

УДК 534.323

## ВІБРАТО У СПІВОЧОМУ ГОЛОСІ

А. Б. АНАНЬЄВ, К. А. АНАНЬЄВА, В. С. ДІДКОВСЬКИЙ, С. А. ЛУНЬОВА

Національний технічний університет України "КПІ", Київ

Одержано 15.03.2004

Статтю присвячено аналізу вібрато музичних звуків. Наведено відомості про історію аналізу вібрато. Описано методику виділення вібрато із музичного звуку. Основну увагу приділено екстракції частотного вібрато. Наведені спектри та часові функції амплітудного та частотного вібрато для ряду співочих голосів виконавців різних музичних жанрів. Проведено порівняльний аналіз ілюстративного ряду голосів. Зроблено висновок про доцільність такого аналізу параметрів музичного звуку в процесі навчання співаків та інструменталістів.

Статья посвящена анализу вибрато музыкальных звуков. Приведены сведения об истории анализа вибрато. Описана методика выделения вибрато из музыкального звука. Основное внимание уделено экстракции частотного вибрато. Приведены спектры и временные функции амплитудного и частотного вибрато для ряда певческих голосов исполнителей разных музыкальных жанров. Проведен сравнительный анализ иллюстративного ряда голосов. Сделан вывод о целесообразности такого анализа параметров музыкального звука в процессе обучения певцов и инструменталистов.

This paper deals with the analysis of a vibrato in musical sounds. An information on the vibrato analysis history is provided. A technique of the vibrato extraction from the musical sound is described. The main attention is focused on the frequency vibrato extraction. A number of spectra and time dependencies for amplitude and frequency vibrato obtained from singing voices of artists from different musical genres is presented. A comparative analysis for voices from the illustrative series is carried out. A conclusion concerning the advisability of such analysis in the process of education of singers and instrumentalists is made.

### ВСТУП

Вібрато є одним з найпоширеніших методів збагачення звучання при інструментальному і вокальному виконанні музичних творів. Як характеристика, що не є обов'язковою і невід'ємною рисою звуку, а навпаки, може підлягати контролю виконавця, вібрато привертає велику увагу дослідників-музикознавців.

Однією з основоположних науково-дослідницьких робіт, присвячених аналізу властивостей співочого голосу, вважається опублікована в 1934 р. стаття В. Бартолом'ю (W. T. Bartholomew) "Фізичне визначення високої якості чоловічого голосу" [1]. У ній серед чотирьох основних характеристик співочого голосу першим було названо саме вібрато – періодичну зміну висоти та/або гучності звуку. За даними К. Сішора (C. Seashore) [2] 95 % часу співу видатних вокалістів припадає на звуки з вібрато. Таким чином, вібрато є значущою складовою кваліфікованого співочого голосу.

З першої половини ХХ століття вібрато стає об'єктом досліджень, пов'язаних з вивченням властивостей звуків музичних інструментів (зокрема, скрипки) [3]. У сучасних публікаціях розглядаються проблеми контролю вібрато при синтезі звуків струнних інструментів [4].

Зауважимо, що ранні дослідження співочого голосу мали на меті загальне визначення його якості та характеристик, від яких вона залежить [1]. Роз-

виток техніки дозволив вивчати ці характеристики кількісно [5, 6], концентруючись на психофізіологічних [7] і біофізичних аспектах цього явища [8].

Завдяки стрімкому розвитку комп'ютерних технологій у музичній акустиці в останні роки відкрився ряд принципово нових можливостей. Зокрема, на даному етапі актуальними стали питання моделювання, аналізу та синтезу співочого голосу [9, 10]. Серед сучасних задач, пов'язаних з вібрато, виділяють визначення його присутності, оцінку параметрів, виділення та видалення вібрато з голосу і його модифікацію [11].

Слід зазначити, що у трактуванні терміна "вібрато" існує певна неоднозначність. Вона полягає в тому, що деякі дослідники цим словом позначають періодичні коливання звуку з частотою 4÷6 Гц, а більш високочастотні називають "тремоло" [5, 7, 12]. Інші вважають, що "вібрато" – це лише частотна модуляція звуку, а "тремоло" – коливання амплітуди [13]. Ми у подальшому будемо дотримуватись енциклопедичного визначення [14] про амплітудне та частотне вібрато з частотою порядку 4÷6 Гц, а словом "тремоло" (буквально – "такий, що тремтить") будемо позначати пульсації будь-якого характеру, які мають вищу частоту і викликають відповідне слухове відчуття.

При експертному оцінюванні 11 чоловічих голосів кваліфікованими вокалістами-педагогами [1] було зазначено, що хороша якість співочого голосу знаходиться у безпосередній залежності від гладкого й рівномірного коливання його характери-

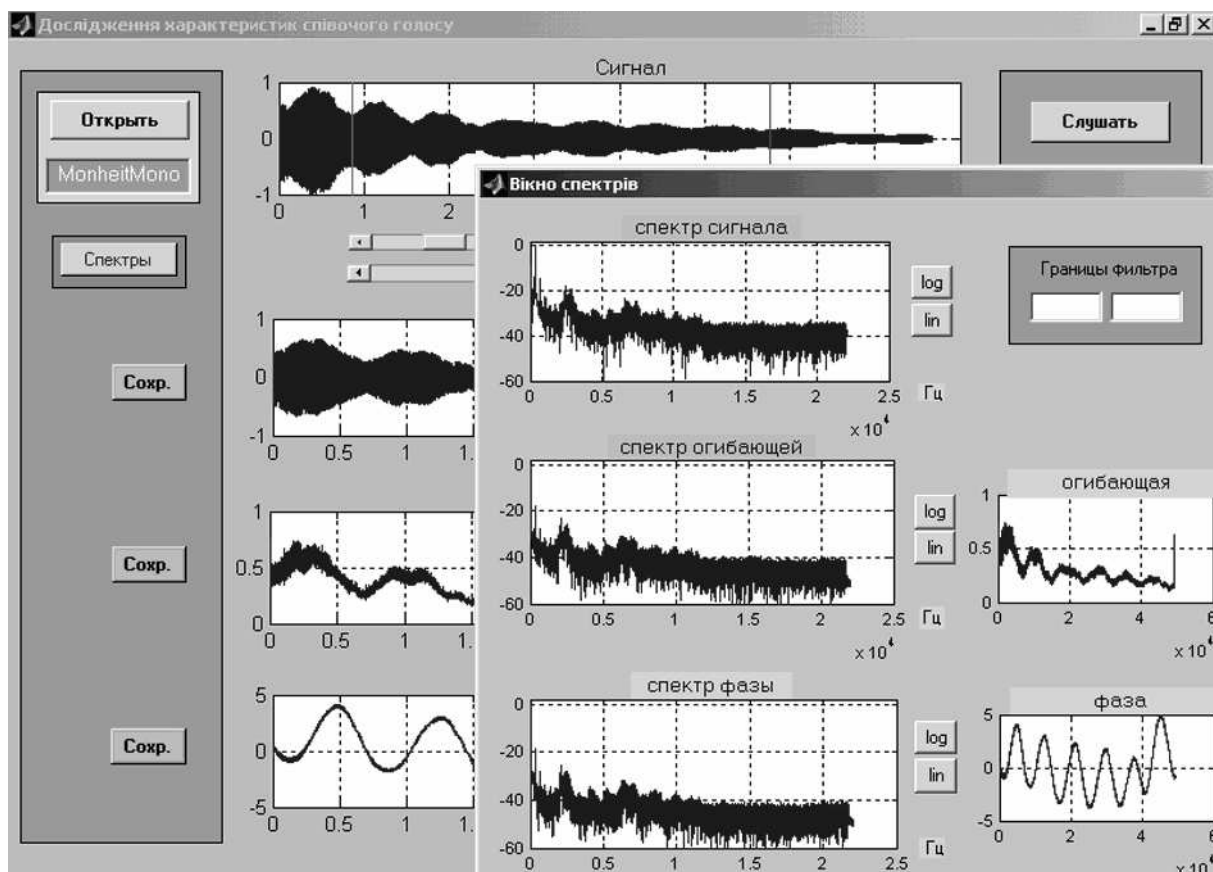


Рис. 1. Інтерфейс програмного стенду для аналізу властивостей співочого голосу

стик, а висота звуків з вібрато, оцінювана на слух, тісно пов'язана з гармонічністю модуляції [15]. Таким чином, нерегулярні пульсації голосу співака можуть спричинити слухове враження фальшивого виконання.

З точки зору досліджень особливість вібрато співочого голосу полягає в тому, що пульсація, яка є його сутністю, належить до тих властивостей, яких можна набути в процесі навчання. Вона “не впадає у вічі”, а природно вписується до цілісного звукового враження, істотно його збагачуючи. “Вібрато на слух воспринимается как компонент тембра, окраска звука... При включении вибрато звук изменился, стал более ‘живым’...” [15]. Саме той факт, що ефект вібрато так органічно сплітається з усіма іншими характеристиками співочого голосу, спонукає дослідників екстрагувати, відділити вібрато від цього “всього іншого”. Тут корисною була б можливість окремо вивчати як характеристики вібрато, свідомо керувати якими співак навчається у процесі постановки голосу, так і безпосередні темброві характеристики голосу (вони здебільшого визначаються

природними даними).

## 1. МЕТОДИКА

На рис. 1 показано інтерфейс програмного стенду, розробленого на базі пакета Matlab на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України “КПІ” для аналізу властивостей співочого голосу. Стенд дозволяє виділяти характеристики амплітудної та частотної пульсацій, формувати спектр коливання загалом, а також спектри амплітуди й частоти. Окрім того, користувач має змогу вирізати зі спектрів бажані частини і формувати сигнал, подібний до початкового, за виключенням вирізаних спектральних зон. На базі згаданого стенду було розвинуто технологію, яка дозволяє виділяти й аналізувати амплітудне та частотне вібрато для співочого голосу і для музичних інструментів, а також екстрагувати компоненти вібрато з музичного матеріалу, залишаючи в ньому лише стабільні тембральні характеристики.

Проілюструємо цю методику на прикладі фра-

гменту запису голосу відомої джазової вокалістки Джейн Монхейт (Jane Monheit) з пісні “Over the rainbow”. Тут голосний звук “і” довжиною 1.74 с звучить на частоті 349 Гц (нота “фа” першої октави). Рис. 2 демонструє наявність амплітудної модуляції для аналізованого фрагмента. Рис. 3 відображає спектрограму сигналу в координатах час–частота, на якій можна чітко розрізнити обертоновий тембровий склад звуку, співочу форманту в частотній області вище 2 кГц і регулярну структуру частотного вібрата кожного обертону. На рис. 4 у тривимірному вигляді зображено частину спектральної картини при сталому характері частотного вібрата. На рис. 5 показано частину спектра цього ж голосного, обчислену на повній довжині фрагмента. Видно, що форма спектральних піків є характерною для модульованого сигналу.

При виділенні модуляційних компонент з музичного звуку важливо обрати таку смугу фільтрування для кожної обертонової складової, за якої, з одного боку, не були б спотворені модуляційні функції гармоніки, а з іншого – відфільтроване коливання не містило б стороннього шуму. Для пошуку орієнтовних значень ширини смуги фільтрування застосуємо модель гармоніки співочого голосу з вібрата, яка відображає амплітудно й частотно модульоване коливання:

$$s(t) = e^{-\alpha t} \left( 1 + m \cos(2\pi f_m t) \times \cos(2\pi f_0 t) + \frac{\delta f f_0}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right).$$

Тут  $f_0$  – частота гармоніки;  $f_m$  – частота вібрата;  $\delta f = \Delta f / f_0$  – відносне відхилення частоти,  $\Delta f$  – девіація частоти модульованого коливання;  $e^{-\alpha t}$  – множник, моделюючий затухання звуку. Типовими для реальних звуків з вібрата (тремоло) діапазонами значень параметрів модуляції є  $f_m = 4 \div 8$  Гц, і  $\Delta f = 0.02 \div 0.06$  (глибина частотного вібрата від 33 центів до півтону). Параметр  $\alpha$  для аналізованого звуку має бути, по можливості, значно меншим 1.5 (саме такому спаданню відповідає, зокрема, наведений зразок голосу Монхейт, див. рис. 2).

Оцінимо смугу фільтрації гармоніки співочого голосу шириною спектра моделі на рівні від –40 до –60 дБ (це не призводить до чутного спотворення фільтрованої гармоніки). Тоді за відносну смугу фільтрації, в залежності від концентрацій енергії гармоніки в шумовому оточенні, доцільно вибрати величину

$$\frac{f_{\text{верх}} - f_{\text{нижн}}}{f_0} \approx 30 \%.$$

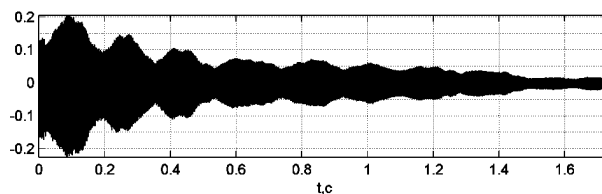


Рис. 2. Ілюстративний фрагмент запису голосу Джейн Монхейт

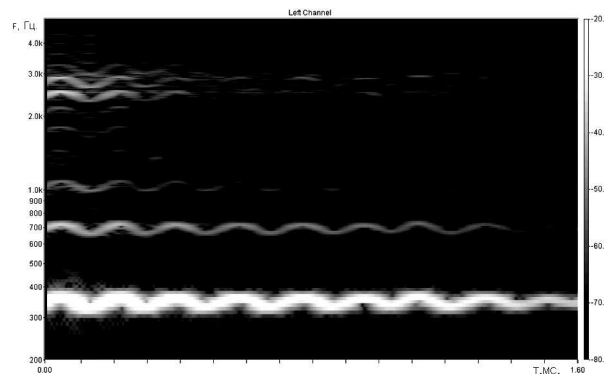


Рис. 3. Спектрограма наведеного ілюстративного фрагмента запису голосу Джейн Монхейт

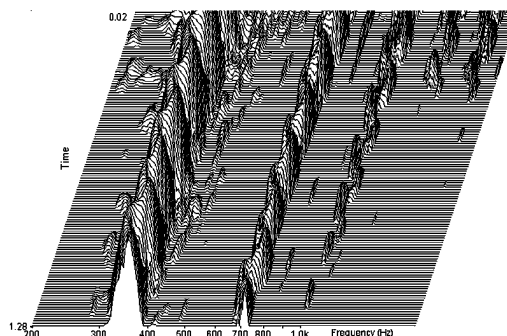


Рис. 4. Тривимірна спектральна картина ілюстративного фрагмента запису голосу Джейн Монхейт

Тут  $f_{\text{верх}}$ ,  $f_{\text{нижн}}$  – верхня й нижня межі фільтрації відповідно. Зауважимо, що при меншій глибині й частоті вібрата смуга фільтрації могла б бути обрана значно вузкою. У цьому разі можна рекомендувати двоступеневу процедуру, яка складається з попередньої фільтрації гармоніки у відносно широкій смузі (для оцінки параметрів вібрата) та наступного точного виділення обертону зі спектра звуку на основі отриманих оцінок.

Обчислення амплітудної та частотної модулюючих функцій для кожної гармоніки відбувається за

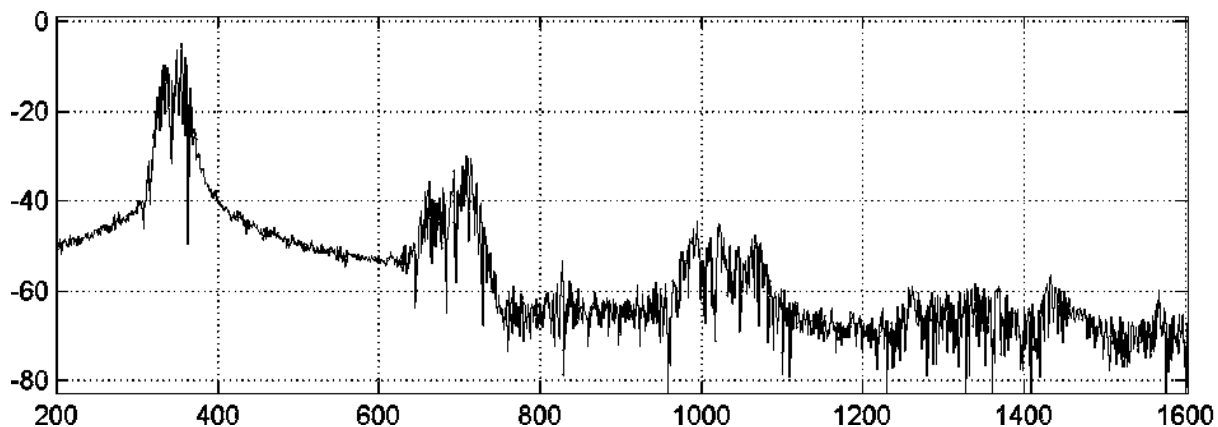


Рис. 5. Спектр ілюстративного фрагменту запису голосу, обчислений на повній довжині фрагмента

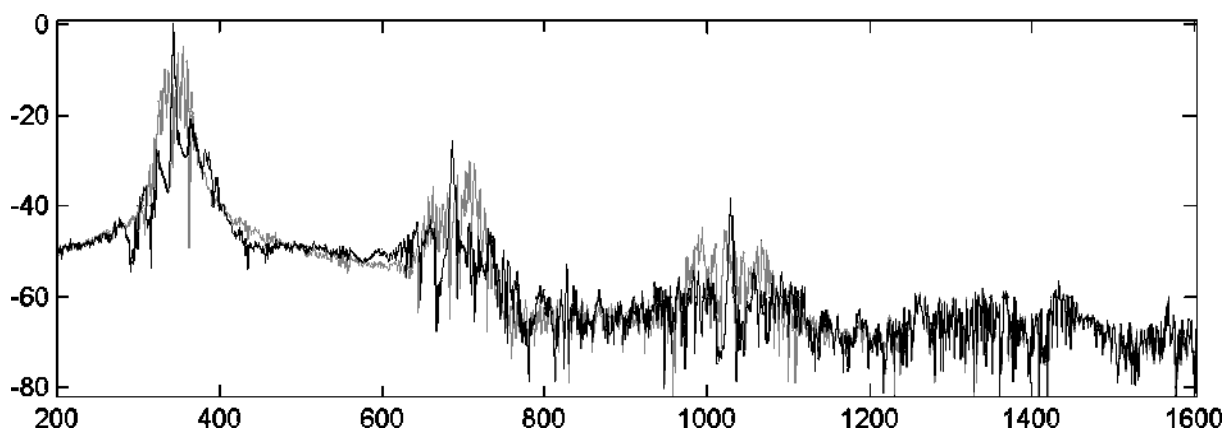


Рис. 6. Спектр ілюстративного фрагмента запису голосу з видаленим амплітудним і частотним вібрато

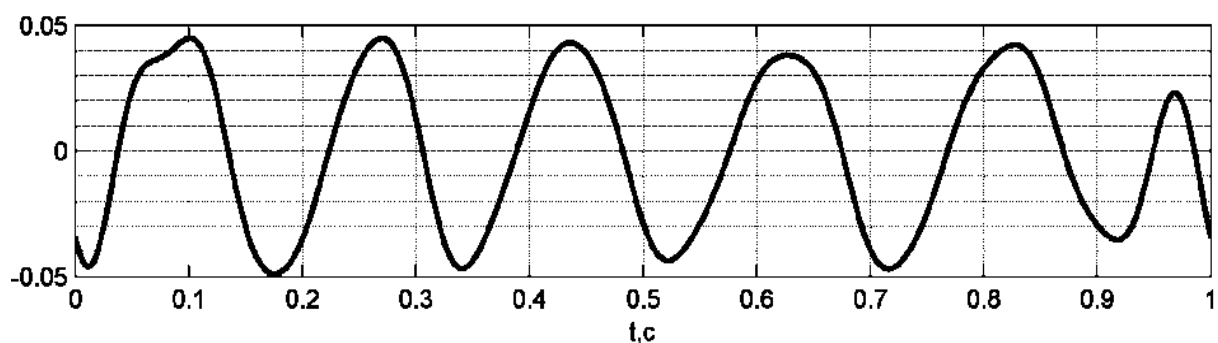


Рис. 7. Частотне вібрато ілюстративного фрагменту (голос Джейн Монхейт)

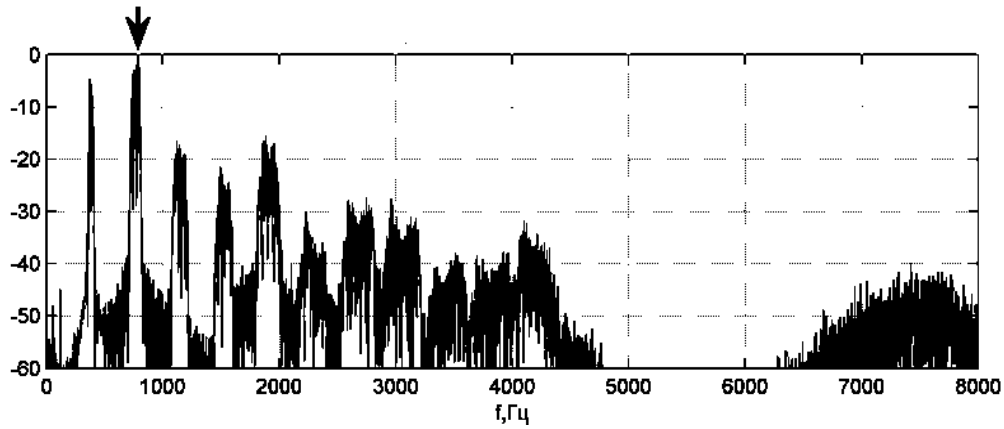


Рис. 8. Спектр стабільного звуку голосу Джейн Монхейт

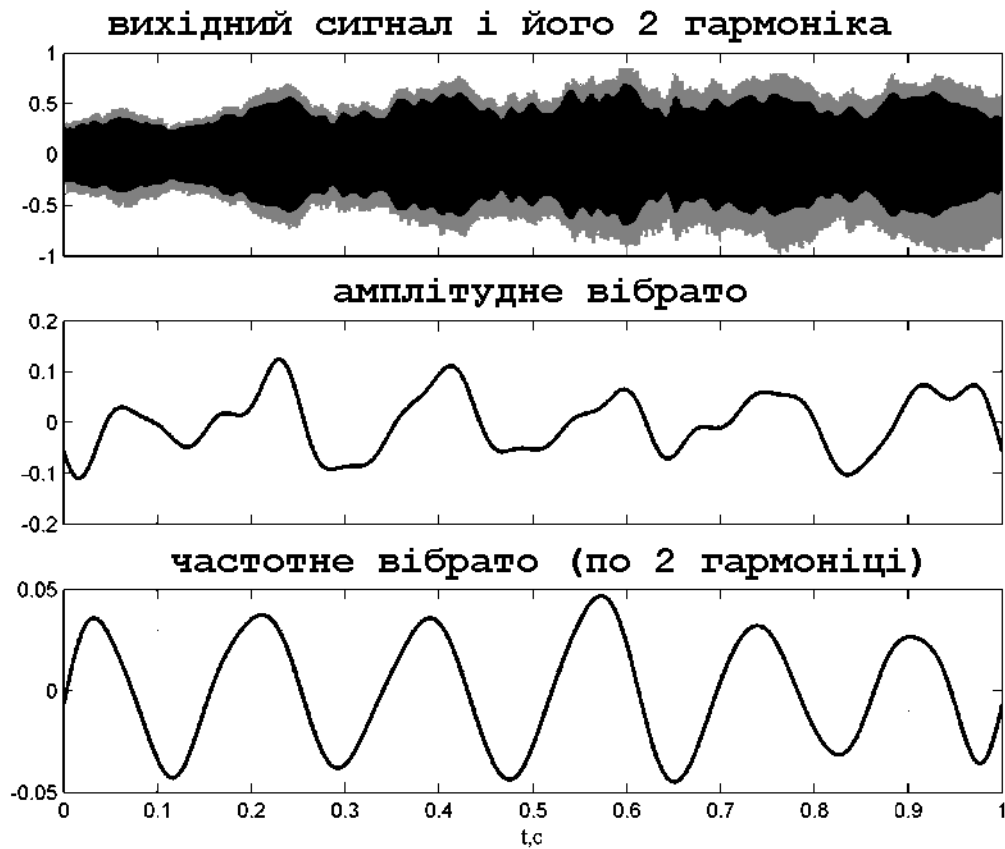


Рис. 9. Амплітудне й частотне вібрато стабільного звуку голосу Джейн Монхейт

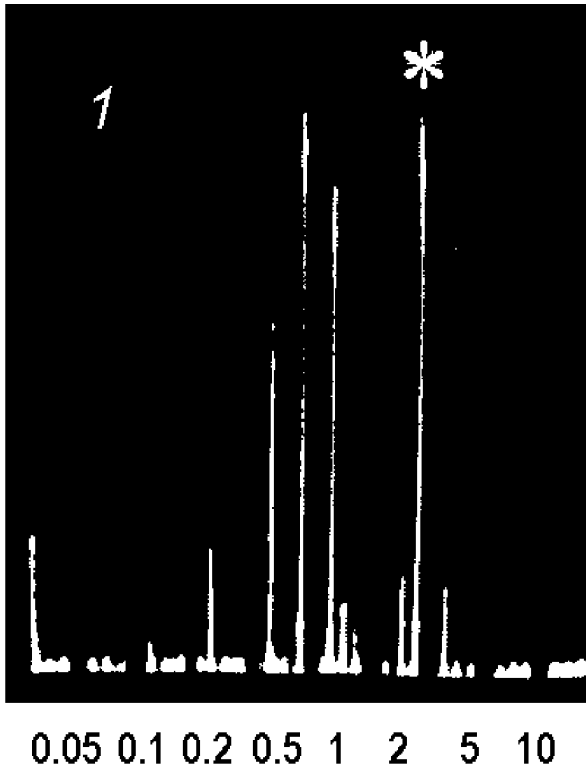


Рис. 10. Спектр звуку голосу Ф. Шаляпіна, отриманий за допомогою третинно-октавного фільтра [3]

допомогою перетворення Гільберта [16] з подальшим видаленням з них вібрата у спектральній області. Остання процедура проводиться на основі таких міркувань. Спектри модулюючих функцій є сукупністю складових в області найнижчих частот, причому максимальна за рівнем спектральна складова модулюючої функції, згідно з наявними даними, лежить у діапазоні  $4 \div 8$  Гц. Однак, враховуючи можливість негармонічності вібрата, екстрагувати слід дещо ширший частотний діапазон. Орієнтуючись на можливу присутність у спектрі вібрата кількох вищих складових, оберемо діапазон  $4 \div 16$  Гц як такий, що підлягає обробці для видалення вібрата. Отримані у результаті видалення цього частотного діапазону остаточні модулюючі функції не мають пульсуючого характеру, а сума ряду промодульованих ними синусоїд кратних частот справляє враження реального звуку, але без вібрата. Оброблені таким чином голосові гармоніки сумуються з призвуками (останні відповідають необробленим спектральним проміжкам між обертонами). Як результат, отримуємо очищений від модуляції сигнал, який зберігає тембральні характеристики початкового співаного звуку. Матеріал

для такого аналізу слід обирати серед звуків голосу тривалістю понад 1 с з наявним вібрата при відсутності інструментального супроводу і практично постійних основному тоні й гучності.

На рис. 6 зображено спектр голосного звука, який був розглянутий раніше (див. рис. 2) після видалення амплітудного й частотного вібрата по кожній гармоніці. Результат обробки (світліша крива) показаний на графіку на фоні початкового спектра. Як бачимо, модуляційні складові обертонів виділені якісно: відповідні їм спектральні підйоми значно звузилися, втративши характерні ознаки частотно-модульованого сигналу. При порівняльному прослуховуванні отриманого таким чином звуку з початковим співаним голосним "і" суб'єктивна оцінка показала, що звук без вібрата зберігає характерні темброві ознаки голосу Джейн Монхейт. Це дозволяє зробити висновок, що методика виділення вібрата зі співочого голосу є коректною.

## 2. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Наведемо результати дослідження амплітудних і частотних модулюючих функцій для ряду зразків співочого голосу.

За перший такий зразок правив звук голосу Джейн Монхейт. Оскільки для екстракції вібрата був обраний сигнал зі значним спаданням гучності та переважанням першої гармоніки, на рис. 7 наведено функцію частотного вібрата саме по ній. Вібрата має вельми регулярний синусоїдальний характер з частотою 5.7 Гц і глибиною  $\pm 65$  центів. Більш повно вокальні дані співачки можна охарактеризувати, аналізуючи відносно стабільний звук її голосу. Відповідний спектр (в дБ) представлено на рис. 8, де стрілкою виділена екстрагована частотна область, яка містить найвищу за рівнем гармоніку, обрану для аналізу, в даному випадку – другу. Як бачимо, спектр звуку багатий на гармоніки, а найвища співоча форманта голосу співачки досить виразна.

На рис. 9 показані результати аналізу звуку в часовій області. На аналізований сигнал більш темним кольором накладено виділену для аналізу гармоніку. В даному випадку вона перекриває значну частину сигналу. Це відповідає її значній питомій вазі у спектрі звуку. Нижче показано функцію амплітудного вібрата гучності, отриману за допомогою лінійного детектування сигналу з наступною фільтрацією низькочастотної смуги  $4 \div 16$  Гц. На цьому ж рисунку зображено функцію частотного вібрата, виділеного по другій гармоніці. У цьому випадку частотне вібрата також

має синусоїдальний характер з частотою 5.8 Гц і відносним відхиленням  $\pm 65$  центів. Зазначимо, що низькочастотні модуляції гучності рідко мають регулярну форму. В даному випадку амплітудне вібрато досить добре синхронізоване з частотною модуляцією.

Наступним зразком є звук “мі” другої октави: голосний “а” у слові “стада́ми” (російською мовою) з твору “Песня убогого странника” у виконанні Ф. Шаляпіна, запис 1934 р. Результати спектрального аналізу саме цього звука представлені у книзі В. П. Морозова [7], ілюстрацію з якої наведено на рис. 10. Графік на рис. 11, який відображає спектр, одержаний за допомогою запропонованої нами методики, дає змогу переконатись у перевазі комп’ютерних технологій. Так, формантна область (позначена на рис. 10 зірочкою) при використанні FFT-аналізу відображається у спектрі значно більш деталізовано (див. рис. 11).

Звертає на себе увагу те, що спектр голосу Ф. Шаляпіна багатий на гармоніки високих рівнів при сильно вираженій найвищій співочій форманті. Це дозволило нам обрати для вилучення вібрато восьму гармоніку звуку, яка належить формантній області (рис. 12). Цікаво, що вібрато в аналізованому звуці є виразним лише в частотній модуляції і має достатньо регулярний характер при частоті 6 Гц та глибині приблизно у чверть тону в кожний бік. Низькочастотна ж зміна гучності має хаотичний вигляд.

Слід наголосити, що метою даної статті є побудова ілюстративного ряду, який найбільш яскраво відображає особливості вібрато на різноманітному за характером звуковому матеріалі, а не дослідження й оцінка загальних вокальних здібностей того чи іншого співака. Тому з етичних міркувань конкретні імена виконавців, із записів яких обрані окремі звукові фрагменти, в подальшому називати не будемо.

На рис. 13, 14 показані частотний спектр і функції зміни у часі для четвертої гармоніки звуку “до” другої октави запису відомої у минулому французької жанрової співачки. Її голосу притаманна достатньо виразна форманта. Високоякісне частотне вібрато має дещо завищену частоту (8.1 Гц) і наближається до тремоло. Така особливість співу взагалі досить характерна для французьких виконавців. Глибина частотної модуляції складає близько чверті тону в кожний бік. Частотну модуляцію супроводжує відносно регулярне амплітудне вібрато.

На рис. 15, 16 наведені такі ж дані для популярного в минулому співака, який став всесвітньо відомим у юному віці. Природно, що тут співо-

ча форманта знаходиться у більш високочастотній області. Частотне вібрато виразне (з частотою 5.1 Гц і глибиною порядку  $\pm 65$  центів), амплітудне – нерегулярне й незначне.

Рис. 17, 18 відображають вокальні дані відомої сучасної актриси та співачки. Видно, що на відносно низькому звуці (“сі бемоль” малої октави) спектр доволі бідний на гармоніки, а висока форманта невиразна. Відсутність класичної постановки голосу позначається й на характері вібрато, форма якого помітно відрізняється від параметрів, притаманних професійним вокалістам. У цьому випадку немає сенсу характеризувати модуляцію в термінах частоти і глибини.

Дані, наведені на рис. 19, 20, ілюструють голос відомого виконавця романсів. Вони відображають ситуацію, яка доволі часто зустрічається у цьому жанрі, а також характерна для аматорського співу. Найзначнішою у спектрі є друга гармоніка (на верхньому графіку рис. 20 вона майже повністю перекриває сигнал). Висока форманта невиразна. Звукові притаманне перебільшене амплітудне вібрато з частотою 6 Гц при практичній відсутності частотного. При цьому для даного співака у сигналі замість частотного вібрато присутня неглибока “параметрична” модуляція на частоті другої гармоніки. Ймовірно, це може свідчити про специфічні особливості голосового апарату виконавця.

Рис. 21, 22 представляють результати, отримані для одного з сучасних популярних українських виконавців, вокального лідера молодіжної рок-групи. Спектр протяжного звуку (“до” першої октави) не має чіткої структури і містить певний домішок шуму, оскільки манера виконання у даному випадку включає в себе протяжне інтонування не тільки голосних, але й приголосних, а також не тільки не приховує, а, скоріш, активно демонструє шуми дихання. Характер модуляцій голосу не дає можливості прослідкувати наявності систематичного вібрато. Судячи з усього, голосовий апарат не дозволяє утримувати частотне вібрато, спроба виконати котре помітна в середині секундного відрізка фонограми. Загальне візуальне враження від цього звуку відповідає суб’єктивному слуховому сприйняттю і може бути описане як “амплітудно-частотне тремтіння”.

На завершення наведемо матеріали, які характеризують вокальні дані двох сучасних виконавиць української оперної сцени (рис. 23, 24 і рис. 25, 26 відповідно). В обох випадках виконується нота “мі бемоль” другої октави. Зауважимо, що, хоча частотне вібрато в обох випадках відзначається високою якістю, різний вокальний контекст виражено

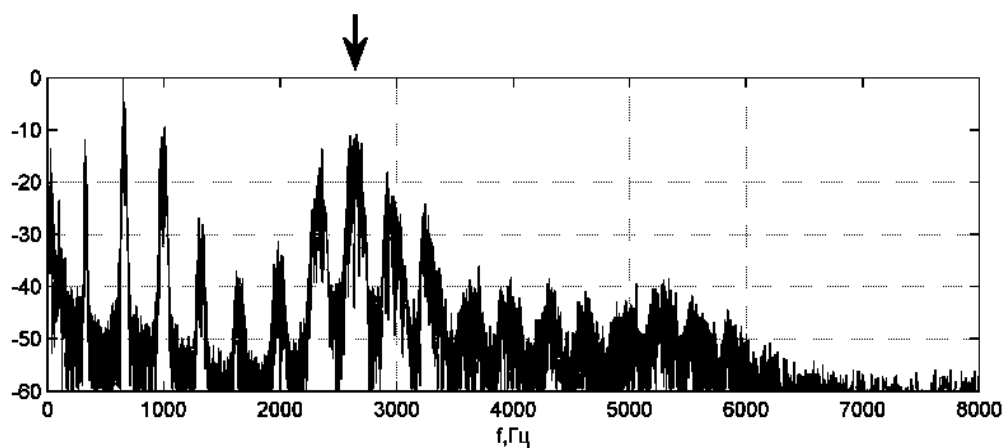


Рис. 11. Спектр звуку голосу Ф. Шаляпіна, отриманий за допомогою FFT-аналізу

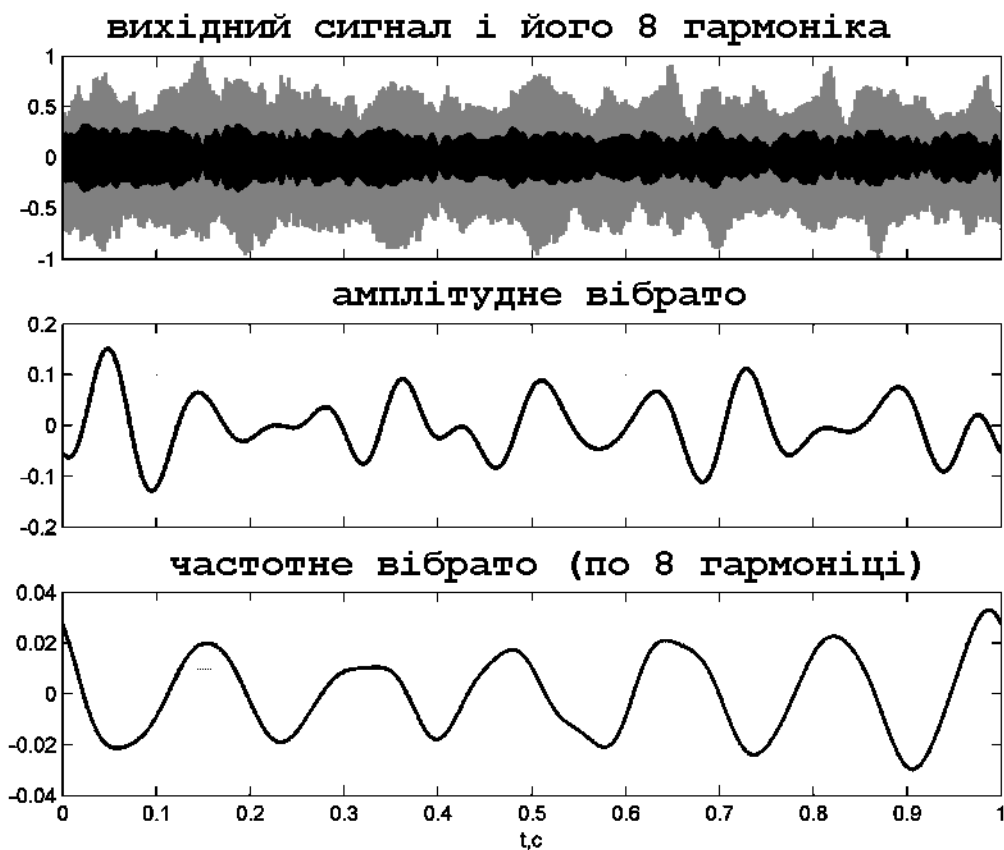


Рис. 12. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу Ф. Шаляпіна



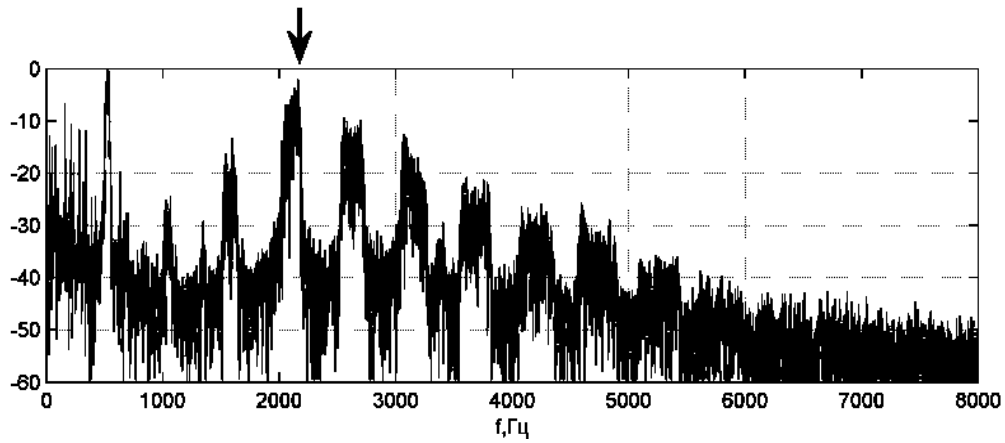


Рис. 13. Спектр звуку голосу французької співачки

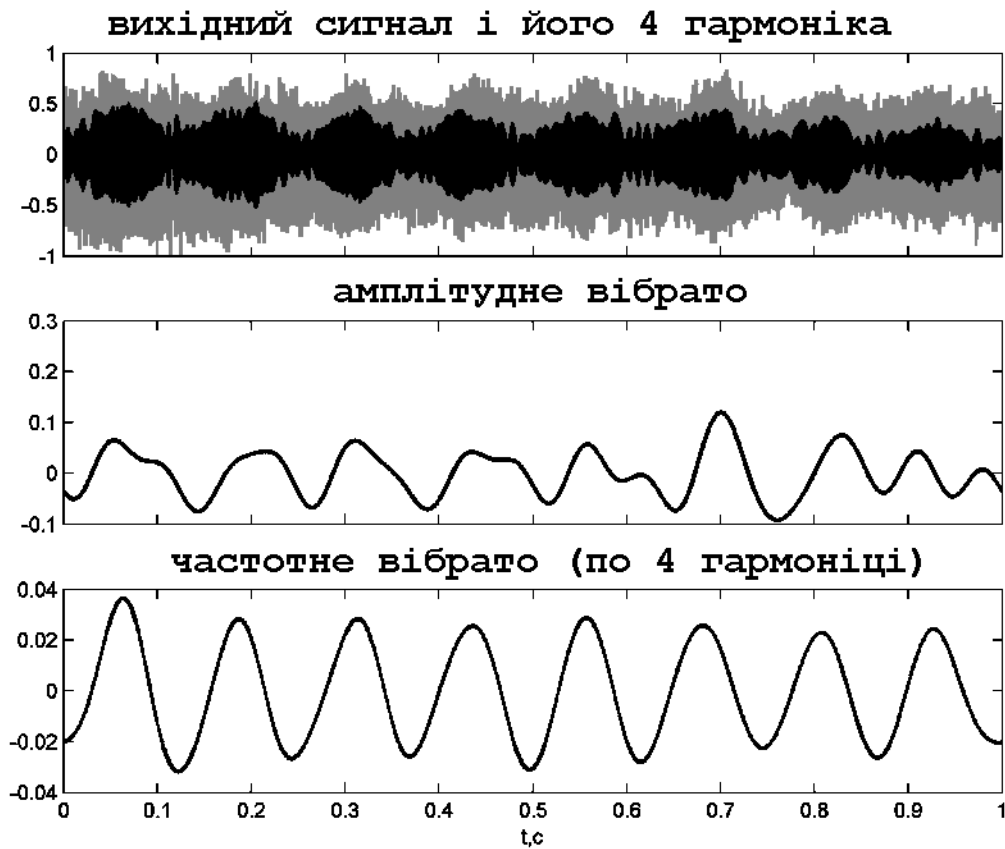


Рис. 14. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу французької співачки

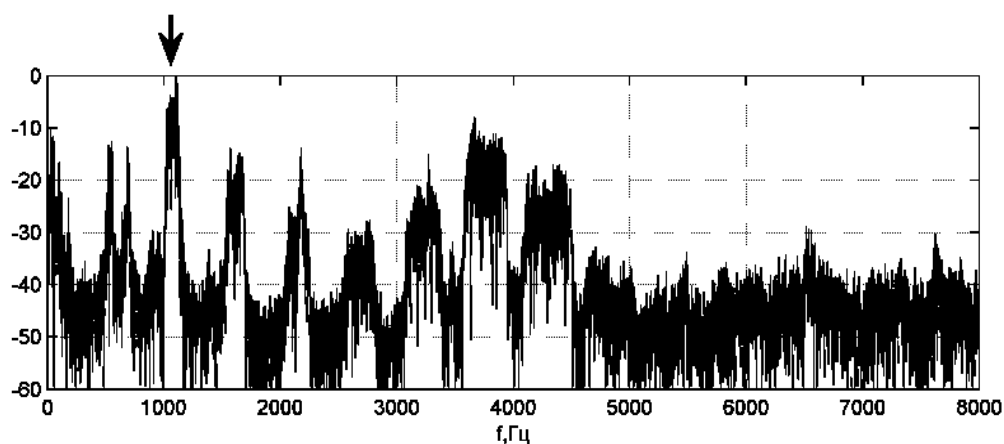


Рис. 15. Спектр звуку голосу юного співака

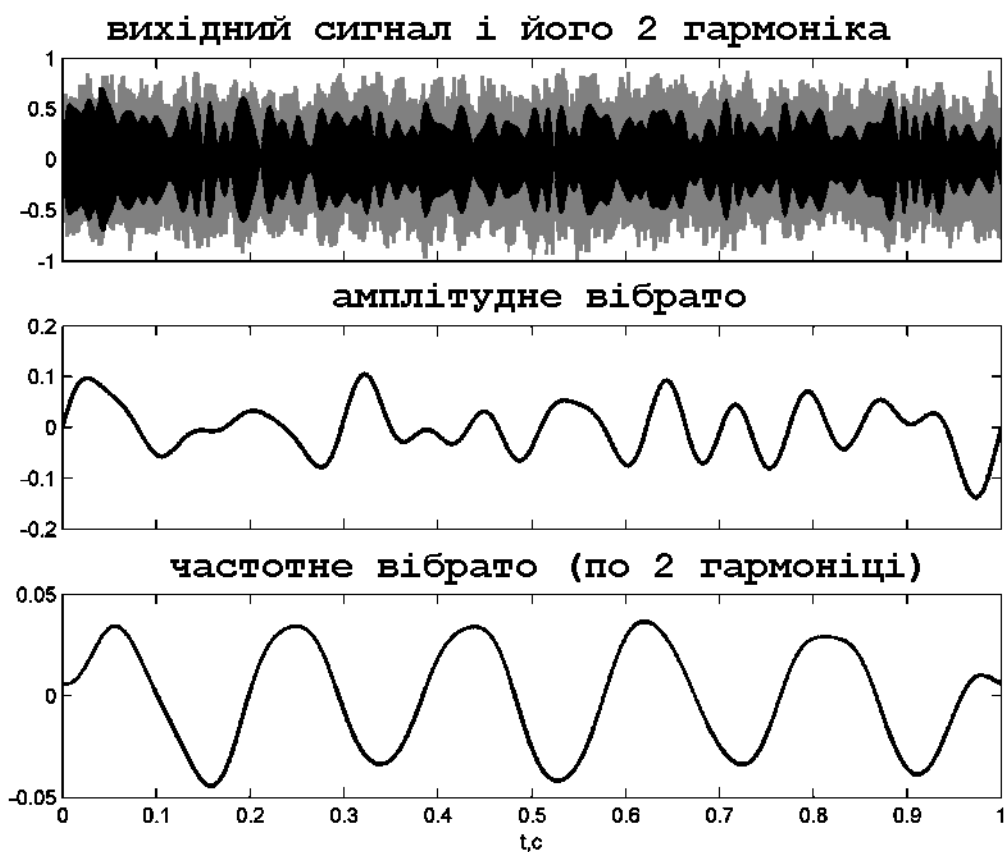


Рис. 16. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу юного співака

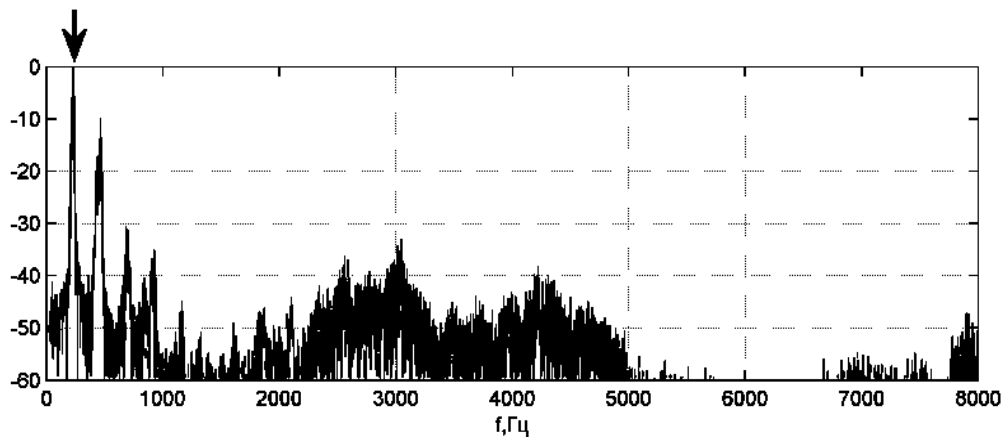


Рис. 17. Спектр звуку голосу естрадної актриси

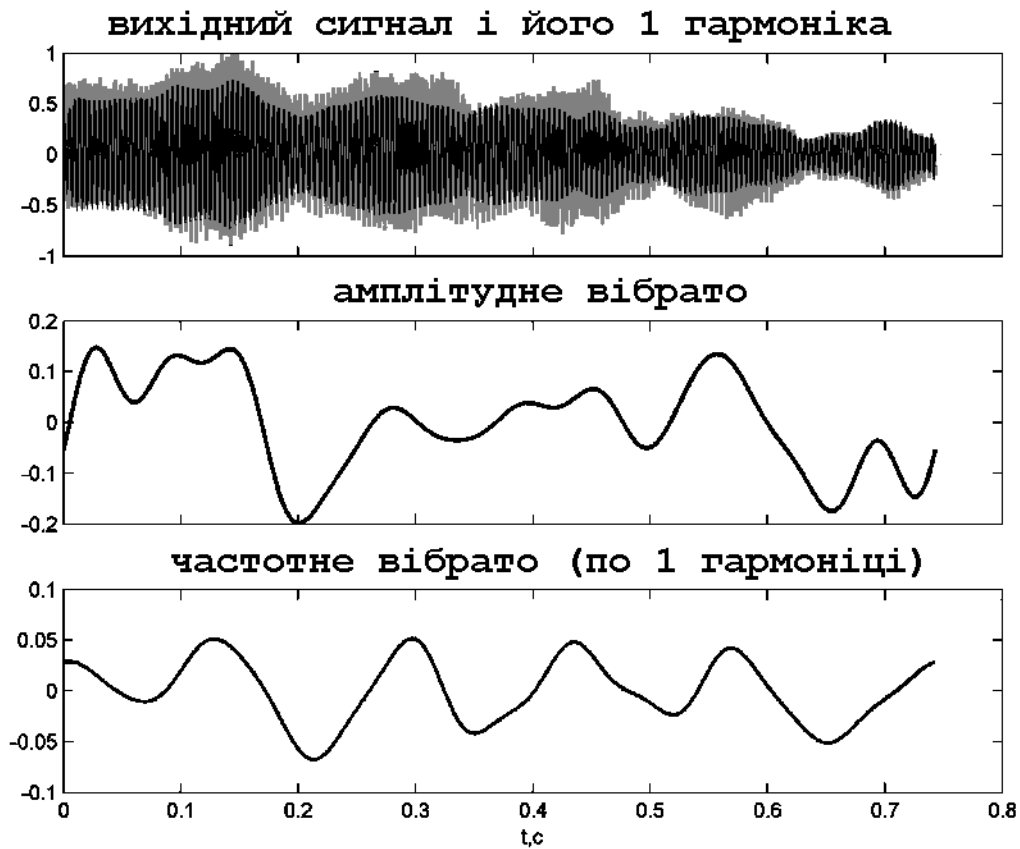


Рис. 18. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу естрадної актриси

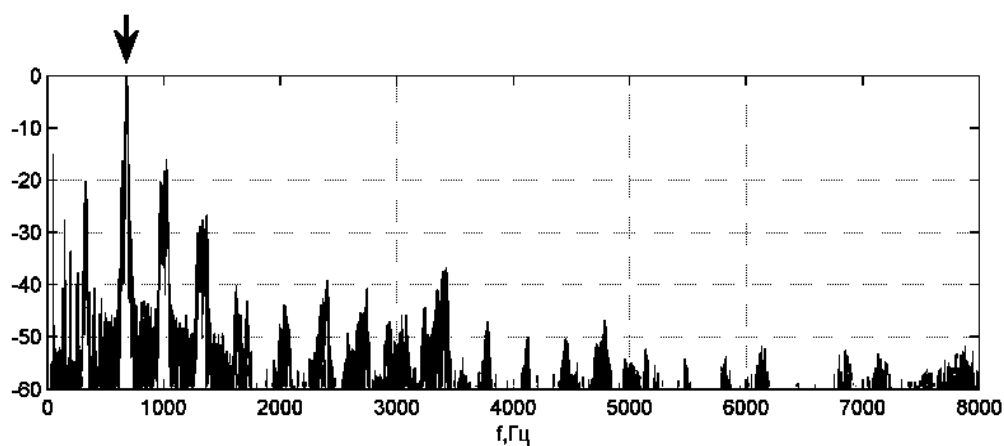


Рис. 19. Спектр звуку голосу виконавця романсів

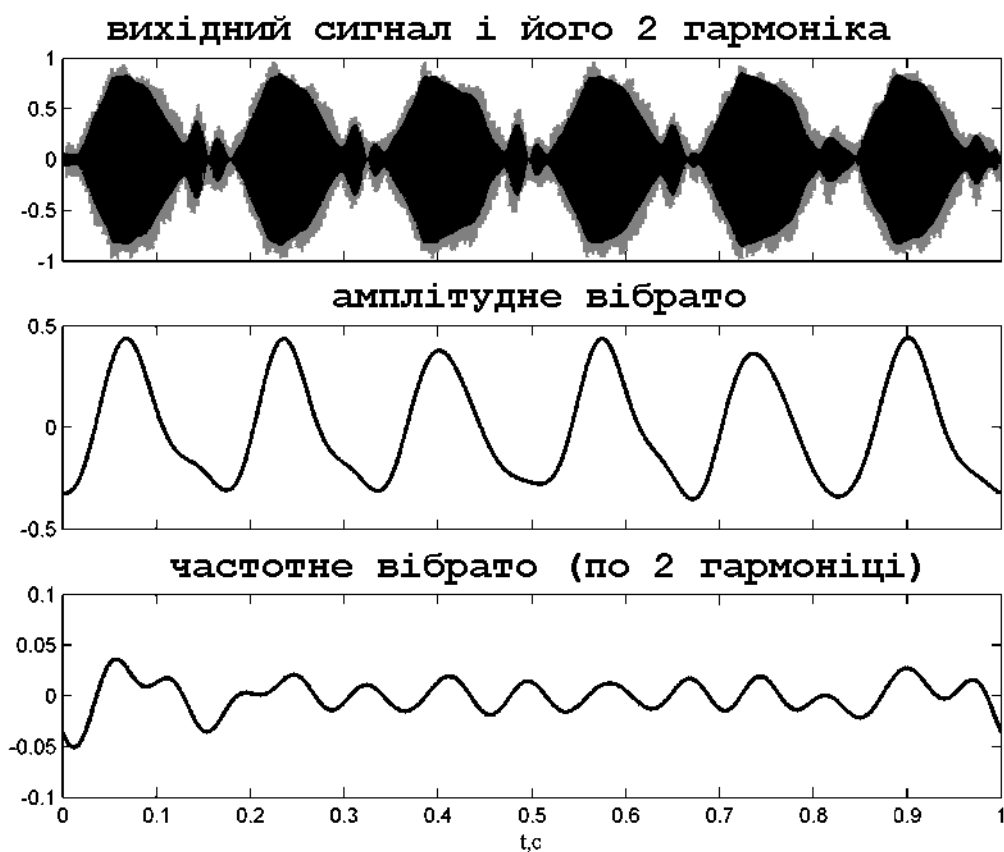


Рис. 20. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу виконавця романсів

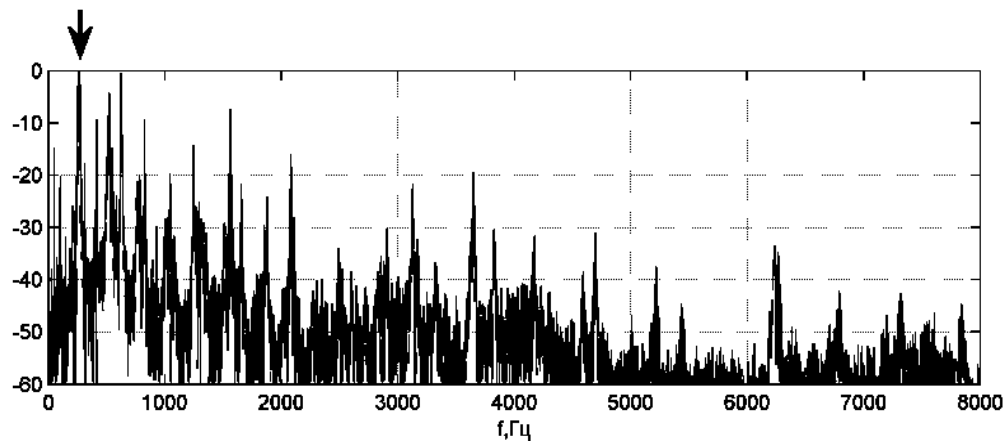


Рис. 21. Спектр звуку голосу рок-співака

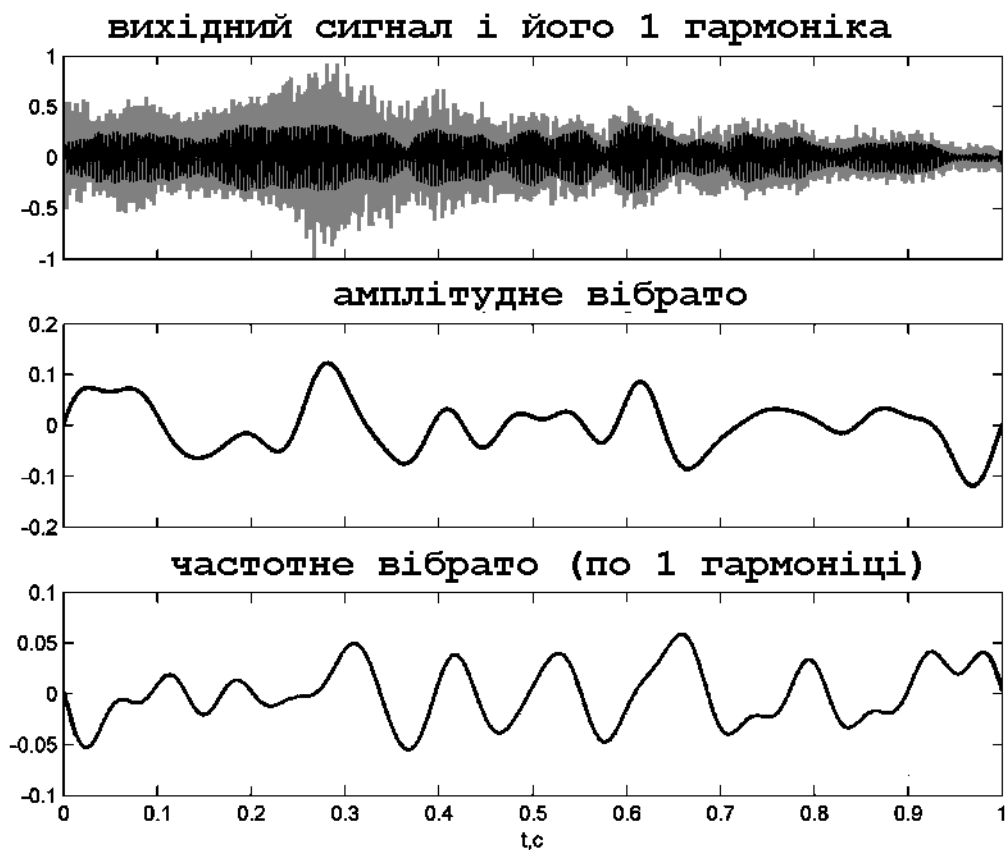


Рис. 22. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу рок-співака

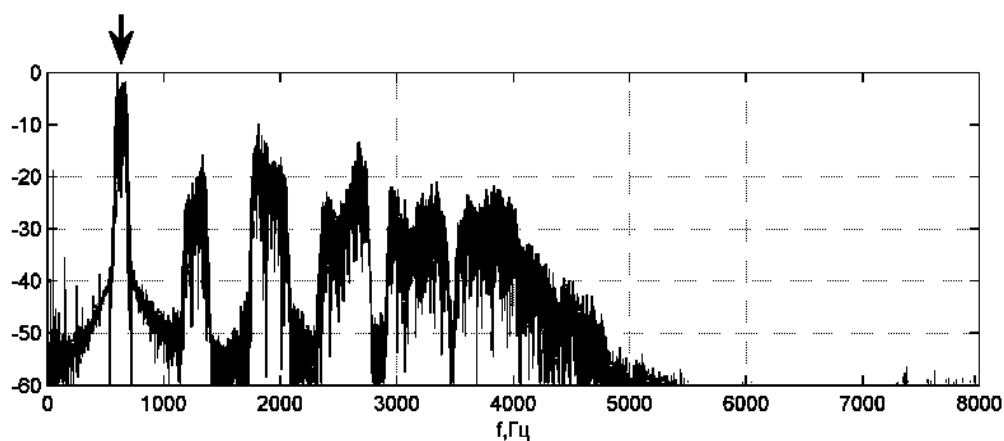


Рис. 23. Спектр звуку голосу оперної співачки (N 1)

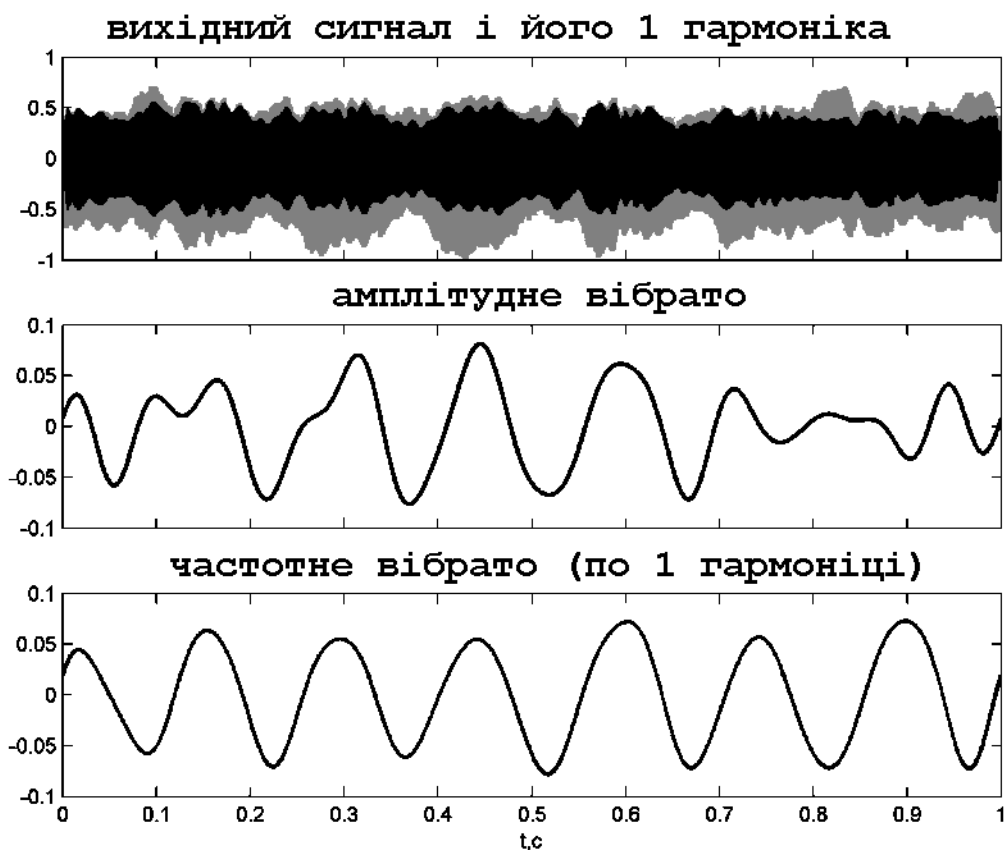


Рис. 24. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу оперної співачки (N 1)

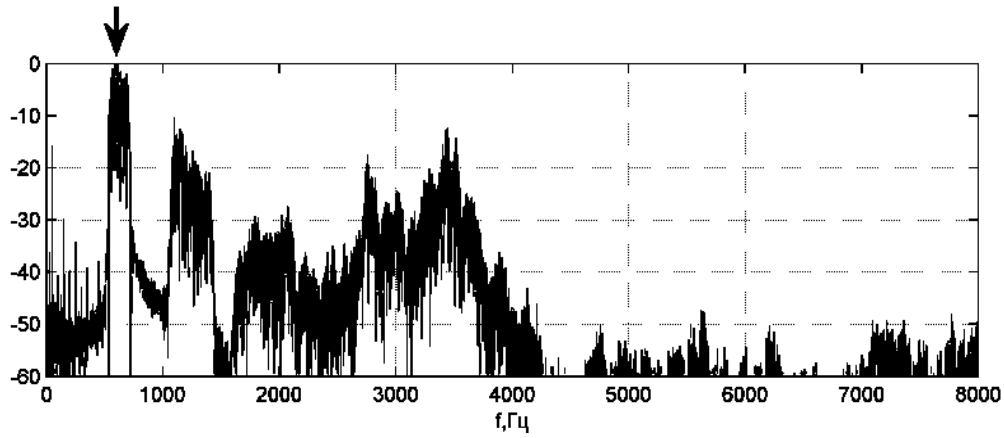


Рис. 25. Спектр звуку голосу оперної співачки (N 2)

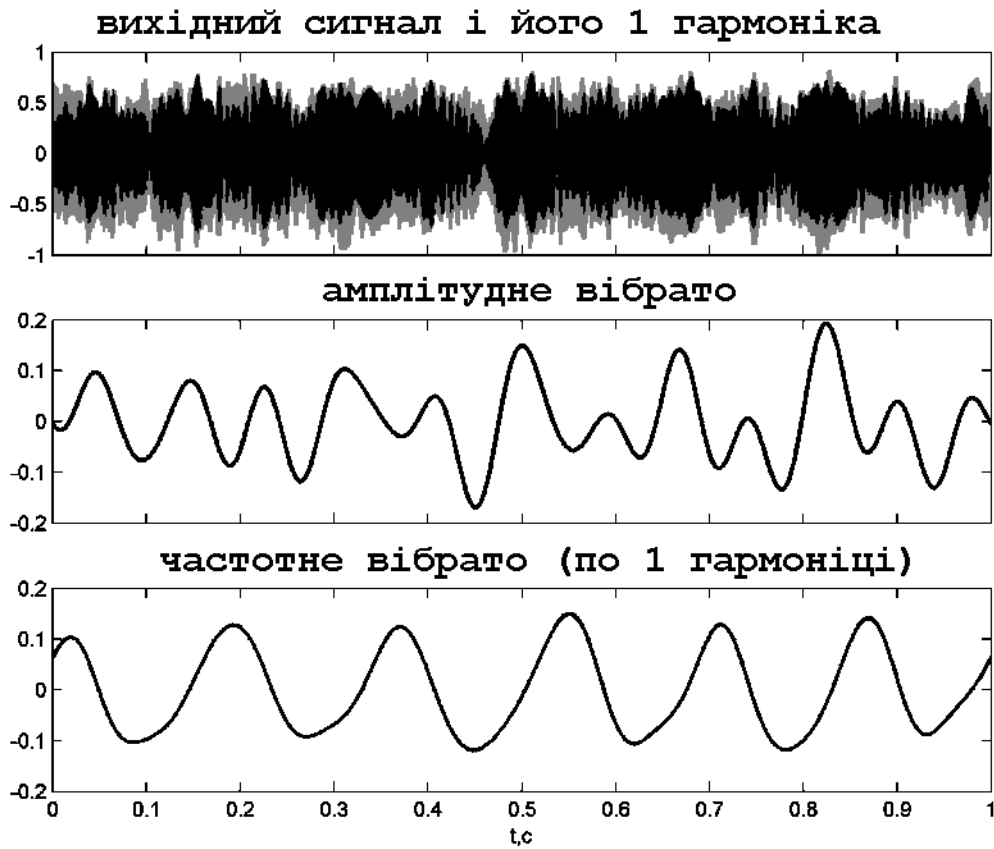


Рис. 26. Амплітудне й частотне вібрато звуку голосу оперної співачки (N 2)

за допомогою дещо відмінних виконавчих засобів. Так, у першому випадку частота частотного вібрато становить 6.9 Гц при глибині по півтону в кожний бік. У другому випадку частота дещо нижча – 5.9 Гц – при надзвичайно глибокому вібрато (на цілий тон у кожний бік від центральної частоти). В обох випадках амплітудна модуляція більшою або меншою мірою підтримує частотну, але не є самостійним регулярним вібрато. Обидва спектри демонструють чіткі низки гармонік з виразними найвищими співочими формантами. Такі характеристики дозволяють віднести об'єктивні характеристики розглянутих голосів до найкращих вокальних зразків.

## ВИСНОВОК

Розвинута технологія обробки співаного звуку дозволяє провести досить детальний його аналіз і може бути використана для спостережень за розвитком вокальних здібностей співака або при порівнянні вокальних властивостей кількох артистів. Зрозуміло, що цю ж технологію можна застосовувати при визначенні об'єктивних параметрів для виконавців, які грають на музичних інструментах зі сталим характером звучання (наприклад, духових та струнних смичкових).

Підсумовуючи виклад результатів циклу попередніх вимірювань, вважаємо за необхідне зазначити, що жодна методика фіксації об'єктивних характеристик голосів або інших звуків, які відносяться до артистичної діяльності людини, сама по собі не здатна визначити якість цієї діяльності. Однак на основі таких вимірювань можна систематизувати об'єктивні характеристики голосів, які загально визнані еталонними, і тих, які такого визнання не здобули. Результати подібних досліджень можуть допомогти наблизитись до розуміння об'єктивних причин, які є основою високої якості музичного звуку. Окрім того, застосування сучасних методик оцінювання акустичних параметрів може і повинно забезпечити об'єктивний оперативний контроль процесу навчання співаків і музикантів, допомагаючи їм наблизити об'єк-

тивні показники своєї творчості до показників найбільш визначних артистів.

1. *Bartholomew W. T.* A physical definition of "good voice-quality" in the male voice // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 1934.– **6**.– P. 25–33.
2. *Seashore C. E., ed.* Psychology of the vibrato in voice and instrument.– Iowa City: The University Press, 1936.– 159 p.
3. *Агарков О. М.* Вибрато как средство музыкальной выразительности в игре на скрипке.– М.: Музгиз, 1956.
4. *Jarvelainen H.* Perception based control of vibrato parameters in string instrument synthesis // *Proc. Int. Mus. Conf.*– Gothenburg, 16–21 September, 2002.– P. 287–294.
5. *Tolmie J. R.* An analysis of the vibrato from the viewpoint of frequency and amplitude modulation // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 1935.– **7**.– P. 29–36.
6. *Wolf S. C., Stanley D., Sette W. J.* Quantitative studies on the singing voice // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 1935.– **6**.– P. 255–266.
7. *Морозов В. П.* Биофизические основы вокальной речи.– Л.: Наука, 1977.– 232 с.
8. *Sundberg J.* The acoustics of the singing voice // *Scientific American.*– 1977.– **236**.– P. 82–91.
9. *Prame E.* Vibrato extent and intonation in professional Western lyric singing // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 1997.– **102**.– P. 616–621.
10. *Herrera P., Bonada J.* Vibrato extraction and parametrization in the spectral modeling synthesis framework // *Proc. 98 Digital Audio Effects Workshop.*– Barcelona, December, 1998.
11. *Rossignol S., Depalle P., Soumagne J., Rodet X., Colette J-L.* Vibrato: detection, estimation, extraction, modification // *Proc. COST-G6 Workshop on Digital Audio Effects (DAFx-99).*– Trondheim, Norway, December, 1999.
12. *Тэйлор Ч.* Физика музыкальных звуков.– М.: Легкая индустрия, 1976.– 184 с.
13. *Moore F. R.* Elements of computer music.– Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.– 560 p.
14. *Музыкальный энциклопедический словарь.*– М.: Сов. энцикл, 1990.– 672 с.
15. *Рагс Ю.* Вибрато и восприятие высоты // *Применение акустических методов исследования в музыковедении / Под. ред проф. С. С. Скребкова.*– М.: Музыка, 1964.– С. 38–60.
16. *Зиновьев А. Л., Филиппов Л. И.* Введение в теорию сигналов и цепей.– М.: Высшая школа, 1975.– 264 с.