

середовищ. Потоки активних частинок поблизу поверхневого шару контролюються електрохімічною окисно-відновною реакцією; для цієї реакції введено імпеданс кола, що складається з послідовно з'єднаних активного опору R_F та імпедансу Варбурга Z_W і до них паралельно під'єднано ємність C_D , оскільки враховуємо подвійний електричний шар на межі розділу середовищ. Для металу (сталі) розраховано числове значення питомої ємності ($C_D = 40 \text{ мФ/м}^2$) й ефективну відстань ($d_\xi = 0,221 \text{ нм}$) між пластинами поверхневого конденсатора (подвійного електричного шару).

1. Джала Р. М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів // *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / під заг. ред. В. В. Панасюка*. – Т. 5: *Неруйнівний контроль і технічна діагностика / під ред. З. Т. Назарчука*. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2001. – Розд. 5. – С. 263–330. 2. Lucowski J. The electrode potential in modelling of transport processes in aqueous electrolytes // J. Lucowski, E. Chaplia // *Physico-mathematical modelling and information technologies*. – 2007. – № 6. – Р. 7–18. 3. Сопрунюк П. М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів / П. М. Сопрунюк, В. М. Юзевич. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 292 с. 4. Графов Б. М. Электрохимические цепи переменного тока / Б. М. Графов, Е. А. Укше. – М.: Наука, 1973. – 128 с. 5. Визначення параметрів корозійного стану ділянки підземного трубопроводу / Р. Джала, Л. Дикмарова, С. Савула та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – Спецвип. № 5, Т. 1. – С. 305–309.

УДК 612.78:319.216

Я. Драган, В. Дозорський, М. Хвостівський, І. Дедів
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя,
кафедра біотехнічних систем

МЕТОД ОПРАЦЮВАННЯ ФРИКАТИВНИХ ЗВУКІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЗАХВОРЮВАНЬ ОРГАНІВ ГОЛОСОВОГО АПАРАТУ НА РАННІХ СТАДІЯХ

© Драган Я., Дозорський В., Хвостівський М., Дедів І., 2011

Розроблено метод опрацювання фрикативних звуків на базі математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, який дає змогу оцінити стан органів голосового апарату людини на ранніх стадіях їх захворювання. Встановлено, що отримані спектральні компоненти є характеристиками інформативних ознак фрикативного звуку і відповідають функціональному стану голосового апарату.

Ключові слова: фрикативний звук, періодично корельований випадковий процес, синфазний метод.

The method of working of fricative sounds is developed on the base of mathematical model as the periodically correlated random process which enables to estimate being of vocal organs of man in the early stages of their disease. It is set that spectral components are got are descriptions of informing signs of fricative sound and show the functional state of vocal organs.

Keywords: fricative sound, periodically correlated random process, sinphase method.

Постановка проблеми

Однією з актуальних проблем сучасної оториноларингології є отримання максимально повної інформації про стан голосового апарату людини, на основі якої можна було б здійснювати діагностику органів голосового апарату.

Сьогодні для діагностики захворювань органів голосового апарату застосовують зовнішній огляд, ендоскопічні методи обстеження, біопсії, рентгеноскопічні методи [1–4]. Оскільки зовнішній огляд є малоінформативним, ендоскопічні методи можуть спричинити порушення прохідності верхніх дихальних шляхів, пошкодження стінок гортані, голосових складок тощо, рентгеноскопічні

методи є порівняно дорогими та мають обмеження щодо кількості, біопсії є інвазивними та проводяться для підтвердження попереднього діагнозу, актуальним є пошук нових ефективніших методів діагностики захворювань органів системи голосотворення [4]. Одним із таких методів є метод, що ґрунтується на аналізі голосових сигналів [2].

Патологічні зміни органів голосового апарату призводять до порушень в їхній роботі, що відображається в голосових сигналах – фрикативних звуках (ФЗ). Це пояснюється складністю їх творення. Своєчасна діагностика дає змогу виявити функціональні зміни на ранній стадії і своєчасно вжити профілактичних заходів або вибрати курс лікування при розвитку хвороби у випадку патологічних порушень. Ефективність вибору профілактично-терапевтичних заходів залежить від належного використання діагностичної системи, яка має базуватись на адекватній математичній моделі і дати змогу автоматизовано з високою точністю та достовірністю визначити місце ураження і відстежити динаміку перебігу хвороби.

Модель ФЗ повинна містити інформативну характеристику – ознаку зміни в роботі голосового апарату. Вона необхідна для обґрунтування алгоритмів вимірювання і опрацювання голосових сигналів – фрикативних звуків, інтерпретації отриманих результатів.

Аналіз останніх досліджень

Найпростіші методи аналізу ФЗ пов'язані з дослідженням характеристик їхніх амплітудних спектрів. Як математичну модель в такому випадку використано детерміновану функцію, яка являє собою суміш гармонічних сигналів.

Значною мірою детермінований підхід удосконалюється у разі використання стохастичного підходу щодо побудови математичної моделі ФЗ. Такий підхід застосовано в [5, 6]. Математичною моделлю ФЗ у цих роботах вважають стаціонарний випадковий процес. Проте структура цієї стохастичної моделі ФЗ не відображає характеру фізіологічного походження сигналу та форм порушення звуковимови, тому що ФЗ є складним за своєю природою сигналом, що містить у собі випадковість та повторюваність.

У праці [7] на основі аналізу механізму породження ФЗ обґрунтовано його модель як нестационарний випадковий процес у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП), яка поєднує властивості повторюваності із випадковістю.

Формулювання задачі

На базі математичної моделі ФЗ як ПКВП можна реалізувати метод опрацювання сигналу, який дасть змогу визначити нові інформативні ознаки для задач діагностики стану голосового апарату людини на ранніх етапах захворювання.

Метод аналізу ФЗ при зображенні його як ПКВП

На підставі властивостей ПКВП виділяють два основні методи опрацювання імовірнісних характеристик ФЗ – компонентний та синфазний [8].

Синфазний метод оснований на тому, що відліки значень сигналу через період корельованості при різному виборі початку відліку (початкової фази) $t_0 \in [0, T)$ утворюють стаціонарну ергодичну векторну випадкову послідовність $\{\xi(t_0), t_0 \in [0, T)\}$, де $\xi(t_0) \equiv \{\xi(t_0 + kT), k \in Z\}$. За цим методом характеристики звуку обчислюють за виразами:

$$m(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \xi(t + kT), \quad (1)$$

$$b(t, u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \xi(t + u + kT) \xi(t + kT), \quad (2)$$

де $\overset{0}{\xi}(t) = \xi(t) - m(t)$ – центровані значення випадкового процесу $\xi(t)$, T – період корельованості.

Компонентний метод виходить з того, що характеристики сигналу є періодичними функціями від часу, а тому їх можна подати за допомогою розкладів типу рядів Фур'є:

$$m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k \exp\left(ik \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (3)$$

$$b(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k(u) \exp\left(ik \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (4)$$

де m_k , $B_k(u)$ — оцінки компонент математичного сподівання (1) та коваріаційної функції (2).

В кореляційному аналізі, окрім отримання оцінок коваріації $\widehat{b}(t, u)$, потрібно також знайти оцінки коваріаційних компонент $\widehat{B}_k(u)$, які характеризують структуру часової мінливості. Оцінювання коваріаційних компонент здійснюється за статистикою $\widehat{b}(t, u)$:

$$\widehat{B}_k(u) = \frac{1}{T} \int_0^T b(u) \exp\left(ik \frac{2\pi}{T} t\right) dt. \quad (5)$$

Синфазний і компонентний методи аналізу, згідно з енергетичною теорією стохастичних сигналів та обґрунтованою математичною моделлю фрикативного звуку у вигляді ПКВП, є методами аналізу його імовірнісних характеристик. Для аналізу ФЗ використаємо синфазний метод.

Результати опрацювання ФЗ синфазним методом

Для реєстрації фрикативних звуків застосовано конденсаторний мікрофон МКЭ-2, що здатний відтворити весь частотний діапазон звуків цього типу. Запис здійснено за допомогою стандартної звукової карточки комп'ютера. Було встановлено частоту дискретизації 32 кГц, розрядність 16 біт.

На рис. 1, *a–г* зображено реєстрограми фрикативного звуку [л] в стані норми (рис. 1, *a, б*) та з патологією (рис. 2, *в, г* – дисфункція язика).

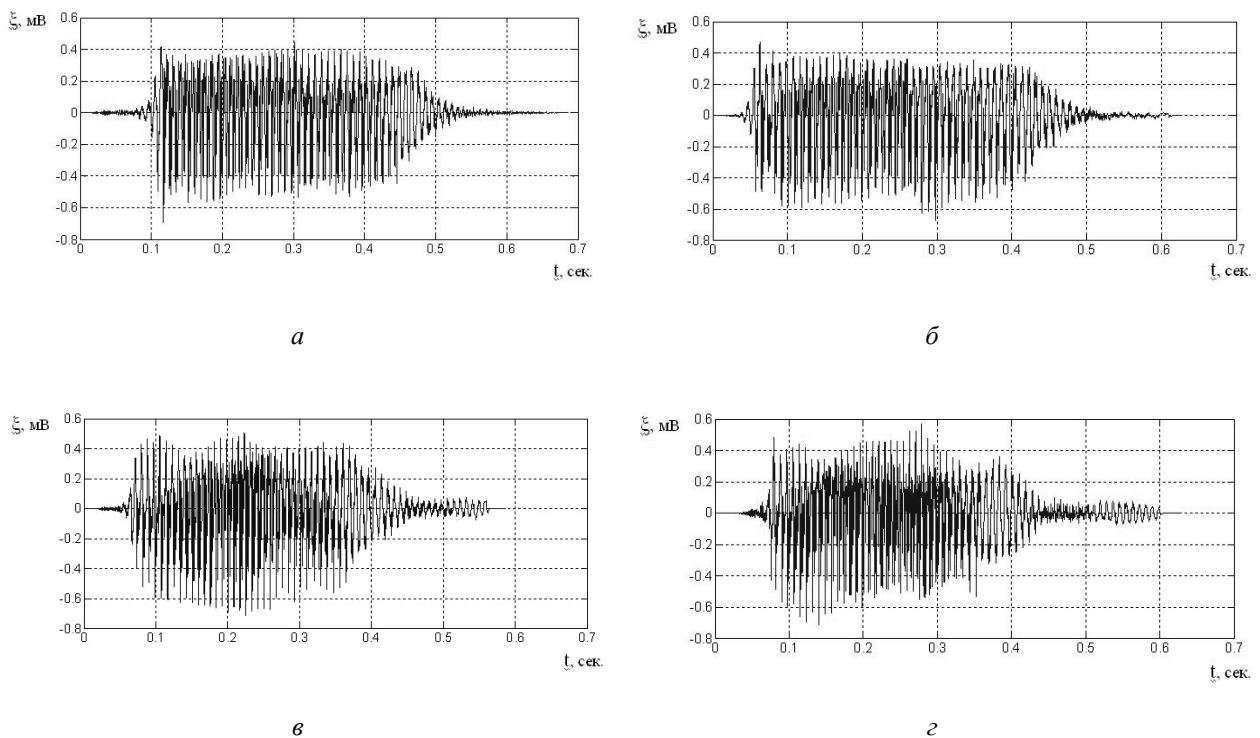


Рис. 1. Реєстрограми звуку [л]: *a, б* – норма; *в, г* – патологія

Застосування синфазного методу статистичного аналізу ПКВП передбачає апіорне знання періоду корельованості (ПК). У випадку ФЗ не існує прямих методів визначення ПК за реалізацією сигналу. Однак зрозуміло, що ПК буде близьким до періоду основного тону (ПОТ) [9]. Тому як його початкове значення доцільно використати значення ПОТ і задача пошуку ПК зведеться до задачі визначення ПОТ. Найпоширенішим методом визначення ПОТ є автокореляційний. Початкова оцінка ПОТ визначається місцезнаходженням максимального значення функції автокореляції в межах визначеного інтервалу.

Однак відомо, що на точність обчислення ПОТ за автокореляційною функцією можуть впливати обертони, наявні в сигналі, та гармоніки з вищою амплітудою. Для вирішення проблеми пропонується обчислити розподіл спектральної густини потужності сигналу за частотами, що дасть можливість виділити частоту основного тону, яка є оберненою до ПОТ, і частоти обертонів. Оскільки ПОТ є змінним для різних дикторів та різних реалізацій сигналу одного диктора, обчислювати ПК описаним вище методом необхідно для кожної реалізації сигналу. Якщо необхідно, для уточнення значення ПК пропонується використати метод максимуму функції варіації статистичних характеристик, що описаний в праці [9] для випадку голосних звуків.

Подальшим етапом дослідження є отримання інформативних ознак ФЗ синфазним методом. Тому із ФЗ (рис. 1) визначено стаціонарні компоненти (рис. 2).

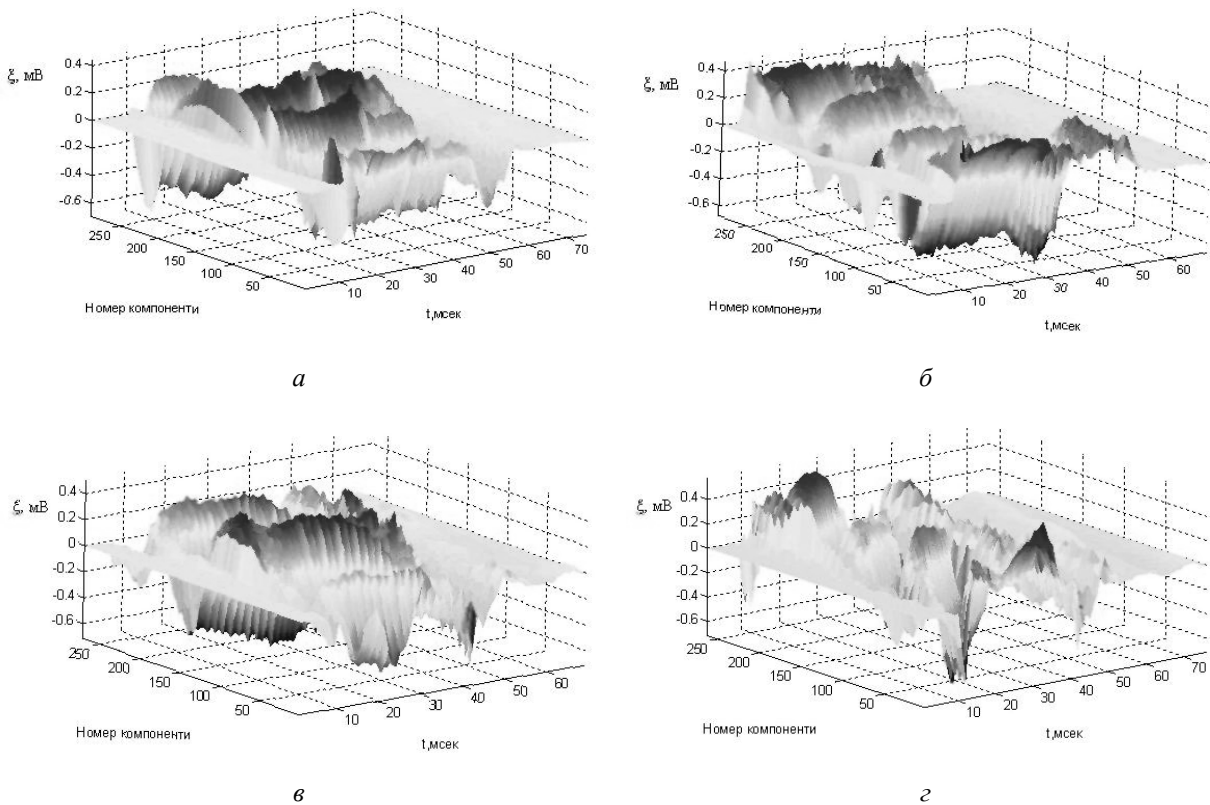
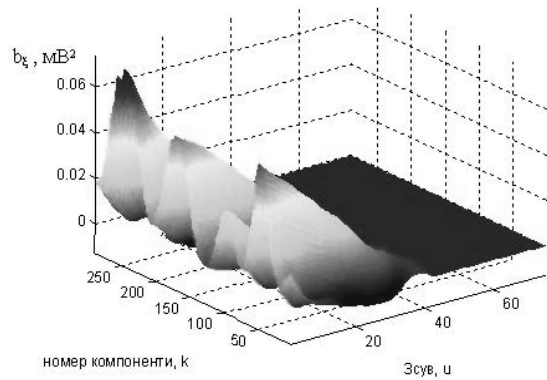
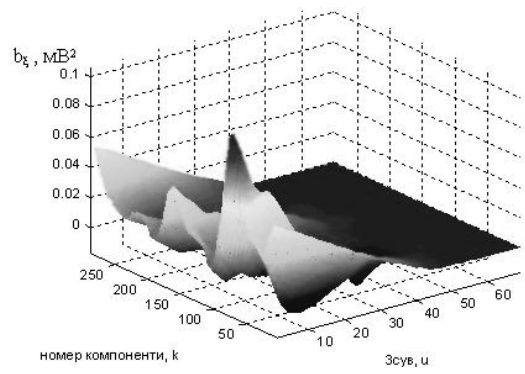


Рис. 2. Реалізації стаціонарних компонент ФЗ: а, б – норма; в, г – патологія

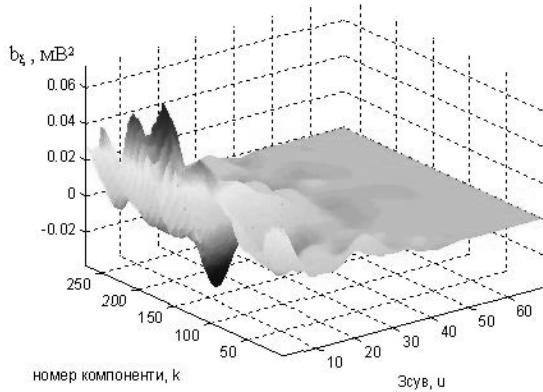
Основною імовірнісною характеристикою ФЗ, яка характеризує розподіл потужності центрованих сигналів, є коваріаційна функція. Тому за допомогою синфазного методу аналізу ФЗ обчислено оцінку коваріаційної функції $b(t, u)$ згідно з виразом (2) (рис. 3).



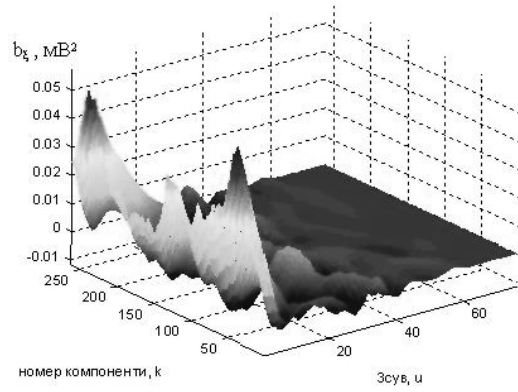
a



б



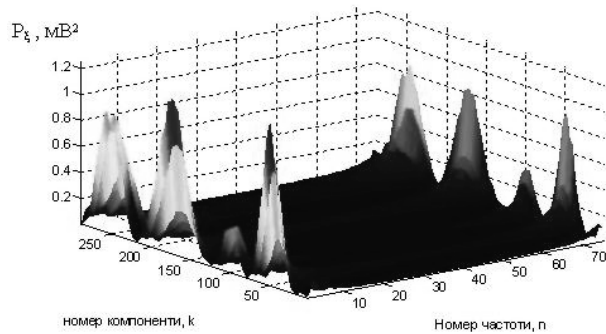
в



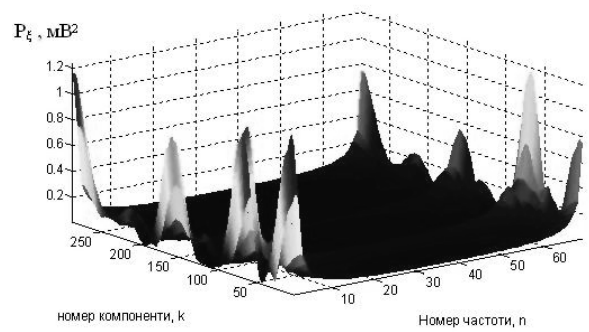
г

Рис. 3. Реалізації коваріаційних функцій стаціонарних компонент: а, б – норма; в, г – патологія

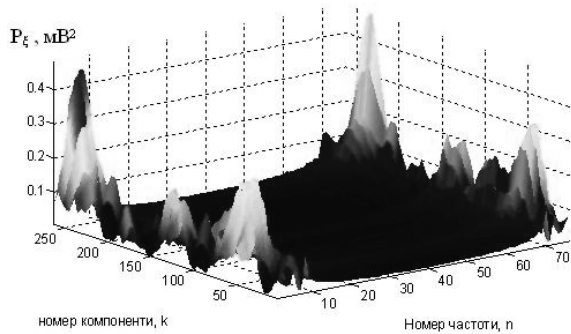
На підставі оцінок стаціонарних компонент отримано спектральні компоненти (рис. 4) згідно з виразом (5) – спектри коваріаційних функцій стаціонарних компонент (потужність).



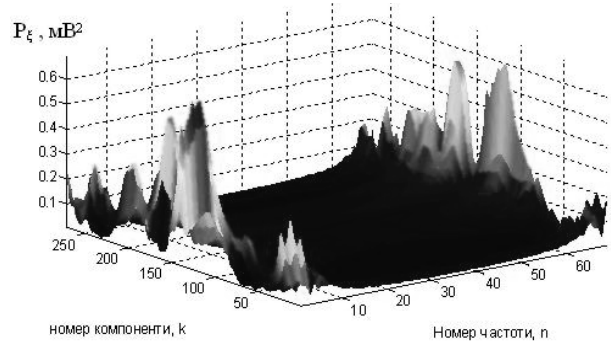
a



б



в



г

Рис. 4. Реалізації спектральних компонент: а, б – норма; в, г – патологія

Для оцінювання спектральних компонент (рис. 4) використано оцінку математичного сподівання:

$$M_k \{P_{\xi_{kn}}\} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} P_{\xi_{kn}}, \quad n = \overline{1, N_T}, \quad k = \overline{1, N_k}, \quad (7)$$

де k – номер спектральної компоненти; n – номер частоти; N_k – кількість спектральних компонент; N_T – кількість частот.

Реалізації оцінок математичних сподівань для спектральних компонент наведено на рис. 5.

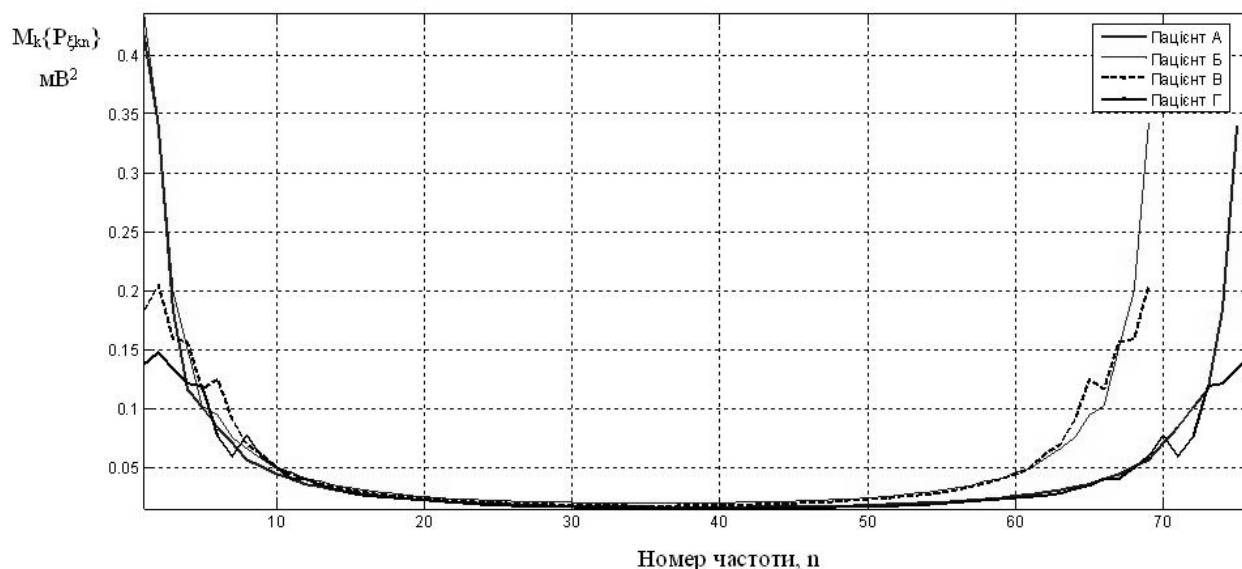


Рис. 5. Усереднені значення спектральних компонент за частотами

Графіки на рис. 1–4 (а, б) відповідають пацієнтам А та Б (рис. 5), що знаходяться в стані норми. Відповідно, графіки на рис. 1–4 (в, г) відповідають пацієнтам В та Г (рис. 5), які в стані патології (дисфункція язика). У результаті порівняльного аналізу ознак ФЗ на основі рис. 5 відзначимо, що для пацієнтів А та Б ознаки лежать у межах норми, а для пацієнтів В та Г спостерігається зміна ознак (що свідчить про порушення роботи органів голосового апарату).

Отже, дослідивши фрикативний звук за розробленим методом, отримано інформативні ознаки сигналу (спектральні компоненти) (рис. 5), які є інваріантними у часі, і поряд з тим виявляють локалізацію розподілу потужності сигналу на певних частотах. Одержані інваріанти показують однорідність властивостей сигналу і водночас зміни, за характером і значеннями яких можна оцінити стан голосового апарату, а також діагностувати зміни його функціонування.

Висновки

У результаті опрацювання ФЗ розробленим методом отримано нові для діагностики стану голосового апарату інформативні ознаки – спектральні компоненти, які фактично відповідають функціональному стану голосового апарату людини. Результати досліджень дають змогу застосувати розроблений метод для медичної діагностики голосового апарату на ранніх стадіях його захворювання.

1. Пальчун В.Т. *Оториноларингология: руководство для врачей* / В.Т. Пальчун, А.И. Крюков. – М. : Медицина, 2001. – 616 с. 2. Джафек Брюс. *Секреты оториноларингологии : пер. с англ.* / Б. Джафек, Е. Старк ; [под ред. Новикова Н. И., Овчинникова А. Ю.]. – М. ; СПб: БИОНОМ : Невский диалект, 2001. – 624 с. 3. Бабияк В.И. *Клиническая оториноларингология: руководство для врачей* / В.И. Бабияк, Я.А. Накатис. – СПб. : Гиппократ, 2005. – 800 с. 4. *Оториноларингология* / [авт. кол. Заболотный Д.И., Митин Ю.В., Брагоморецкий В.Д., Базаров В.Г., Безшапочный С.Б.]. – К. : Здоров'я, 1999. – 368 с. 5. Фант Гунер. *Акустическая теория речеобразования : пер. с англ.* / Гунер Фант ; [под ред. Григорьева В. С.]. – М. : Наука, 1964. – 284 с. 6. Фланаган Джеймс. *Анализ*