

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя**

Дозорський Василь Григорович

УДК 519.218:612.78

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВОКАЛІЗОВАНИХ ФРИКАТИВНИХ
ЗВУКІВ ДЛЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОСОВОГО АПАРАТУ
ЛЮДИНИ**

01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Тернопіль – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий
керівник

доктор фізико-математичних наук, професор
Драган Ярослав Петрович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри програмного забезпечення
автоматизованих систем, м. Львів.

Офіційні
опоненти:

доктор технічних наук, професор
Бойко Іван Федорович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри електроніки, м. Київ;

доктор технічних наук,
Малачівський Петро Стефанович,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України,
провідний науковий співробітник відділу математичних
методів обчислювального експерименту, м. Львів.

Захист відбудеться _____ 2013 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розіслано “____” _____ 2013 р.

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 58.052.01*

Шелестовський Б. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За даними Міністерства охорони здоров'я України та Всесвітньої організації охорони здоров'я щорічно спостерігається тенденція до зростання кількості людей із захворюваннями органів голосового апарату. Тому важливим завданням сучасної медицини є завчасна діагностика патологічних змін у голосовому апараті на ранніх етапах їх виникнення та розвитку.

Патологічні зміни органів голосового апарату призводять до порушень в їх роботі. Це знаходить своє виразне відображення в голосових сигналах – сонорних, а саме вокалізованих фрикативних (щілинних) звуках, що пояснюється специфікою їх творення, і, як наслідок, призводить до появи в них шумової складової та наближення цих звуків до класу фрикативних шумових. Своєчасна діагностика дає змогу виявити зміни функціонального стану органів голосового апарату шляхом належного опрацювання голосових сигналів і провести профілактичні заходи або вибрати курс лікування. Для об'єктивної діагностики в медицині застосовують опосередковані методи, що створюються на основі системно-сигнальної концепції, відповідно до якої голосовий сигнал трактується як фізичний процес, що поширюється від досліджуваного об'єкта і є засобом перенесення відомостей про цей об'єкт. Ефективність функціонування діагностичної системи вирішальною мірою визначається математичною моделлю сигналу, що лежить в її основі, та повинна містити у своїй структурі інформативну ознаку зміни в роботі голосового апарату. Вона необхідна для обґрунтування алгоритмів вимірювання й опрацювання характеристик голосових сигналів – вокалізованих фрикативних звуків та інтерпретації отриманих результатів.

Найпростіші методи опрацювання вокалізованих фрикативних звуків пов'язані з дослідженням характеристик їхніх амплітудних спектрів (методи формантного аналізу). За математичну модель у такому разі використано детерміновану функцію, яка являє собою суміш гармонічних сигналів. Значною мірою детерміністський підхід удосконалюється при використанні ймовірнісного підходу щодо побудови математичної моделі фрикативних звуків. За математичну модель у цьому випадку приймають стаціонарний випадковий процес. Проте ця стохастична модель не дає можливості врахування у своїй структурі фазово-часових характеристик сигналу для виявлення моменту прояву ранніх змін у функціонуванні голосового апарату.

Наведені аргументи вказують на актуальність обґрунтування вибору математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків та розроблення методу аналізу їх для автоматизованих комп'ютерних діагностичних систем, зорієнтованих на задачу проведення ранньої діагностики функціонального стану голосового апарату людини шляхом запровадження нового класу інформативних ознак, базуючись на моделі ритміки, яка є далекосяжним узагальненням коливання, у вигляді періодично корельованого випадкового процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи входить до тематичного плану наукових робіт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі результати роботи були отримані при виконанні наукових тем: ВК 22-08 – “Розроблення методів ідентифікації і верифікації математичних моделей сигналів

при побудові медичних систем телемоніторингу та діагностики», інвентарний номер державної реєстрації 0108U001110, 2008-2010 р.р. Дисертантові належить розроблення програмного забезпечення для статистичного опрацювання голосових сигналів та проведення серії експериментів; ВК 37-11 – «Дослідження змін функціонального стану організму людини за біосигналами засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів», інвентарний номер державної реєстрації № 0111U005289, 2011-2013 р.р. Дисертанту належить дослідження голосових сигналів з метою відшукування нових інформативних ознак для медичної норми стану людини, які були б змінними при відхиленнях від норми; ДІ 188-12 – «Розробка математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та аутентифікації людини за циклічними біометричними сигналами», інвентарний номер державної реєстрації № 0112U002203, 2011-2013 рр. Дисертанту належить розроблення методу комп'ютерного імітаційного моделювання голосових сигналів.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є обґрунтування вибору математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків, яка враховує характер роботи органів голосового апарату людини, та розроблення методів їх опрацювання, сформованих на основі цієї моделі, а також використання нових інформативних ознак стану органів голосового апарату. Досягнення мети вимагає розв'язання таких задач:*

1. Провести аналітичний огляд і класифікацію відомих задач, принципів, моделей та методів опрацювання вокалізованих фрикативних звуків для виявлення можливості пристосування їх до використання як можливих засобів визначення характеристик сигналів, що містять відомості про роботу голосового апарату.
2. Обґрунтувати вибір математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків, яка враховує у своїй структурі повторюваність, випадковість форм порушення вимови, пов'язану з функціональним станом органів голосового апарату й часово-фазову структуру.
3. Розробити метод статистичного опрацювання вокалізованих фрикативних звуків на основі цієї математичної моделі для виявлення нових інформативних ознак.
4. Обґрунтувати застосовність цих нових інформативних ознак вокалізованих фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату.
5. Розробити програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень вокалізованих фрикативних звуків групи пацієнтів та комп'ютерного імітаційного моделювання для верифікації математичної моделі й статистичних методів опрацювання.

Об'єкт дослідження: процес математичного моделювання вокалізованих фрикативних звуків.

Предмет дослідження: математична модель вокалізованих фрикативних звуків у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, її властивості та можливості, які вона забезпечує при розв'язанні задач діагностики голосового апарату людини.

Методи дослідження побудовано на основі енергетичної теорії стохастичних сигналів та статистичної теорії вибору рішень при верифікації математичної моделі

вокалізованих фрикативних звуків. Для програмної реалізації алгоритмів опрацювання використано пакет прикладних програм MATLAB 7.0.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. На підставі зробленого змістовного опису сигналу показано, що його адекватне відображення та вибір часово-інваріантної та інформативної характеристики для задачі медичної діагностики голосового апарату можна провести на основі математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків у вигляді стохастичного коливання.
2. Уперше обґрунтовано вибір математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка, на відміну від відомих, враховує у своїй структурі періодичність, випадковість форм порушення вимови та часово-фазову структуру цих сигналів.
3. Уперше застосовано нові в області діагностики голосового апарату інформативні ознаки вокалізованих фрикативних звуків – кореляційні компоненти, які відповідають функціональному станові голосового апарату людини і придатні бути індикаторами цього стану. Шляхом експериментальної верифікації встановлено адекватність стохастичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу фізичній природі вокалізованих фрикативних звуків – притаманність їм властивостей: випадковості, гармонізованості та періодичності статистичних характеристик.
4. Розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання вокалізованих фрикативних звуків на основі запропонованої математичної моделі, який підтвердив добре узгодження результатів комп'ютерного експерименту з емпіричними даними.

Практичне значення отриманих результатів. На базі запропонованої математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків модифіковано синфазний метод аналізу, який дає змогу діагностування голосового апарату шляхом аналізу нового класу інформативних ознак, що ними є кореляційні компоненти. Отримані практичні результати розширюють область застосування статистичних методів при проектуванні автоматизованих діагностичних систем для медицини.

Результати дисертаційного дослідження використані в навчальному процесі на кафедрі нормальної фізіології Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського.

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: у праці [1] – обґрунтування математичної моделі фрикативного звуку у вигляді періодично корельованого випадкового процесу; у працях [2, 12] – обґрунтування статистичного методу опрацювання для визначення інформативних ознак фрикативного звуку при поданні його як періодично корельованого випадкового процесу; у працях [3,10] – обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів, що ними є фрикативні звуки та дихальні шуми; у праці [4] – обґрунтування стохастичної коливної природи голосових сигналів, що носять акустичний характер, та моделі їх у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, як засобу опису стохастичних коливних сигналів; у праці [13] – модифікований синфазний метод статистичного

опрацювання вокалізованих фрикативних звуків на базі моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу; у праці [6, 14] – результати комп’ютерного імітаційного моделювання вокалізованих фрикативних звуків; у праці [7] – обґрунтування стохастичної природи фрикативних звуків; у праці [8] – представлення вокалізованих фрикативних звуків у вигляді складних амплітудно-модульованих сигналів; у праці [9] – розроблення методу визначення періоду корельованості вокалізованих фрикативних звуків на базі моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу; у праці [11] – обґрунтування застосування енергетичної теорії стохастичних сигналів для опрацювання ряду біосигналів для задач медичної діагностики.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі результати доповідалися і обговорювалися на восьмій, десятій та одинадцятій всеукраїнських науково-технічних конференціях Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського (Кременчук, 2009-2011), на всеукраїнській науковій конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2009), чотирнадцятій науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2010), науково-технічній конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2011), науково-практичній конференції “Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень, ‘2011” (Одеса, 2011), щорічних наукових семінарах кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

В цілому робота доповідалась на науковому семінарі Інституту комп’ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету “Львівська політехніка” (м. Львів) та науковому семінарі факультету комп’ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 14 наукових праць, 6 із них – статті у наукових фахових виданнях [1-6], 8 тез доповідей на наукових конференціях [7-14]. Праця [5] опублікована без співавторів.

Структура та обсяг. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 95 сторінках, додатків на 9 сторінках, списку використаних джерел з 104 назв на 12 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 117 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі шляхом аналізу стану задачі діагностики органів голосового апарату людини за голосовими сигналами обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв’язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у друкованих працях.

У першому розділі на основі аналітичного огляду літературних джерел розкрито стан та особливості задачі діагностування голосового апарату людини за голосовими сигналами. Розглянуто відомі фізико-математичні моделі голосового апарату людини, результатом роботи якого є голосовий сигнал. Відповідно до положень системно-сигнальної концепції голосовий сигнал трактується як фізичний процес, що поширюється від досліджуваного об'єкта (голосового апарату) і є засобом перенесення відомостей про цей об'єкт. При цьому розглянуто два способи подання голосових сигналів, які визначають різні об'єкти та методи моделювання, а саме: параметричний та коливний. Враховуючи особливості задачі діагностики в роботі використано коливний спосіб подання голосових сигналів.

Математична модель голосових сигналів повинна бути адекватною як задачі дослідження, так і їхній фізичній природі та структурі. Для задач діагностики необхідно проводити опрацювання того класу голосових сигналів, які є найбільш чутливими до змін у функціональному стані органів голосового апарату. Відповідно до логопедичної статистики, за наявності порушень у роботі органів голосового апарату спостерігається порушення у вимові вокалізованих фрикативних (іншими словами – щілинних) звуків (ВФЗ). Для проведення досліджень вибрано звук [л], при творенні якого задіюються практично всі органи голосового апарату людини, тобто цей голосовий сигнал містить максимально повну інформацію про роботу голосового апарату.

Беручи до уваги специфіку поставлених задач, відомі підходи до їх розв'язання та особливості досліджуваного сигналу необхідно виділити характеристики цього класу звуків (ВФЗ), що несуть інформацію про функціональний стан органів голосового апарату та повинні бути враховані в математичній моделі, і, як наслідок, сформулювати вимоги до нової математичної моделі ВФЗ.

У другому розділі проаналізовано фізичні особливості творення та характеристики ВФЗ з позицій детерміністського та ймовірнісного (методами теорії стаціонарних випадкових процесів) підходів. Враховуючи результати проведеного аналізу, обґрунтовано вибір математичної моделі ВФЗ у вигляді періодично корельованого випадкового процесу.

При творенні ВФЗ у потоці видихуваного повітря (рис. 1 (1)) джерело сигналу формує звуковий сигнал з характерною повторюваністю – основним тоном (рис. 1 (3)), що генерується голосовими складками, котрі збуджуються квазіперіодичною послідовністю нервових імпульсів $p(t)$ (рис. 1 (2), рис. 2). Артикуляційний апарат, що апроксимується набором смугових фільтрів, формує фонетичну структуру сигналу $x(t)$ (рис. 1, (4), рис. 2). Відповідно голосовий сигнал $y(t)$ можна зобразити як складний амплітудно модульований сигнал $y(t)=p(t) \cdot x(t)$, де $y(t)$ – сигнал ВФЗ (реєстрограма звуку [л], зображена на рис. 2) – повідомлення; $p(t)$ – несучий сигнал, що характеризує роботу джерела сигналу; $x(t)$ – обвідна голосового сигналу в часовій області, що характеризує поведінку органів артикуляційного апарату в часі. Аналіз обвідної та несучої ВФЗ у часовій та частотній областях дасть можливість оцінити роботу джерела сигналу та артикуляційного апарату в цілому і його органів зокрема. Відповідно математична модель сигналу повинна враховувати повторюваність, спричинену роботою

голосових складок, і часово-фазову структуру, що відображає поведінку органів голосового апарату в процесі творення ВФЗ [л] та необхідна для виявлення моментів появи порушень у роботі цих органів.

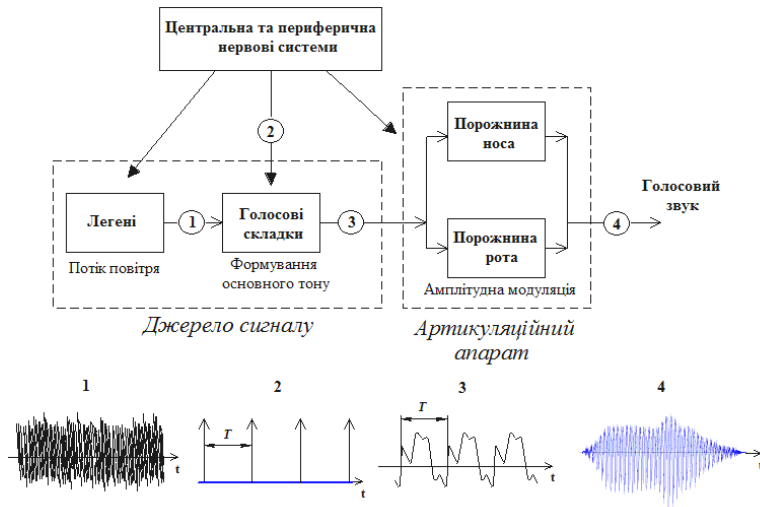


Рис. 1. Процес творення вокалізованих фрикативних звуків

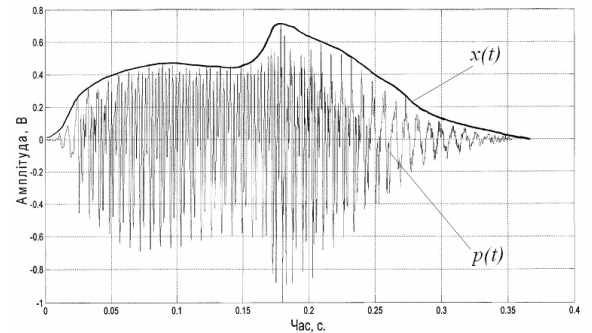
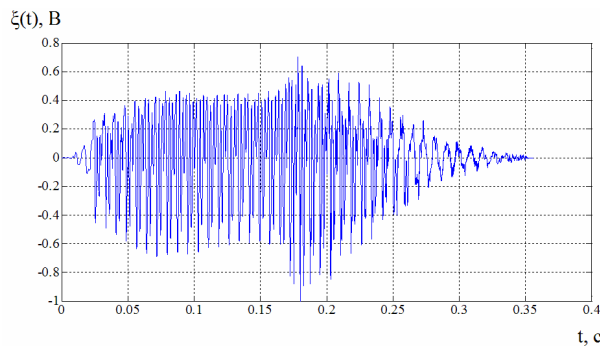
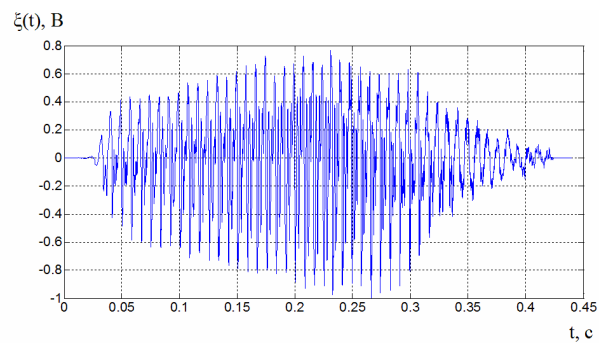


Рис. 2. Вокалізований фрикативний звук, як результат процесу голосотворення

На рис. 3 зображено реєстрограми звуку [л], експериментально зареєстровані обґрунтованою в третьому розділі роботи системою відбору від пацієнтів, що перебувають у стані медичної норми та з патологією.



а)



б)

Рис. 3. Реєстрограми звуку [л]: (а) – стан голосового апарату у нормі; (б) – стан голосового апарату з патологією

Враховуючи вимоги до математичної моделі ВФЗ, що визначаються фізичною природою сигналу та задачею діагностики, а саме, врахування періодичності сигналу та його часово-фазової структури, найпростішою моделлю ВФЗ є детермінована модель у вигляді суміші періодичних функцій. Інформативними та інваріантними ознаками сигналу при цьому є морфологічні особливості часової реалізації сигналу та амплітудні спектри, оцінювання характеристик яких лежать в основі методів гармонічного та формантного аналізу.

Оцінки амплітудних спектрів для вибірок однакового об'єму, взятих з сигналу ВФЗ, наведено на рис. 4.

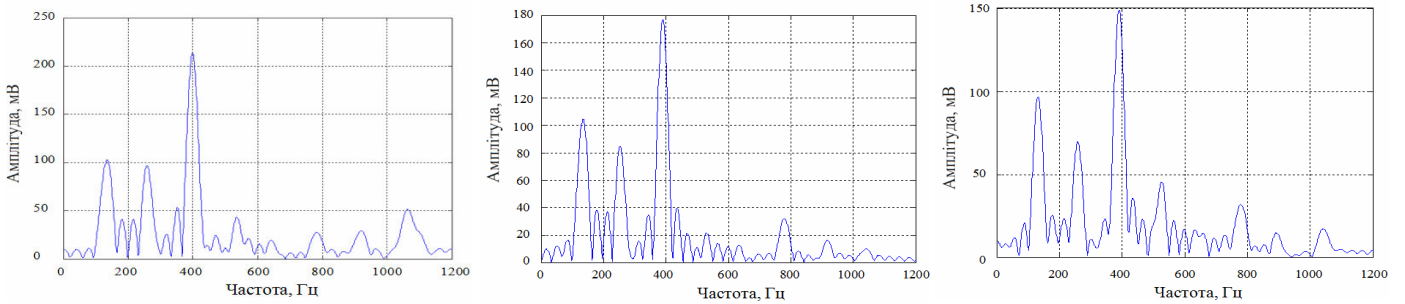


Рис. 4. Оцінки амплітудних спектрів вибірок з реєстрограми звуку [л].
Тривалість вибірки – 0,03 с

Результати опрацювання ВФЗ методами гармонічного аналізу при поданні їх як детермінованого періодичного процесу підтверджують, що отримані амплітудні спектри відгуків ВФЗ (рис. 4) є мінливими. Цей факт свідчить про наявність у сигналі стохастичної складової.

У випадку ймовірнісного підходу до моделювання ВФЗ відомою є стаціонарна модель, що визначає методи спектрально-кореляційного аналізу. При цьому інформативними та інваріантними ознаками сигналу є його ймовірнісні характеристики та їх розподіли. Така математична модель відображає складність ВФЗ у спектральному розподілі потужності, проте не відображає його часово-фазової структури, що є важливим для виявлення моментів появи змін у функціонуванні голосового апарату. У термінах енергетичної теорії ці вимоги задовольняє модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП), яка має засоби врахування як пов'язаності гармонічних складових, так і зміни ймовірнісних характеристик.

Періодично корельований випадковий процес класу π^T – це процес, математичне сподівання якого є періодичною функцією, період якої дорівнює періодові корельованості процесу, а кореляційна функція задовольняє умови:

1) періодичність щодо сумісних зсувів на період корельованості $r_\xi(t+T, s+T) = r_\xi(t, s)$, $T > 0$ для всіх $t, s \in \mathbf{R}$;

2) скінченність середньої за цей період потужності $\frac{1}{T} \int_0^T r_\xi(t, t) dt < \infty$.

Зображення стохастичного коливного процесу (СКП) як ПКВП має подання його через стаціонарні компоненти

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(t) \cdot e^{ik \frac{2\pi}{T} t}, t \in \mathbf{R}, \quad (1)$$

де $\xi_k(t)$ – стаціонарні та стаціонарно пов'язані компоненти СКП, при поданні його як ПКВП; $\mathbf{Z}$ – множина всіх цілих чисел; T – період корельованості сигналу.

Компоненти $e^{ik \frac{2\pi}{T} t}$ виразу (1) відображають гармонічну (коливну) структуру сигналу, а компоненти $\xi_k(t)$ – його стохастичність.

Однак, аналіз часової структури ВФЗ показує, що вони є близькими за виглядом до амплітудно модульованих коливань. У цьому разі, застосувавши

поняття биттів з теорії коливань, ВФЗ доцільно трактувати як поліперіодично корельований випадковий процес, а як найважливіший для застосувань – біперіодично корельований випадковий процес (біПКВП). БіПКВП має зображення:

$$\xi(t) = \sum_{k,j \in Z} \xi_{kj}(t) e^{i\lambda_{kj}t}, \quad (2)$$

$$\lambda_{kj} = k\Lambda_0 + j\Lambda, \quad \Lambda_0 = 2\pi/T_0, \quad \Lambda = 2\pi/T, \quad k, j \in Z,$$

де T_0, T – періоди корельованості.

При цьому існує два способи зображення біПКВП через періодично корельовані компоненти:

$$1) \quad \xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_k^{(T)}(t) e^{ik\Lambda_0 t}, \quad \text{де } \xi_k^{(T)}, \quad k \in Z \text{ – біперіодично корельовані ВП усі з}$$

тим самим періодом корельованості $T = 2\pi/\Lambda$;

$$2) \quad \xi(t) = \sum_{j \in Z} \xi_j^{(T_0)}(t) e^{ij\Lambda t} \text{ через періодично корельовані компоненти } \xi_j^{(T_0)},$$

$j \in Z$, зі спільним періодом корельованості $T_0 = 2\pi/\Lambda_0$. Таким чином виконується пониження порядку корельованості ВП та зведення біПКВП до ПКВП.

Отже, як модель ВФЗ використано ПКВП, як результат пониження порядку корельованості, в якому характеристики обвідної сигналу ВФЗ у часовій області будуть включені в характеристики його несучої.

Модель у вигляді ПКВП визначає загальні методи статистичного опрацювання сигналів: синфазний та компонентний, що використовуються для обчислення статистичних оцінок їхніх ймовірнісних характеристик, які у випадку опрацювання ВФЗ є інформативними, тобто показниками стану органів голосового апарату людини.

У третьому розділі проведено обґрунтування технічних характеристик системи відбору голосових сигналів від пацієнтів. На основі обґрунтованої математичної моделі ВФЗ у вигляді ПКВП розглянуто методи статистичного опрацювання його та отримано нові вирази для числення статистичних оцінок характеристик ВФЗ.

Шляхом аналізу часової структури та гармонічного складу ВФЗ обґрунтовано технічні характеристики, які має задовольняти система для відбору сигналів від пацієнтів з метою забезпечення врахування під час їх опрацювання суттєвих з точки зору діагностичної цінності характеристик ВФЗ та забезпечення коректності результатів опрацювання їх діагностичною системою. Установлено, що для якісного відбору ВФЗ досить використати мікрофони електростатичного типу з максимально рівномірною частотною характеристикою в діапазоні 0.06-7 кГц. Частота дискретизації АЦП повинна становити не менше ніж 22 кГц, а розрядність – 8. Під час досліджень відбір ВФЗ з допомогою комп'ютера проводився з використанням електростатичного конденсаторного мікрофона МКЭ-2, що задовольняє зазначені вище вимоги, частота дискретизації сигналів становила 32 кГц, розрядність АЦП – 8.

Для опрацювання відібраних сигналів використано синфазний метод з відповідною його модифікацією. Метод ґрунтується на зведенні нестационарного випадкового процесу до стаціонарного, не відкидаючи нестационарності, а враховуючи її, із наступним застосуванням методів спектрально-кореляційного аналізу теорії стаціонарних випадкових процесів. При цьому приймається до уваги факт, що відліки значень сигналу Ξ через період корельованості T при різному виборі початкової фази $t_0 \in [0, T)$ утворюють стаціонарну ергодичну векторну випадкову послідовність $\{\Xi(t_0), t_0 \in [0, T)\}$, де $\Xi(t_0) \equiv \{\Xi(t_0 + k \cdot T), k \in Z\}$, $\{\Xi(t_0), \Xi(t_1) \dots \Xi(t_n)\}$ – стаціонарні та стаціонарно пов'язані випадкові послідовності. Таким чином, статистика періодично корельованих випадкових послідовностей зводиться до статистики стаціонарних випадкових послідовностей. При цьому кореляційні функції таких послідовностей, внаслідок їх періодичності з періодом корельованості T , виходячи з означення класу ПКВП, можуть бути розкладені в ряди Фур'є згідно з виразом (3).

$$b_{\xi}(t, u) = \sum_{k \in Z} e^{ik\Delta t} B_k(u), \quad \Delta = \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

де $b_{\xi}(t, u)$ – кореляційна функція, $B_k(u)$ – кореляційні компоненти; k – номер компоненти; u – величина зсуву.

Компоненти $B_k(u)$ характеризують структуру часової мінливості сигналу. Оцінки їх для випадку періодично корельованих випадкових послідовностей знаходяться за виразом (4).

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{N_T} \sum_{n=0}^{N_T-1} \hat{b}_{\xi}(n\Delta t, u) \cdot e^{ik \frac{2\pi}{N_T} n}, \quad (4)$$

де N_T – дискретний період корельованості фрикативного звуку; $N_T = T / \Delta t$, Δt – крок дискретизації.

Застосування синфазного методу статистичного опрацювання ВФЗ при поданні його математичною моделлю у вигляді ПКВП передбачає апріорне знання величини періоду корельованості (ПК). У випадку ВФЗ не існує прямих методів визначення ПК за реалізацією сигналу. Однак зрозуміло, що ПК буде близьким до періоду основного тону (ПОТ). Тому за його початкове значення використано значення ПОТ і задача пошуку ПК звелась до задачі визначення ПОТ.

Найпростішим методом знаходження ПОТ є метод, що ґрунтується на аналізі часової структури голосового сигналу. Відстань між максимумами амплітуди сигналу приймається за значення ПОТ. Також відомим є кепстральний метод знаходження ПОТ. Розміщення максимуму в кепстрі ВФЗ у діапазоні від 2 мс до 20 мс визначає період аналізованого сигналу.

Найпоширенішим методом знаходження ПОТ є автокореляційний. Початкова оцінка ПОТ визначається часовою відстанню між максимальними за амплітудою значеннями автокореляційної функції в межах визначеного інтервалу (рис. 5).

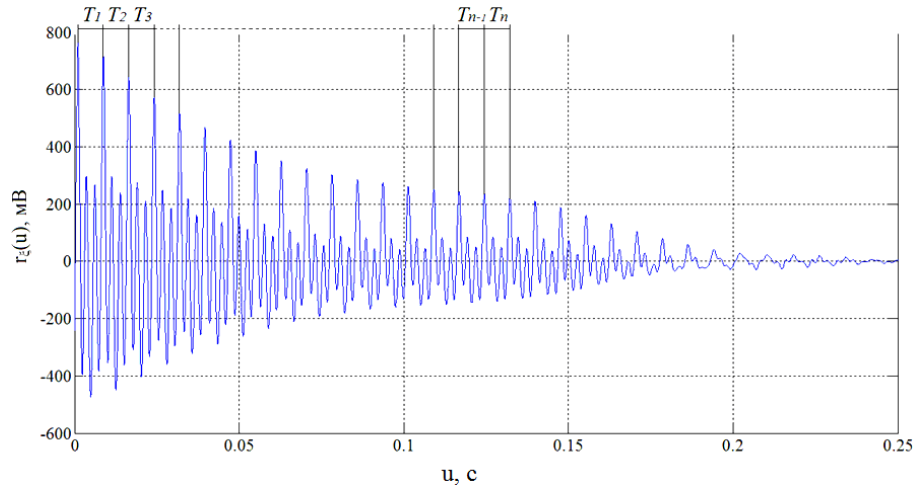


Рис. 5. Знаходження періоду основного тону фрикативного звуку [л] за автокореляційною функцією

Значення періоду корельованості T визначається з виразу (5):

$$T = M(T_n), \quad n \in Z, \quad (5)$$

де $M(\cdot)$ – символ математичного сподівання; T_n – проміжні значення ПОТ, знайдені за автокорелційною функцією.

Однак відомо, що на точність обчислення ПОТ за автокореляційною функцією можуть впливати обертони, присутні в сигналі, та гармоніки з вищою амплітудою. Для вирішення проблеми обчислено розподіл спектральної густини потужності сигналу за частотами, що призвело до розділення частоти основного тону (ЧОТ), яка є оберненою до ПОТ, і частот обертонів. Отримана оцінка спектральної густини потужності сигналу зображена на рис. 6.

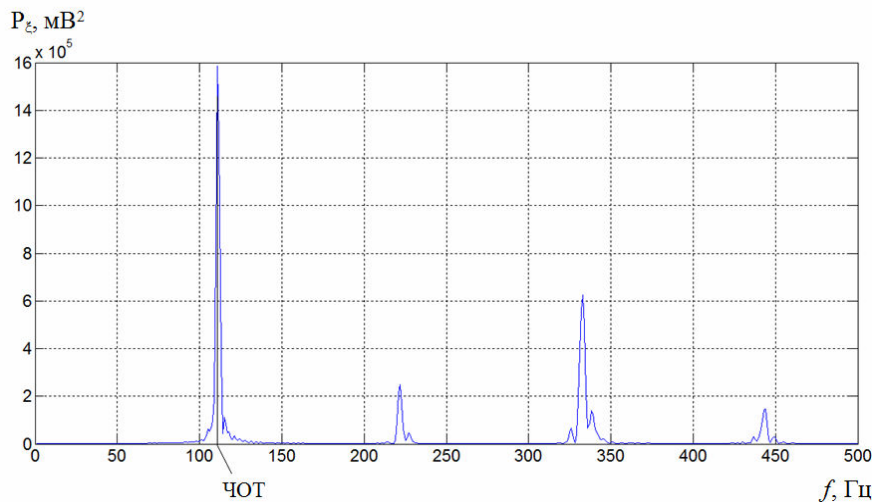


Рис. 6. Оцінка спектральної густини потужності звуку [л]

Відповідно до рис. 6, перший пік відповідає першій форманті, а частота його розміщення – ЧОТ.

Оскільки ПОТ є змінним для різних дикторів та різних реалізацій сигналу одного диктора, обчислення ПК описаним вище методом необхідно проводити для кожної реалізації сигналу.

У четвертому розділі наведено результати опрацювання ВФЗ, відібраних від пацієнтів, що перебувають в стані медичної норми та патології, модифікованим синфазним методом. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель ВФЗ на базі моделі у вигляді періодично корельовано випадкової послідовності. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель ВФЗ на основі моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу. Результати аналізу ймовірнісних характеристик імітаційної моделі підтвердили коректність імітаційного моделювання, що, в свою чергу, підтвердило відповідність вибраної у розділі 2 математичної моделі ВФЗ фізичній природі досліджуваного сигналу та розв'язуваній задачі.

Послідовність операцій реалізації модифікованого синфазного методу опрацювання ВФЗ зображено на рис. 7.

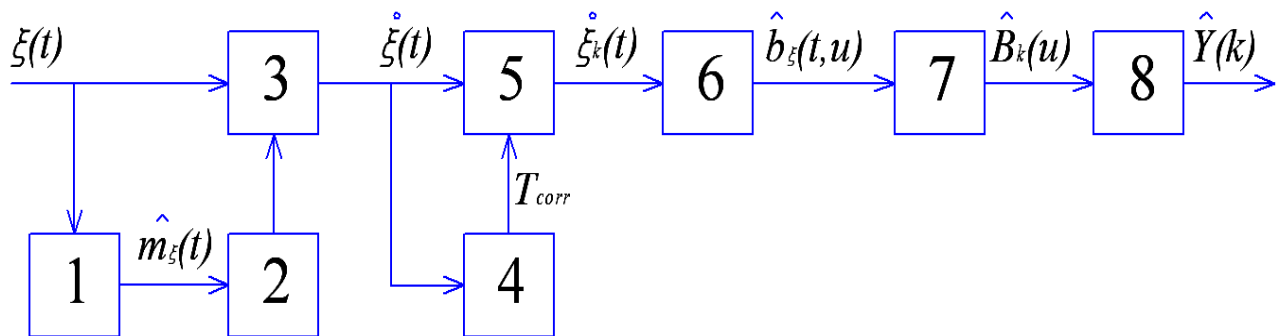


Рис. 7. Послідовність операцій реалізації модифікованого синфазного методу опрацювання ВФЗ

Відповідно до рис. 7, блок 1 описує числення оцінки математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t)$ від $\xi(t)$, блок 2 – формування періодичної послідовності $[\hat{m}_\xi(t) \hat{m}_\xi(t) \dots \hat{m}_\xi(t)]$, блок 3 – центрування випадкової послідовності $\hat{\xi}(t)$, блок 4 – числення періоду корельованості T_{corr} описаним вище способом, блок 5 – формування стаціонарних компонент $\hat{\xi}_k(t)$, блок 6 – числення оцінки кореляції $\hat{b}_\xi(t, u)$ між стаціонарними компонентами з урахуванням часових u та періодних T зсувів, блок 7 – числення оцінок кореляційних компонент $\hat{B}_k(u)$ та блок 8 – оцінювання кореляційних компонент $\hat{Y}(k)$.

Враховуючи послідовність дій опрацювання ВФЗ модифікованим синфазним методом отримано результати, які наведені на рис. 8 та рис.9.

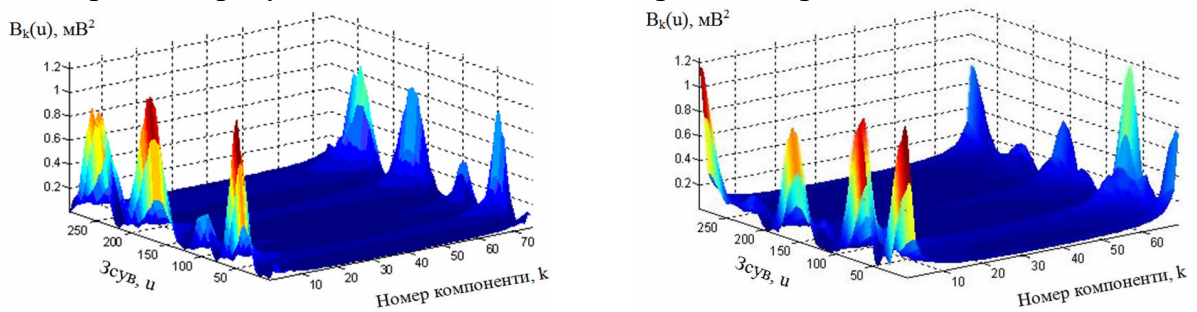


Рис. 8. Оцінки кореляційних компонент ВФЗ для стану медичної норми

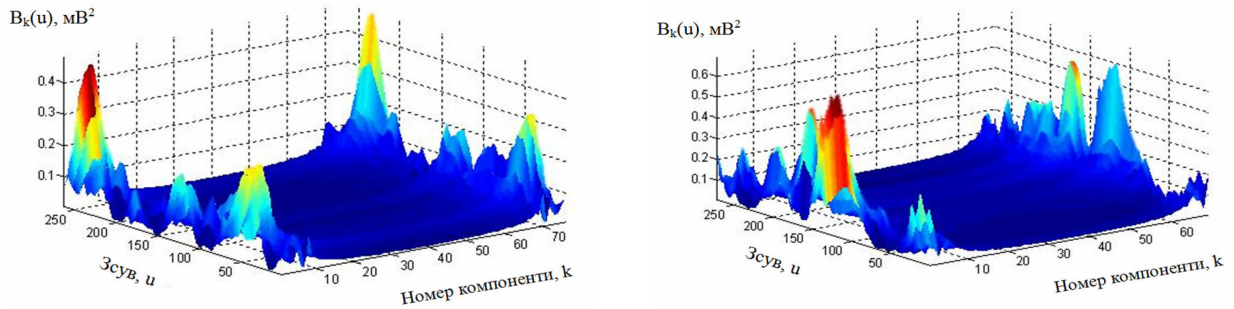


Рис. 9. Оцінки кореляційних компонент ВФЗ для стану медичної патології

Для оцінювання загального функціонального стану (норма/патологія) виконано усереднення кореляційних компонент (рис. 8,9) відповідно до виразу (6).

$$M\left(\hat{B}_k(u)\right) = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} B_k(u), \quad k = \overline{1, N_k}, \quad (6)$$

де k – номер кореляційної компоненти; N_k – кількість кореляційних компонент.

Результати усереднення кореляційних компонент наведені на рис. 10.

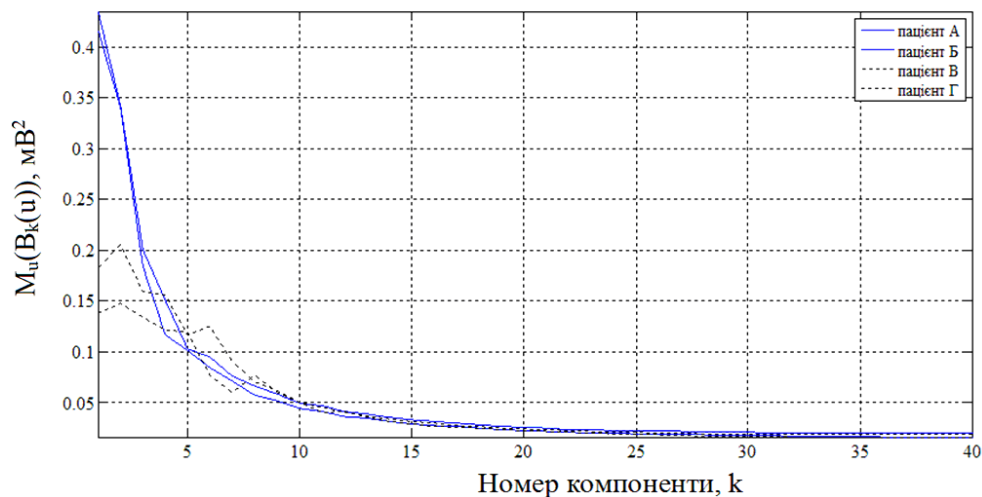


Рис. 10. Усереднені значення кореляційних компонент

Графіки на рис. 8 відповідають пацієнтам А та Б (рис. 10), що перебувають у стані норми. Відповідно графіки на рис. 9 відповідають пацієнтам В та Г (рис. 10), що перебувають у стані патології (дисфункція язика). У результаті порівняльного аналізу ознак ВФЗ на основі рис. 10 можна відзначити, 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 модифікованим методом, отримано інформативні ознаки сигналу (кореляційні компоненти) (рис. 9). Вони є інваріантними у часі та показують однорідність властивостей сигналу, і поряд з тим зміни, за характером і значеннями яких можна оцінити стан голосового апарату, а також діагностувати порушення його функціонування.

За критерій оцінювання загального функціонального стану голосового апарату за оцінками усереднених кореляційних компонент (ОУКК) ВФЗ запропоновано

використати дисперсію варіації значень ОУКК, що відображають варіацію потужності зміни ритму. ОУКК, обчислені для сигналів ВФЗ [л], відібраних в стані норми та патології, наведено на рис. 11.

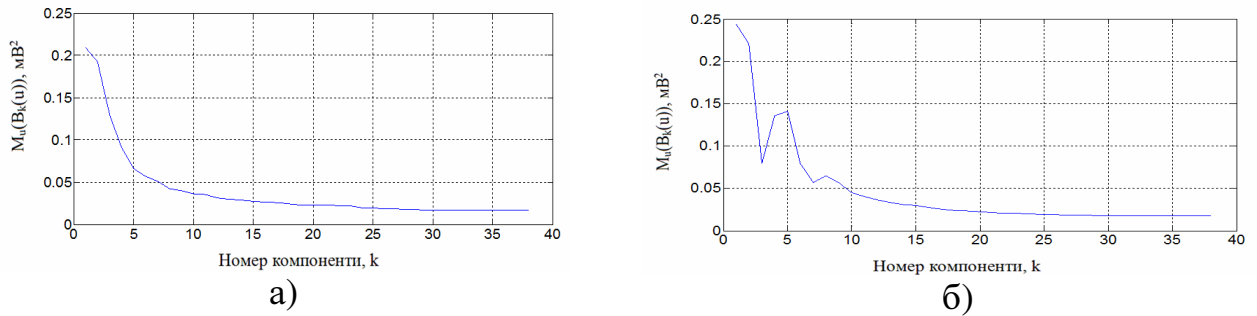


Рис. 11. Оцінки усереднених кореляційних компонент ВФЗ [л] для стану норми (а) та патології (б))

Запропонований метод ґрунтується на апроксимації кривих ОУКК до кривої, яка повинна відображати стан медичної норми голосового апарату, а саме, мати мінімальну варіацію потужності ритму. Оцінки варіації потужності ритму ВФЗ відносно апроксимуючих кривих наведено на рис. 12.

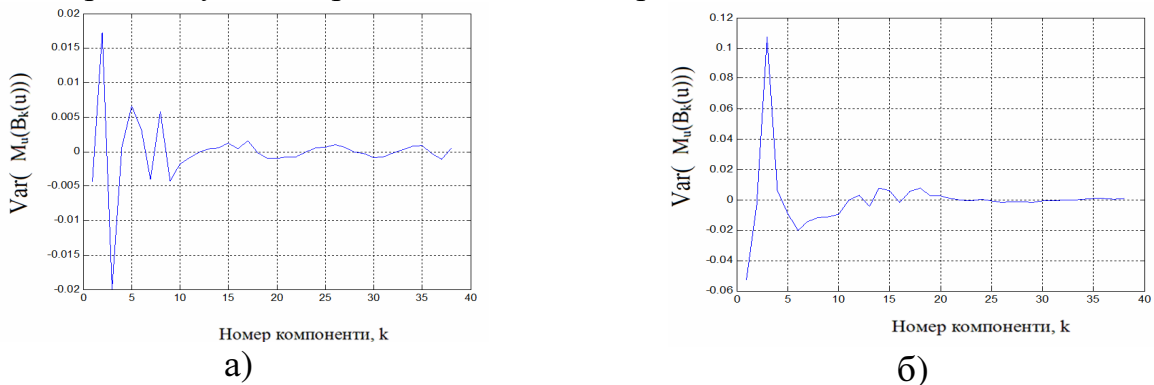


Рис. 12. Оцінки варіації потужності ритму ВФЗ [л] для стану норми (а) та патології (б))

Шляхом опрацювання восьми реалізацій ВФЗ [л], відібраних у стані норми, та восьми реалізацій, відібраних у стані патології, встановлено, що для стану норми значення дисперсії варіації потужності ритму знаходяться в околі значень $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ мВ}^4$, а для стану патології – $(1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^4$. Отже, запропонований критерій є чутливим до змін ритму у ВФЗ [л] та може бути використаний як критерій для поставлення попереднього діагнозу про загальний функціональний стан голосового апарату.

Базуючись на математичній моделі ВФЗ у вигляді ПКВП та його фізичній природі вираз для реалізації комп'ютерної імітаційної моделі подано у вигляді:

$$y_{ij}(u\Delta t) = p_j(l\Delta t) \cdot x_i(u\Delta t) \quad (7)$$

$$p_j(l\Delta t) = (\psi_{A_j} + A_j) \cdot \sin\left(2\pi(l\Delta t + \psi_{T_j}) \cdot f_j\right) \cdot e^{-l\Delta t \cdot K_j} \cdot S_j, \quad l \in [t_{1j} + nT, t_{2j} + nT]$$

$$x_i(u\Delta t) = (\psi_{B_j} + B_i) \cdot \sin\left(2\pi(u\Delta t + \psi_{T_j}) \cdot f_{oi}\right) \cdot e^{-u\Delta t \cdot K_{oi}} \cdot S_{oi} + N_i, \quad u \in [t_{1i}, t_{2i}],$$

де $y_{ij}(u\Delta t)$ – зімітований ВФЗ; $p_j(l\Delta t)$ – несучий сигнал; $x_i(u\Delta t)$ – обвідна сигналу ВФЗ в часовій області; Δt – крок дискретизації ВФЗ; j, i – номер відліку відповідно несучої та обвідної ВФЗ; Ψ_A – випадкова величина амплітуди хвилі несучої сигналу ВФЗ, розподілена за нормальним законом із математичним сподіванням $M\{A\}=0$ та дисперсією $D\{A\}$, яка є показником відхилення; Ψ_B – випадкова величина амплітуди хвилі обвідної, розподілена за нормальним законом із математичним сподіванням $M\{B\}=0$ та дисперсією $D\{B\}$, яка є показником відхилення; Ψ_T – випадкова величина часової тривалості хвилі, розподілена за нормальним законом із математичним сподіванням $M\{N_T\Delta t\}=0$ та дисперсією $D\{N_T\Delta t\}$, де N – кількість точок, які лежать у межах одного періоду T ВФЗ.

Результати комп'ютерного імітаційного моделювання ВФЗ для стану медичної норми наведено на рис. 13.

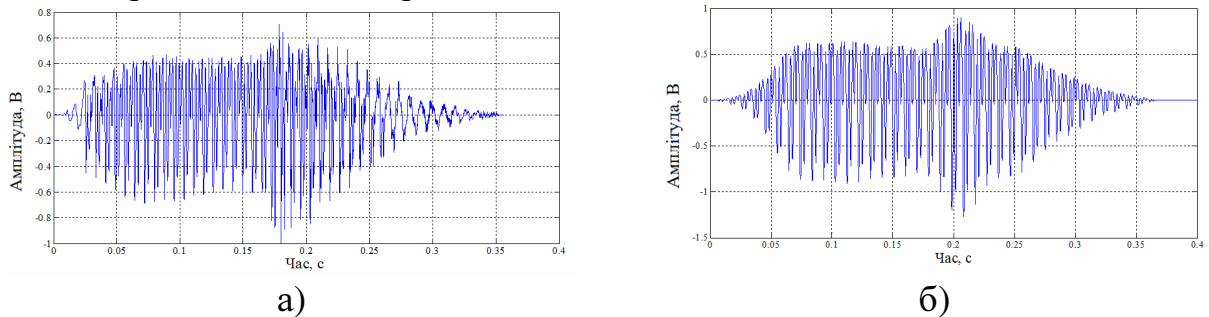


Рис. 13. Реалізації реального (а) та зімітованого (б) сигналу ВФЗ

Оцінки варіації потужності ритму реального та зімітованого ВФЗ наведено на рис. 14.

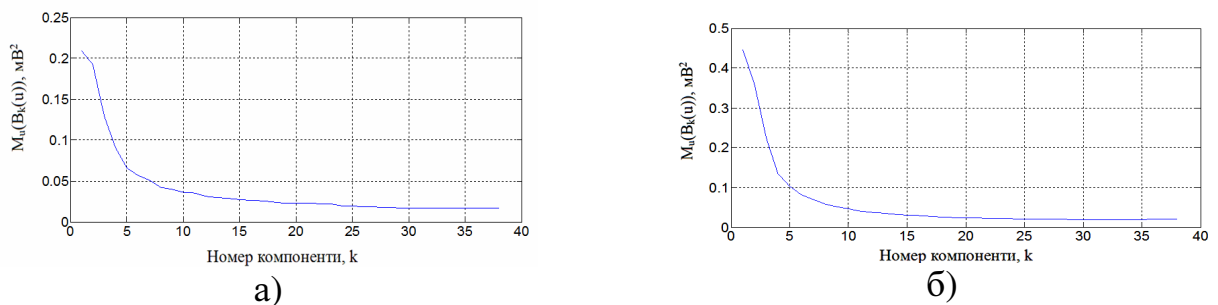


Рис. 14. Оцінки усереднених кореляційних компонент, обчислені для реалізацій реального (а) та зімітованого (б) сигналу ВФЗ.

З рис. 13 та рис. 14 бачимо, що часові реалізації реального та зімітованого сигналів – ВФЗ [л] є подібними, а ОУКК характеризуються мінімальною дисперсією варіації потужності ритму, яка для зімітованого сигналу становить $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ мВ}^4$. Даний факт є підставою для верифікації методу комп'ютерного імітаційного моделювання.

На основі розробленої математичної моделі та методу опрацювання ВФЗ створено пакет комп'ютерних програм для статистичного опрацювання та

імітаційного моделювання ВФЗ як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення медичних автоматизованих діагностичних систем.

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows XP), акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу обґрунтування вибору математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків, яка враховує характер роботи органів голосового апарату людини, та обґрунтування на її основі інформативних ознак сигналу й методу їх розрахунку для задач діагностики голосового апарату людини.

При цьому отримано такі результати:

1. Обґрунтовано доцільність застосування опрацювання класу вокалізованих фрикативних звуків для задач діагностування органів голосового апарату людини на ранніх етапах розвитку їх захворювання.

2. У результаті проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей голосових сигналів виявлено їх неадекватність фізичній природі вокалізованих фрикативних звуків та задачі діагностики голосового апарату. Сформульовано основні вимоги до математичної моделі: врахування повторюваності в сигналі, випадковості, спричиненої порушеннями вимови, та часово-фазової структури, що характеризує роботу органів голосового апарату в процесі вимови.

3. Обґрунтовано вибір математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка на відміну від відомих, враховує поєднання випадковості з повторністю сигналу та його часово-фазову структуру.

4. Модифіковано синфазний метод статистичного опрацювання вокалізованих фрикативних звуків, який дає змогу оцінити стан голосового апарату та його органів зокрема на ранніх стадіях розвитку захворювання.

5. Установлено, що отримані значення кореляційних компонент є характеристиками інформативно-інваріантних ознак вокалізованого фрикативного звуку та характеризують функціональний стан голосового апарату людини.

6. Створено пакет комп'ютерних програм статистичного опрацювання вокалізованих фрикативних звуків на основі модифікованого методу, який придатний для використання як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих комп'ютерних діагностичних систем.

7. Розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання вокалізованих фрикативних звуків для верифікації запропонованої математичної моделі та методу їх статистичного опрацювання.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Драган, Я. Обґрунтування математичної моделі фрикативного звуку у вигляді періодично корельованого випадкового процесу [Текст] / Я. Драган,

- Є. Яворська, В. Дозорський // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2010. – Т15. – №3. – С. 159–164.
2. Драган, Я. Метод опрацювання фрикативних звуків для діагностики захворювань органів голосового апарату на ранніх стадіях [Текст] / Я. Драган, В. Дозорський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : НУЛП, 2011. – № 694. – С. 376–382.
 3. Бачинський, М.В. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач медичної діагностики систем дихання та голосотворення [Текст] / М.В. Бачинський, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – №3. – С.192–195.
 4. Модель акустичного сигналу для виявлення порушень стану дихальної системи та голосового апарату як частковий випадок стохастичної коливної системи [Текст] / Н.І. Джичка, І.Ю. Дедів, В.Г. Дозорський, Я.П. Драган // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : НУЛП, 2011. – № 710. – С. 155–159.
 5. Дозорський, В. Синфазний метод статистичного опрацювання фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату [Текст] / В. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 3. – С. 16–21.
 6. Бачинський, М.В. Комп’ютерна імітаційна модель вокалізованих фрикативних звуків [Текст] / М.В. Бачинський, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 1. – С. 149–156.
 7. Драган, Я. Стохастична модель фрикативних звуків для задач корекції вимови [Текст] / Я. Драган, В. Дозорський // VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Тези наукових доповідей. – Кременчук : КДУ імені Михайла Остроградського, 2009. – С. 132–133.
 8. Дозорський, В. Представлення мовних звуків у вигляді амплітудно-модульованих сигналів в задачах корекції вимови [Текст] / В. Дозорський, Ю. Лещишин // Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 13–14 травня, 2009. – С.158.
 9. Дозорський, В.Г. Метод визначення періоду корельованості вокалізованих фрикативних звуків [Текст] / В.Г. Дозорський, Г.М. Шадріна // Збірник тез доповідей XIV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя “Природничі науки та інформаційні технології” . – Тернопіль, ТНТУ ім. І.Пулюя, 27–28 жовтня, 2010. – С. 42.
 10. Дедів, І. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач діагностики систем дихання та голосотворення [Текст] / І. Дедів,

- В. Дозорський // Матеріали науково-технічної конференції “Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування”. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 11–12 травня, 2011. – С. 24–25.
11. Застосування енергетичної теорії стохастичних сигналів для задач медичної діагностики [Текст] / Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, В.Л. Дунець, І.Ю. Дедів // Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции “Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2011’”. – Одесса: Черноморье, 15–28 марта, 2011. – Т.3. – С. 72–73.
 12. Дозорський, В.Г. Метод статистичного опрацювання вокалізованих фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату людини [Текст] / В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів // X Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Тези наукових доповідей. – Кременчук : КНУ імені Михайла Остроградського, 2011. – С. 85–86.
 13. Дозорський, В. Синфазний метод опрацювання фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату людини [Текст] / В. Дозорський, В. Забитівський // Сборник научных трудов SWorld по материалам научно-практической конференции “Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании ‘2011’”. – Одесса: Черноморье, 20–27 декабря, 2011. – Вып.4. – Т.5. – С. 85–87.
 14. Дозорський, В.Г. Імітаційна модель вокалізованих фрикативних звуків для задач тестування комп’ютерних діагностичних систем [Текст] / В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів // XI Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Матеріали конференції. – Кременчук : КНУ імені Михайла Остроградського, 2012. – С. 32–33.

АНОТАЦІЯ

Дозорський В.Г. Математична модель вокалізованих фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату людини. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2013 р.

У дисертації розв’язано актуальну наукову задачу обґрунтування вибору математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків, яка враховує характер роботи органів голосового апарату людини, та обґрунтування на її основі інформативних ознак сигналу та методу їх розрахунку для задач діагностики голосового апарату.

Обґрунтовано нове застосування періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі вокалізованих фрикативних звуків, яка враховує у своїй структурі поєднання властивостей періодичності із випадковістю. На основі обґрунтованої моделі модифіковано синфазний метод опрацювання вокалізованих

фрикативних звуків, що дає змогу оцінити стан голосового апарату та його органів зокрема на ранніх етапах розвитку захворювання. Установлено, що отримані значення кореляційних компонент, обчислені з допомогою модифікованого синфазного методу, є інформативними ознаками вокалізованого фрикативного звуку та характеризують функціональний стан голосового апарату людини.

Створено пакет комп'ютерних програм статистичного опрацювання вокалізованих фрикативних звуків на основі модифікованого методу, який придатний для використання як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих комп'ютерних діагностичних систем.

Розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання вокалізованих фрикативних звуків для верифікації запропонованої математичної моделі та методу їх статистичного опрацювання.

Ключові слова: вокалізований фрикативний звук, періодично корельований випадковий процес, період корельованості, кореляційні компоненти, верифікація.

АННОТАЦИЯ

Дозорский В.Г. Математическая модель вокализированных фрикативных звуков для задач диагностики голосового аппарата человека – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2013 г.

В диссертационной работе развязано важное научное задание – обоснование выбора математической модели вокализированных фрикативных звуков, которая должна учитывать характер работы органов голосового аппарата человека, и обоснование на ее основе информативных признаков сигнала и методов их расчета для задач диагностики голосового аппарата.

На основе аналитического обзора литературных источников раскрыто состояние и особенности задачи диагностирования голосового аппарата человека за голосовыми сигналами. Рассмотрены известные физико-математические модели голосового тракта человека, результатом работы которого является голосовой сигнал, который в рамках системно-сигнальной концепции трактуется как физический процесс, распространяющийся от исследуемого объекта (голосового аппарата) и являющийся средством переноса информации об этом объекте. Обоснован выбор для обработки класса вокализированных фрикативных звуков, при образовании которых задействуются практически все органы голосового аппарата, то-есть этот класс сигналов содержит максимально полную информацию о работе голосового аппарата. Учитывая специфику поставленных задач, известные подходы к их решению и особенности исследуемых сигналов, сформулированы требования к математической модели вокализированных фрикативных звуков.

Учитывая сложность механизма формирования вокализированного фрикативного звука проанализированы его характеристики в рамках

детерминированного подхода и с позиций стохастического подхода (методами теории стационарных случайных процессов). Полученные результаты анализа методами гармонического анализа в рамках детерминированного подхода подтверждают, что полученные амплитудные спектры выборок из сигнала являются переменчивыми, то-есть содержат определенную случайность. Стохастическая стационарная модель отображает сложность сигнала в спектральном распределении мощности, однако не отображает его фазово-временной структуры, которая является важным показателем при выявлении временных изменений в сигнале. Из анализа свойств вероятностных характеристик сигнала и свойств периодически коррелируемых случайных процессов следует, что математическая модель процесса такого класса дает возможность адекватно описать сигнал, а именно учесть в своей структуре сочетание свойств периодичности из стохастичностью, что является важным при исследовании фазово-временных отклонений с целью выявления момента проявления ранних изменений в функционировании голосового аппарата человека.

На основе обоснованной математической модели модифицирован синфазный метод исследования вокализированных фрикативных звуков, позволяющий оценить состояние голосового аппарата и его органов, в частности на ранних этапах развития заболевания. Установлено, что полученные значения корреляционных компонент, вычисленные с помощью модифицированного метода, являются информативными признаками вокализированного фрикативного звука и характеризуют функциональное состояние голосового аппарата человека.

Создан пакет компьютерных программ статистической обработки вокализированных фрикативных звуков на основе модифицированного метода, который пригоден для использования его как компонента специализированного программного обеспечения автоматизированных компьютерных диагностических систем.

Разработан метод компьютерного имитационного моделирования вокализированных фрикативных звуков для верификации математической модели и метода их статистической обработки.

Ключевые слова: вокализированный фрикативный звук, периодически коррелированный случайный процесс, период коррелированности, корреляционные компоненты, верификация.

SUMMARY

Dozorsky V.G. Mathematical model of vocal fricative sounds for the tasks of diagnostic of human vocal apparatus. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 01.05.02 - mathematical modeling and computational methods. - Ternopil State Technical University named after Ivan Pul'uj, Ternopil, 2013.

In dissertation the important scientific task is solved – the mathematical model of vocal fricative sounds is improved and the method of analysis of him is worked out, formed on the base of this model, for the problems of diagnosis vocal apparatus.

New application of the periodically correlated random process is reasonable as a mathematical model of vocal fricative sounds, which takes into account in the structure combining of properties of periodicity with a stochastic. On the base of reasonable model the method of research of vocal fricative sounds is worked out. Set, that correlation component is got are the informative sings of vocal fricative sounds and answer the functional state of human vocal apparatus.

An of simulation of vocal fricative sounds technique (program and algorithm) is worked out on the basis of periodically correlated random process. The of package of computer software is created for the automated working of vocal fricative sounds and realization of imitation experiments for automated systems of medical diagnostic.

Keywords: vocal fricative sounds, periodically correlated random process, period of correlation, correlation components, verification.