

КАСКАДНИЙ ТРАНСПОРТ ЕНЕРГІЇ ЗБУРЕНЬ В СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОЇ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Методами часового і спектрального аналізу сигналів акустичної емісії досліджені каскадні процеси передачі енергії вихоро-хвильових збурень в системах динамічної контактної взаємодії. Встановлено, що крім відомих для систем гідродинамічної турбулентності каскадних процесів з суцільним спектром збурень, для нестационарних процесів контактної взаємодії деформівних твердих тіл характерні також каскадні процеси з дискретним спектром, обумовлені внутрішнім синтезом когерентних структур руху. Відмічено нерівноважний характер каскадного транспорту енергії збурень та пов'язану з цим високу чутливість і адаптивність трибосистеми до зміни внутрішніх та зовнішніх умов її функціонування.

Ключові слова: енергетичний каскад, контактна взаємодія, динаміка, вихоро-хвильові збурення, турбулентність, когерентна структура, спектр.

YU.P. ZASPA, S.G. KOSTOGRIZ

Khmelnytsky National University

THE PERTURBATIVE CASCADE ENERGY TRANSPORTATION IN THE DYNAMIC CONTACT INTERACTION SYSTEMS

Cascade energy transfer processes of the vortex-wave disturbances in the dynamic contact interaction are investigated by the methods of temporal and spectral analysis of acoustic emission signals. It was identified that besides the known to the hydrodynamic turbulence systems cascade processes with continuous spectrum of perturbations, for non-stationary processes of the contact interaction of the deformable elements cascading processes with the discrete spectrum resulting from the internal synthesis coherent movement structures. The unbalanced mode of the perturbative cascade energy transportation and the associated with that high sensitivity and adaptability of tribosystem to change the internal and the external conditions of its functioning are marked.

Keywords: energetic cascade, contact interaction, dynamics, vortex-wave disturbance, turbulence, coherent structure, spectrum.

Вступ

Каскадні процеси передачі енергії лежать в основі сучасних теорій гідродинамічної турбулентності [1–3]. Нестационарна контактна взаємодія деформівних твердих тіл, однак, не описується в термінах каскадного транспорту енергії вихоро-хвильових збурень. Між тим, в механічних системах, що містять обертальні (роторні) елементи, які контактують із статорною частиною, або ж між собою, нестационарне поле швидкостей частинок матеріалу неодмінно включає вихорову компоненту. Це дозволяє априорно допустити можливість енергетичних каскадів не тільки в гідродинамічних, але й в твердотільних контактних системах, застосовуючи до них добре розвинутий теоретичний апарат гідродинамічної теорії турбулентності.

Особливістю твердотільних контактних систем є одночасна присутність потенційної компоненти поля швидкостей, обумовлена пружним характером взаємодії деформівних твердих тіл. Ця особливість завідомо обмежує повноту описання нестационарної контактної взаємодії цих тіл на основі одних лише каскадних моделей турбулентності нестискуваної рідини.

Таким чином, теоретичне описання динаміки нестационарної контактної взаємодії деформівних твердих тіл із врахуванням каскадного транспорту енергії вихоро-хвильових збурень є складною і досі не вирішеною проблемою. В зв'язку з цим особливий інтерес представляють експериментальні методи дослідження згаданих вище процесів. Завданням роботи є встановлення фізичних механізмів та особливостей каскадного транспорту енергії збурень на основі експериментальних методів дослідження, в першу чергу, із застосуванням спектрального аналізу акустичної емісії, що супроводжує процеси динамічної контактної взаємодії.

Технічне обладнання та методика експерименту

В роботі досліджені різноманітні процеси динамічної контактної взаємодії, що супроводжувались акустичною емісією: зокрема, процеси руху тіл кочення по площині основи, а також взаємодія робочих елементів машин (кутової шліфувальної, точильної) з оброблюваним матеріалом. Вивчались процеси внутрішньої взаємодії контактуючих елементів цих машин в режимах холостого ходу, а також акустична емісія експериментальної машини тертя, розробленої для дослідження номінально нерухомих фрикційних з'єднань в умовах фретингу [4]. Сигнали акустичної емісії (АЕ) реєструвались портативними комп'ютерами з вмонтованим, а також з виносним мікрофоном, в діапазоні частот 5 Гц – 20 кГц. Подальша спектральна обробка записаних сигналів АЕ здійснювалась із застосуванням стандартного програмного забезпечення (швидкого перетворення Фур'є).

Експериментальні результати та їх обговорення

На рис. 1 в якості прикладів наведені експериментально отримані спектри сигналів АЕ від різних джерел динамічної контактної взаємодії. Спектри рис. 1а, в містять квазілінійні ділянки (в логарифмічному масштабі частот), характерні для каскадних процесів гідродинамічної турбулентності [1–3]:

$$I(\nu) \sim \nu^{-\gamma}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність спектральної складової, ν – частота збурення, γ – показник степені. Зокрема, довгохвильове крило спектру на рис. 1а при $\gamma \approx -1,5$ можна поставити у відповідність оберненому каскаду енергії квазидвовимірної гідродинамічної турбулентності [1]. Короткохвильове крило спектру на рис. 1в при $\gamma \approx -3$ відповідає каскаду енстрофії (квадрата завихреності) в спектрах квазидвовимірної турбулентності [1]. Енергетична накачка відмічених каскадів є достатньо широкополосною з центром ≈ 9 кГц (рис. 1а) та ≈ 2 кГц (рис. 1в). Фізичним механізмом накачки у даному випадку виступають: контактна взаємодія абразивної частини круга точильної машини з металом (рис. 1а) та квазіномальні контактні коливання кульки підшипника на площині дзеркала (рис. 1в).

Водночас, спектри, показані на рис. 1, містять когерентні частотні складові, не характерні для гідродинамічної турбулентності. Ці складові переважно знаходяться в середній, а також у довгохвильовій ділянках спектрів. Механізми їх виникнення дещо різняться. Так дискретні компоненти спектру на рис. 1а обумовлені дисбалансом ротора машини. Водночас, дискретні компоненти спектрів на рис. 1б–г, не пов'язані з таким дисбалансом, слід віднести на рахунок утворення когерентних структур руху в процесі динамічної саморегуляції трибосистеми. Найбільш виразно цей процес позначається на спектрі рис. 1б – у вигляді майже еквідистантних спектральних ліній лівіше роторної частоти (≈ 200 Гц).

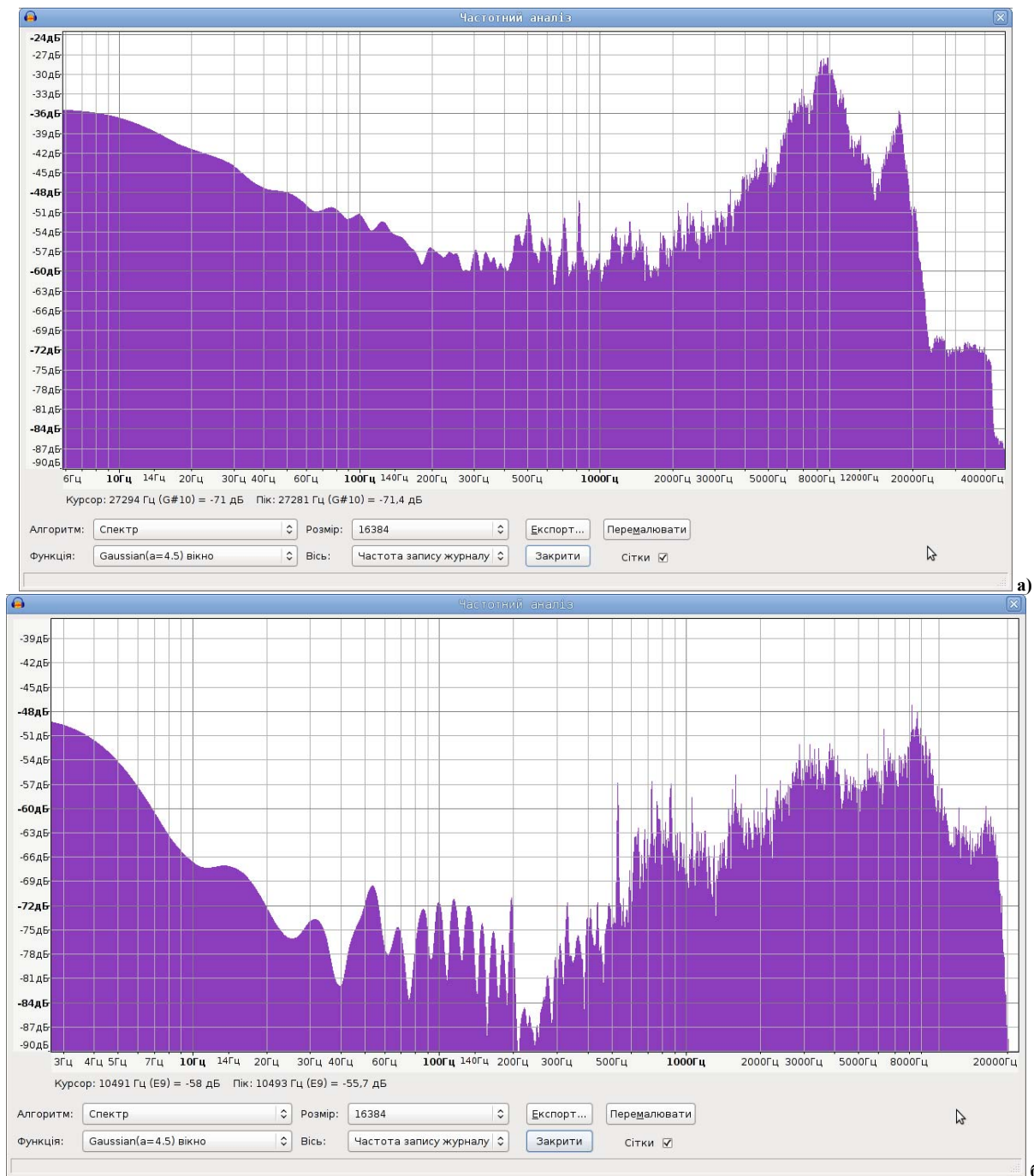


Рис. 1. Спектри сигналів акустичної емісії, отриманих в процесі заточки металевої смуги диском точильної машини (а), холостого ходу кутової шліфувальної машини (б)

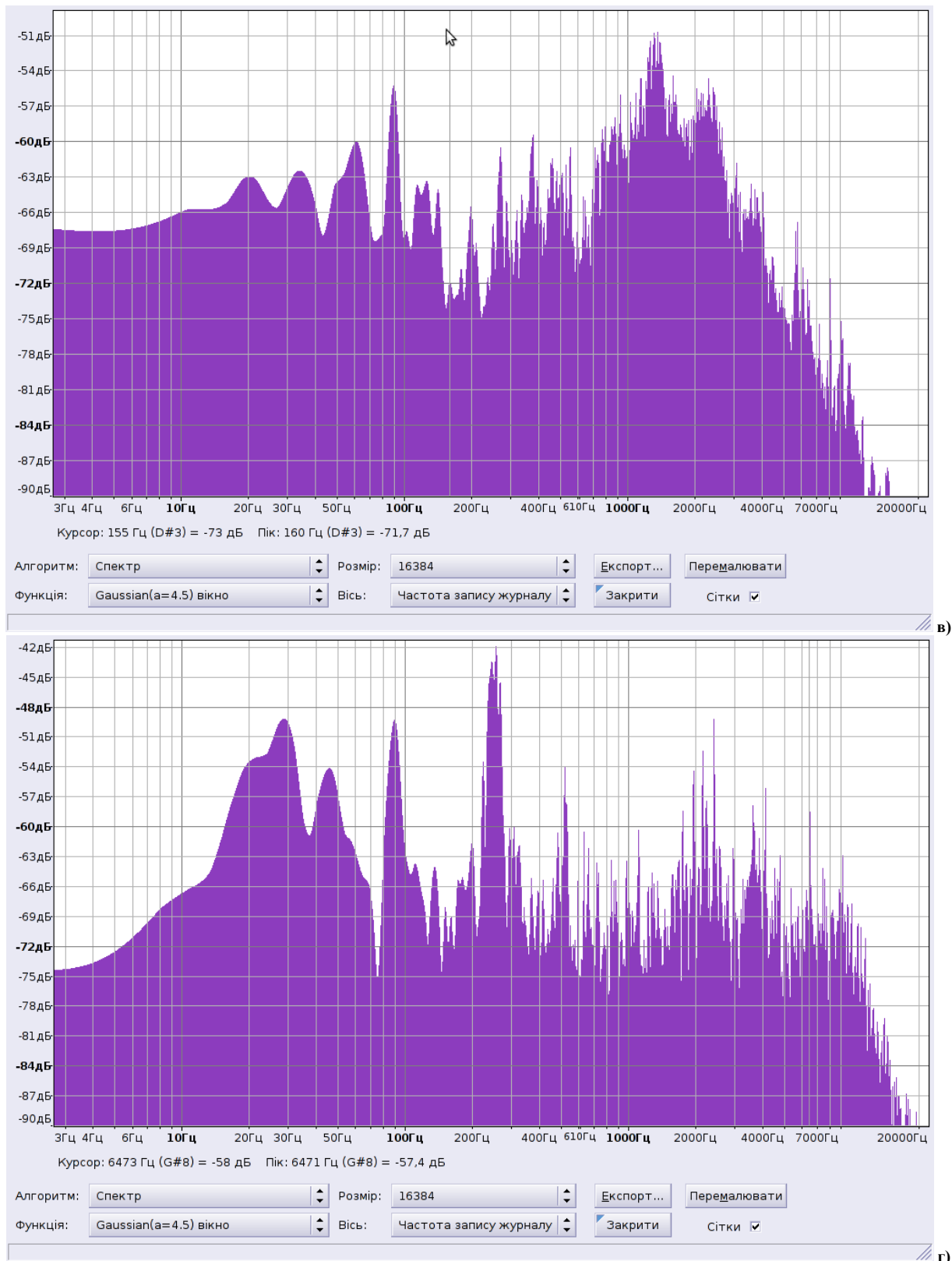


Рис. 1. (продовження). Спектри сигналів кочення кульки підшипника діаметром 13,5 мм горизонтальною площиною дзеркала (в), кочення кульки підшипника діаметром 6 мм похилою площиною дзеркала (г).

В основі внутрішнього синтезу когерентних структур руху лежать саме каскадні процеси передачі енергії по спектру збурень. Ці процеси явно виражені на різномасштабних осцилограмах сигналів акустичної емісії – рис. 2–4. Як видно з рис. 2, низькочастотна автомодуляційна складова сигналу (≈ 30 Гц) утворена каскадом середньочастотних (≈ 150 Гц) складових. Час існування окремого масштабу збурень, як видно (рис. 3–4), обмежений часом когерентності [5], причому спостерігається перенос енергії як від більших часових масштабів до менших (прямий каскад), так і в зворотному напрямі – рис. 3, 4. Після зміни режиму контактної взаємодії поступово встановлюється стаціонарний режим – рис. 2а, в якому

інтенсивності прямого і зворотного енергетичних каскадів умовно вирівнюються. Однак, такий стан є суттєво нерівноважним і вкрай чутливим (адаптивним) до зміни зовнішніх і внутрішніх умов в динамічній трибосистемі. Для прикладу на рис. 5 показана спектральна динаміка збурень, що відповідає осцилограмі сигналу АЕ, наведений на рис. 2а. Тут в процесі заточки металеві смуги диском кутової шліфувальної машини плавно збільшується нормальне контактне зусилля (в ручному режимі). Як видно, на перших етапах заточки (рис. 5а, б) домінують довгохвильові автомодуляційні збурення, а роторна частота (≈ 200 Гц) в спектрі проявлена відносно слабо. На завершальному етапі (рис. 5г) в зв'язку із збільшенням контактного стиску, навпаки, домінує каскад відносно вузьких середньочастотних ліній, що бере початок від роторної частоти (≈ 150 Гц).

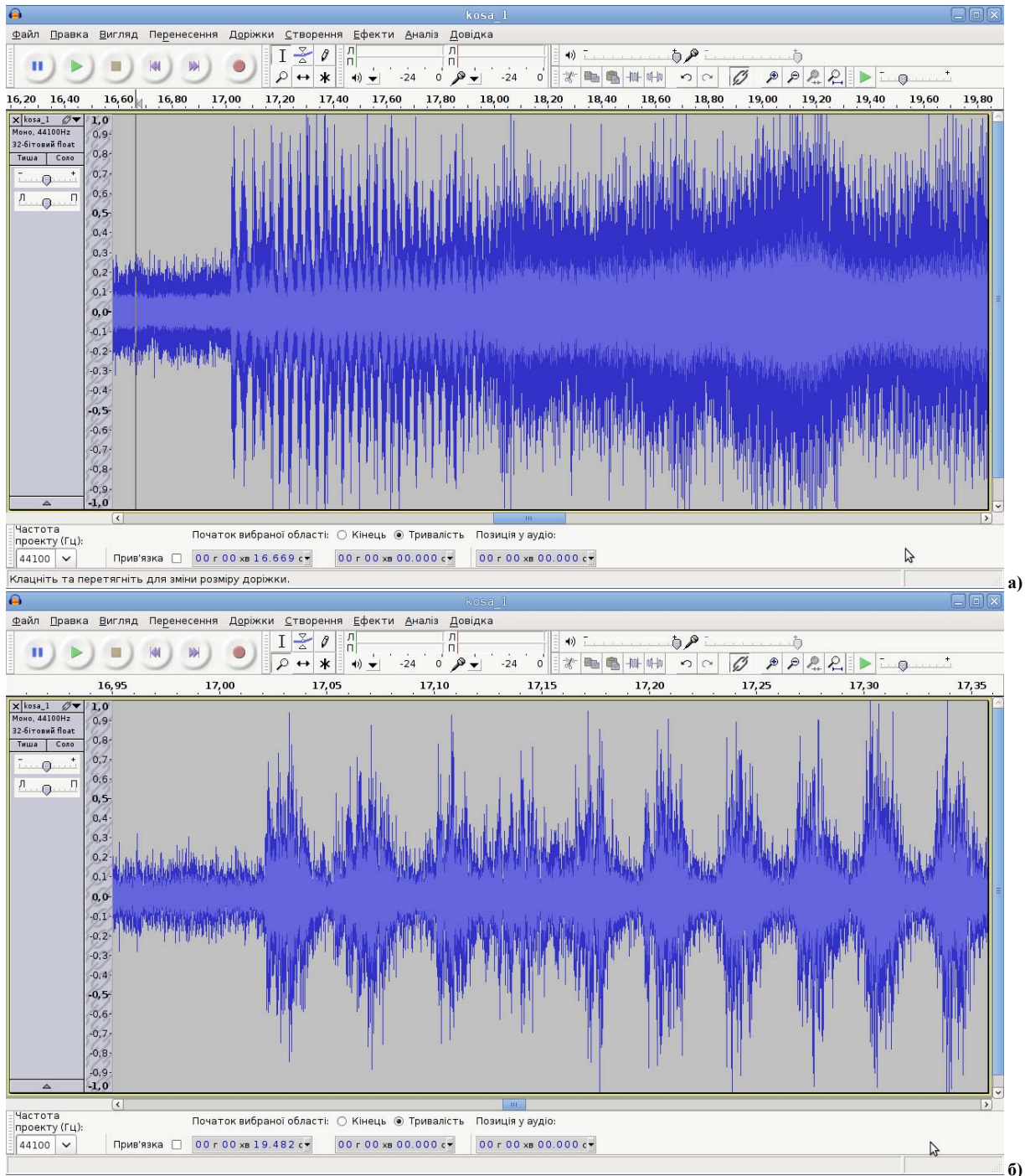


Рис. 2. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ, що супроводжує процес заточки металеві смуги диском кутової шліфувальної машини

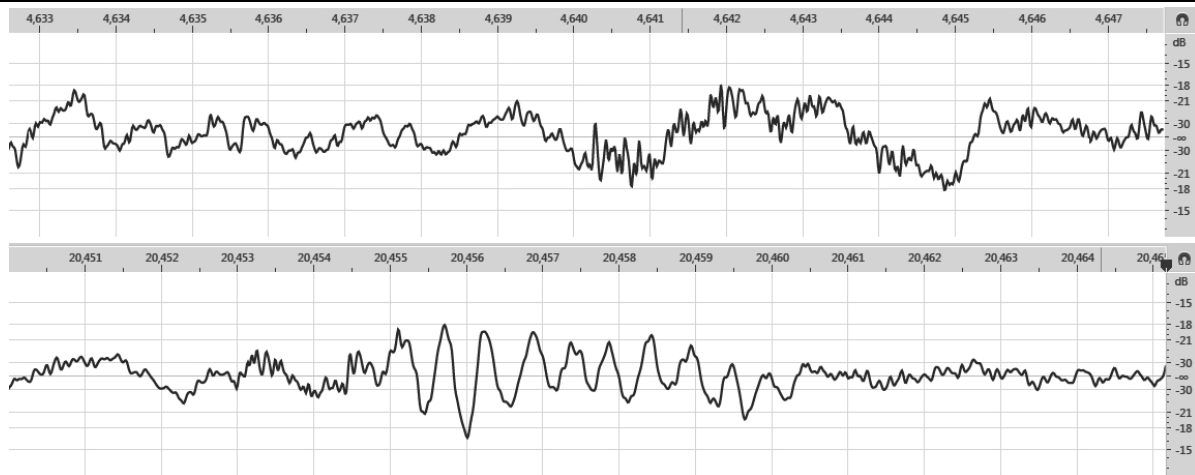


Рис. 3. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ, зареєстрованого в процесі роботи дослідної машини тертя

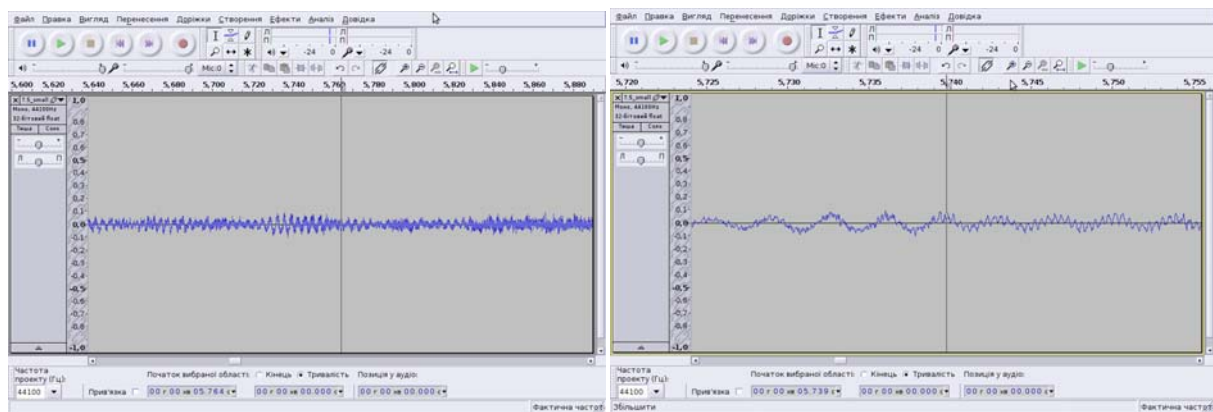


Рис. 4. Різномасштабні осцилограми сигналу АЕ при коченні кульки підшипника діаметром 6 мм похилою площиною дзеркала

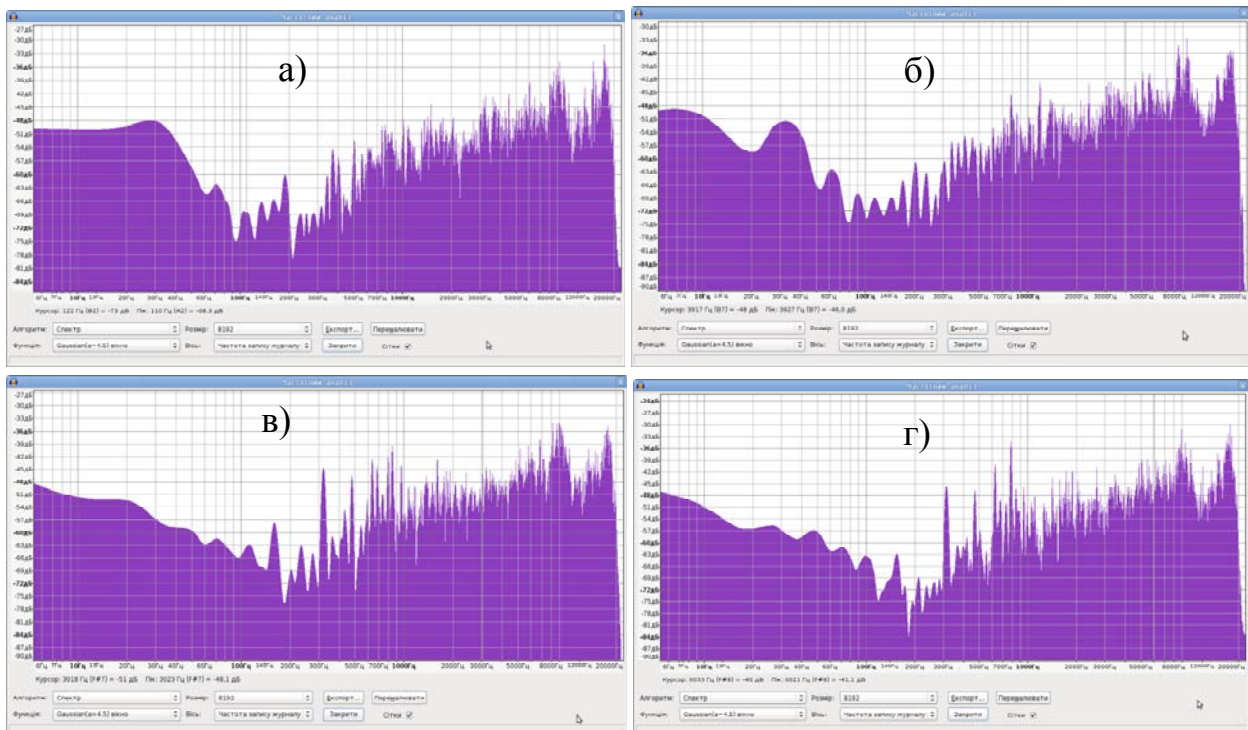


Рис. 5. Спектри сигналу АЕ, показаного на рис. 2а, в часових інтервалах (секунди): 17,0–17,3 (а), 17,6–17,9 (б), 18,2–18,5 (в), 18,5–18,8 (г)

Висновки

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтверджують наявність каскадних процесів передачі енергії вихоро-хвильових збурень в системах динамічної контактної взаємодії деформівних твердих тіл.

В роторних контактних системах, де нестационарне поле швидкостей елементів матеріалу близьке

до двовимірного, спостерігаються прямі і обернені каскади, характерні для квазидвовимірної гідродинамічної турбулентності. Водночас, суттєвою відмінністю каскадних процесів передачі енергії в контактних системах деформівних твердих тіл є участь когерентних структур руху в транспорті енергії збурень.

Нестационарне вихоро-хвильове поле збурень, утворене в результаті динамічної саморегуляції трибосистеми, є нерівноважним і високо адаптивним до зміни внутрішніх і зовнішніх умов її функціонування.

Література

1. Данилов С.Д. Квазидвумерная турбулентность / С.Д. Данилов, Д. Гурарий // Успехи физических наук. – 2000. – Т.170, № 9. – С. 922–968.
2. Степанов Р.А. О спектральных свойствах спиральной турбулентности / Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, А.В. Шестаков // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2009. – № 5. – С. 34–44.
3. Левшин А.О. Затухание спиральности в однородной турбулентности / А.О. Левшин, О.Г. Чхетиани // Письма в ЖЭТФ. – Т.98, вып. 10. – С. 670–675.
4. Пат. 69559А України. МПК G7601N3/00. Установка для дослідження матеріалів та покриттів в умовах фреттинг-процесів / Гончар В.В., Шалапко Ю.І., Каплун В.Г. – Опубл. 11.08.2003, Бюл. № 9.
5. Заспа Ю.П. Когерентная трибодинамика / Ю.П. Заспа // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 6. – С. 656–673.

References

1. Danylov S.D., Gurarii D. Kquazhdvumernaya Turbulentnost. Uspekhy fizycheskyh nauk. 2000, Vol.170, №9. P.922-968.
2. Stepanov R.A., Frik P.H., Shestakov A.V. O spectralnikh svoystvakh spyrалnoy turbulentnosty. Izv. RAN. Mechanics of fluid and gas. 2009, №5, P.34-44.
3. Levshin A.A., Chhetyany A.G. Zatuhaneye spyrалnosty v odnorodnoy turbulentnosty. Pis'ma v ZHETF, Vol. 98, Issue 10, P.670-675.
4. Pat. 69559A Ukraine. IPC G7601N3 / 00. Installation for study materials and coatings under fretting processes / Gonchar V.V., Shalapko YU.I., Kaplun V.G. Publish. 11.08.2003, Bull. №9.
5. Zaspа YU.P. Koherentnaya trybodynamyka. Trenye i iznos. 2012, vol. 33, №6, P.656-673.

Рецензія/Peer review : 8.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.