

Р. А. Андрощук, Ю. В. Гринюк

АНАЛІЗ СИГНАТУРИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ПРОЛЬОТУ КРИЛАТИХ РАКЕТ

У сучасних умовах повномасштабної агресії рф та загрози з боку високоточної зброї, зокрема крилатих ракет, питання своєчасного виявлення та ідентифікації повітряних цілей набуває особливої актуальності. Визначення сигнатури акустичного сигналу прольоту крилатих ракет є ключовим елементом у створенні ефективних систем акустичного моніторингу, що дозволяють оперативно реагувати на загрози та забезпечувати захист критичної інфраструктури. Аналіз джерела акустичного шуму під час прольоту крилатої ракети є важливим для виявлення та видачі цілевказівок на її знищення. Джерелами акустичного шуму прольоту крилатої ракети є реактивний двигун, аеродинамічні ефекти, контакт із поверхнею та вибух. Реактивний двигун генерує шум шляхом викиду газів із великою швидкістю, особливо під час старту ракети. Аеродинамічні ефекти, зокрема турбулентні потоки та ударні хвилі, також призводять до аеродинамічного шуму. Контакт із поверхнею та вибух під час зіткнення із цілями створюють додаткові шумові сигнали. Аналіз цих джерел шуму допомагає вдосконалювати системи виявлення та ідентифікації прольоту крилатих ракет. У статті наведено приклади зареєстрованих акустичних сигналів від прольоту крилатих ракет, визначено особливості побудови хвильової форми акустичного сигналу, його амплітудних, часових та спектральних параметрів, які дозволяють його ідентифікувати. Аналіз даних зареєстрованих сигналів показує характерні особливості хвильової форми та параметрів акустичних сигналів від прольоту крилатих ракет: тривалість акустичного сигналу, що реєструється, становить від 2–3 с до 12–15 с; акустичний сигнал реактивного (турбореактивного) двигуна має спектральний портрет із шумоподібною структурою, що займає смугу частот від десятків герц до 2,5–3 кГц та обмежується частотою у 8 кГц; максимум енергії сигналу зосереджено в області частот від 0,12 кГц до 0,6 кГц, найчастіше – на частотах близько 300 Гц; ширина спектра становить близько 1–2 кГц. Визначена сигнатура акустичного сигналу прольоту крилатих ракет може бути інтегрована в системи акустичного моніторингу для забезпечення комплексного спостереження (виявлення) та аналізу повітряних загроз.

Ключові слова: крилата ракета; акустичний сигнал; сигнатура; спектрограма; система акустичного моніторингу; виявлення та ідентифікація прольоту крилатої ракети.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Упродовж повномасштабної війни проти України рф активно використовує для знищення інфраструктури різні види ракетного озброєння в поєднанні з ударними безпілотними апаратами (БпЛА) типу Shahed. Аналіз повідомлень Генерального штабу Збройних Сил України, інших офіційних

джерел, а також аналітичних звітів [1–4] показує, що у війні проти нашої держави РФ активно застосовувала близько десяти типів ракет, із них чотири – це балістичні ракети: «Іскандер-М»; «Точка-У»; Х-47М2 «Кинджал» повітряного базування та корейська KN-23 (офіційна назва – Hwasong-11Ga); решта – крилаті ракети (КР): «Калібр» морського базування; «Онікс» морського і берегового базування; «Іскандер-К» наземного базування; Х-101 та Х-555 (модифікація радянської Х-55) повітряного базування; Х-22 та Х22М/МА (радянська надзвукова крилата протикорабельна ракета повітряного базування), 3М22 «Циркон» (гіперзвукова протикорабельна КР). У таких умовах важливим елементом організації протидії ракетним обстрілам [5, 6] є вдосконалення систем виявлення та визначення траєкторії польоту повітряних цілей за балістичною траєкторією та на малих висотах. Однією зі складових такої системи є акустична, яка показала високу ефективність для виявлення КР та БпЛА типу Shahed. Система акустичного моніторингу (САМ) побудована за мережевою технологією на основі територіально рознесених акустичних датчиків (АД), що дозволяють відслідковувати повітряні цілі в місцях, де немає радіолокаційного покриття. У зв'язку із цим питання дослідження та врахування особливостей акустичних сигналів прольоту КР та БпЛА типу Shahed для вдосконалення алгоритмів і методів оброблення в системі виявлення та визначення траєкторії польоту повітряних цілей на малих висотах (ПЦМВ) є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років велика кількість робіт як вітчизняних [7–9], так і закордонних дослідників [10–12] була присвячена вивченню характеристик акустичного випромінювання ПЦМВ. Так, у публікаціях [7–9] проаналізовано деякі особливості акустичних сигналів БпЛА, КР, реактивних та турбогвинтових літаків, гелікоптерів. У роботах закордонних дослідників [10–12] основну увагу зосереджено на зменшенні акустичних шумів, що породжує турбореактивний двигун літака. Визначено основні джерела шуму турбореактивного двигуна літака, що можуть бути віднесені й до джерел шумів турбореактивного двигуна КР. Проте питання аналізу сигнатур акустичних сигналів прольоту КР розкрито не в повній мірі.

Формулювання завдання дослідження. Метою дослідження є визначення сигнатур акустичних сигналів прольоту КР шляхом аналізу їх у часовій та спектральній областях для подальшого вдосконалення методів і алгоритмів їх виявлення та обробки в САМ.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження сигнатур акустичних сигналів від прольоту КР проведено обробку їх аудіосигналу, який записаний на мікрофон (або АД). Тому важливим є проаналізувати умови дослідження, а саме основні характеристики мікрофона [13]: чутливість, акустичну та амплітудно-частотну характеристики (АЧХ), частотний діапазон. Відомо, що чутливість мікрофона визначається відношенням напруги на виході мікрофона до звукового тиску у вільному звуковому полі, тобто за відсутності сигналу. Чутливість сучасних мікрофонів становить від 1–2 мВ/Па (для динамічних) до 10–15 мВ/Па (для конденсаторних). Акустична характеристика визначає направленість мікрофона. За видом акустичної характеристики, а отже, і направленістю відрізняють три типи мікрофонів як приймачів звуку: приймачі тиску; градієнти тиску; комбіновані. АЧХ – це залежність чутливості мікрофона від частоти звукових коливань. Типові АЧХ мікрофонів [13] наведено на рис. 1.

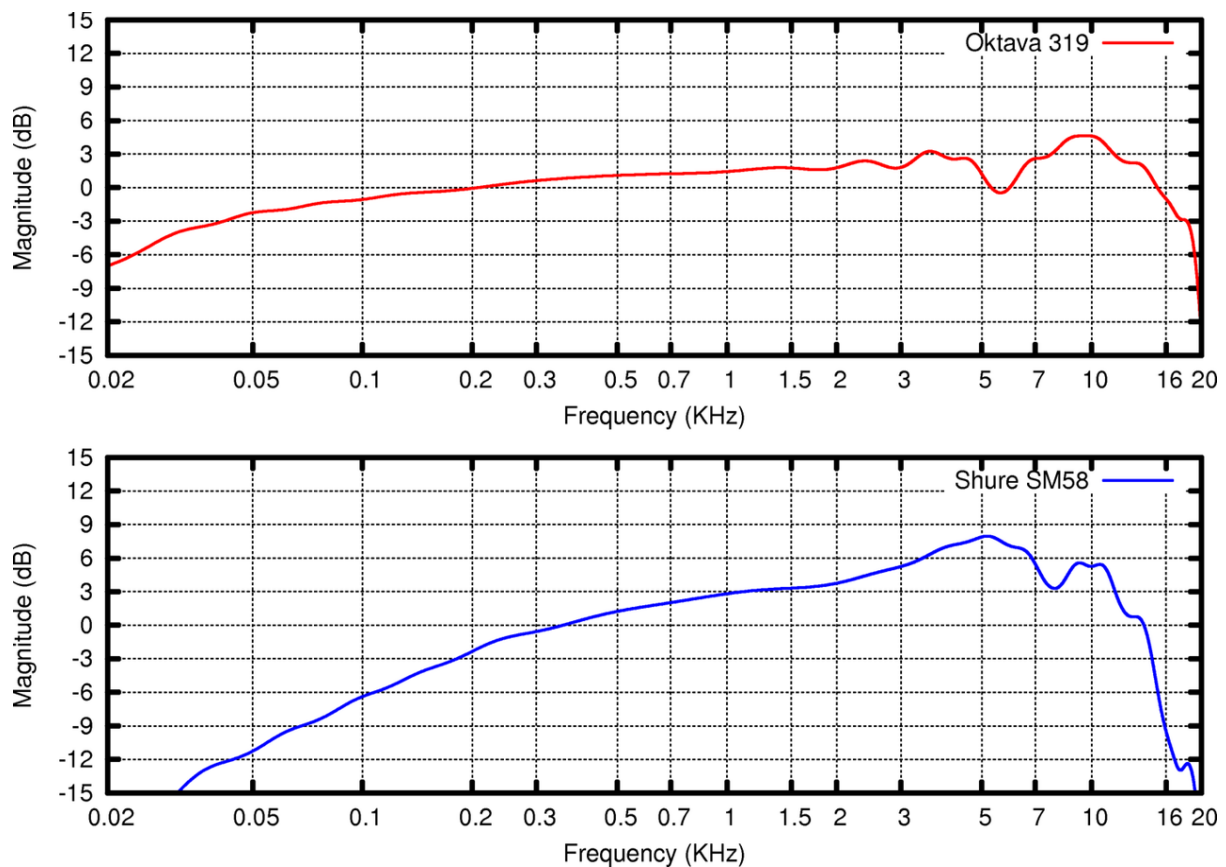


Рис. 1. Приклади АЧХ мікрофонів

Як видно з рис. 1, АЧХ пов'язана із залежністю чутливості мікрофона від частоти звукових коливань. Нерівномірність АЧХ вимірюють у децибелах як відношення чутливості мікрофона на певній частоті до чутливості на середній частоті, наприклад, 1000 Гц. Відомо, що частотний діапазон сучасних зразків мікрофонів лежить у межах від 50 Гц до 16 кГц.

Аналіз наведених характеристик мікрофонів показує, що сигнали від прольоту КР можуть бути зареєстровані в частотному діапазоні 50 Гц – 16 кГц. При цьому найбільш сприятливою для спостережень акустичних сигналів є ділянка від 300 Гц до 14 кГц.

Створений КР акустичний сигнал є досить складним. Джерела акустичного шуму КР оснащених турбореактивними двигунами, можна розділити на такі складові [10]:

- 1) шум, створений лопатями вентилятора, компресорів і турбіни (Fan Ton Noise та Fan Broadband Noise);
- 2) шум камери згоряння (Combustor Noise), пов'язаний зі швидким окисненням ракетного палива;
- 3) шум, породжений змішуванням високошвидкісних вихлопних газів із навколишнім повітрям (Jet Noise);
- 4) аеродинамічний шум.

Орієнтовний спектр акустичного шуму турбореактивного двигуна (Total Engine Noise) та його складові [10] наведено на рис. 2.

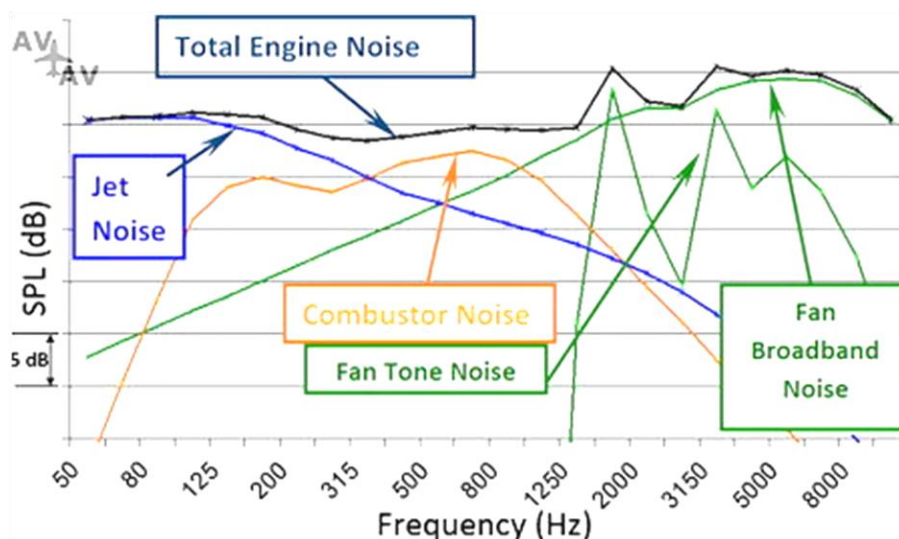


Рис. 2. Спектр акустичного шуму турбореактивного двигуна

Аналіз даних, наведених на рис. 2, показує, що:

шуми, створені лопатями вентилятора, компресорів і турбіни (Fan Ton Noise та Fan Broadband Noise), розподілені в межах вузької смуги від 1,3 кГц до 8 кГц та мають піки спектра на 2 кГц та 5 кГц;

шум камери згоряння (Combustor Noise) має більш низькочастотну (НЧ) вузькосмугову складову від 80 Гц до 2 кГц;

шум, породжений змішуванням високошвидкісних вихлопних газів із навколишнім повітрям (Jet Noise), має НЧ складову в межах від 50 Гц до 2 кГц.

Отже, найбільшим джерелом акустичного шуму КР є її двигун. Більшість його шумів зумовлена шумом вихлопних газів. Високошвидкісний струмінь газів, залишаючи задню частину двигуна, є нестійким і створює турбулентність, що є потужним джерелом широкосмугового звукового випромінювання.

Під сигнатурою акустичного сигналу у статті розуміємо особливості побудови його хвильової форми, а також амплітудних, часових та спектральних параметрів, які дозволяють ідентифікувати зареєстрований акустичний сигнал як прольот КР. За досвідом оброблення акустичних сигналів від штучних джерел збурень у Житомирському військовому інституті імені С. П. Корольова та Головному центрі спеціального контролю Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, основними параметрами сигналу, що дозволяють розкрити його сигнатуру, визначено:

тривалість сигналу – τ ;

час наростання максимальної амплітуди – t_n ;

частоту сигналу на ділянках вступу $f_{вст}$, основної $f_{осн}$ та хвостової $f_{хв}$ частин;

ширину спектра сигналу Δf та частотний інтервал, що відповідає цій ділянці, $(f_n \dots f_e)$;

частоти, що відповідають максимальній потужності сигналу $F(P_{max})$;

частоту, якою обмежено спектр сигналу, $F_{обм}$.

Проаналізуємо основні параметри зареєстрованих акустичних сигналів від прольоту КР, винищувачів на низькій висоті та гелікоптерів. За структурою в отриманих

акустичних сигналах можна виділити вступну, основну та хвостову частини. Приклад зареєстрованого сигналу від прольоту КР у часовій області наведено на рис. 3.

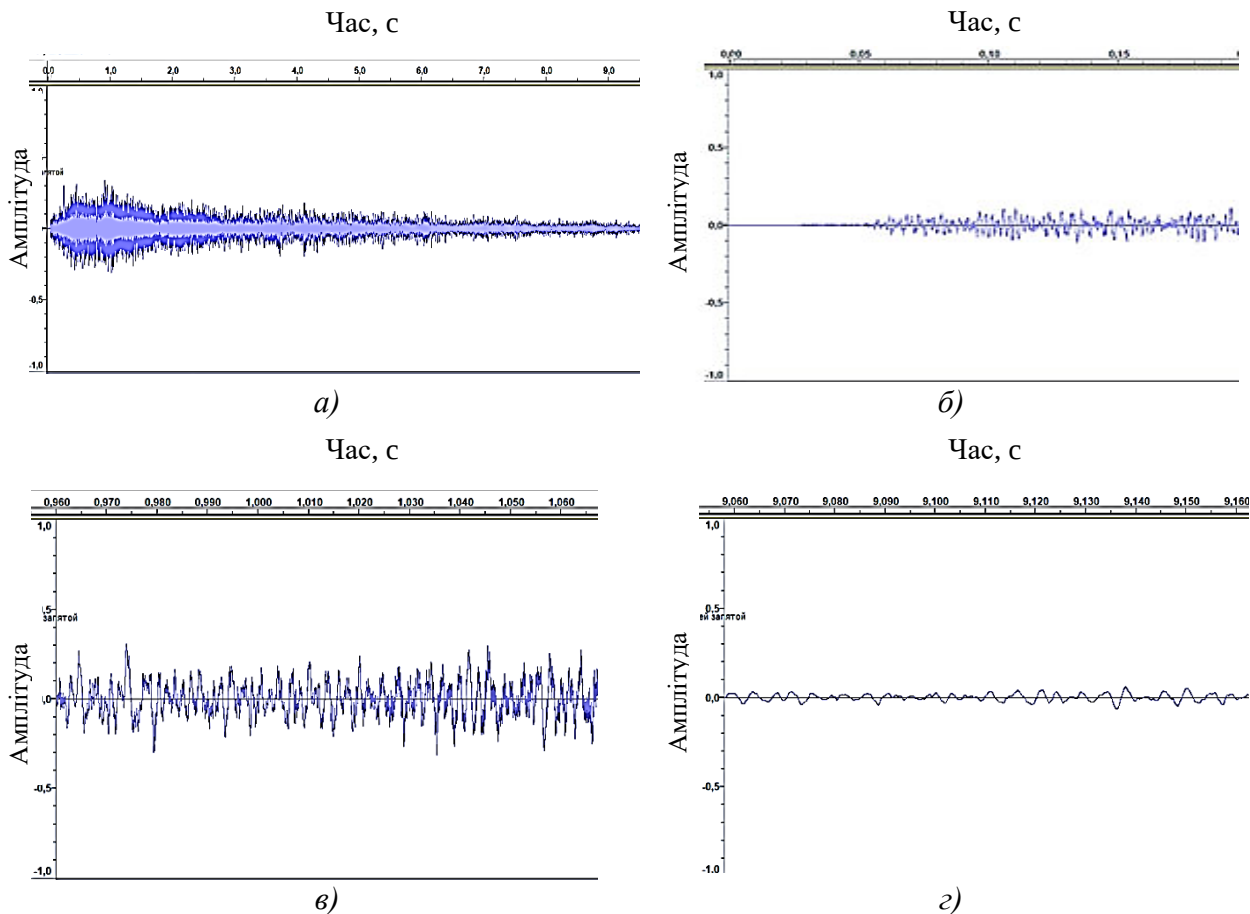


Рис. 3. Приклад зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

На рис. 3а проілюстровано загальний вигляд акустичного сигналу від прольоту КР у часовій області, а на наступних рис. 3б–3г – більш детально його окремі ділянки.

Так, на рис. 3б показано ділянку, що відповідає вступу сигналу в часовій області. Як бачимо, вона являє собою зростаючі за амплітудою коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,0024$ с ($f = 416,7$ Гц).

На рис. 3в зображено ділянку, на яку припадає максимальна амплітуда сигналу (за 1,06 с від початку його вступу). Вона містить коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,0015$ с ($f = 666,667$ Гц).

Хвостову частину сигналу наведено на рис. 3г, на якому спостерігаємо поступово згасаючі за амплітудою коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,004875$ с ($f = 205,128$ Гц).

Спектрограму та спектр зареєстрованого акустичного сигналу від прольоту КР наведено на рис. 4 та рис. 5, аналіз яких показує, що отриманий результат відповідає типовій спектрограмі акустичного сигналу турбореактивного двигуна, отриманий у [10]. Смуга частот, яку займає акустичний сигнал, та насиченість спектра гармоніками змінюється під час переміщення КР відносно АД.

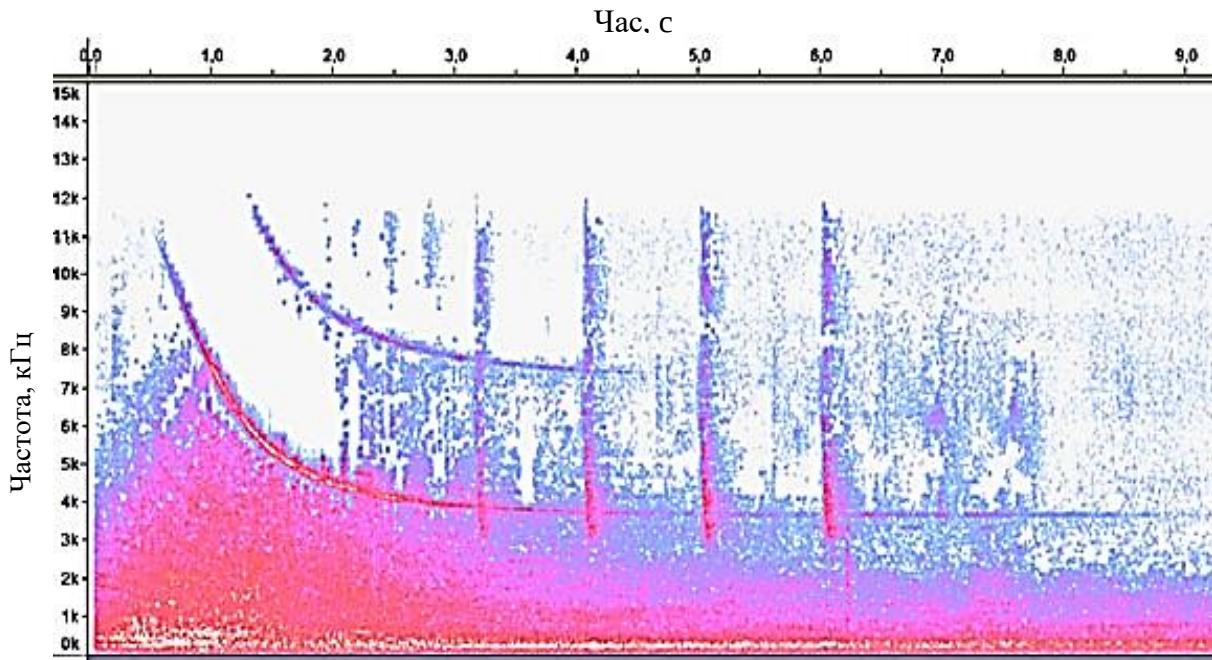


Рис. 4. Спектрограма зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

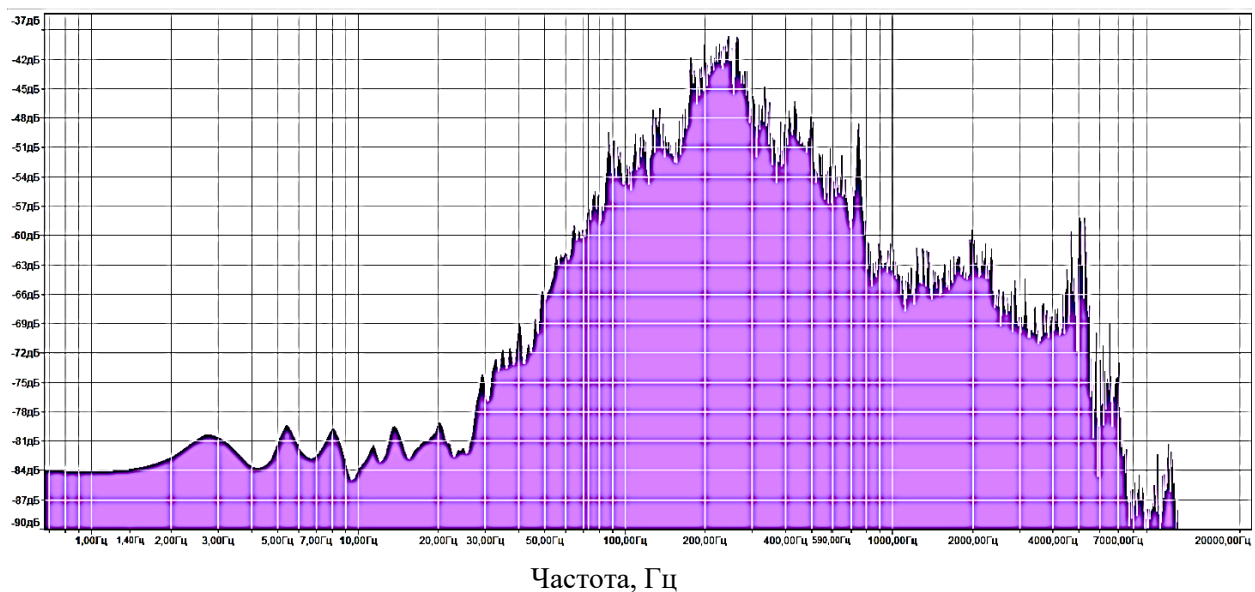


Рис. 5. Спектр зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

Із теорії поширення акустичних сигналів звукового діапазону відомо [14], що амплітуда та частота сигналів у разі збільшення відстані до джерела буде зменшуватися. При цьому амплітуди акустичних сигналів високої частоти (ВЧ) в ході розповсюдження поглинаються середовищем більше, ніж сигналів НЧ. Під час наближення до АД ширина спектра акустичного сигналу і кількість гармонічних складових збільшуються та є найбільшими за їх максимального зближення. У разі віддалення спостерігається зворотний ефект, причому звуження спектра відбувається за рахунок зниження максимальної частоти, що пояснюється більшим затуханням високочастотних складових в атмосфері [14].

Результати вимірювання основних параметрів зареєстрованих сигналів від прольоту КР (сигнали № 1–9), турбореактивного літака (сигнали № 10–12) та гелікоптера (сигнали № 13–15) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри зареєстрованих акустичних сигналів

Сигнал №	Параметри сигналу							
	τ , с	t_n , с	$f_{вст}$, Гц	$f_{осн}$, Гц	$f_{хв}$, Гц	Δf , Гц; ($f_n \dots f_6$), Гц	$F(P_{max})$, Гц	$F_{обм}$, Гц
1	11	0,9	416,7	666,7	205,1	860; (40...900)	250	8000
2	5,3	-	-	416,7	217,4	1372; (28...1400)	70; 200; 500	6800
3	3,2	1,1	333,3	347,8; 7619,1	347,8	1745; (55...1800)	125; 500	10000
4	5	1,7	258,1	427,4	353,4	1460; (40...1500)	55; 150; 450	8000
5	7,6	2,1	460,8	277,8	214,1	966; (34...1000)	100; 250	6500
6	4,0	0,7	348,4	380,2	185,1	1550; (50...1600)	400	6000
7	7,5	2,7	666,7	281,7	228,3	940; (160...1100)	250	8000
8	5,9	2,9	363,6	461,5	428,6	974; (26...1000)	70	8000
9	7,0	1,04	555,6	1470	142,8	1945; (55...2000)	150; 500	7000
10	24	12	2069,0	3809,5	2272,7	4000; (0...4000)	400...500	20000
11	21	15	857,14	181,8; 2955,7	142,9	2180; (20...2200)	100...200	10000
12	17,2	8,1	-	-	-	1970; (30...2000)	300; 500...600	7000
13	55	2,0	1162,8	1190,5	416,7	1382; (30...2000)	20...25; 35...50	9000
14	60	24	340	190,5	315,8	795; (55...850)	250	3000
15	62	40	-	-	-	1140; (60...2200)	120; 180	15000

Аналіз даних, наведених у табл. 1, показує такі характерні особливості хвильової форми та параметрів акустичних сигналів від прольоту КР (сигнали № 1–9):

вступ сигналу починається з різкого наростання його амплітуди до максимальної за час 0,7–2,9 с, на відміну від запису прольоту літаків 8–15 с (сигнали № 10–12) та гелікоптерів 24–40 с (сигнали № 14–15);

ділянка наростання амплітуди сигналу до максимальної відповідає наближенню КР до АД; подальша ділянка поступового зменшення амплітуди сигналу становить близько 70–85% тривалості сигналу і відповідає віддаленню КР від спостерігача;

тривалість акустичного сигналу від прольоту КР коливається в межах 6–11 с (сигнали № 1–9), на відміну від запису прольоту літаків 20–24 с (сигнали № 10–12) та гелікоптерів 55–62 с (сигнали № 13–15);

частота коливань вступної частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 258–666 Гц ;

частота коливань основної частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 277–666 Гц, на одному із сигналів виділено ще й високочастотну складову коливань 7619 Гц (сигнал № 3);

частота коливань хвостової частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 142–428 Гц;

ширина частотного спектра за рівнем 0,7 потужності акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 760–1945 Гц і займає частотний діапазон 26 Гц – 2000 Гц;

акустичні сигнали від прольоту КР мають виражені піки спектра на частотах від 70 Гц до 500 Гц;

частотний спектр акустичного сигналу від прольоту КР обмежений частотою 7–8 кГц.

Усі зареєстровані акустичні сигнали відповідають випадкам прольоту КР над АД або в безпосередній близькості до нього. На рис. 6 наведено спектрограми інших записів акустичних сигналів КР [8] під час прольоту над АД. Специфічне розміщення вузькосмугових складових на частотно-часовій площині може стати характерною ознакою для виявлення та розпізнавання типу КР.

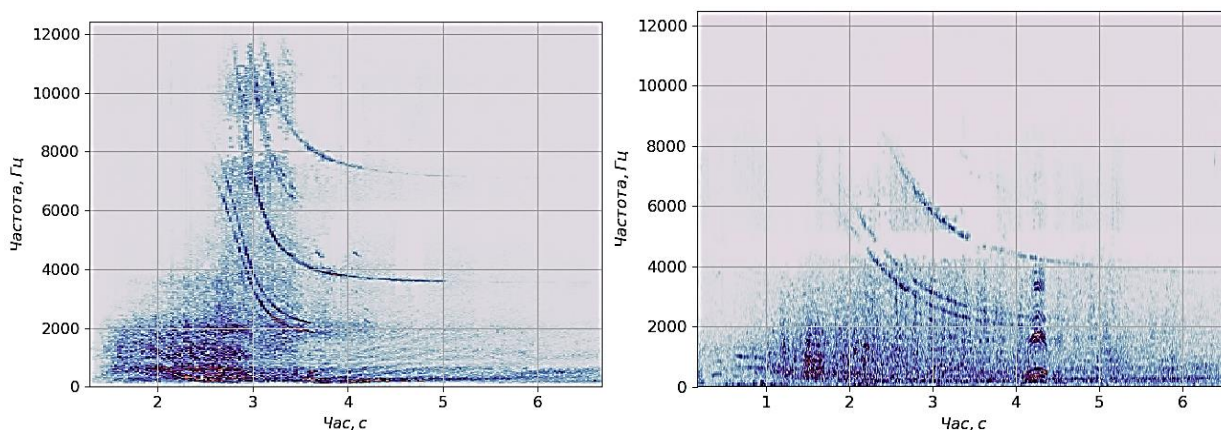


Рис. 6. Спектрограма акустичного сигналу КР під час прольоту над АД

На рис. 7 показано типову хвильову форму акустичного сигналу КР під час прольоту над АД, що відображає залежність рівня акустичного шуму на часовій осі. Як бачимо, амплітуда сигналу наростає швидше, ніж спадає. Причому в його передній частині, як впливає зі спектрограми (рис. 6), зосереджено в основному НЧ складові. У середній частині сигналу, що відповідає максимальному зближенню КР і АД, найбільше проявляються вузькосмугові складові. У хвостовій – спостерігається зменшення амплітуд як НЧ широкосмугових складових, так і вузькосмугових.

Виходячи з проведеного аналізу, характерними відмінними ознаками акустичних сигналів прольоту КР є:

- 1) невелика тривалість сигналу, що реєструється;
- 2) його шумоподібна структура з кількома частотно-модульованими складовими;
- 3) імпульсна форма обвідної сигналу зі згладженими краями;

- 4) розмах і швидкість зміни частоти Доплера;
- 5) швидкість зміни ширини спектра сигналу;
- 6) швидкість зміни потужності сигналу.

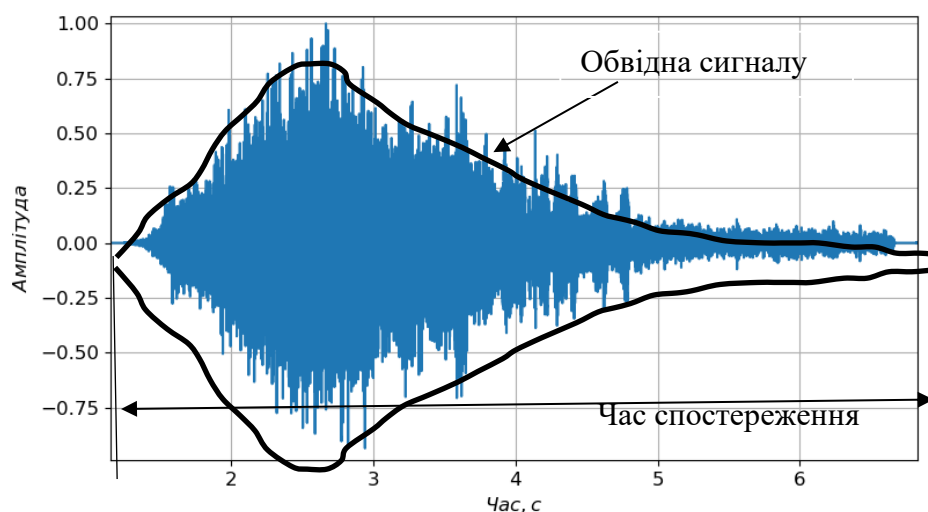


Рис. 7. Запис типового акустичного сигналу прольоту КР біля АД

Через велику швидкість руху КР (порівняно з більшістю інших джерел акустичних сигналів, які можуть переміщуватися біля АД) наведені вище швидкості зміни параметрів також будуть високими. Використовуючи цю ознаку, можна забезпечити надійну ідентифікацію акустичних сигналів прольоту КР.

Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в підсумку результаті проведених досліджень удосконалено опис сигнатури акустичних сигналів прольоту КР та визначено характерні особливості для їх ідентифікації на фоні інших джерел акустичних сигналів (літаків, гелікоптерів). Тривалість акустичного сигналу прольоту КР може становити від 2–3 с до 12–15 с, вона визначається швидкістю її польоту, відстанню до АД, станом середовища поширення. Акустичний сигнал КР (реактивного, турбореактивного двигуна) має спектральний портрет із шумоподібною структурою, що займає смугу частот від десятків герц до 2,5–3 кГц та обмежується частотою у 8 кГц. Максимум енергії сигналу зосереджено в області частот від 0,12 кГц до 0,6 кГц, найчастіше – на частотах близько 300 Гц. Ширина спектра становить близько 1–2 кГц, вона залежить від дальності прольоту КР від АД: чим більшою є ця відстань, тим спектр буде вужчим через затухання в атмосфері високочастотних складових. В акустичному сигналі прольоту КР гармонічні складові, зумовлені обертанням лопатей турбіни двигуна, виражені слабо. Отримані авторами результати щодо визначеної сигнатури акустичних сигналів прольоту КР апробовані на наукових конференціях [15, 16] та можуть бути використані для покращення ідентифікації прольоту КР у системах акустичного моніторингу.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Крилаті ракети рф: які є, скільки та що із цим робити. URL: <https://mind.ua/publications/20271058-krilati-raketi-rf-yaki-e-skilki-ta-shcho-iz-cim-robiti> (дата звернення: 01.09.2025).

2. Категорія: Крилаті ракети р осії. URL: <https://bit.ly/4ojTSAU> (дата звернення: 01.09.2025).
3. Російські крилаті ракети: виробники, номенклатура і можливості. URL: <https://military.com/uk/articles/rosijski-krylati-rakety-vyrobnyky-nomenklatura-i-mozhlyvosti/> (дата звернення: 01.09.2025).
4. Defeating Cruise Missiles. Technical Report APA-TR-2007-0402. URL: <http://www.ousairpower.net/Analysis-Cruise-Missiles.html> (last accessed: 10.09.2025).
5. Tate D. C. Acoustic Littoral Engagement Response to Threats – ALERT A System to Provide Advanced Warning of an Anti-Ship Missile Attack. RTO-MP-SET-079. 2004. 12 p.
6. Stillton J., Orletsky D. T. Airbase Vulnerability to Conventional Cruise-Missile and Ballistic-Missile Attacks: Technology, Scenarios, and U.S. Air Force Responses. RAND, 1999. 120 p.
7. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення безпілотник літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів // Вісник ЖДТУ. 2014. № 4 (71). С. 71–80.
8. Розроблення сигнатури аудіосигналу прольоту крилатої ракети для системи акустичного моніторингу: звіт про виконання оперативного завдання / Наук. кер-к І. М. Сашук, відп. вик. Р. А. Андрощук, вик. О. І. Ляшук, І. О. Солопій, О. М. Терещенко, В. С. Кокра. Житомир : ЖВІ, 2022. 61 с.
9. Поздняков В. В., Бугайов М. В. Аналіз акустичних сигналів засобів повітряного нападу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2023. Вип. 25 (І). С. 58–75. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06>
10. Ann P. Dowling, Yasser Mahmoudi. Combustion noise // Science Direct Proceedings of the Combustion Institute. 2015. Vol. 35. P. 65–100. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.08.016>
11. Krebs W., Bütikofer R., Plüss S., Thomann G. Spectral Three-Dimensional Sound Directivity Models for Fixed Wing Aircraft // Acta Acustica Acustica. 2006. Vol. 92. P. 269–277.
12. Bütikofer R., Thomann G. Aircraft Sound Measurements: The Influence of Microphone Height // Acta Acustica. 2005. Vol. 91. P. 907–914.
13. АЧХ мікрофона. URL: <http://jablog.ru/blog/studio-1/3845.html> (дата звернення: 05.10.2025).
14. Артилерійська звукова розвідка : Підруч. / О. Красюк, Р. Сергієнко, С. Соколовський та ін. Львів : НАСВ, 2020. 346 с.
15. Андрощук Р. А., Кокра В. С. Побудова системи акустичних спостережень для виявлення прольоту крилатої ракети // Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони : зб. тез доп. VI Міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 23.05.2023). Київ : НУО України, 2023. С. 47.
16. Андрощук Р. А., Кокра В. С. Використання технології пасивного моніторингу для виявлення та спостережень прольоту крилатих ракет // Тези доп. III наук.-техн. конф. ДНДІ ВС ОБТ (“Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки”), (м. Черкаси, 26.09.2024). Черкаси : Вид-вець Євенок О. О., 2024. С. 216–218.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2025.

REFERENCES

1. *Krylati rakety rf: yaki ye, skilky ta shcho iz tsym robyty [Cruise Missiles of the russian federation: what are they, how many and what to do with them]*. (n.d.). Retrieved from

<https://mind.ua/publications/20271058-krilati-raketi-rf-yaki-e-skilki-ta-shcho-iz-cim-robiti> [in Ukrainian].

2. *Katehoriia: Krylati rakety rosii [Category: Cruise Missiles of Russia]*. (n.d.). Retrieved from <https://bit.ly/4ojTSAU> [in Ukrainian].

3. *Rosiiski krylati rakety: vyrobnyky, nomenklatura i mozhlyvosti [Russian Cruise Missiles: Manufacturers, Nomenclature and Capabilities]*. (n.d.). Retrieved from <https://military.com/uk/articles/rosijski-krylati-rakety-vyrobnyky-nomenklatura-i-mozhlyvosti/> [in Ukrainian].

4. *Defeating Cruise Missiles. Technical Report APA-TR-2007-0402*. (n.d.). Retrieved from <http://www.ausairpower.net/Analysis-Cruise-Missiles.html>

5. Tate, D. C. (2004). *Acoustic Littoral Engagement Response to Threats – ALERT A System to Provide Advanced Warning of an Anti-Ship Missile Attack*. RTO-MP-SET-079.

6. Stillton, J., & Orletsky, D. T. (1999). *Airbase Vulnerability to Conventional Cruise-Missile and Ballistic-Missile Attacks: Technology, Scenarios, and U.S. Air Force Responses*. RAND.

7. Danyk, Yu. H., Puleko, I. V., Buhaiov, M. V. (2014). *Vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi analizu akustychnykh ta radiolokatsiinykh syhnaliv [Detection of Unmanned Aerial Vehicles Based on the Analysis of Acoustic and Radar Signals]*. *Visnyk ZhDTU [Bulletin of ZhSTU]*, 4 (71), 71–80 [in Ukrainian].

8. Sashchuk, I. M., Androshchuk, R. A., & Liashchuk, O. I., et al. (2022). *Rozroblennia syhnatury audiosyhnalu prolodu krylatoi rakety dlia systemy akustychnoho monitorynhu : zvit pro vykonannia operatyvnoho zavdannia [Development of the Signature of the Audio Signal of the Flight of a Cruise Missile for the Acoustic Monitoring System: Report on the Implementation of the Operational Task]*. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

9. Pozdniakov, V. V., & Buhaiov, M. V. (2023). *Analiz akustychnykh syhnaliv zasobiv povitrianoho napadu [Acoustic Signals Analysis of Aerial Attack Weapon]*. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 25 (I), 58–75. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06> [in Ukrainian].

10. Ann, P. Dowling, Yasser Mahmoudi. (2015). *Combustion noise*. *Science Direct Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 65–100. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.08.016>

11. Krebs, W., Bütikofer, R., Plüss, S., & Thomann, G. (2006). *Spectral Three-Dimensional Sound Directivity Models for Fixed Wing Aircraft*. *Acta Acustica Acustica*, 92, 269–277.

12. Bütikofer, R., & Thomann, G. (2005). *Aircraft Sound Measurements: The Influence of Microphone Height*. *Acta Acustica*, 91, 907–914.

13. *AChKh mikroфона [Microphone Amplitude-Frequency Response]*. (n.d.). Retrieved from <http://jablog.ru/blog/studio-1/3845.html> [in Ukrainian].

14. Krasiuk, O., Serhiienko, R., & Sokolovskyi, S., et al. (2020). *Artyleriiska zvukova rozvidka: Pidruch. [Artillery Sound Reconnaissance: Tutorial]*. Lviv [in Ukrainian].

15. Androshchuk, R. A., & Kokra, V. S. (2023). *Pobudova systemy akustychnykh sposterezhen dlia vyivlennia prolodu krylatoi rakety [Construction of an Acoustic Observation System for Detecting the Flight of a Cruise Missile]*. In *Zastosuvannia kosmichnykh ta heoinformatsiinykh system v interesakh natsionalnoi bezpeky ta oborony : zb. tez dop. VI Mizhn. nauk.-prakt. konf.*

[Application of Space and Geoinformation Systems in the Interests of National Security and Defense: Collection of Abstracts of the VI International Scientific and Practical Conference]. Kyiv, 23.05.2023. (P. 47) [in Ukrainian].

16. Androshchuk, R. A., Kokra, V. S. (2024). Vykorystannia tekhnolohii pasyvnoho monitorynhu dlia vyjavlennia ta sposterezhen prolotu krylatykh raket [Using Passive Monitoring Technology to Detect and Observe the Flight of Cruise Missiles]. *Tezy dop. III nauk.-tekhn. konf. DNDI VS OVT ("Vyprobuvannia i sertyfikatsiia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki") [Abstracts of the 3rd Scientific and Technical Conference of the National Research Institute of Armed Forces of Ukraine ("Testing and Certification of Weapons and Military Equipment")]*. Cherkasy, 26.09.2024. (pp. 216–218) [in Ukrainian].

R. A. Androshchuk, Yu. V. Hryniuk

SIGNATURE ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNAL OF CRUISE MISSILES

In the current conditions of full-scale aggression by the Russian Federation and the threat from high-precision weapons, in particular cruise missiles, the issue of timely detection and identification of air targets is becoming particularly urgent. Determining the signature of the acoustic signal of cruise missiles is a key element in creating effective acoustic monitoring systems that allow for a prompt response to threats and ensure the protection of critical infrastructure. Analysis of the source of acoustic noise during the flight of a cruise missile is important for detecting and issuing target designations for its destruction. The sources of acoustic noise during the flight of a cruise missile are the jet engine, aerodynamic effects, contact with the surface and explosion. The jet engine generates noise by releasing gases at high speed, especially during the launch of the missile. Aerodynamic effects, in particular turbulent flows and shock waves, also lead to aerodynamic noise. Surface contact and explosion during collision with targets create additional noise signals. Analysis of these noise sources helps to improve systems for detecting and identifying cruise missiles. The article provides examples of recorded acoustic signals from the flight of cruise missiles, identifies the features of constructing the waveform of the acoustic signal, its amplitude, time and spectral parameters, which allow its identification. Analysis of the data of the recorded signals shows the characteristic features of the waveform and parameters of acoustic signals from the flight of cruise missiles: the duration of the recorded acoustic signal is from 2–3 s to 12–15 s; the acoustic signal of a jet (turbojet) engine has a spectral portrait with a noise-like structure, occupying a frequency band from tens of hertz to 2,5–3 kHz and is limited to a frequency of 8 kHz; the maximum signal energy is concentrated in the frequency range from 0,12 kHz to 0,6 kHz, most often at frequencies of about 300 Hz; the spectrum width is about 1–2 kHz. The determined signature of the acoustic signal of the flight of cruise missiles can be integrated into acoustic monitoring systems to provide comprehensive surveillance (detection) and analysis of air threats.

Keywords: *cruise missile; acoustic signal; signature; spectrogram; acoustic monitoring systems; detection and identification of the flight of cruise missiles.*