

І. В. Косяк

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

Система цифрового неруйнівного відтворення інформації з раритетних носіїв

Розглянуто сучасні способи та стан проблеми неруйнівного зчитування інформації з фоноциліндрів і визначено важливість і доцільність розробки нового ефективного способу зчитування. На основі запропонованих способу й засобів розроблено систему зчитування інформації з раритетних носіїв, що забезпечує високий рівень якості відтворення інформаційного сигналу з фоноциліндрів.

Ключові слова: зчитування інформації, фоноциліндр, неруйнівне відтворення, звукова інформація, інтерференційний сигнал, викривлення сигналу, обробка сигналу, шуми.

Вступ

Ідеї про можливе збереження звуку висловлювалися ще в XVI столітті Джованні Баттіста, Іоганном Кеплером, Сірано де Бержераком, Францем Грюндлем та іншими. Однак перші практичні роботи, що створили необхідні передумови для виникнення пристроїв звукозапису, з'явилися на початку XIX століття. Думку про оборотність запису, що лежить в основі всіх подальших пристроїв, уперше висловив Шарль Кро у своєму листі до Французької академії наук 30 квітня 1877 р., де ясно описав процес реєстрації звукових коливань на циліндрі з наступним їхнім відтворенням [1].

Першим практично працюючим апаратом механічного запису-відтворення був фонограф, винайдений Томасом Едісоном у серпні 1877 р. Запис у ньому вівся по гвинтовій лінії шляхом вдавнення по олов'яній фользі, обгорненої навколо мідного циліндра, що обертався від руки. Акустичні коливання тиснули на мембрану, і закріплене безпосередньо до її центра притуплене сталеве вістря (голка) видавлювало канавку змінної глибини. Для відтворення звуку в канавку поміщалася голка, яка зв'язана з мембраною й рупором. Чистота передачі звуку першого фонографа була низькою зі слабким звуком.

Удосконаленням фонографа зайнявся цілий ряд осіб. Найбільш істотних успіхів досягли Белл і Тайтнер. У результаті робіт над удосконаленням фонографа вони запропонували використовувати віск із добавкою парафіну й інших речовин, для носія запису, що мав форму барабана (восковий валик). Сам Едісон у наступні

роки витратив на досліди близько 3-х млн. доларів, перш ніж удалось одержати апарат, здатний записати й відтворити музику цілого симфонічного оркестру з мінімальними викривленнями.

У винаході практичного звукозапису Едісону належить безперечний пріоритет. Він не тільки створив у 1877 р. перший пристрій запису-відтворення звуку, але й аж до 1929 р. не залишав роботу над удосконаленням фонографа, одержавши більше 100 нових патентів. Завдяки цим зусиллям у 1889 р. був створений досконалий фонограф і його численні модифікації. У тому, що ми сьогодні маємо можливість почути голоси Л. Українки, Н. Толстого й А.П. Чехова, велика заслуга Едісона.

Швидкому розповсюдженню у світі фонографа сприяли його можливості як записувати, так і відтворювати звук. Дуже швидко була створена ціла індустрія звукозапису. Протягом майже 60-ти років із часу винаходу, фонограф слугував для збирання фольклорної музики та пісень, запису голосів видатних діячів культури й історії. За цей час у світі накопичилася величезна кількість воскових фонографічних циліндрів, декілька сот тисяч, які в переважній більшості зберігаються в багатьох бібліотеках та архівах світу, зокрема: Інституті мистецтвознавства, фольклористики та етнології ім. М.Т. Рильського, м. Київ (300 од.зб.); Інституті рукописів Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського (НБУВ) (1024 од.зб.); архіві Проблемної науково-дослідної лабораторії музичної етнології при Вищому державному музичному інституті ім. Лисенка, м. Львів (775 од.зб.).

Записи фонографічних циліндрів здійснювались як у спеціально обладнаних студіях, так і в етнографічних експедиціях. В Україні застосування фонографів у етнографічних експедиціях почалося в 1902–1905 рр. і тривало до кінця 1940-х років. Великі унікальні колекції записів на фонографічних циліндрах зберігаються не тільки у відомих культурних закладах і музеях, а також у приватних колекціях, здебільшого в західних регіонах України.

Зібрання колекцій записів на валиках дозволили зберегти музичні й мовні традиції різних культур. Через відсутність апаратури якісного відтворення звуку ці безцінні зразки звукової культурної спадщини мало або взагалі недоступні дослідникам, аматорам і знавцям народної творчості. Учені США, Австрії, Німеччини, Швейцарії, Японії й інших розвинутих країн уже досить довго працюють над проблемою відтворення звуку з циліндрів Едісона, перезаписом його на сучасні носії інформації.

Сьогодні цей матеріал став безцінним. Але, на жаль, після багатьох прослуховувань восковий шар валиків стає все більш пошкодженим. Хімічні елементи, що входять до складу валиків, протягом часу псується, знищуючи сам валик. Тому процес руйнації взагалі зупинити неможливо.

Нерідко організації, що займаються збереженням і реставрацією раритетних носіїв запису, що представляють художню цінність, для продовження терміну збереження фондів «консервують» копії «до кращих часів».

Останнім часом у світі зріс інтерес до колекцій валиків, що лежали забутими чи занедбанними. Із цих тендітних валиків багато були втрачені через поломки, спресованість, розплавлювання воску чи інших ушкоджень. Стало очевидним, що необхідні спільні зусилля державних установ та організацій для координації робіт по збереженню валиків та їхньому відтворенню.

Постає велика необхідність у якісному перезаписі валиків для збереження духовної спадщини наступним поколінням.

Актуальність цієї тематики зумовлена рядом факторів, роль і значення яких із часом лише зростають. Це насамперед удосконалення існуючих методів і розвиток експериментальних досліджень нових методів зчитування звукової інформації з раритетних носіїв — воскових фонографічних циліндрів. Завдяки чому стає можливим сьогодні доступ до музичних творів широкому колу зацікавлених осіб.

Інший важливий фактор актуальності цієї тематики зумовлений швидким розвитком методів цифрової обробки сигналів. Нині вони дозволяють отримувати якісні результати по відновленню та реконструкції звукового сигналу.

Порівняно із сучасними носіями інформації, записи на фонографічних циліндрах характеризуються високим рівнем шумів, пов'язаним із механічним пошкодженням поверхні циліндрів, налипанням пилу, руйнуванням поверхні воскових циліндрів мікроорганізмами. Найбільшу шкоду інформаційній поверхні завдають пошкодження мікроорганізмами й багаторазові відтворення звуку методами, пов'язаними з великим тиском на поверхню циліндра [2]. Необхідно зауважити, що головним недоліком фоноциліндрів, як носіїв запису, є достатня м'якість матеріалу, з якого вони виготовлені.

Публікація робіт, присвячених дослідженню різних способів зчитування фоноциліндрів, свідчить про важливість і нагальну потребу узагальнюючого підходу в цьому напрямку [3–8].

На ранньому етапі (у 1940–1950 рр.) виконання робіт із перезапису фонографічних циліндрів використовувався механічний метод відтворення звуку. Удосконалений фонограф використовувався ще досить довго. З розвитком техніки грамазапису, появою електропрогравачів, електричний метод почали застосовувати й для відтворення звуку з фонографічних циліндрів. У розроблювальній для цієї мети апаратурі застосовуються традиційні електрозвукознімачі й електронні системи від електропрогравачів високого класу [3–5].

Основним недоліком цих методів є великий тиск відтворюючої голки на поверхню циліндра. Навіть для найсучасніших звукознімачів величина тиску голки на поверхню звукової доріжки складає 15–20 мН. При такому тиску й швидкості обертання циліндра 160–180 об/хв., динамічне навантаження на поверхню циліндра досить істотне, що може привести до деформації профілю звукової доріжки чи руйнуванню її взагалі. А це, у свою чергу, може призвести до спотворення відтвореного звуку.

Основна проблематика в цій області пов'язана з розробкою шляхів подолання можливостей пошкодження раритетних носіїв при їхньому зчитуванні. Одним із ключових факторів розвитку в цьому напрямку виступає технологічний прогрес. Цікавий напрям досліджень запропонували японці.

Японські дослідники зробили спробу розробити апаратуру безконтактного оптичного (лазерного) відтворення звуку з воскових циліндрів [6, 8]. Однак, через неоднорідну структуру відбиваючої поверхні воску, наявності пилу, мікроорганізмів і т.д. корисний сигнал виявився дуже зашумленим, що істотно позначилось на якості відтвореного звуку.

Результати обстежень фізичного стану інформаційної поверхні воскових циліндрів показують, що загалом більшість із них мають ушкодження [2].

У зв'язку з цим, використовувати для зчитування фоноциліндрів існуючі на сьогоднішній день методи є недоцільним, з огляду на проблеми якості відтвореного звуку та можливості руйнування звукових канавок.

Таким чином, актуальною задачею, що має величезне наукове й культурне значення, є створення системи неруйнівного відтворення звукової інформації з раритетних носіїв — воскових циліндрів Едісона, і перезапис їх на сучасні носії. Вирішення цієї задачі дасть можливість зберегти для нащадків музичну культурну спадщину, ввести її до наукового обігу, зробити доступною широкому колу шанувальників музичного й виконавського мистецтва.

У результаті аналізу причин, що спотворюють якість відтвореного сигналу, існуючої апаратури й принципів відтворення, в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України був реалізований принципово новий метод високоякісного відтворення звуку з фонографічних циліндрів Едісона [7].

Робота була ініційована звертанням ЮНЕСКО, Ігуді Мінухіна до керівництва Національної академії наук України по перезапису фонографічних циліндрів Едісона з колекції Інституту рукописів НБУВ. Початку робіт сприяв директор Віденського фонографічного архіву Австрійської академії наук доктор Д. Шуллер.

Відтворення звукових колекцій воскових фонографічних циліндрів, які зберігаються в Україні та світі, перезапис їх на сучасні носії інформації сприятиме глибшому вивченню культурної спадщини народів світу.

Аналіз фізичних принципів вимірювання параметрів звукової доріжки

Існує три різних способи відтворення звукової інформації з механічної фонограми [4], зокрема, і з воскових фонографічних циліндрів: акустичний, електричний, оптичний. У таблиці представлено переваги й недоліки цих способів.

Аналіз і дослідження існуючих способів відтворення звукової інформації з фонографічних циліндрів доводить, що якісно відтворити звуковий сигнал із будь-яких воскових валиків, у тому числі й з дефектами, без їхнього подальшого ушкодження практично неможливо.

При застосуванні неруйнівного *оптичного* способу унеможливується якісне відтворення багатьох фонографічних циліндрів. За експертним висновком про стан фізичного збереження колекції фонозаписів єврейського фольклору на фонографічних воскових циліндрах, що зберігається в Інституті рукописів НБУВ, із 1014-ти обстежених циліндрів тільки 288 одиниць (28 %) не мають дефектів [2]. Таким чином, використання неруйнівного *оптичного* способу матиме тільки вибіркового характеру, і більшість воскових валиків не буде відтворено. Це є переконливим чинником для того, щоб відмовитися від оптичного способу відтворення звукової інформації з воскових валиків.

Що стосується *електричного* способу відтворення звуку із застосуванням стандартних електричних звукознімачів будь-якого типу [9], то тут є вагомими проблеми, які не дозволяють достовірно відтворити звукову інформацію, враховуючи головні вимоги — якісне та безпечне відновлення інформації без ушкодження фоноциліндрів.

Характерні особливості способів відтворення звуку з фоноциліндрів

Спосіб відтворення, та принцип дії	Переваги	Недоліки	Відтворення на зниженій швидкості обертання
Акустичний Перетворює механічну енергію обертання фоноциліндра безпосередньо в акустичну енергію	простота конструкції	Наявність контакту з канавкою, велика притискна сила 1 Н, швидке псування фоноциліндрів, малий діапазон відтворених частот 0,2-4 кГц, низька якість	–
Електричний <i>П'єзоелектричний звукознімач</i> діє на основі п'єзоелектричного ефекту	простота конструкції, дешевизна	Наявність контакту з канавкою, порівняно велика притискна сила 50-70 мН, невеликий діапазон відтворених частот 0,06–12 кГц	–
Електричний <i>Магнітний звукознімач</i> — вихідний сигнал обумовлений електромагнітною індукцією, що виникає при механічних коливаннях голки	невелика притискна сила звукознімача 15-20 мН, діапазон відтворюваних частот 0,02–20 кГц, зменшення маси рухливої системи головки звукознімача й підвищення її гнучкості	Наявність контакту з канавкою, чутливість до магнітних полів, низька чутливість головки й необхідність корекції частотної характеристики	–
Електричний <i>Фотоелектричний звукознімач</i> — перетворює механічні коливання голки в електричні за допомогою перекриття світлового потоку, що падає на площадки фотоприймача	невелика притискна сила звукознімача 15-20 мН, широкий діапазон відтворюваних частот 0–20 кГц	Наявність контакту з канавкою, складність конструкції	+
Оптичний Заснований на методі відбиття лазерного променя від модулюючої канавки і перетворення прийнятої оптичної інформації в електричний звуковий сигнал	безконтактне зчитування інформації, що є найбільш безпечним	Складність конструкції, невірне звуковідтворення інформації через неоднорідну структуру поверхні циліндра, і як наслідок, низьке відношення сигнал/шум	+

Наявність фізичного контакту голки з тендітною поверхнею звукової доріжки воскового циліндра при відтворенні зі швидкістю обертання, яка дорівнює швидкості запису, може призводити до руйнування канавок. А в окремих випадках, при наявності механічних пошкоджень у вигляді подряпин, тріщин, сколів приз-

водитиме не тільки до руйнування поверхні внаслідок абразивного ефекту, але й створенні нових подряпин і сколів внаслідок того, що голка звукознімача при таких великих прискореннях буде виштовхуватися з канавки, і з силою падати на іншу. Гірше того, при цьому буде відбуватися навіть утрата деякої інформації, що приводить в кінцевому випадку до спотворення фонограми. Водночас, з'ясовано, що типові промислові електричні звукознімачі пристосовані виключно для відтворення поперечного запису звукових канавок (грамплатівки), тоді як звукові канавки фоноциліндрів утворені за допомогою глибинного запису.

У результаті звуковий сигнал, при відтворенні електричним звукознімачем, не відповідає справжньому профілю звукових канавок, які записані на фоноциліндрі й таким чином якість сигналу безумовно, погіршується. За розрахунками, середня коливальна швидкість запису на фоноциліндрах, при зниженій швидкості обертання, становить 0,2–0,3 см/с. Тоді як середня коливальна швидкість запису на грамплатівках становить 10 см/с, і стандартні звукознімачі розраховані саме на це значення. Отже, відношення коливальних швидкостей дорівнює 30–50. Враховуючи те, що магнітні звукознімачі розвивають е.д.с. пропорційну коливальній швидкості голки (тобто вони є швидкісними звукознімачами), то відношення сигнал/шум істотно погіршиться за рахунок зниження рівня відтвореного сигналу.

Підсумовуючи сказане, можна стверджувати про те, що існуючі способи та засоби зчитування звукової інформації з фонографічних циліндрів, унеможливають одночасне виконання основних вимог — якісного та неруйнівного відтворення звукової інформації.

Спосіб вимірювання параметрів звукової доріжки

Основними труднощами при зчитуванні записів із фоноциліндрів є: відсутність стандартного устаткування для відтворення звуку з фоноциліндрів без їхнього ушкодження; фізичне руйнування звукових доріжок внаслідок агресивної дії середовища (грибки, мікроорганізми, цвіль). Таким чином, зчитування повинно забезпечувати як доступ до інформації носія запису, так і його збереження.

При програванні фоноциліндра звукова канавка переносить як оборотну, так і необоротну деформації. Від сполучення пружних і в'язких властивостей матеріалу фоноциліндра залежить стан канавки, що програвється, її схильність до зносу. Щоб уникнути необоротної деформації та запобігти зменшенню зносу фоноциліндра, необхідно, щоб навантаження на фоноциліндр було по можливості малим.

Величина точності, з якою необхідно забезпечити вимірювання амплітуди коливань для отримання відтворених фонограм високої якості, дорівнює

$$\Delta A = \frac{A_{сер}}{10^{\frac{1}{N}}} = 0,01 \text{ мкм},$$

де $A_{сер}$ — середня амплітуда запису канавки, 5 мкм; N — динамічний діапазон, 54 дБ (як для грамплатівок).

З метою вирішення основних вимог — якісного й неруйнівного відтворення звукової інформації — було розроблено новий спосіб й апаратуру неруйнівного

відтворення звуку з воскових валиків. Його суть полягає в тому, що для повноцінного відтворення звуку застосовується метод фізичного контакту голки з канавкою. Але при цьому зчитування звукової інформації відбувається на зниженій до 12 об/хв. швидкості обертання фоноциліндра. Зазначимо, що записи на валиках зроблені зі швидкістю обертання 120–160 об/хв. (за дуже рідким виключенням 90–100 об/хв.), тому можна стверджувати про зменшення швидкості в середньому в 12 разів. Це, у свою чергу, дає зменшення динамічного навантаження на поверхню воскового циліндра в 100–180 разів, тобто пропорційно квадрату відношення швидкостей при запису й відтворенні інформації.

Таким чином, зменшення швидкості обертання фоноциліндра при зчитуванні, забезпечуватиме подолання саме проблеми неруйнівного відтворення звуку з воскових валиків.

Величину швидкості обертання фоноциліндра при зчитуванні рівній 12 об/хв. було визначено в результаті проведеної оцінки механічних властивостей за допомогою непрямого електроакустичного вимірювання. Результати досліджень показали, що швидкість обертання фоноциліндра при зчитуванні 12 об/хв., з урахуванням величини притискної сили голки звукознімача 20 мН, є оптимальною з точки зору збереження інформаційних канавок фоноциліндра та цілісності відтвореної фонограми.

Треба враховувати, що при зменшенні швидкості зчитування відбувається зміщення спектра сигналу в більш низьку частотну область. Використання в цьому випадку традиційних електричних звукознімачів недоцільно з точки зору якісного та достовірного зчитування звукової інформації, так як вони спотворюють сигнал на цих частотах.

Звідси випливає необхідність у створенні нового звукознімача, як одного з найважливіших вузлів системи відтворення звуку.

При розробці нового звукознімача необхідно виходити з того, що відтворення звуку з фоноциліндра зводиться до вимірювання амплітуди відхилення профілю звукових канавок від свого середнього положення, на яких зафіксовані звукові коливання при запису. Тому, як звукознімач доцільно використовувати датчик вимірювання малих лінійних переміщень. Чутливим елементом датчика можуть бути, наприклад, консольна балка, діафрагма, резонуюча струна. Для випадку відтворення звуку найбільш придатним варіантом чутливого елемента є консольна балка.

Для вимірювання малих лінійних переміщень добре досліджені й широко використовуються в наукових дослідженнях і в техніці електричні, магнітні й оптичні методи вимірювань.

На підставі величини виміру амплітуди, яка коливається в межах 0,125–25 мкм, що дорівнює відношенню величин у 200 раз, точності виміру 0,01 мкм, та з огляду на відтворення саме звукової інформації більш прийнятними є оптичні методи вимірювань малих лінійних переміщень.

Оптичні методи, при однакових розмірах консольної балки, детектують меншу мінімальну величину сигналу, ніж електричні, що підтверджується основною тенденцією останніх років щодо більш широкого використання оптичних схем датчиків малих лінійних переміщень [10].

У результаті в якості звукознімача було запропоновано оптичний чутливий елемент, побудований на основі інтерферометра Майкельсона з використанням методу диференціальної фотометрії. На відміну від традиційних звукознімачів, запропонований оптично-механічний спосіб виміру параметрів звукової канавки забезпечує вимірювання саме профілю інформаційної доріжки, що підвищує точність відтворених звукових коливань.

До переваг запропонованого оптико-механічного способу виміру параметрів інформаційної звукової доріжки можна також віднести можливість якісного відтворення звукового сигналу з будь-яких воскових фоноциліндрів, у тому числі й з дефектами, без їхнього подальшого ушкодження за рахунок значного зменшення обертання фоноциліндра [11].

Оптико-механічний блок

Для знімання профілю звукової доріжки запропоновано, розроблено й досліджено комбіновану оптико-механічну інтерферометричну систему, побудовану за класичною схемою інтерферометра Майкельсона. При розробці установки інтерференційного відтворення звукового сигналу з фонографічних циліндрів був використаний досвід по створенню оптичних запам'ятовуючих пристроїв, зокрема, конструювання надточних аеростатичних направляючих, інтерферометричних датчиків.

Узагальнену функціональну схему системи неруйнівного відтворення звуку з фонографічних циліндрів із високою розподільною здатністю представлено на рис. 1.

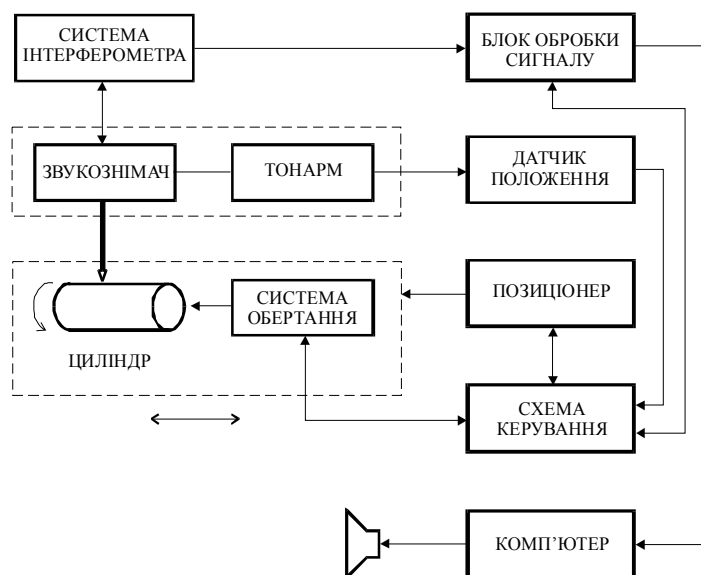


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема системи неруйнівного відтворення звуку з фонографічних циліндрів

Профіль звукової доріжки циліндра відстежується за допомогою голки сферичної форми. З голкою жорстко зв'язаний оптичний елемент вимірювального

плеча інтерферометра — кутиковий відбивач. Інтерферометричний сигнал після перетворення в блоці обробки надходить на аналого-цифровий перетворювач, де він оцифровується й зберігається у вигляді файлу на твердому диску комп'ютера для подальшої програмної обробки. Для одержання звукового сигналу здійснюється обчислення швидкості зміни виміряного профілю поверхні та його комп'ютерна обробка.

З метою забезпечення стабільності й точності, інтерферометрична вимірювальна система виконана нерухомою. Знімання профілю звукової доріжки здійснюється за допомогою синхронного обертання й осьового переміщення циліндра щодо нерухомої інтерферометричної системи.

Обертання циліндра здійснюється зі сталою швидкістю 12 об/хв. Поздовжня швидкість переміщення циліндра встановлюється слідкуючою системою за доріжкою таким чином, щоб голівка звукознімача торкалася кожної канавки під прямим кутом. Притискна сила голки звукознімача 20 мН. Основну увагу при розробці вузла рухливої призми інтерферометра приділено зменшенню маси рухомого блока.

Інтерферометр є невід'ємною частиною звукознімача. Оптичні сигнали, що пропорційні профілю, утворені в інтерферометрі за рахунок режиму змішаних хвиль, тобто інтерференції променів, відбитих від рухомого, зв'язаного з поверхнею циліндра, і нерухомого відбивачів.

Розроблена установка дозволяє відтворювати коливання в широкому частотному діапазоні (до 20 кГц), що значно перевищує спектр частот, записаних на фонографічному циліндрі.

Обробка інтерферометричних сигналів

При відтворенні фоноциліндра вертикальні коливання голки звукознімача передаються кутиковому відбивачу, який є рухливим елементом інтерферометра, змінюючи різницю ходу між інтерферуючими променями. Різниця ходу, що завжди однозначним образом зв'язана з різницею фаз, в інтерферометрі Майкельсона визначається виразом

$$\Delta = 2(x_0 - x_1) = 2x,$$

де x_0 , x_1 — координати точок простору; x — значення величини переміщення голки звукознімача.

Завдання полягає у визначенні значень x за виміряними значеннями інтерференційних сигналів $U_1(t)$ і $U_2(t)$, які відповідно дорівнюють вихідним сигналам першого та другого фотоприймачів:

$$U_1(t) = U_0 + U_m \sin \left[\frac{4\pi(x_0 - x_1)}{\lambda} + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \int_0^t v(t) dt \right], \quad (1)$$

$$U_2(t) = U_0 + U_m \cos \left[\frac{4\pi(x_0 - x_1)}{\lambda} + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \int_0^t v(t) dt \right], \quad (2)$$

де U_0 — стала складова сигналу.

Різниця ходу й відповідно значення величини переміщення x визначається з виразів (1) і (2) у вигляді:

$$\Delta = 2x = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{U_1}{U_2} \right) + \frac{k\lambda}{2},$$

де $k = \Delta/\lambda$ — порядок інтерференції.

Так як різниця ходу Δ у нашому випадку змінюється зі швидкістю v і $\Delta = vt$, то світловий потік, що надходить на фотоприймачі, буде модульований із частотою $f = v/\lambda$. На рис. 2 показаний приклад фрагмента реальних інтерференційних сигналів, отриманих при зчитуванні фоноциліндра, а на рис. 3 показані відповідні їм спектри.

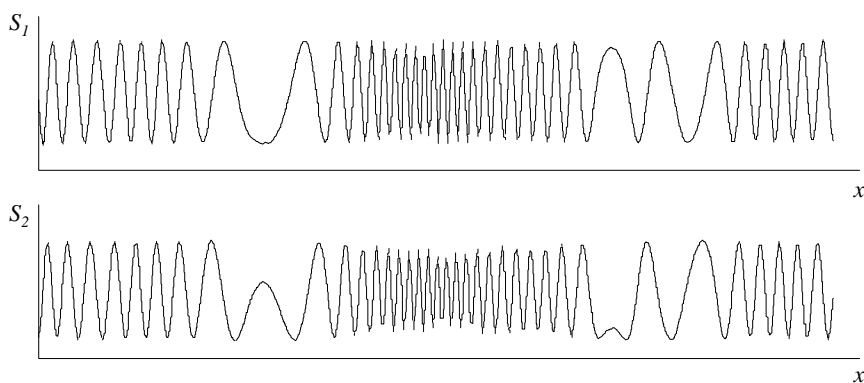


Рис. 2. Приклад реальних інтерференційних сигналів

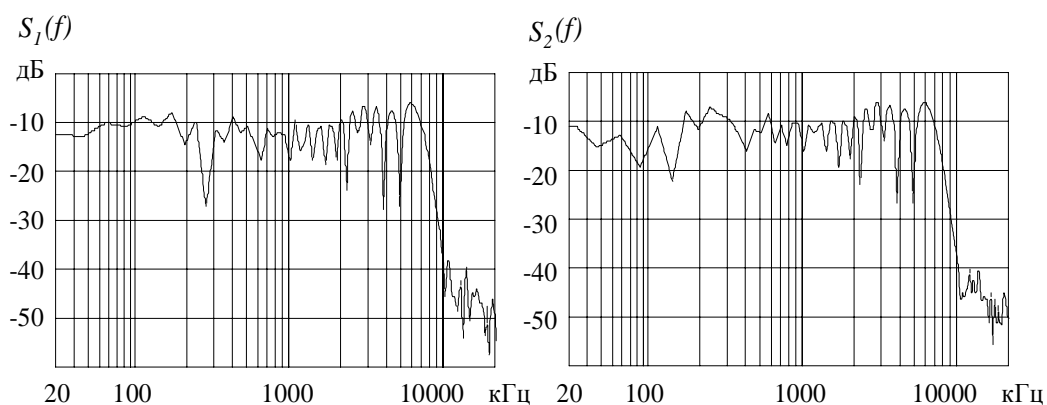


Рис. 3. Спектри реальних інтерференційних сигналів

Фактично необхідний звуковий сигнал, що відповідає глибинному профілю канавки фоноциліндра, знаходиться з виразу:

$$U(t) = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_1(t)}{U_2(t)}\right).$$

Електричні сигнали, що знімаються з фотоприймачів, піддаються подальшій обробці в електронному блоці з метою добування з них інформації про вимірюваний профіль звукових доріжок фоноциліндра. Відомі різні способи перетворення інтерференційних сигналів із метою визначення величини й напрямку переміщення об'єкта, у нашому випадку голки звукознімача. Практично були реалізовані: спосіб перетворення, побудований на основі пристрою рахування інтерференційних смуг, та метод обробки інтерференційних сигналів на основі алгоритму визначення аргументу вектора. Експериментальними дослідженнями було доведено, що дані способи мають суттєві недоліки: наявність нелінійних викривлень сигналу та шуми [12].

По-перше, головна проблема полягає в апаратурній реалізації тригонометричної функції $\operatorname{arctg}(U_1/U_2)$ із заданою точністю через необхідність виконання операції розгортання фази, що представляє собою перетворення значень приведеної фази на інтервалах $[-\pi, \pi]$ у безперервне змінювання значень повної фази. Це, безумовно, приводить до збільшення похибки в обробці інтерференційних сигналів.

По-друге, так як у наведених вище способах відновлення звуку відбувається з послідовності імпульсів, то при цьому неминуче виникає проблема згладжування ступеневої форми сигналу й заглушення гармонік, внесених операцією множення. Через неідеальність АЧХ-фільтрів може відбуватися або недостатнє заглушення цих перешкод, або надмірне ослаблення корисних високочастотних складових. Погано заглушені побічні гармоніки спотворюють форму аналогового сигналу (особливо в області високих частот), що створює враження «шорсткого», «брудного» звуку.

З метою усунення вищезгаданих недоліків було запропоновано алгоритм розгортання фази, який не потребує використання функції арктангенса при обчисленні фази інтерференційного сигналу [12]. Алгоритм створено на основі відомого методу диференціальної синус-косинусної демодуляції [13]. Розглянемо реалізацію цього методу в системі відтворення звуку з фонографічних циліндрів.

Вихідні сигнали першого й другого фотоприймачів інтерферометра (1) і (2) піддаються диференціюванню по незалежній змінній t , перехресному множенню й відніманню відповідно до виразу:

$$Z(t) = U_2(t) \cdot \frac{dU_1(t)}{dt} - U_1(t) \cdot \frac{dU_2(t)}{dt}$$

Це безпосередньо приводить до виразу для градієнта фази:

$$Z(t) = U_m^2 \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + U_0 U_m \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \cdot (\cos \theta(t) + \sin \theta(t)),$$

де $\theta(t) = \frac{4\pi x}{\lambda} + \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \int_0^t v(t) dt$ — різниця фаз.

Так як величина U_0 є сталою складовою сигналу, то вона за допомогою електричних перетворень може бути зведена до нуля. Тоді

$$Z(t) = U_m^2 \cdot \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (3)$$

Важливою особливістю цього рівняння є те, що градієнт фази знаходиться безпосередньо із двох сигналів інтерферометра, що відрізняються один від одного зміщенням по фазі на $\pi/2$, без необхідності обчислення функції арктангенс.

Інтегрування виразу (3) по незалежній змінній дозволяє знайти значення повної фази в будь-якій точці:

$$\tilde{Z}(t) = \int_0^t Z(t) dt = U_m^2 \cdot u(t) .$$

Так як різниця ходу завжди однозначним образом зв'язана з різницею фаз, то відповідно можемо визначити й значення величини переміщення голки звукознімача x .

Теоретично, при використанні методу диференціальної синус-косинусної демодуляції, відтворений сигнал може мати необмежений динамічний діапазон, але практично він буде обмежений динамічним діапазоном роботи електронної схеми.

Також у силу того, що визначення градієнта фази відбувається безпосередньо із сигналів інтерферометра, для повного відновлення звукової інформації достатньо в якості інтегратора використовувати фільтр низької частоти (ФНЧ) першого порядку. Це дозволяє зменшити частотні викривлення за рахунок розширення смуги відтворення, тим самим підвищуючи якість звукового сигналу.

На рис. 4 зображено блок-схему пристрою обробки інтерференційних сигналів методом диференціальної синус-косинусної демодуляції. У розробленій електронній схемі значення похідних знаходять за допомогою диференціаторів, зібраних на операційних підсилювачах із застосуванням RC -ланцюгів. Операції перехресного множення виконуються за допомогою інтегральних аналогових помножувачів. Для одержання результату множення із правильним алгебраїчним знаком, тобто добутку двох співмножників будь-якого знаку, в електричній схемі використовуються чотириквadrантні помножувачі. Як інтегратор застосовано ФНЧ першого порядку.

На рис. 5 ілюструються часові діаграми роботи електронної схеми запропонованого пристрою обробки інтерференційних сигналів із використанням методу диференціальної синус-косинусної демодуляції, де U_1, U_2 — інтерференційні сигнали з виходу відповідно 1-го та 2-го фотоприймачів; U_3, U_4 — здиференційова-

ний сигнал U_1 та U_2 ; U_5, U_6 — сигнал на виході першого та другого помножувачів; Z — результуючий сигнал, відповідний градієнту фази у виразі (3); \tilde{Z} — сигнал на виході інтегратора, що відповідає звуковому сигналу.

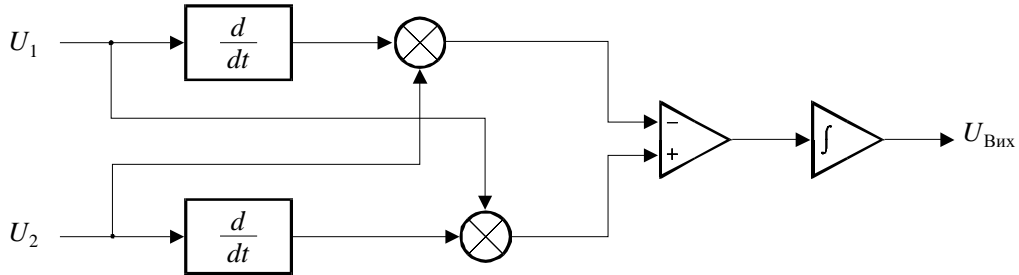


Рис. 4. Блок-схема пристрою обробки інтерференційних сигналів

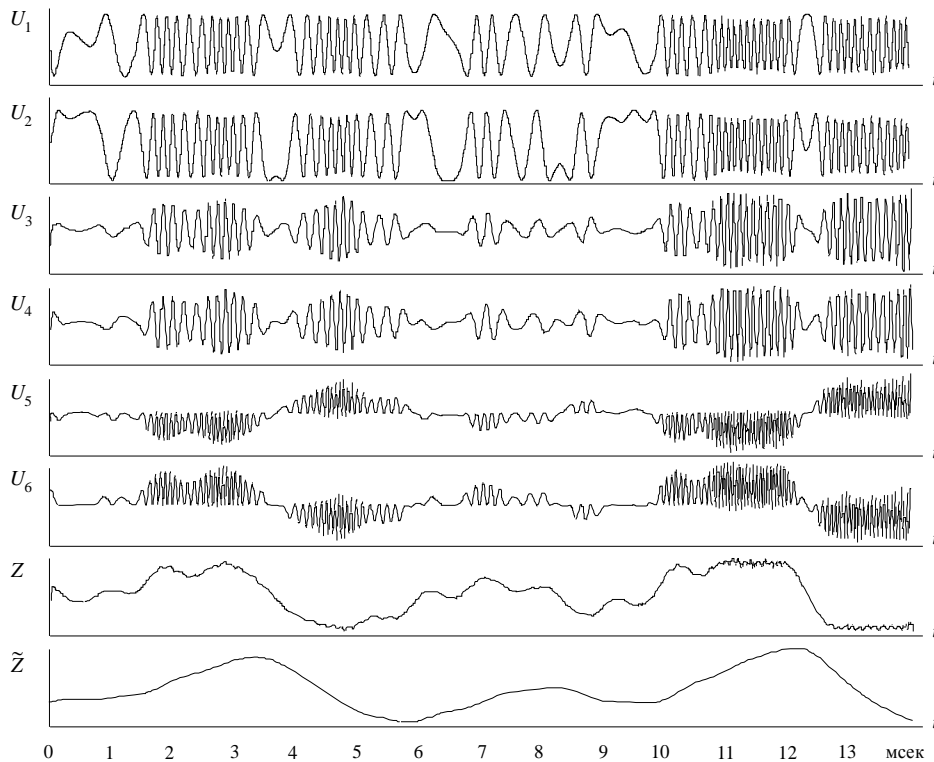


Рис. 5. Часові діаграми роботи електронної схеми

У ході порівняльних досліджень було отримано результати зчитувань із використанням різних способів перетворення інтерференційних сигналів, а саме способу перетворення з використанням алгоритму визначення аргументу вектора та способу перетворення на основі методу синус-косинусної демодуляції. Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що порівняно з іншими способами перетворення інтерференційних сигналів запропонований спосіб має:

- розширений динамічний діапазон;
- збільшення відношення сигнал/шум;
- малі нелінійні викривлення;

— розширення частотної смуги відтворення.

Експериментальні дослідження довели, що запропонований спосіб перетворення інтерференційних сигналів забезпечує перевагу перед іншими відомими способами. У всьому діапазоні обробки значень вхідних інтерференційних сигналів запропонований спосіб характеризується більшою природністю звучання та меншим рівнем шумів.

На рис. 6 представлені для порівняння хвильові форми реальних звукових сигналів, оброблених різними способами, що дозволяє судити про якість обробки інтерференційних сигналів, де U_1 і U_2 — інтерференційні сигнали з виходу першого й другого фотоприймачів відповідно; U_3 — хвильова форма звукового сигналу, отримана після обробки, з використанням алгоритму визначення аргументу вектора; U_4 — хвильова форма звукового сигналу, отримана після обробки, з використанням методу диференціальної синус-косинусної демодуляції.

Аналіз форми обвідної звукових сигналів, показаних на графіках U_3 і U_4 (рис. 6), у характерних областях A і B указує на те, що крива на графіку U_3 має обмеження розмаху амплітуди в порівнянні з графіком U_4 . Також видно, що форма коливань, яка показана на графіку U_3 менш гармонійна. Це й складає основну проблему при відтворенні гучних звуків.

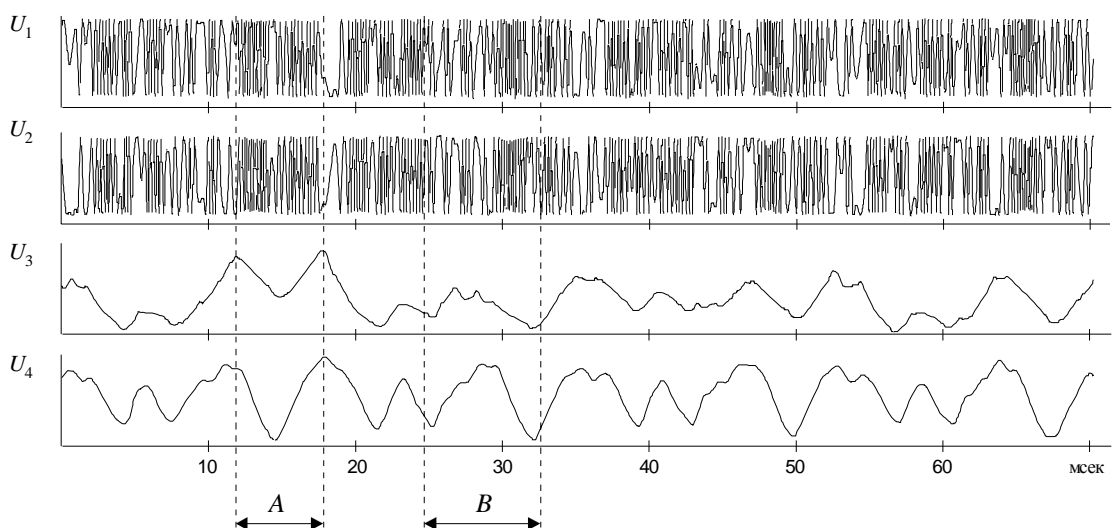


Рис. 6. Хвильові форми звукових сигналів

Розроблена система цифрового неруйнівного відтворення інформації з раритетних носіїв дозволяє відтворювати звукові коливання в широкому частотному діапазоні до 20-ти кГц, що значно перевищує спектр частот, записаних на фонографічному циліндрі. Використання в обробці звукового сигналу із частотним діапазоном до 20-ти кГц має дві очевидні переваги. Перше — це дозволяє зберегти вищі гармоніки звукового сигналу, що безпосередньо не сприймаються слухом, але позитивно впливають на формування загальної звукової картини. Друге — такий сигнал зручніше обробляти при видаленні імпульсних перешкод, тому що фронти імпульсів більш круті й імовірність їхнього виявлення підвищується.

Відновлення та реконструкція звукового сигналу у фонограмах раритетних носіїв запису

Записи, зроблені на фонографічних циліндрах, характеризуються високим рівнем шумів, які пов'язані з механічними ушкодженнями поверхні, налипанням пилу, руйнуванням поверхні воскового циліндра мікроорганізмами.

На рис. 7 представлені зображення інформаційних канавок, які були отримані за допомогою оптичного сканувального мікроскопу. Порівняння вигляду звукових канавок дає нам уявлення про достатньо значні ушкодження, які призводять до спотворення звукової інформації.

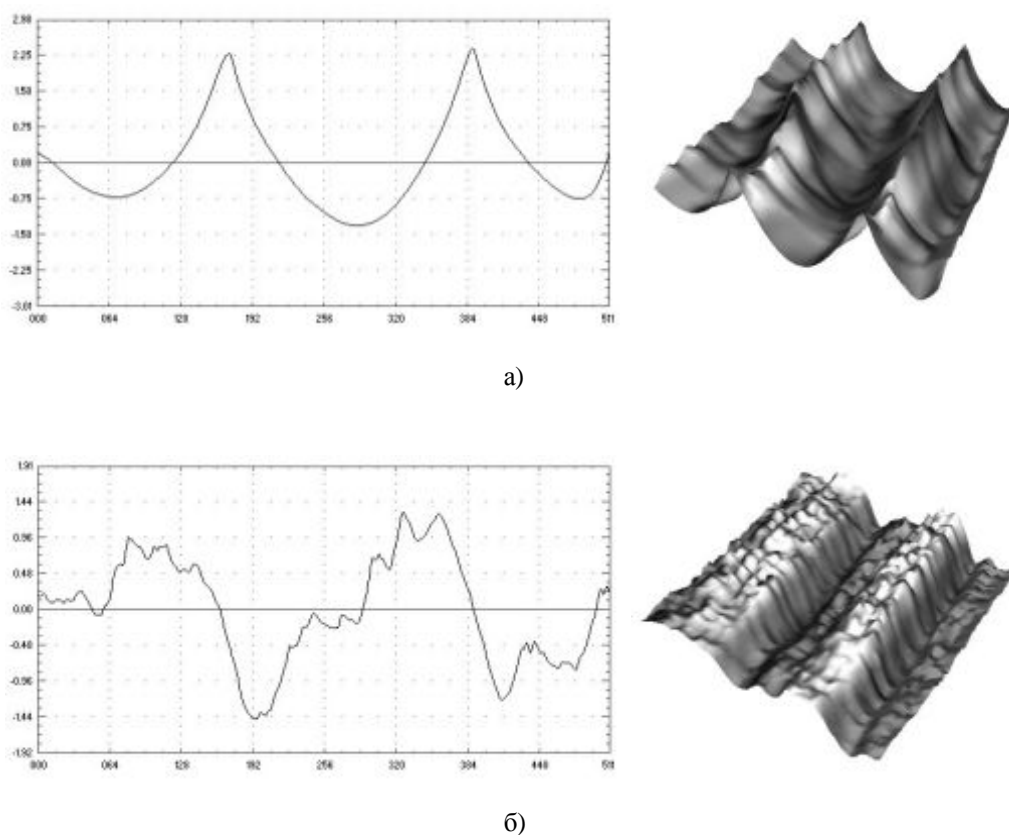


Рис. 7. Зображення звукових канавок (розмірність осей виражена в мкм):
а) поперечний та тривимірний профілі неушкоджених звукових канавок;
б) поперечний та тривимірний профілі ушкоджених звукових канавок

Окрім викривлень, які викликані механічним ушкодженням поверхні й довготерміновим зберіганням, існують викривлення, що викликали деградацію (погіршення) сигналу ще в момент запису. Так, апаратура, що застосовувалася, допускала запис у вузькому частотному діапазоні, в межах 200-4000 Гц, і вносила, крім того, великі викривлення, обумовлені резонансними явищами й перевантаженнями сигналу.

Більшість фонографічних циліндрів записані поза студію на портативних фонографах, рушійні механізми яких були далекі від досконалості, а тому мали

підвищену нерівномірність швидкості обертання й збільшений ексцентриситет. Ці відхилення рушійного механізму передавалися безпосередньо циліндру й викликали паразитну частотну модуляцію корисного сигналу — детонацію. На слух такого роду викривлення сигналу сприймаються як плавання й дроблення звуку. Обертіві деталі рушійного механізму додатково викликали низькочастотну перешкоду, яка, додаючись до корисного сигналу в момент запису, також приводила до викривлення сигналу.

Викривлені спектри первісних звуків, невелике відношення сигнал/шум, великі зміни у швидкостях запису, імпульсні перешкоди, шуми різнобічного характеру — усе це спричинює погіршення сприйняття записів.

Отже, на якість фонограм у значній мірі впливають дві фізичні властивості: це поверхневі шумові перешкоди, присутні на звукових доріжках унаслідок структурних дефектів поверхні воскового циліндра й амплітудні викривлення початкової характеристики звуку, що виникають у результаті роботи записуючого фонографа.

Сучасна обробка аудіосигналів пропонує різні способи поліпшення якості звучання від традиційної смугової фільтрації, динамічної фільтрації шумів, заглушення короткочасних імпульсних перешкод до особливо складних цифрових методів заглушення найрізноманітніших шумів й імпульсних перешкод.

Для досягнення найкращої якості при відновленні та реконструкції сигналів, присутні у фонограмах викривлення звуку насамперед необхідно класифікувати й розділити за тривалістю й частотою. Аналіз багатьох відтворених із циліндрів фонограм показав, що в переважній більшості присутні найбільш характерні перешкоди таких видів [14]:

- акустичні резонансні викривлення;
- короткі імпульсні перешкоди (кляцання);
- низькочастотні імпульсні перешкоди (тріск);
- низькочастотний шум (рокіт);
- широкосмуговий поверхневий шум;
- амплітудні викривлення;
- частотні викривлення;
- детонація.

Кожен вид перешкод має свої характерні риси та особливості, і для їхньої обробки використовуються різні алгоритми. Істотний вплив на якість очищення фонограми має послідовність, у якій придушуються різні види перешкод [11, 14].

Аналіз практичних досліджень по відновленню й реконструкції звукових сигналів, зчитаних із фоноциліндрів, дав оцінку впливу на характеристики якості як послідовності виконання процедур обробки, так і ступінь їхнього застосування. Будь-яка процедура обробки вносить свої коригування в сигнал у тій чи іншій мірі, і це треба враховувати при їхньому подальшому виконанні. Тому, з метою раціонального використання програмних засобів для якісного відновлення фонограм, було узагальнено алгоритм цифрової обробки сигналу у фонограмах раритетних носіїв запису. Ґрунтуючись на проведених теоретичних й експериментальних дослідженнях встановлено, що виконання процедур по відновленню та реконструкції сигналу слід виконувати згідно тієї послідовності, яка зазначена в роботі [14].

Ціль відновлення сигналу полягає в тому, щоб відокремити тільки деградований сигнал від корисного сигналу. Виконання процедур здійснюється в порядку зростання їхнього впливу на суттєві зміни реконструкції звукового сигналу.

Методи комп'ютерної обробки звукових сигналів ґрунтуються на принципах фільтрації й оцінювання параметрів по дискретній вибірці відліків сигналу. Обробка здійснюється на основі математичних представлень, що завжди є наближеними. Ступінь наближення значною мірою визначається складністю алгоритмів комп'ютерної обробки в межах прийнятих моделей сигналу й шуму. Найбільш відповідне наближення для досліджуваного сигналу в різних випадках може бути неоднаковим. Так, фонографічний циліндр може мати різні ушкодження звукових каналів від цвілі, мікроорганізмів, механічних дій тощо, розташованих хаотично по всій робочій поверхні циліндра, що в значній мірі ускладнює операції по видаленню шумових перешкод [15].

Важливо зауважити, що оцінка якості обробки звукового сигналу 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.

Висновки

На основі аналізу сучасних способів і стану проблеми неруйнівного зчитування звуку з фоноциліндрів (воскових валиків) формулюється важливість і доцільність розробки нового ефективного способу зчитування.

Досліджено всі можливі способи відтворення звукової інформації з воскових фонографічних циліндрів, та проаналізовано їхні недоліки й переваги.

Враховуючи вимоги щодо якісного відтворення звукового сигналу з будь-яких фоноциліндрів у тому числі й з дефектами, без їхнього подальшого ушкодження, було запропоновано новий оптико-механічний спосіб виміру параметрів звукової доріжки, який забезпечує високу точність і чутливість системи вимірювання.

Характерними особливостями розробленого способу є:

— знімання з фонографічних циліндрів саме профілю звукової доріжки з наступною реєстрацією в цифровій формі, що забезпечує більш точне відтворення звукового сигналу;

— зменшення динамічного навантаження на поверхню воскового циліндра більш ніж у 100 разів, завдяки зниженій до 12 об/хв. швидкості обертання;

— як звукознімач запропоновано застосувати оптичний чутливий елемент, побудований на основі інтерферометра Майкельсона, з використанням методу диференціальної фотометрії.

Обґрунтовано ефективність застосування методу диференціальної синус-косинусної демодуляції для обробки інтерференційних сигналів при відтворенні даних із фоноциліндрів. Показано, що такий підхід забезпечує усунення амплітудних спотворень і розширення динамічного діапазону відтвореного звукового сигналу.

Проведені суб'єктивно-статистичні експертизи показали, що якість відтворення звуку з фоноциліндрів за допомогою розробленої системи цифрового неруйнівного відтворення звуку з раритетних носіїв, є на достатньо високому рівні. Це підтверджується експертними оцінками контрольних зчитувань одних і тих самих фоноциліндрів спеціалістами Віденського грамархіву (Австрія) та Державної й Університетської Бібліотеки Орхуса (Данія) (State and University Library of Aarhus, Denmark).

1. *Резурер Е.И.* Граммофонная пластинка. — Госхимиздат, 1940. — 756 с.
2. *Новикова Г., Скобець І.* До питання про збереження фонографічних воскових циліндрів (у НБУ ім. В.І. Вернадського) // Бібліотечний вісник. — 1996. — № 6. — С. 10–12.
3. *John C. Fesler.* Electrical Reproduction of Acoustically Recorded Cylinders and Discs // J. of the Audio Engineering Society. — 1983 September. — **31**(9). — P. 674–694.
4. *Franz Lechleiter.* A Newly Constructed Cylinder Replay Machine for 2-inch Diameter Cylinders // Archiving the Audio-Visual Heritage: Third Joint Technical Symp. — Canadian Museum of Civilization, Ottawa. — 1990 May 3–5. — P. 145–148.
5. *Joe Pengelly.* The Electrical Reproduction of Cylinders // Phonographs & Gramophones: A Symp. Organised by the Royal Scottish Museum. — Edinburgh. — 1977. — P. 57–60.
6. *Toshiaki Iwai, et al.* Reproduction of Sound from Old Wax Phonograph Cylinders Using the Laser-Beam Reflection Method // Applied Optics. — 1986. — Vol. 25, N 5. — P. 597–604.
7. *Petrov V.V., Kryuchin A.A., Shanoylo S.M., Rjabokon I.P., Kosyak I.V., Atayev V.A., Zenin V.N., Voytenko A.K.* Optomechanical Method of Sound Reproduction from Edison Cylinders // Proc. SPIE. (International Conf. «Optical Storage and Transmission of Information». — Kiev (Ukraine). — 1996, 14–16 May — Vol. 3055. — P. 218–224.
8. *Nakamura T., Asakura T.* Optical Reproduction of Sounds from Old Phonographic Wax Cylinders // SPIE. — 1997. — Vol. 3190. — P. 304–313.
9. *Dietrich Shuller.* The Ethics of Preservation, Restoration, and Reissues of Historical Sound Recordings // J. Audio Eng. Soc. — 1991 Desember. — Vol. 39, N.12. — P. 1014–1016.
10. Дослідження та розробка систем неруйнівного цифрового відтворення аудіоінформації з раритетних носіїв: Звіт про науково-дослідну роботу (заключний) / Інститут проблем реєстрації інформації НАН України. УДК 681.327.68; № ДР 0199U000552. — 2001. — 104 с.
11. *Shanoylo S.M., Kosyak I.V., Petrov V.V., Kryuchin A.A.* Reading and Processing of Audio Information Reproduced from Edison Phonograph Cylinders by Method of laser Interferometry // Proc. SPIE. Laser Techniques and Systems in Art Conservation, Renzo Salimbeni; Ed. — 2001/10. — Vol. 4402. — P. 194–201.
12. *Косяк І.В.* Применение синус-косинусной демодуляции в обработке интерферометрических сигналов при считывании звуковой информации с фонографических цилиндров // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2003. — Т. 5, № 4. — С. 33–42.
13. *Singh H., Sircis J.S.* Direct Extraction of Phase Gradients from Fourier-Transform and Phase-Step Fringe Patterns // Appl. Opt. — 1994. — Vol. 33, N 22. — P. 5016–5020.
14. *Косяк І.В.* Відновлення та реконструкція звукового сигналу в фонограмах раритетних носіїв запису // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2005. — Т. 7, № 1. — С. 122–129.
15. *Косяк І.В.* Усунення широкосмугового поверхневого шуму в фонограмах раритетних носіїв запису // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 6, № 4. — С. 12–22.

Надійшла до редакції 10.05.2007