим планом випробування, $\Delta t_m$ – інтервал часу між початком появи наступного та попереднього імпульсного сигналу АЕ; $\delta$ – випадкова складова в момент часу появи кожного наступного сигналу АЕ.

Моменти часу $t_j$ появи окремих $j$-их імпульсних сигналів АЕ у виразі (1) можна представити у вигляді суми стаціонарної та випадкової складових процесу. При цьому стаціонарна складова $\Delta t_j$ залежить від розмірів елементів КМ, а також розмірів елементарної площадки контактної взаємодії. У свою чергу випадкова складова $\delta$ в момент появи імпульсного сигналу АЕ обумовлена варіацією властивостей елементів КМ, а також нестабільністю положення площадки контактної взаємодії в загальній площі перекриття поверхонь.

Вихідними даними для моделювання результуючих сигналів АЕ, згідно з виразом (1), є наступне. Вузол тертя являє собою фрикційний контакт двох елементів, один з яких здійснює переміщення або обертання відносного іншого на визначеному часовому проміжку. Площадка контактної взаємодії являє собою деяку малу та змінну в часі площу перекриття поверхонь, яка рівномірно заповнена виступами та впадинами в загальній площі контактної взаємодії.

При зміні відносного розташування поверхонь фрикційного контакту в межах визначеної площадки контактної взаємодії відповідно до розробленої імпульсної моделі сигналу АЕ [8] відбувається руйнування деякої визначеної кількості $N_0$ елементів КМ під дією постійної поперечної сили, яка викликана відносним переміщенням поверхонь фрикційного контакту. При цьому елементи КМ мають визначені фізико-механічні характеристики та розміри.

Зміна положення площадки контактної взаємодії в часі забезпечується відповідною швидкістю обертання вузла тертя, а характер фрикційної взаємодії поверхонь визначається відповідною швидкістю прикладення навантаження. Задана швидкість обертання та величина прикладеного навантаження до вузла тертя, з урахуванням характеристик елементів КМ, визначають закономірність зміни еквівалентних напружень та порогового напруження початку руйнування в часі при початку руйнування елементів КМ.

Згідно з рівнянням (1), з урахуванням [8], можна провести моделювання амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ, які формуються в умовах тертя поверхонь із КМ при зміні швидкості їх відносного переміщення з метою визначення закономірностей зміни статистичних моментів третього та четвертого порядків.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** У сучасних дослідженнях сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь як традиційних, так і КМ, частіше всього аналізуються статистичні моменти першого та другого порядків. Проте слід зазначити, що статистичні моменти вищих порядків сигналів АЕ можуть бути характеристиками мікропроцесів, які протікають під час тертя поверхонь із КМ. Тому визначення закономірностей зміни статистичних моментів вищих порядків результуючих сигналів АЕ при зміні швидкості обертання вузла тертя із КМ є актуальним напрямком наукових досліджень.

**Формулювання мети статті.** У роботі буде проведено аналіз закономірностей зміни статистичних моментів третього та четвертого порядків амплітуди та енергії модельних результуючих сигналів АЕ, які формуються при різних швидкостях обертання вузла тертя із КМ. Буде показано, що зростання швидкості обертання вузла тертя приводить до зростання значень статистичних моментів третього та четвертого порядків амплітуди та енергії результуючих сигналів акустичної емісії. При цьому найбільший приріст значень статистичних моментів третього та четвертого порядків буде спостерігатися в енергії результуючих сигналів АЕ, а найменший приріст буде відповідати коефіцієнту ексцесу амплітуди результуючого сигналу АЕ.

**Виклад основного матеріалу.** Результати експериментальних досліджень показують, що зміна швидкості обертання вузла тертя із КМ призводить до зміни поверхневих контактних напружень, процесів їх мікроруйнування, а також похідних показників. Для навантажених поверхонь фрикційного контакту із КМ це означає, що при збільшенні кінетичної сили, внаслідок зростання швидкості обертання вузла тертя, відбувається зростання локальної швидкості зміни еквівалентних напружень.

У цій роботі було проведено аналіз статистичних моментів вищих порядків амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ при зростанні швидкості обертання вузла тертя із КМ за умови постійності дії величини прикладеного навантаження, а також постійності фізико-механічних характеристик матеріалів та лінійних розмірів одиничних елементів.

Дослідження статистичних моментів вищих порядків амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, полягало в наступному. Спочатку було проведено моделювання чотирьох результуючих сигналів АЕ на стадії нормального зношування поверхонь тертя із КМ при різних значеннях швидкості обертання вузла тертя. Обсяг вибірки для всіх досліджуваних сигналів АЕ був однаковим та становив 800 значень. Після цього було проведено моделювання миттєвої енергії результуючого сигналу АЕ згідно з виразом $E_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |U(\mathrm{t})|^2 \, dt$. На наступному етапі проводилось оброблення отриманих значень амплітуд та енергій результуючих сигналів АЕ, що полягало у визначенні статистичних моментів третього та четвертого порядків відповідно до загальноприйнятих виразів [9]. При цьому обсяг вибірок для кожного модельного сигналу АЕ становив 40 значень. Таким чином, у ході дослідження кожної швидкості обертання вузла тертя із КМ був визначений груповий діапазон, який складався з 20 вибірок. Після цього проводилося усереднення значень вибірок з визначенням рівня параметра сигналу для кожного значення швидкості обертання вузла тертя із КМ. Подальшим етапом досліджень було визначення закономірностей зміни статистичних моментів третього та четвертого порядків амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ залежно від швидкості обертання вузла тертя із КМ.

Результати попередніх досліджень показують, що при збільшенні швидкості обертання вузла тертя із КМ [10] відбувається зменшення тривалості формованого імпульсного сигналу АЕ, а також зменшення значення випадкової складової його появи. Тому при моделюванні результуючих сигналів АЕ зі збільшенням швидкості обертання вузла тертя зменшувалися значення випадкової складової появи окремого імпульсного сигналу АЕ. Слід зазначити, що випадкова складова появи імпульсного сигналу АЕ впливає як на форму результуючого сигналу АЕ, так і на його основні амплітудно-енергетичні параметри. При цьому визначення залежностей між випадковою складовою появи окремого імпульсного сигналу АЕ та факторами, які впливають на процес тертя поверхонь із КМ, є достатньо складним завданням. Тому з врахуванням динаміки процесу тертя поверхонь при моделюванні результуючих сигналів АЕ вважалося, що залежність між швидкістю обертання вузла тертя та випадковою складовою появи імпульсного сигналу АЕ є лінійною та оберненою.

З урахуванням прийнятих вище умов було проведено моделювання сигналів АЕ при різних значеннях швидкості обертання тертя із КМ. При моделюванні всі параметри, які входять у вираз (1), були приведені до безрозмірних величин. Моделювання сигналів АЕ проводилося у відносних одиницях при наступних величинах. Значення параметрів $\tilde{\upsilon}_0$, $\tilde{r}$, $\tilde{g}$, які входять у модель імпульсного сигналу АЕ [8], були прийняті наступні: $\tilde{\upsilon}_0$=$10^6$; $\tilde{r}$ =$10^4$; $\tilde{g}$ =0,1. Величина $\tilde{\alpha}$, яка характеризує швидкість навантаження елементарних площадок вузла тертя із КМ, змінювалася в межах від 100 до 400 з кроком приросту $\Delta\tilde{\alpha}$=100. Час початку руйнування $\tilde{t}_0$ початкової площадки контактної взаємодії у відносних одиницях для прийнятого порогового напруження руйнування $\tilde{\sigma}_0$ =0,1019419 становив $\tilde{t}_0$=0,0012 згідно з [8].

Значення інтервалу часу $\Delta\tilde{t}_j$, який характеризує швидкість зміни площадок контактної взаємодії, а отже, і швидкість обертання вузла тертя із КМ, для $\tilde{\alpha}$ =100 був прийнятий рівним $\Delta\tilde{t}_j$ =1,1·$10^{-6}$ з урахуванням тривалості одиничного імпульсного сигналу АЕ [8]. При цьому для прийнятого значення $\tilde{\alpha}$ величина $\delta$ змінювалася в межах від $\tilde{\delta}$ =0…5·$10^{-7}$ псевдовипадковим чином. Початкове значення параметра $\delta$ було прийнято з урахуванням лінійних розмірів елементів КМ, а також умов перекриття окремих імпульсних сигналів АЕ.

При моделюванні результуючих сигналів АЕ також вважалося, що розміри та форма елементарної площадки контактної взаємодії не змінювалися в часі у ході випробування зразків тертя із КМ, які працюють в умовах нормального зношування. При цьому поверхні фрикційного контакту із КМ повністю перекривалися між собою.

Результати моделювання результуючого сигналу АЕ для прийнятих граничних значень швидкості навантаження $\tilde{\alpha} = 100$ та $\tilde{\alpha} = 400$ у вигляді графіків зміни амплітуди $\tilde{U}$ для прийнятих значення вибірки *N* у відносних одиницях згідно з рівнянням (1) показано на рис. 1. Результати моделювання сигналів АЕ представлялися залежно від вибірки *N*, що є пропорційно часовому проміжку дослідження зразків тертя із КМ, тобто $T$=$\Delta t_d \cdot N$. Інтервал дискретизації результуючого сигналу АЕ $\Delta t_d$ становив $\Delta t_d$=1·$10^{-7}$.

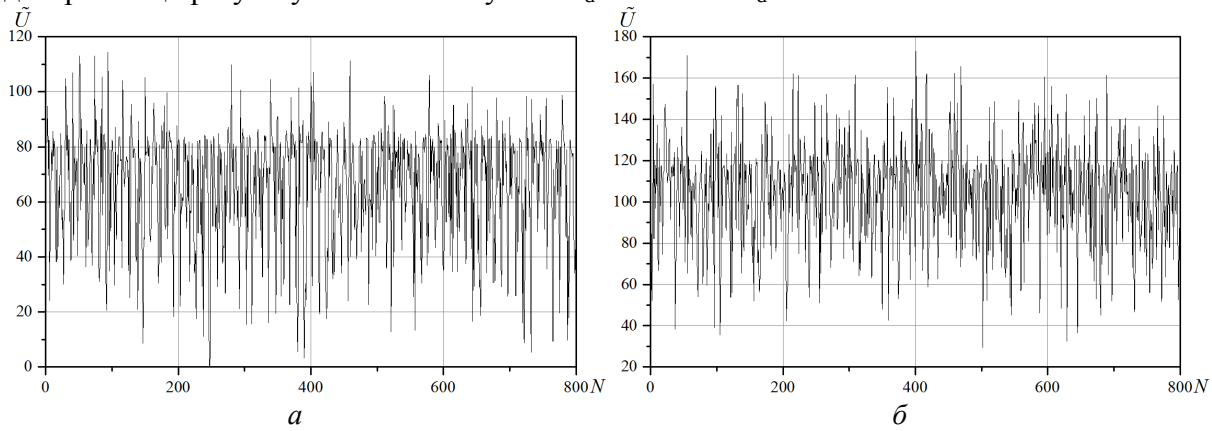


*Рис. 1. Зміна амплітуди результуючого сигналу акустичної емісії в часі при випробуванні вузла тертя із композиційних матеріалів на стадії його нормального зношування. Швидкість навантаження вузла тертя $\tilde{\alpha}$ = 100 (а) та $\tilde{\alpha}$ = 400 (б)*

Результати проведеного моделювання показують, що на стадії нормального зношування вузла тертя із КМ формується неперервний сигнал АЕ, який характеризується визначеним середнім рівнем та величиною розкиду. Зростання швидкості обертання вузла тертя із КМ приводить до зростання середнього рівня амплітуди $\tilde{\bar{U}}$ результуючих сигналів АЕ та величин її розкиду.

На рис. 2 показано результати обробки амплітуд сигналів АЕ, які формуються при терті поверхонь із КМ з визначенням коефіцієнта асиметрії $\tilde{\gamma}_U$, коефіцієнта ексцесу $\tilde{K}_U$ для кожної вибірки, а також їх середнього рівня для прийнятого значення швидкості обертання вузла тертя із КМ. Результати досліджень показують, що кожній стадії роботи вузла тертя із КМ відповідає деяке середнє значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди результуючого сигналу АЕ. При цьому при збільшенні швидкості обертання вузла тертя із КМ значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди результуючого сигналу АЕ також відповідно зростають.

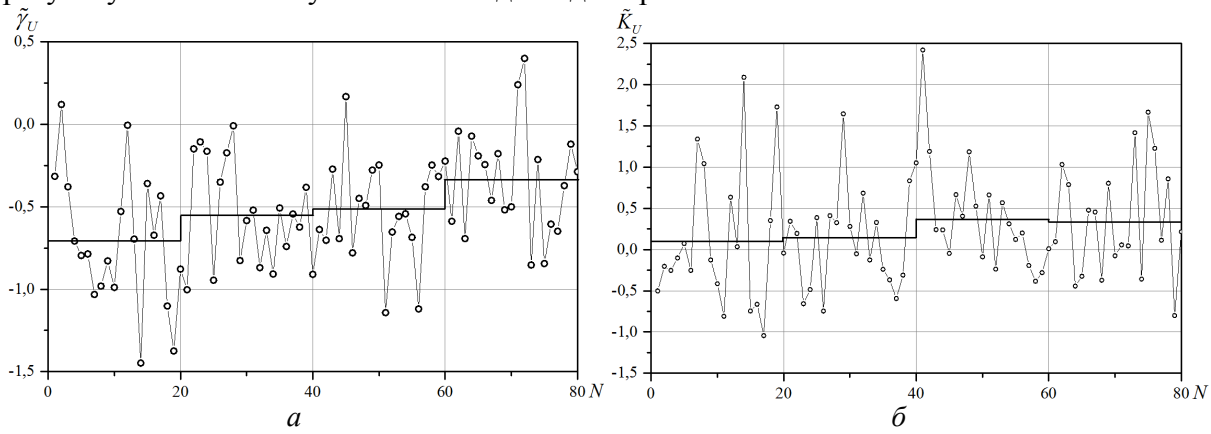


*Рис. 2. Закономірності зміни коефіцієнта асиметрії $\tilde{\gamma}_U$ (а) та коефіцієнта ексцесу $\tilde{K}_U$ (б) амплітуди результуючого сигналу акустичної емісії, який зареєстровано при різних швидкостях обертання вузла тертя із композиційних матеріалів*

Слід також зауважити, що при збільшенні швидкості обертання вузла тертя значення коефіцієнта асиметрії все більше наближається до нуля. Такий характер зміни коефіцієнта асиметрії свідчить про наближеність до симетричного розподілу амплітуди сигналу АЕ, що буде відповідати нормальним умовам спряження контактуючих поверхонь вузла тертя із КМ, які мають визначені фізико-механічні характеристики та елементарні розміри. Результати моделювання також показали, що приріст значень коефіцієнта асиметрії перевищує приріст значень коефіцієнта ексцесу амплітуди результуючого сигналу АЕ при зміні швидкості обертання вузла тертя із КМ.

Результати моделювання результуючого сигналу АЕ для прийнятих граничних значень швидкості навантаження $\tilde{\alpha} = 100$ та $\tilde{\alpha} = 400$ у вигляді графіків зміни енергії $\tilde{E}$ для прийнятих значення вибірки $N$ у відносних одиницях згідно з рівнянням (1) показано на рис. 3.

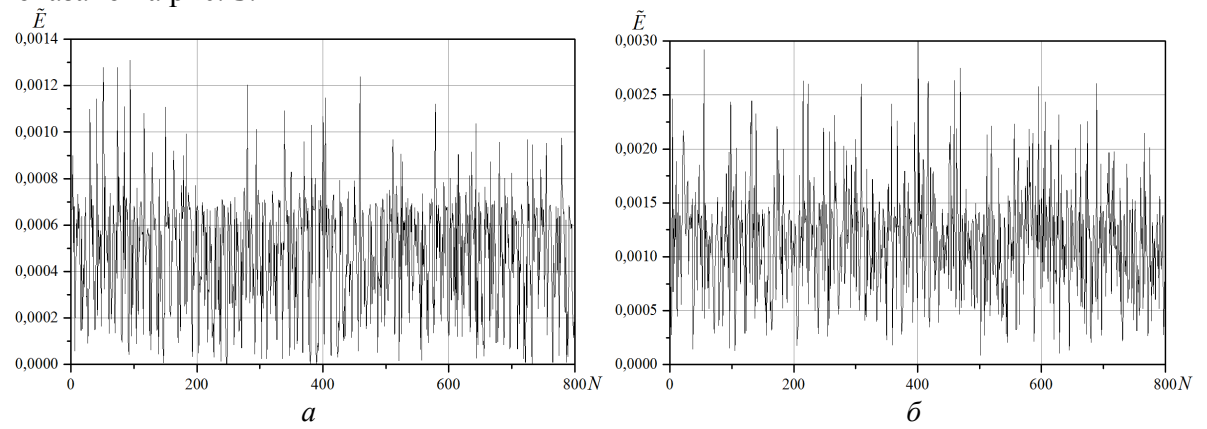


*Рис. 3. Зміна енергії результуючого сигналу акустичної емісії в часі при випробуванні вузла тертя із композиційних матеріалів на стадії його нормального зношування. Швидкість навантаження вузла тертя $\tilde{\alpha} = 100$ (а) та $\tilde{\alpha} = 400$ (б)*

Результати моделювання показали, що зростання швидкості обертання вузла тертя із КМ також приводить до зростання середнього рівня енергії $\tilde{\bar{E}}$ результуючих сигналів АЕ, а також величин її розкиду.

На рис. 4 показано результати обробки енергій результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ з визначенням коефіцієнта асиметрії $\tilde{\gamma}_E$, коефіцієнта ексцесу $\tilde{K}_E$ для кожної вибірки, а також їх середнього рівня для прийнятого значення швидкості обертання вузла тертя із КМ.

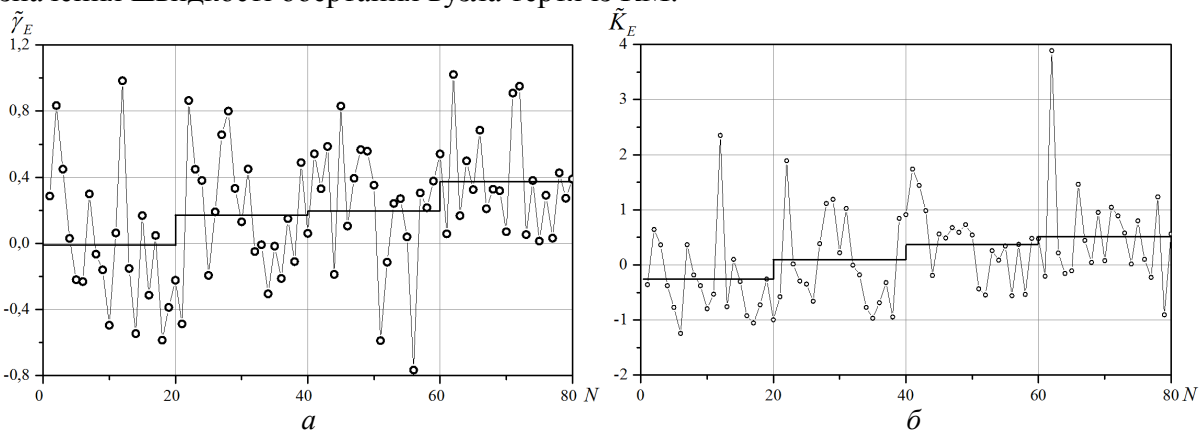


*Рис. 4. Закономірності зміни коефіцієнта асиметрії $\tilde{\gamma}_E$ (а) та коефіцієнта ексцесу $\tilde{K}_E$ (б) енергії результуючого сигналу акустичної емісії, який зареєстровано при різних швидкостях обертання вузла тертя із композиційних матеріалів*

Результати моделювання показують, що кожній стадії роботи вузла тертя із КМ також відповідає деяке значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу енергії результуючого сигналу АЕ. При цьому при збільшенні швидкості обертання вузла тертя із КМ значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу енергії сигналу АЕ відповідно зростають. Слід також відзначити, що мінімальному значенню швидкості обертання вузла тертя відповідають значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, які наближаються до нуля, тобто до нормального розподілу енергії результуючого сигналу АЕ. Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що енергетичні параметри результуючих сигналів АЕ (статистичні моменти третього та четвертого порядків), на відміну від амплітудних параметрів, більш чутливі до процесів, які протікають при мінімальній контактній взаємодії поверхонь тертя поверхонь із КМ.

Як і для амплітудних параметрів сигналів АЕ при збільшенні швидкості обертання вузла тертя із КМ спостерігається також зростання значень енергетичних параметрів сигналів АЕ. Проте слід зауважити, що значення коефіцієнтів ексцесу амплітуди сигналу АЕ знаходяться в межах від'ємних значень, на відміну від значень коефіцієнтів ексцесу енергії результуючого сигналу АЕ. Збільшення швидкості обертання вузла тертя із КМ, на відміну від значень коефіцієнта ексцесу амплітуди сигналу АЕ, характеризується більшим зростанням значень коефіцієнта ексцесу енергії сигналу АЕ. Результати моделювання також показали, що приріст значень коефіцієнта ексцесу перевищує приріст значень коефіцієнта асиметрії енергії результуючого сигналу АЕ при зміні швидкості обертання вузла тертя із КМ.

На рис. 5 показано абсолютний приріст значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ, які формуються на прийнятому діапазоні швидкостей обертання вузла тертя із КМ.

З рис. 5 видно, що приріст значень коефіцієнтів асиметрії амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ є подібний між собою. При цьому приріст значень коефіцієнта ексцесу амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ суттєво відрізняється між со-

бою. Мінімальний приріст значень коефіцієнта ексцесу відповідає амплітуді результуючого сигналу АЕ, а максимальний приріст значень відповідно відповідає значенням коефіцієнта ексцесу енергії результуючого сигналу АЕ.

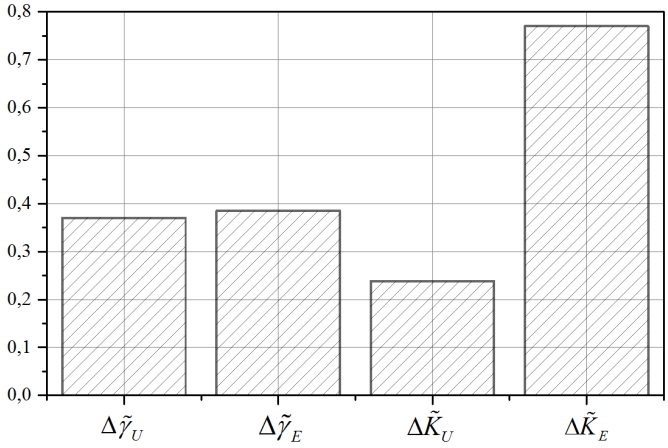


*Рис. 5. Абсолютний приріст значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди та енергії результуючих сигналів акустичної емісії, які формуються при терті поверхонь із композиційних матеріалів*

**Висновки і пропозиції.** Проведено моделювання амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ, які формуються при різних швидкостях обертання вузла тертя із КМ. Проведено визначення статистичних моментів вищих порядків амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ, які формуються при терті поверхонь із КМ. При цьому було визначено, що при збільшенні швидкості обертання вузла тертя із КМ значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ відповідно зростають.

Встановлено, що швидкість обертання вузла тертя із КМ по-різному впливає на закономірності зміни коефіцієнтів асиметрії та ексцесу амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ. При збільшенні швидкості обертання вузла тертя значення коефіцієнта асиметрії амплітуди результуючого сигналу АЕ все більше наближається до нуля. При цьому мінімальному значенню швидкості обертання вузла тертя відповідають значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, які наближаються до нуля, тобто до нормального розподілу енергії результуючого сигналу АЕ. Збільшення швидкості обертання вузла тертя із КМ, на відміну від значень коефіцієнта ексцесу амплітуди сигналу АЕ, характеризується більшим зростанням значень коефіцієнта ексцесу енергії сигналу АЕ.

Приріст значень коефіцієнтів асиметрії амплітуди та енергії результуючого сигналу АЕ, який формується при різних швидкостях обертання вузла тертя із КМ, подібний між собою. Проте приріст значень коефіцієнта ексцесу амплітуди та енергії результуючих сигналів АЕ суттєво відрізняється між собою. Мінімальний приріст значень коефіцієнта ексцесу відповідає амплітуді результуючого сигналу АЕ, а максимальний приріст значень відповідає значенням коефіцієнта ексцесу енергії результуючого сигналу АЕ, що відповідає найбільшій чутливості серед досліджених амплітудних та енергетичних параметрів сигналів АЕ. Це означає, що у процесі експериментальних досліджень результуючих сигналів АЕ, які формуються при різних швидкостях обертання вузла тертя із КМ, найменшої чутилвості слід очікувати для коефіцієнта ексцесу амплітуди сигналу АЕ, а найбільшої – для коефіцієнта ексцесу енергії сигналу АЕ. При цьому у ході аналізу асиметрії розподілу результуючого сигналу АЕ можна розглядати як амплітудну, так і енергетичну складову сигналу АЕ.

Перспективним напрямком досліджень є аналіз статистичних моментів вищих порядків амплітуд та енергій результуючих сигналів АЕ, які формуються при різних навантаженнях вузла тертя із КМ.

## Список використаних джерел

1. *Liao C.*, Suo S., Wang Y., Huang W., Liu Y. Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques // Tribology transactions. – 2012. – Vol. 55. – № 1. – P. 43–51.

2. *Hong E.*, Kaplin, B., You T., Suh M., Kim Y.S., Choe H. Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles // Wear. – 2010. – Vol. 270. – P. 591–597.

3. *Об образовании* и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В. Н. Стадниченко, Н. Г. Стадниченко, Р. Н. Джус, О. Н. Трошин // Вестн. науки и техн. – Харьков : ХДНТ и НТУ “ХПИ”, 2004. – № 1(16). – С. 18–27.

4. *Filonenko S.* Model of acoustic emission signal at the prevailing mechanism of composite material mechanical destruction / S. Filonenko, T. Nimchenko, O. Kosmach // Aviation. – 2010. – Vol. 4(14). – P. 95–103.

6. *Filonenko S.* Impact of rotational speed of composite friction pair on energy accumulation in acoustic emission signal formation / S. Filonenko, O. Kosmach // Aviation. – 2013. – Vol. 17 (4). – P. 129–136.

7. *Філоненко С. Ф.* Модель сигналу акустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів / С. Ф. Філоненко, Т. Н. Косицька, О. П. Космач // Наукоємні технології. – 2010. – № 2(6). – С. 30–38.

8. *Filonenko S.* Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation / S. Filonenko, V. Kalita, O. Kosmach // Aviation. – 2012. – Vol. 1(16). – P. 1–9.

9. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – Питер, 2006. – 751 с.

10. *Филоненко С. Ф.* Моделирование акустического излучения при изменении скорости вращения пары трения из композиционных материалов / С. Ф. Филоненко, О. П. Космач // Технологические системы. – 2013. – № 1. – С. 73–81.

*УДК 621.923.42*

**М.В. Міщенко,** канд. техн. наук
**Г.В. Пасов,** канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

# АВАРІЙНИЙ РЕМОНТ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ГАЗ-544 І ЙОГО МОДИФІКАЦІЙ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ ВНАСЛІДОК КОНСТРУКТИВНОГО ПРОРАХУНКУ

**Н.В. Мищенко**, канд. техн. наук
**Г.В. Пасов**, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

# АВАРИЙНЫЙ РЕМОНТ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗ-544 И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ В СВЯЗИ С КОНСТРУКТИВНОЙ НЕДОРАБОТКОЙ

**Mykola Mishchenko**, PhD in Technical Sciences
**Hennadii Pasov**, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

# EMERGENCY REPAIR OF DIESEL GAS-544 AND ITS MODIFICATIONS IN FIELD IN CONNECTION WITH DESIGN FLAWS

*Представлено аналіз відомих способів виділення уламка болта з’єднання головки циліндра та картера, а також запропоновано новий спосіб, який не потребує спеціального дорогого обладнання та може бути виконаний у будь-яких, у тому числі і польових умовах.*

***Ключові слова:*** *двигун, картер, головка циліндра, ремонт, уламок, зварювання.*

*Представлен анализ известных способов удаления обломка болта соединения головки цилиндра и картера, а также предложен новый способ, который не требует специального дорогого оборудования и может быть реализован в любых, в том числе и полевых условиях.*

***Ключевые слова****: двигатель, картер, головка цилиндра, ремонт, обломок, сварка.*

*The analysis of the known methods to remove fragments of the bolt connection of the cylinder head and crankcase, as well as a new method that does not require special expensive equipment and can be implemented in all, including field*

***Key words****: engine, crankcase, cylinder head, repair, fragment, welding.*