

УДК 534.83; 681.3

**І. В. Косяк**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Усунення широкосмугового поверхневого шуму в фонограмах раритетних носіїв запису**

*Розглянуто методи цифрової обробки звукових фонограм з метою за-  
глушення широкополосного шуму стосовно до фонограм раритетних  
носіїв запису. Проведено аналіз існуючих програмних засобів шумоза-  
глушення. Запропоновано застосування частотно-залежної динамічної  
обробки в дуже зашумлених фонограмах для поліпшення сприйняття  
сигналу.*

**Ключові слова:** фонограма, фоноциліндр, шумозаглушення, артефак-  
ти, шуми, звуковий сигнал.

### **Вступ**

Фонограми записів, відтворених із фонографічних циліндрів, характеризу-  
ються високим рівнем шумів, які пов'язані з механічними ушкодженнями поверх-  
ні, налипанням пилу, цвіллю та руйнуванням поверхні воскового циліндра мікро-  
організмами. В більшості випадків невелике співвідношення сигнал-шум спричи-  
няє погіршення сприйняття записів. Тому вирішення проблеми заглушення різно-  
бічних шумів у архівних звукозаписах є важливою і наразі актуальною задачею.

Власне широкосмуговий поверхневий шум являє собою випадковий, адитив-  
ний фон — форму деградації сигналу, що є неминуче присутньою на всіх носіях  
аналогового запису (фоноциліндрах, грамплатівках, магнітних стрічках). Випад-  
ковий хаотичний шум має істотно важливі складові в усьому діапазоні звукових  
частот, і таким чином, процедури простої фільтрації й корекції є недостатньо аде-  
кватними для цілей відновлення сигналу. Особливо це стосується фонографічних  
циліндрів, відтворені записи яких мають нестационарну характеристику шуму, що  
істотно впливає на погіршення якості обробки сигналу. Спектральна характе-  
ристика шуму може значно змінюватися в межах кожного обороту обертання фоно-  
циліндра в системі відтворення звуку, що приводить до ефекту «шиплячої» харак-  
теристики. Це в значній мірі посилює й ускладнює процес заглушення шуму. Такі  
значні флуктуації і спектральні зміни шуму викликані, в першу чергу, ушкоджен-  
ням поверхні фоноциліндра мікроорганізмами й цвіллю. Для порівняння шумові

характеристики аналогових записів з магнітних стрічок та грамплатівок стаціонарні і типово мають безперервний, нескінченний спектр, близький до рівномірного, так званий білий шум.

На рис. 1 представлені типові спектри різних шумів, а на рис. 2 — їх сонограми, в яких для кожної часової позиції градаціями яскравості відображено миттєвий спектр. Представлення сигналу за допомогою сонограм дозволяє легко знайти різні аномалії, що викликають стрибки ширини миттєвого спектра. Аналізуючи сонограми, не важко помітити, як змінюється спектр сигналу шуму, зчитаного з фоноциліндра на протязі однієї секунди на противагу незмінному, або майже незмінному спектру сигналу шуму з магнітної стрічки.

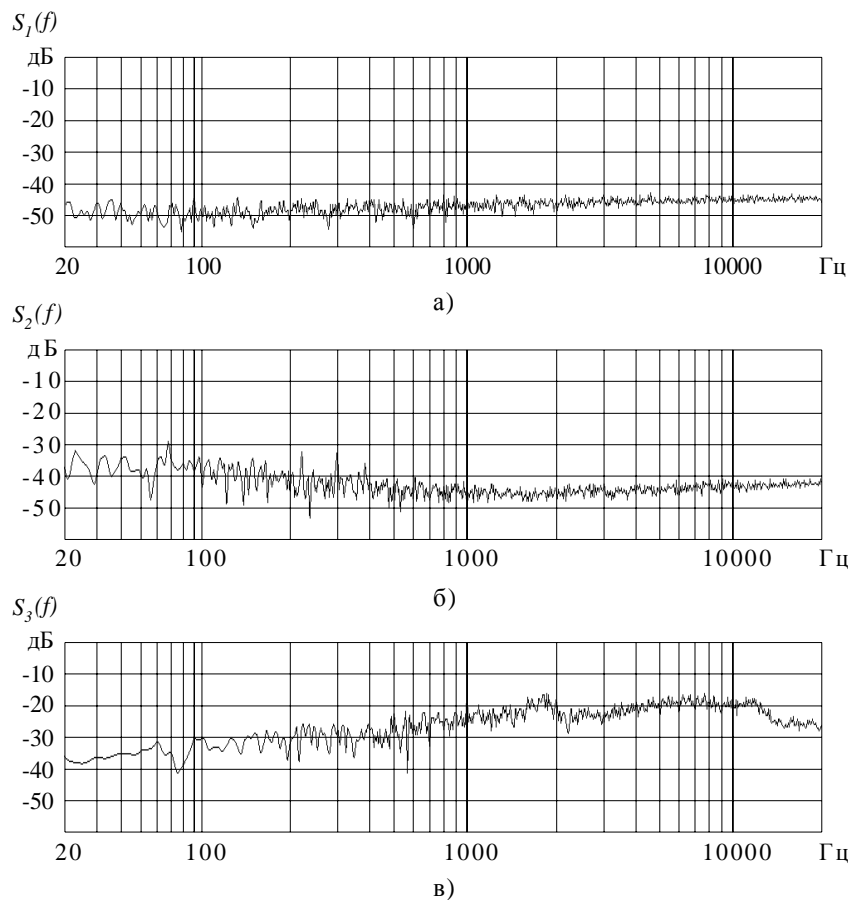


Рис. 1. Спектри різних сигналів: а) спектр білого шуму; б) спектр шуму, зчитаного з магнітної стрічки; в) спектр шуму, зчитаного з фоноциліндра

### Аналіз методів шумозаглушення

У класичній роботі Норберта Вінера [1], присвяченій, головним чином, задачам лінійного передбачення й фільтрації, описано оптимальний лінійний фільтр для видалення шуму, названий фільтром Вінера. Вінеровський фільтр відокремлює сигнали, виходячи з їхніх частотних спектрів. Ця робота послужила основою

для подальшого розвитку різних методів шумозаглушення, серед яких можна відзначити:

- методи адаптивної компенсації перешкод;
- методи, засновані на оцінці спектральних характеристик шуму;
- методи, засновані на обробці сигналу з використанням апарата схованих марковських моделей.

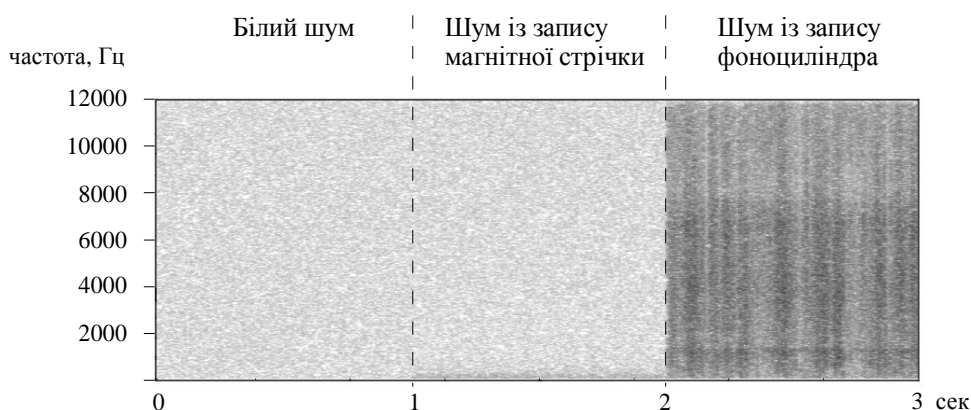


Рис. 2. Сонограма сигналів шуму

Слід зазначити, що розроблено велику кількість різних методів цифрової обробки зашумлених звукових сигналів. Однак, спеціалізовані методи обробки звукового сигналу, що забезпечують автоматизацію та підвищення швидкодії систем розпізнавання мови, застосовуються винятково для підвищення розбірливості мовного сигналу.

Метод адаптивної компенсації перешкод заснований на використанні одного або декількох опорних сигналів, корельованих із шумовим сигналом [2]. За допомогою опорних сигналів формується сигнал, що є оцінкою перешкоди. Цей сигнал потім віднімається із зашумленого сигналу. Адаптивні компенсатори перешкод дозволяють поліпшити якість зашумлених сигналів, але вимога наявності опорного сигналу істотно звужує їхню область застосування. Наприклад, при реставрації архівних записів із фоноциліндрів, грамофонних платівок, опорного сигналу, принаймні у явному вигляді, немає. Тому застосування методу адаптивної компенсації перешкод у цих випадках не доцільно.

Методи обробки зашумлених сигналів із використанням апарата схованих марковських моделей засновані на статистичних моделях мовного сигналу, пов'язаних із його фонетичною структурою. Реалізація такого методу полягає в тому, що спочатку будуються статистичні моделі одиниць мовного потоку, використовуючи фонетичну інформацію, яку переносить мовний сигнал. Після побудови статистичної моделі для безлічі станів сигналу, по ній розраховується оптимальний фільтр Вінера. Також для обробки сигналу використовуються окремо оцінені марковські моделі шуму, що спостерігаються в сегментах пауз за відсутності корисного сигналу [3]. Очевидним недоліком підходу є необхідність мати апріорну інформацію про можливі типи шумів, яких у дійсності безліч, а тому ви-

мога наявності заздалегідь обчислених моделей представляється малоздійсною.

При усуненні шуму дуже важливо дотримуватись принципу мінімального викривлення сигналу, при якому всі параметри алгоритму обробки повинні, головним чином, реагувати на заглушення самого шуму. Одним з більш ефективних алгоритмів заглушення фонового шуму у звукових сигналах є метод спектрального вирахування.

Методи, засновані на оцінці спектральних характеристик шуму, реалізують різні модифікації алгоритму вирахування амплітудних спектрів [4, 5]. На сьогоднішній день метод вирахування амплітудних спектрів є найбільш прийнятним для обробки саме музичних записів.

### **Метод спектрального вирахування та його практичне застосування**

Спектральне вирахування — метод відновлення спектральної щільності потужності або амплітуди спектра сигналу, що спостерігається в адитивному шумі, за допомогою вирахування розрахованого усередненого спектра шуму від спектра зашумленого сигналу. Спектр шумів оцінюється в періоди, коли є присутнім тільки шум, а корисний сигнал відсутній. Моделювання зашумленого сигналу в часовій області дає:

$$y(m) = x(m) + n(m),$$

де  $y(m)$  — зашумлений сигнал;  $x(m)$  — корисний сигнал;  $n(m)$  — адитивний шум;  $m$  — дискретне значення часу.

При спектральному вирахуванні вхідний сигнал  $x(m)$  буферизується і розділяється на блоки, що перекриваються, довжиною  $N$  відліків. Кожен блок помножується на вагове вікно Хеммінга, організовуючи зважені вікна, і за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) перетворюється у  $N$  спектральних вибірок у частотній області. Основна функція вікна й операції перекриття полягає в ослабленні ефекту розривів на межах кожного вихідного блоку. Після спектрального вирахування, отримані значення величини спектра складаються з фазою зашумленого сигналу і перетворюються назад у часову область за допомогою зворотного перетворення Фур'є. Потім сигнали з кожного перекритого блоку додаються до попередніх і наступних блоків, щоб сформувати остаточний результат. Для видалення викривлень, внесених спектральним вирахуванням, застосовується постпроцесорний алгоритм, який використовує інформацію про кореляцію кожного частотного каналу блоків, що слідує один за одним, та тривалість дії сигналу [6].

Вибір довжини блоку для спектрального аналізу — це компроміс між суперечливими вимогами тимчасової й спектральної розподільчої здатності. Частотна розподільність спектра прямо пропорційна до числа вибірок  $N$ . Більше значення  $N$  приводить до кращої оцінки спектра. Це особливо важливо для низькочастотних складових, котрі вимагають більшого вікна для стійкої оцінки спектра. Однак, внаслідок нестационарної природи звукових сигналів, довжина вікна не повинна

бути занадто великою, щоб уникнути невизначеностей при аналізі короточасних сигналів і виникнення побічного ефекту — луни. Тривалість вікна звичайно, складає від 512 до 24000 відліків. Рис. 3 ілюструє ефект спектрального вирахування в відновленні фрагменту сигналу, зчитаного з фоноциліндра за допомогою програми *Cool Edit Pro*.

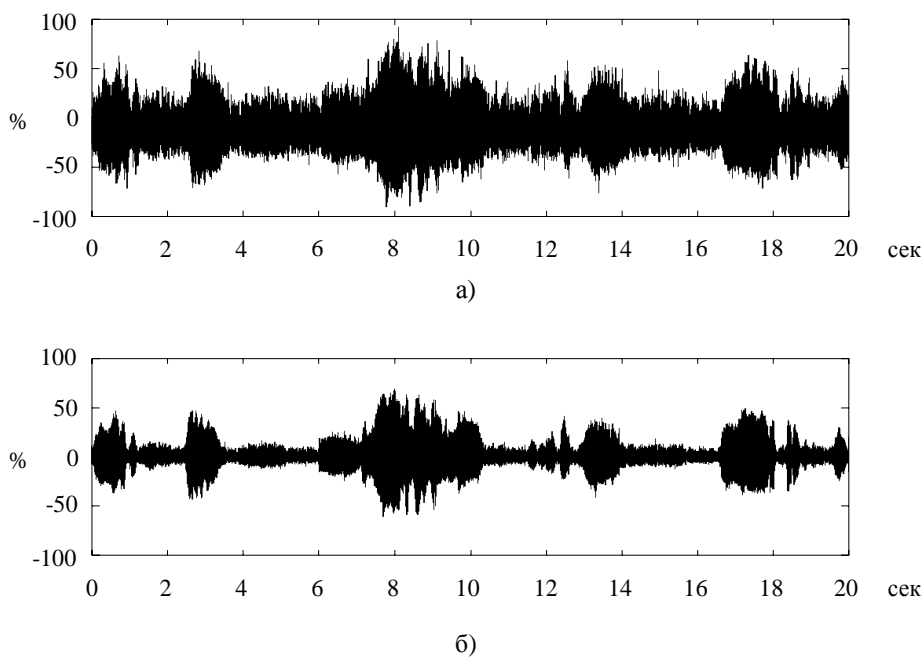


Рис. 3. Ефект спектрального вирахування: а) зашумлений сигнал; б) відновлений сигнал

У більшості методів вирахування амплітудних спектрів шум, що залишається після обробки, має дуже неприродну якість звучання, особливо в музичному контексті. Це явище згадується як музичний шум або «залишковий шум» [5, 6]. На спектрограмі рис. 4,б наведено приклад наявності в сигналі після обробки викривлень у формі окремих «музичних» шумів — артефактів, що сприймаються на слух як металевий призвук, які відсутні в оригіналі (рис. 4,а). На сонограмі рис. 5 наведено показовий приклад процедури відновлення сигналу при наявності в ньому шумів квазістаціонарного характеру. Сонограма являє собою потужний інструмент аналізу з більш інформативною характеристикою, тому що дозволяє враховувати при порівнянні зміни сигналів у динаміці. Для прикладу взятий фрагмент фонограми фоноциліндра із записом жіночого голосу в супроводі оркестру. На рис. 5,б показано сонограму відновленого сигналу (після заглушення шумів) із виразним збільшенням контрасту в зображенні спектральних складових сигналу. На рис. 5,в показаний приклад неякісно відновленого сигналу з наявністю артефактів, їх помітно у вигляді побічних частотних складових навколо основних гармонік сигналу.

Практично всі комерційні програмні продукти по усуненню ширококутових шумів застосовують у своїх алгоритмах методи вирахування амплітудних спектрів. Для аналізу якості обробки сигналу до експериментальних досліджень були залучені наступні, насамперед більш-менш потужні, програмні засоби:

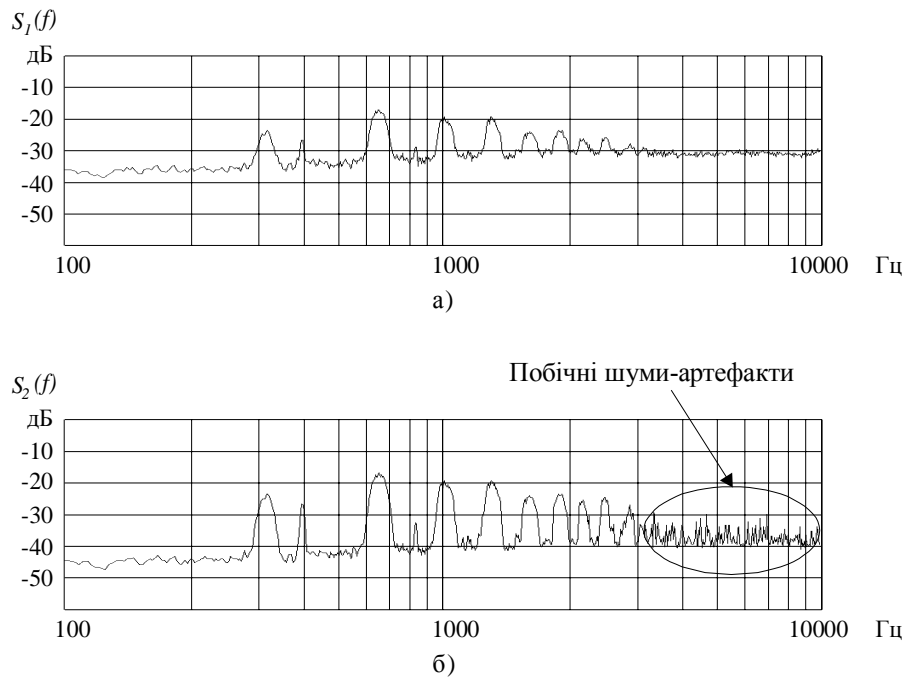


Рис. 4. Приклад наявності в сигналі артефактів

- *DART XP Pro (DARTech)* [7];
- *Noise reduction (Sonic Foundry)* [8];
- *SoundSoap Pro (Bias)* [9];
- *Cool Edit Pro (Syntrillium Software Corporation)* [10];
- *X-Noise (Waves)* [11];
- *Ionizer (Arboretum)* [12];
- *DINR (Digidesign)* [13];
- *Samplitude Professional (Magix)* [14];
- *DC Live (Diamond Cut Productions)* [15];
- *DeNoiser (Algorithmix)* [16].

Програмний засіб *DC Live* також має додаткову функцію — адаптивну фільтрацію, яка не додає бажаного ефекту при обробці музичного матеріалу. Адаптивна фільтрація, в першу чергу, розрахована на покращення розбірливості мовного сигналу за умов високого рівня шумів ціною деякої втрати натуральності звучання.

Аналіз сигналів, здійснений після обробки різними програмами виключно звукових фонограм фоноциліндрів, не дав однозначної позитивної оцінки якомусь одному програмному засобу. Але окремо можна виділити *X-Noise (Waves)*, *Noise reduction (Sonic Foundry)*, *Cool Edit Pro (Syntrillium Software Corporation)*. Найкошторисна професійна програма *DINR (Digidesign)* не змогла конкурувати з вищезазначеними програмними засобами, бо призначена для усунення шумів, у першу чергу, з фонограм магнітних стрічок. При аналізі враховувались основні критерії якості: наявність у сигналі артефактів; втрата яскравості звучання; ступінь заглушення шумів. Необхідно зазначити, що для різних фонограм обробка одні-

ми і тими же програмами була неоднаковою. Це прямий наслідок того, що рівень шумів і його характеристики є специфічними майже для кожного окремо взятого фоноциліндра. Тому для отримання позитивних результатів необхідно застосовувати різні програми в залежності від одержуваного результату, використовуючи метод порівняння. Експериментально були отримані також позитивні результати при послідовному застосуванні двох програм до однієї фонограми.

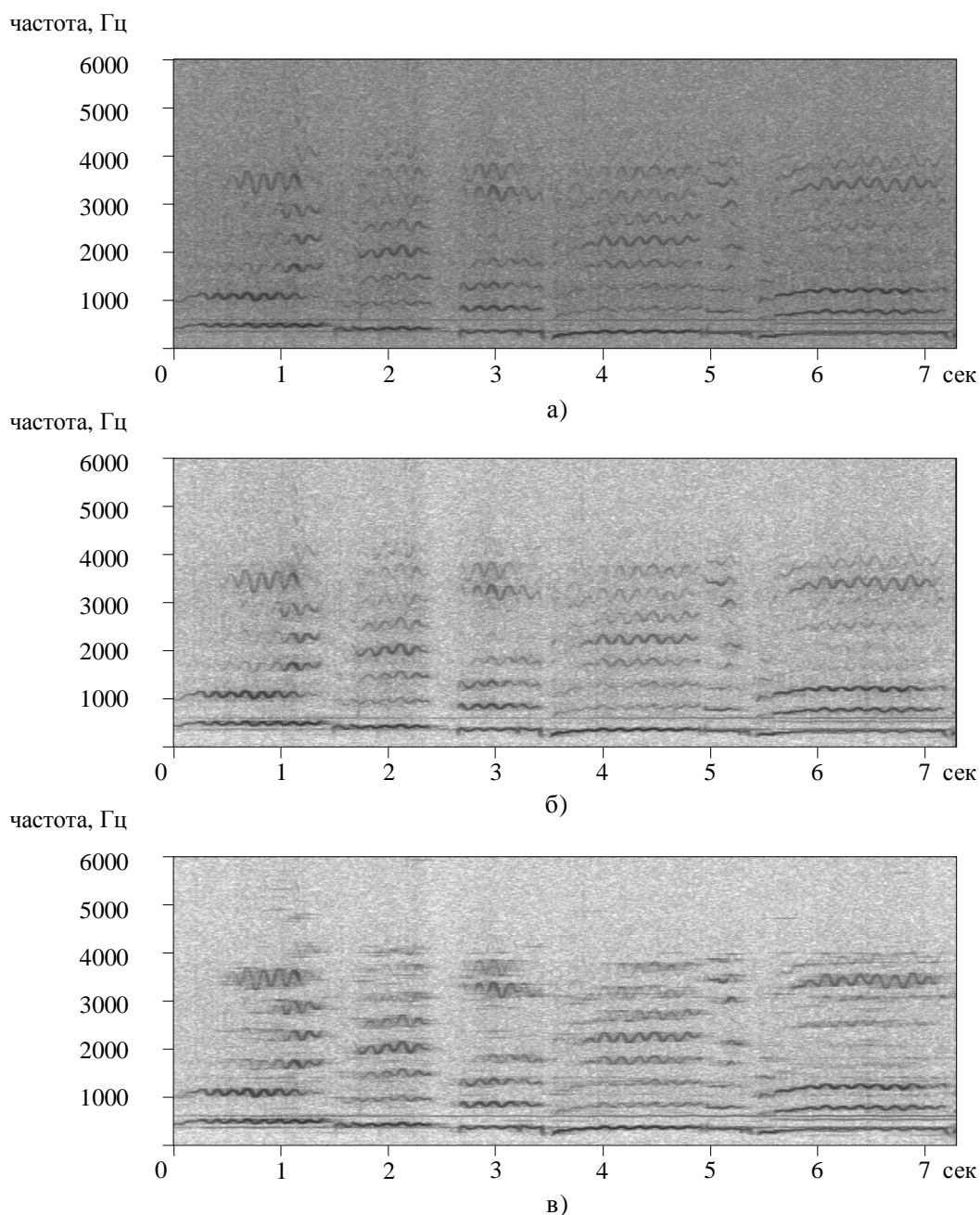


Рис. 5. Сонограми сигналів: а) зашумлений сигнал; б) відновлений сигнал; в) відновлений сигнал при наявності артефактів

Важливо зауважити, що оцінка якості обробки усунення шумів у звуковому сигналі є певною мірою суб'єктивною. Це обумовлено тим, що використовуваний на даний час набір об'єктивних параметрів: відношення сигнал/шум, діапазон відтворених частот, нерівномірність АЧХ, рівень нелінійних викривлень та інші неоднозначно визначає «слуховий образ», який сприймається слухачем. Тому суб'єктивна оцінка є основним критерієм визначення рівня якості обробки звукових фонограм по усуненню шумів.

Власне, процес оцінки якості звучання фонограм, так само як і всіх видів звукової апаратури — акустичних систем, підсилювачів, мікрофонів, звукознімачів тощо — є процедурою суб'єктивною, результати якої істотно залежать від багатьох факторів.

Дослідження якості звуку, отриманого в результаті застосування методів вирахування амплітудних спектрів, показали, що в тих випадках, коли шум або перешкода мають стаціонарний (або квазістаціонарний) характер, і їхній спектр має гармонійну структуру, можливе досягання значного підвищення якості звукової фонограми, яка сприймається. Однак, у випадку обробки фоноциліндрів із значними ушкодженнями поверхні мікроорганізмами і цвільлю, і які відповідно мають шуми із швидкозмінюваними спектральними характеристиками, така обробка малоефективна (рис. 6,а). В таких фонограмах після обробки усунення шумів можуть бути присутні синтетичні призвуки, зміни динамічних властивостей сигналу й інші побічні ефекти — артефакти. Для того, щоб покращити сприймання звукової інформації у цьому випадку, без особливо відчутної втрати її натуральності, необхідно окрім процедури спектрального вирахування виконати частотно-залежну динамічну обробку. Вона полягає у зменшенні інтенсивності (енергії) високочастотних складових сигналу шляхом їхнього стиснення, при перевищенні ними заданого порога. Результат такої обробки зображено на рис. 6,б. Безумовно в такий спосіб відбувається часткова втрата високочастотних складових, але враховуючи інтенсивність шумових перешкод, це не велика плата за покращення сприйняття звукової інформації в окремих випадках.

Також окремі фоноциліндри мають слабкий рівень запису, так, що рівень перешкод може перевищувати рівень корисної інформації на 10...20 дБ. При обробці подібних фонограм серйозним недоліком може стати значне заглушення слабого корисного сигналу. При цьому погіршується природність сприйняття акустично записаної музики, і заглушуються слабкі високі обертони звуку.

В особливо важких випадках, на жаль, реставрація можлива лише при паралельній втраті натуральності звучання. Тому, враховуючи всі особливості й недоліки записів фонограм фоноциліндрів, при виконанні операцій по усуненню шуму необхідно керуватись, у першу чергу, слуховим сприйняттям звукової інформації. Головним критерієм вибору ступеня глибини заглушення шуму повинно бути правило — не зашкодити. Тим паче, що більшість слухачів природно має тенденцію насолоджуватися архівними записами, в яких присутній незначний шум, на протигагу записам без шуму, що суб'єктивно зменшують яскравість у сприйнятті звукового матеріалу.



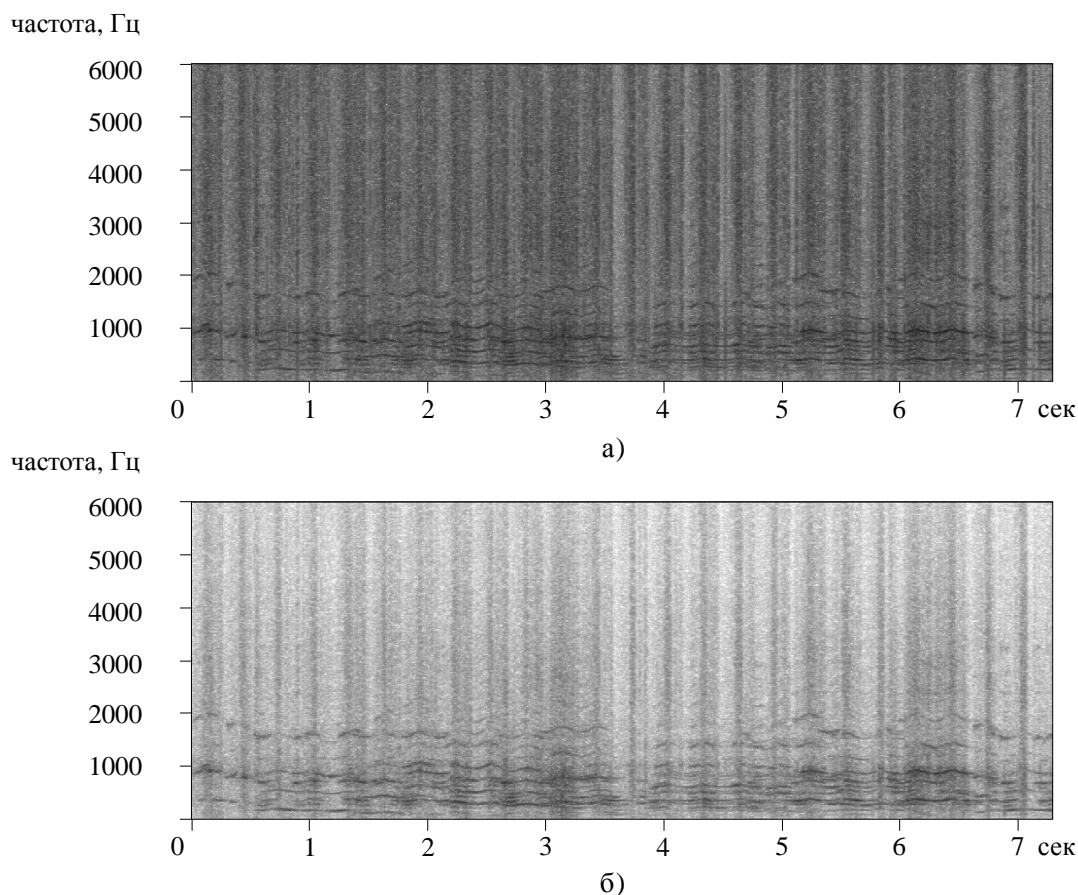


Рис. 6. Сонограми сигналів: а) зашумлений сигнал; б) відновлений сигнал

Однією з причин широкого застосування методів вирахування амплітудних спектрів (за іншою термінологією короткочасне спектральне ослаблення STSA) безсумнівно є та обставина, що вони поставлені у відповідність із непараметричним підходом, що може застосовуватися до великого класу сигналів. Приймаючи до уваги, що більшість музичних записів містять одночасно кілька джерел звуку, малоймовірно, що деякі з методів, які покладаються на дуже специфічні знання властивостей мовного сигналу (заснованих на принципах підвищення розбірливості мови) могли би бути узагальнені для відновлення звукової музичної інформації.

Іншою причиною успішного застосування методів вирахування амплітудних спектрів в області реставрації звуку можливо є той факт, що вони мають дуже інтуїтивну інтерпретацію: вони принципово розширили на більшу кількість піддіапазонів добре відомі аналогові пристрої, що використовуються для підвищення рівня сигналу, такі як порогові шумозаглушувачі [17].

Застосування методів шумозаглушення, заснованих на алгоритмі вирахування амплітудних спектрів є найбільш стійкими й ефективними дотепер. Важливо відзначити, що універсальних методів обробки, що однаково добре боролися би з істотно нестационарними і стаціонарними, адитивними й мультиплікативними

шумами, істотно підвищували би якість звуку й одночасно розбірливість мовного сигналу, зараз немає.

Однак, у зв'язку зі стрімким збільшенням обчислювальної потужності персональних комп'ютерів очікується поява нової методології розвитку даного напрямку з використанням більш складних методів, заснованих на реалістичному моделюванні сигналу.

## Висновки

Проведений аналіз фонограм раритетних носіїв запису — фонографічних циліндрів — показав значну наявність у них широкосмугового поверхневого шуму. У випадках, коли характеристика шуму має відносно квазістаціонарний характер, можливе значне покращання звучання музичних фонограм за рахунок усунення шумових перешкод без відчутного викривлення сигналу. З наявних на сьогоднішній день програмних продуктів більш якісні результати були отримані при застосуванні програм *Noise reduction (Sonic Foundry)*, *Cool Edit Pro (Syntrillium Software Corporation)*, *X-Noise (Waves)*. У тих випадках, коли характеристика шуму має істотно нестационарний характер, окрім процедури спектрального вирахування, слід застосовувати операцію частотно-залежної динамічної обробки.

При виконанні процедур шумозаглушення слід дотримуватись певних вимог:

— не вносити до корисного сигналу істотних викривлень та побічних звукових шумів-артефактів, щоб не спотворювати музичну фонограму;

— не намагатися задовольнятися цілком видалити якомога глибше шум, бо в контексті психологічного ефекту наявність у деякій мірі шипіння в сигналі підкреслює яскравість голосу та насиченість звучання музичних інструментів.

1. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications. — MIT Press, 1949.

2. Widrow B. et al. Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications // Proc. IEEE. — 1975. — **63(12)**. — P. 1692–1716.

3. Sheikhzadeh H., Sameti H., Deng L. Comparative Performance of Spectral Subtraction and HMM Based Speech Enhancement Strategies with Application to Hearing Aid Design // Proc. ICASSP-94. — P. 13–17.

4. Etter W. and Moschytz G.S. Noise Reduction by Noise-Adaptive Spectral Magnitude Expansion // J. Audio Eng. Soc. — 1994. — **42(5)**. — P. 341–349.

5. Vaseghi S.V. and Frayling-Cork R. Restoration of Old Gramophone Recordings // J. Audio Eng. Soc. — 1992, October. — **40(10)**.

6. Vaseghi S.V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction. — John Wiley & Sons Ltd, 2000. — 466 p.

7. <http://www.dartpro.com>

8. <http://www.sonicfoundry.com>

9. <http://www.bias-inc.com>

10. <http://www.syntrillium.com>

11. <http://www.waves.com>

12. <http://www.arboretum.com>
13. <http://www.digidesign.com>
14. <http://www.samplitude.com>
15. <http://www.diamondcut.com>
16. <http://www.algorithmix.com>
17. *Moorer J.A. and Berger M. Linear-Phase Bandsplitting: Theory and Applications // J. Audio Eng. Soc.. — 1986. — 34(3). — P. 143–152.*

Надійшла до редакції 08.11.2004