

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

ДЕДІВ ІРИНА ЮРІЇВНА

УДК 519.218:612.216.1

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИХАЛЬНИХ ШУМІВ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ
АУСКУЛЬТАТИВНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ

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 України.

Науковий керівник

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

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Овсяк Володимир Казимирович,
Українська академія друкарства, професор кафедри
автоматизації та комп’ютерних технологій,
м. Львів;

кандидат технічних наук, доцент
Сверстюк Андрій Степанович,
Тернопільський державний медичний
університет імені Івана Яковича Горбачевського,
доцент кафедри медичної інформатики,
м. Тернопіль.

Захист відбудеться _____ 2013 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** у 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. Дихальна система займає основне місце серед інших систем людського організму, забезпечуючи киснем організм людини. Проте погіршення екології, пасивний спосіб життя, а також шкідливі звички є тими соціально-екологічними факторами, які спричиняють негативний вплив на її стан. Зокрема, згідно зі статистичними даними Всесвітньої організації охорони здоров'я станом на 2012 рік налічувалось 2,5 млн. людей з порушенням роботи дихальної системи. Тому, актуальною проблемою сучасної пульмонології як в Україні, так і в усьому світі, постає прогностичне виявлення змін в функціонуванні дихальної системи людини.

Порушення роботи дихальної системи викликає зміну функціонального стану її органів, і відображується в дихальних шумах – сигналах, належне опрацювання яких може забезпечити виділення ознак цих порушень, що є індикаторами змін у функціональному стані органів дихальної системи. Завчасна діагностика стану дихальної системи дає змогу виявити в ній функціональні зміни на початкових етапах виникнення та розвитку їх і тим самим уможливорює проведення своєчасних профілактичних заходів з її реабілітації, а у випадку виявлення патології – проведення відповідного лікування. Поширені в медицині методи діагностування опираються на вислуховуванні дихальних шумів лікарем, а якість та точність поставленого діагнозу залежить від професійних якостей лікаря, його власного функціонального стану тощо, тобто вони є суб'єктивними та низькоінформативними. Тому, важливою медичною та технічною задачею є побудова автоматизованої діагностичної аускультативної технічної системи, якість якої вирішальною мірою визначається математичною моделлю сигналу, що повинна бути адекватною задачі діагностування дихальної системи і є необхідною для обґрунтування алгоритмів вимірювання та опрацювання дихальних шумів, інтерпретації отриманих результатів, а також давати змогу автоматизовано виявляти зміни у функціонуванні дихальної системи.

Відомі дві концепції щодо побудови математичних моделей дихального шуму – детермінована та стохастична. Однак, цим моделям притаманні ряд недоліків, що унеможливають застосування їх для побудови автоматизованої аускультативної діагностичної системи. Так, детермінована модель у вигляді суміші періодичних функцій має обмежені можливості щодо опису реальних сигналів, оскільки не враховує у своїй структурі властивість стохастичності (це впливає із фізичної природи породження сигналу), що є характерним для дихальних шумів. Стаціонарна випадкова модель - не враховує у своїй структурі поєднання властивості стохастичності із періодичністю, що є суттєвим при дослідженні змін фазово-часової структури дихального шуму з метою виявлення моменту прояву ранніх змін у функціонуванні дихальної системи.

Тому, обґрунтування математичної моделі дихального шуму, адекватної для задач діагностування дихальної системи людини, і методів його опрацювання для підвищення об'єктивності поставленого діагнозу шляхом впровадження в область пульмонології нового класу інформативних ознак та можливості побудови на цій основі автоматизованих діагностичних аускультативних систем, є актуальною науковою задачею.

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

Тема дисертаційної роботи пов'язана з тематикою наукових досліджень Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема, з темою НДР, яка виконується на кафедрі біотехнічних систем, ВК 37-11 «Дослідження змін функціонального стану організму людини за біосигналами засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів», № д.р. 0111U005289 (2011-2013 р.р.). Вклад дисертанта полягає в: а) обґрунтуванні вибору періодично корельованого випадкового процесу за математичну модель дихального шуму; б) пристосуванні синфазного та компонентного методів оцінювання характеристик дихального шуму при визначенні його інформативних ознак.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є обґрунтування математичної моделі дихального шуму та розроблення методів його аналізу, сформованих на базі цієї моделі, для підвищення інформативності аускультативних діагностичних систем. Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких задач:*

1. Провести аналіз відомих математичних моделей дихальних шумів та методів опрацювання їх для обґрунтування напрямку наукового дослідження.

2. Обґрунтувати математичну модель дихальних шумів, яка поєднує у своїй структурі властивості періодичності із стохастичністю для розроблення засобів оперативного та достовірного виявлення змін дихальної системи на ранніх стадіях захворювання.

3. Обґрунтувати методи статистичного опрацювання дихальних шумів на основі цієї математичної моделі, зорієнтовані на підвищення інформативності та достовірності аускультативних діагностичних систем.

4. Обґрунтувати застосування цих нових інформативних ознак дихальних шумів в аускультативних діагностичних системах і спосіб верифікації моделі.

5. Розробити математичне та програмне забезпечення як засоби комп'ютерного імітаційного моделювання для проведення експериментальних досліджень дихальних шумів пацієнтів з метою верифікації обґрунтованої математичної моделі та статистичних методів їх опрацювання.

Об'єкт дослідження: процес опрацювання дихальних шумів.

Предмет дослідження: математична модель дихальних шумів у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, її властивості та можливості для підвищення інформативності аускультативних діагностичних систем.

Методи дослідження побудовано на базі енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС), зокрема подання періодично корельованого випадкового процесу для удосконалення математичної структури моделі дихальних шумів і статистичного оцінювання її характеристик та статистичної теорії вибору рішень при верифікації математичної моделі дихальних шумів. Для програмної реалізації алгоритмів опрацювання використано пакет прикладних програм MATLAB 8.0.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано нову математичну модель дихального шуму у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, що дало змогу одночасно врахувати в одній математичній структурі періодичність та випадковість процесу дихання, чим підвищено інформативність аналізу дихального шуму.

2. Вперше запроваджено нові в області аускультативні ознаки дихального шуму – кореляційні компоненти – характеристики, які адекватно відображають функціональний стан дихальної системи людини.

3. Вперше застосовано методи статистичної теорії вибору рішень для визначення достовірності результатів оцінювання інформативних ознак дихального шуму, що уможливило прогноз достовірності результатів опрацювання дихального шуму як періодично корельованого випадкового процесу.

4. Вперше на основі обґрунтованої математичної моделі дихального шуму у вигляді періодично корельованого випадкового процесу розроблено його комп'ютерну імітаційну модель, результати застосування якої підтвердили добре узгодження комп'ютерного експерименту з емпіричними даними.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на базі обґрунтованої математичної моделі дихального шуму у вигляді періодично корельованого випадкового процесу модифіковано синфазний та компонентний методи аналізу. Це дало змогу розширити можливості автоматизованих аускультативних діагностичних систем шляхом впровадження в область пульмонології нового класу інформативних ознак, що ними є кореляційні компоненти. Побудована комп'ютерна імітаційна модель дихального шуму придатна для тестування алгоритмів опрацювання даних, отриманих у лікувальних установах.

Результати дисертаційного дослідження використані в навчальному процесі на кафедрі нормальної фізіології Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського (м.Тернопіль) та науково-виробничому експериментальному СМП „Медап” (м.Тернопіль).

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать такі результати: у працях [1,4,10,12] – обґрунтування математичної моделі дихального шуму у вигляді періодично корельованого випадкового процесу; у працях [2,7,8] – застосування синфазного та компонентного методів опрацювання для визначення інформативних ознак акустичних сигналів, в тому числі дихальних шумів; у працях [3,9,15] – обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів, в тому числі дихальних шумів; у праці [14] – проведено імітаційне моделювання дихального шуму.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі результати доповідалися і обговорювалися на всеукраїнській науковій конференції, міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», XV науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2009-2011 р.р.); міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень 2011” (м. Одеса); міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні проблеми і шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті” 2011” (м. Одеса); X та XI міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів” Кременчуцького національного університету (2011-2012 р.р.); 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 в Центрі математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача (м. Львів).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, 6 із них – статті у наукових фахових виданнях [1-6] ([2,4,5,6] входять до переліку видань міжнародної наукометричної бази Inspec), 9 тез доповідей на наукових конференціях [7-15]. Праці [5,6,11,13] опубліковані без співавторів.

Структура та обсяг. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, викладених на 98 сторінках, списку використаних джерел з 105 назв на 11 сторінках, додатків на 11 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 120 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** 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** описано стан дослідження і використання дихальних шумів (ДШ) для задач діагностики дихальної системи людини, фізичні механізми їх породження. Проведено порівняльний аналіз та класифікацію відомих математичних моделей дихальних шумів та методів їх опрацювання, що використовуються в задачах діагностування функціонального стану дихальної системи людини.

Результати огляду відомих моделей показали, що існує два підходи щодо побудови математичних моделей та методів аналізу ДШ, а саме детермінований та стохастичний (імовірнісний). Найпростіші методи опрацювання ДШ у випадку детермінованого підходу щодо побудови їх математичної моделі ґрунтуються на дослідженні морфологічних параметрів реєстрограми ДШ в часовій області (респіросонограми). За математичну модель при цьому використано суміш періодичних функцій, яка описує ДШ у межах одного періоду. Значною мірою детермінований підхід удосконалено при використанні імовірнісного підходу щодо побудови математичної моделі ДШ. Перші кроки у цьому напрямку зроблено такими дослідниками як Дахнов С.Л., Аль-Нажжар Номан Каїд, Гусейнов А.А., Коренбаум В.І, Почекутова І.А., Кулаков Ю.В. Математичною моделлю ДШ у цих роботах вважають стаціонарний випадковий процес. На основі цієї моделі були обґрунтовані для задачі діагностування дихальної системи статистичний, спектральний та кореляційний методи опрацювання ДШ. Ці методи ґрунтуються на знаходженні імовірнісних характеристик сигналу та розподілу спектральної густини потужності за частотами. Проте стаціонарна модель ДШ не має засобів поєднання у своїй структурі властивостей стохастичності із періодичністю, що є характерним для ДШ.

На основі проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей ДШ встановлено, що їм властиві недоліки, а тому є необхідність обґрунтування адекватної фізичній природі та задачі діагностики дихальної системи математичної моделі ДШ та розроблення на її основі методів опрацювання для розв'язання задач виявлення змін стану дихальної системи людини на ранніх етапах їх виникнення та розвитку.

Враховуючи специфіку поставлених задач, відомі підходи до їх розв'язання та особливості досліджуваного сигналу, сформульовано вимоги до математичної моделі ДШ.

У другому розділі проаналізовано характеристики ДШ з позицій детермінованого та імовірнісного підходів. Враховуючи результати аналізу та механізм формування ДШ, обґрунтовано вибір його математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП).

На рис. 1 наведено реалізації експериментально відібраних ДШ двох пацієнтів, що знаходяться в стані медичної норми та патології.

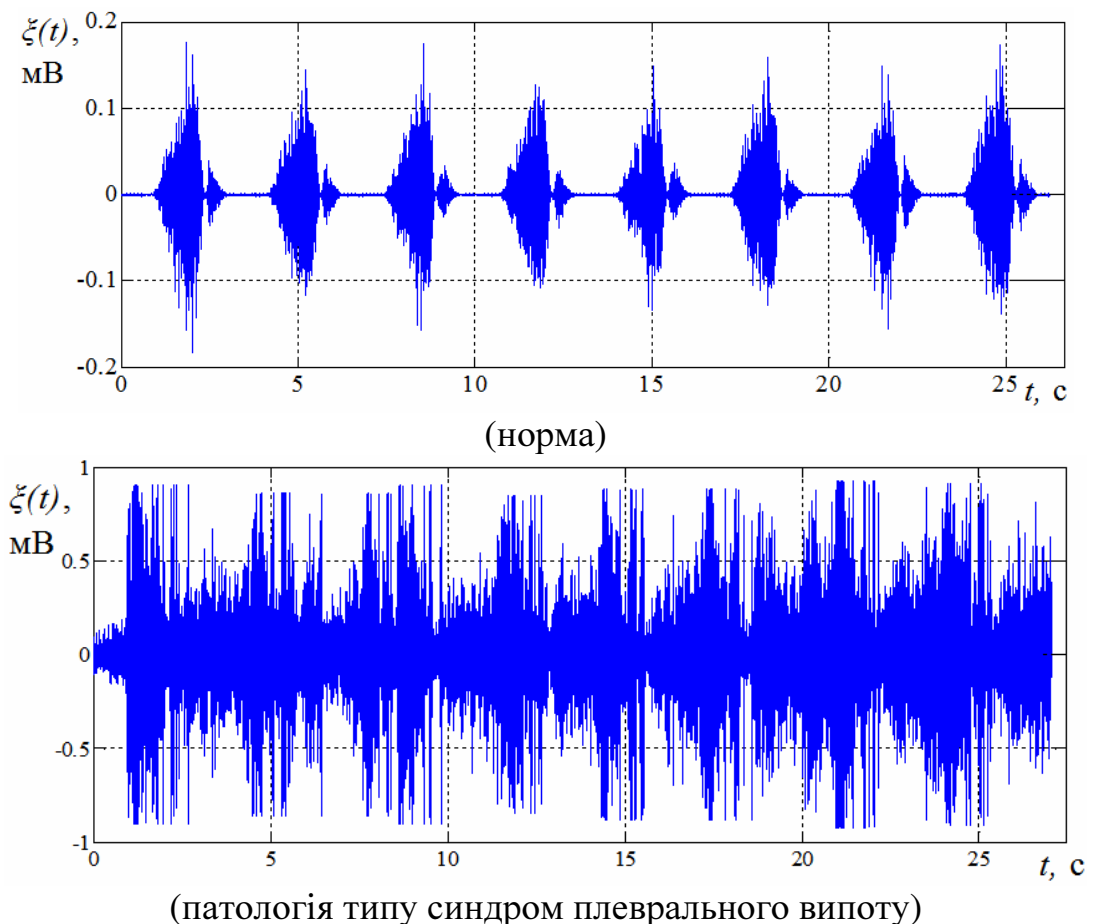


Рис.1. Реалізації експериментально відібраних ДШ від пацієнтів, що знаходяться в стані медичної норми та патології

У випадку застосування детермінованого підходу до побудови математичної моделі ДШ у вигляді суміші періодичних функцій найбільш інформативно значимими з точки зору діагностики стану дихальної системи повинні бути оцінки їх амплітудних спектрів, які повинні зберігати свій склад для різних пацієнтів, що

знаходяться у стані медичної норми, та відобразити додаткові складові спектру, які є результатом порушеної роботи дихальної системи.

Результати аналізу ДШ пацієнтів, що знаходяться у стані норми, методами гармонічного аналізу у рамках детермінованого підходу підтверджують, що отримані амплітудні спектри є мінливими (рис. 2). Цей факт свідчить про наявність у сигналі випадкової складової. Відповідно, можна зробити висновок, що математична модель у вигляді суміші періодичних функцій не є адекватною фізичній природі ДШ.

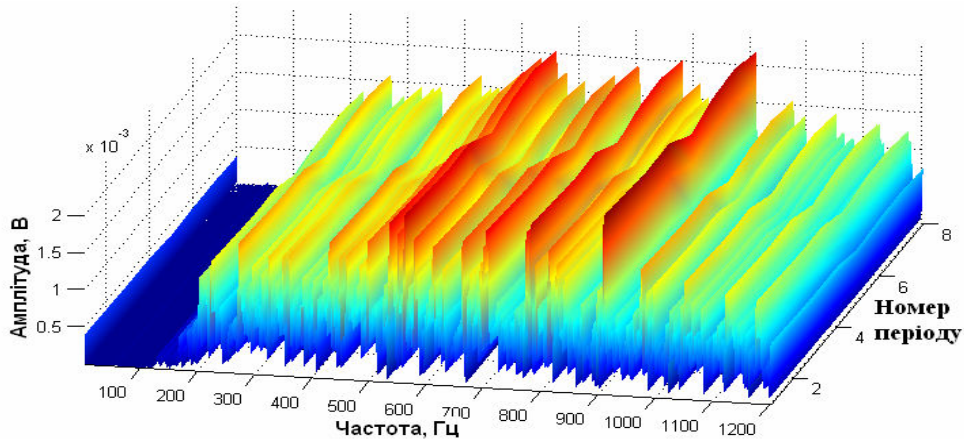


Рис. 2. Оцінки амплітудних спектрів вибірок з реалізації ДШ (норма)

У випадку застосування імовірнісного підходу до побудови математичної моделі ДШ у вигляді стаціонарного випадкового процесу інформативно значимими повинні бути статистичні оцінки ДШ та розподіли спектральної густини потужності. Розглядаючи сигнал у рамках стаціонарної моделі, що рівносильне розглядові стаціонарного наближення періодично корельованого випадкового процесу помічено, що кореляційна функція ДШ, оцінка якої наведена на рис. 3, є циклічно-зникаючою та періодичною в часі, при цьому, цей період однаковий з періодом дихання пацієнтів. На основі цього, використовуючи принцип Слуцького, висунуто припущення про ергодичність сигналу. Тому, для оцінювання ДШ з діагностичною метою достатньо виконати опрацювання однієї реалізації ДШ.

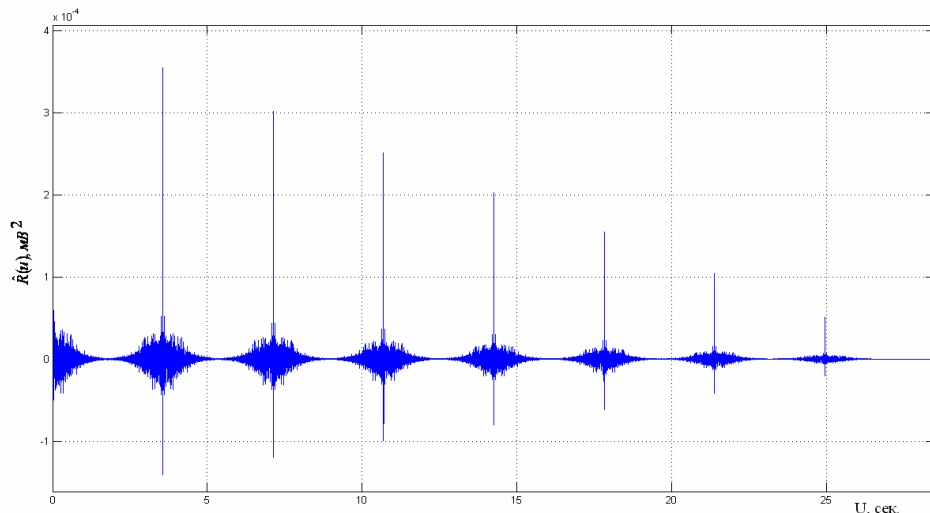


Рис.3. Оцінки автокореляційної функції ДШ (норма)

Адекватна задачі діагностики дихальної системи модель ДШ повинна мати засоби врахування його властивостей: стохастичності, гармонізованості і періодичності статистичних характеристик. Випадкова стаціонарна модель відображає складність ДШ у спектральному розподілі потужності, проте не відображає його фазово-часової структури, яка є важливим показником при виявленні фазово-часових змін у сигналі, що є наслідком порушень у роботі дихальної системи. У термінах енергетичної теорії ці вимоги задовольняє модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка має засоби врахування як пов'язаності гармонічних складових, так і зміни ймовірнісних характеристик і скінченності середньої за цей період потужності.

Періодично корельований випадковий процес класу π^T – це процес, який задовольняє умови періодичності математичного сподівання та кореляційної функції з періодом T , що називається періодом корельованості сигналу.

При поданні ДШ як ПКВП його можна подати таким виразом:

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

де $\xi_k(t)$ – стаціонарні та стаціонарно пов'язані компоненти, що відображують наявну в сигналі випадковість, множини $e^{ik \frac{2\pi}{T} t}$ характеризують його повторюваність.

Таким чином, математична модель ДШ у вигляді ПКВП, що описується виразом (1), є адекватною як фізичній природі таких сигналів (враховує у своїй структурі повторюваність та випадковість) так і задачі діагностики дихальної системи (має засоби оцінювання ймовірнісних характеристик ДШ та їх часово-фазову структуру).

Модель ДШ у вигляді ПКВП обґрунтовує застосовність до нього відомих методів статистичного опрацювання (синфазного, компонентного) для обчислення оцінок ймовірнісних характеристик, які, як показано в дисертаційній роботі, є показниками стану дихальної системи людини.

У третьому розділі на основі запропонованої математичної моделі ДШ у вигляді ПКВП отримано вирази для числення статистичних оцінок його характеристик, які дали змогу підвищити об'єктивність поставленого діагнозу шляхом впровадження в область пульмонології нового класу інформативних ознак, одержаних синфазним та компонентним методами статистичного опрацювання.

Синфазний метод ґрунтується на тому, що відліки значень ДШ 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 $\xi(t_0) \equiv \{\xi(t_0 + kT), k \in \mathbf{Z}\}$, до опрацювання якої застосовані методи спектрально-кореляційного аналізу стаціонарних випадкових процесів.

У випадку застосування синфазного методу характеристики ДШ (математичне сподівання $\hat{m}(t)$ та кореляційна функція $\hat{b}_\xi(t, u)$) числяться за виразами:

$$\begin{array}{l}
 \xi(t), T, u_{\max}, t_{\max}, k_{\max} \\
 ; \\
 \varphi(k \leq k_{\max}) \\
 \hline
 \varphi(u \leq u_{\max}) \\
 \hline
 \varphi(t \leq t_{\max}); \quad c(k \leq k_{\max}); \quad (k \leq k_{\max})-? \\
 ; \\
 |B(k,u) = \xi(t+k*T) * \xi(t+k*T+u) * \exp(j*2*\pi*k*t/T) \\
 ; \\
 c(t \leq t_{\max}) \\
 ; \\
 c(u \leq u_{\max}) \\
 ; \\
 (t \leq t_{\max})-?
 \end{array} \quad (7)$$

де $u=0, dt, 2 \cdot dt, 3 \cdot dt, \dots, u_{\max}$, $t=0, dt, 2 \cdot dt, 3 \cdot dt, \dots, t_{\max}$, $k=0, dt, 2 \cdot dt, 3 \cdot dt, \dots, k_{\max}$

Формули алгоритмів (6) та (7) дають змогу розробити програмне забезпечення для оцінювання характеристик ДШ з метою виявлення нових в області пульмонології інформативних ознак на основі математичної моделі їх у вигляді періодично корельованої випадкової послідовності із дискретним часом.

У четвертому розділі на основі обґрунтованої математичної моделі дихальний шум опрацьовано сигнал синфазним та компонентним методами. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель ДШ на базі моделі у вигляді періодично корельованої випадкової послідовності.

На основі формул алгоритмів (6) та (7) в середовищі Matlab розроблено програмне забезпечення для числення оцінок кореляційних компонент синфазним та компонентним методами. Результати опрацювання ДШ, відібраних від пацієнтів, що знаходяться в стані медичної норми та патології, наведено на рис. 4 та рис.5.

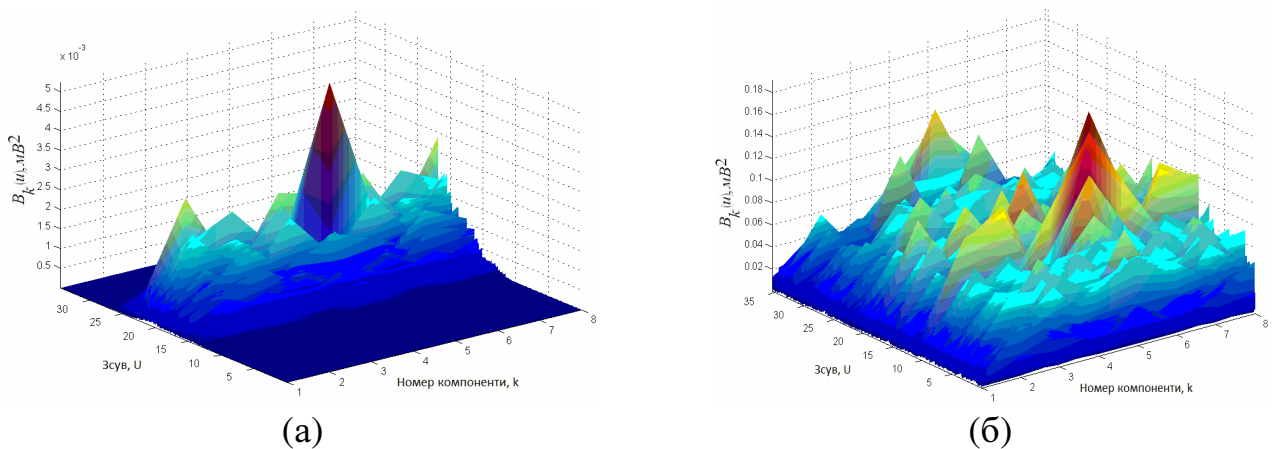


Рис. 4. Оцінки кореляційних компонент реалізацій ДШ, що обчислені синфазним методом: а) – стан норми, б) – стан патології

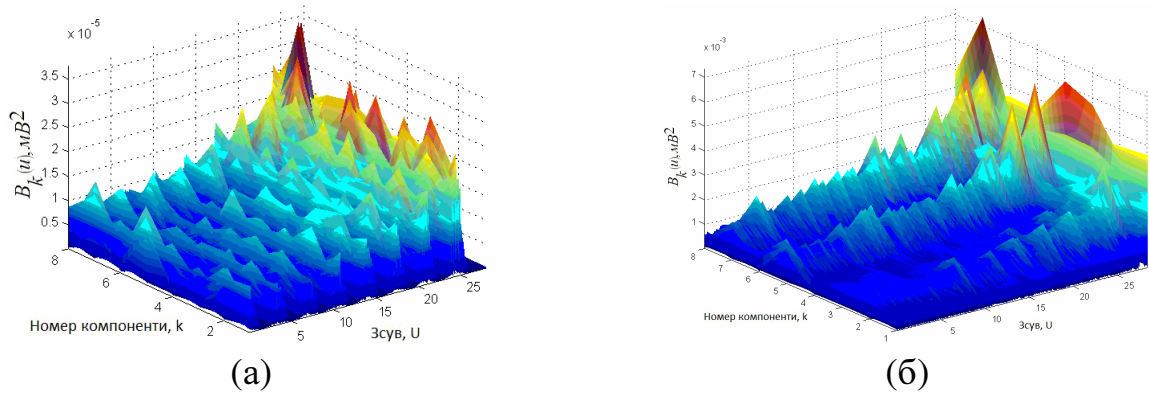


Рис. 5. Оцінки кореляційних компонент реалізацій ДШ, що обчислені компонентним методом: а) – стан норми, б) – стан патології

Одержані оцінки кореляційних компонент кількісно характеризують часово-фазову структуру ДШ.

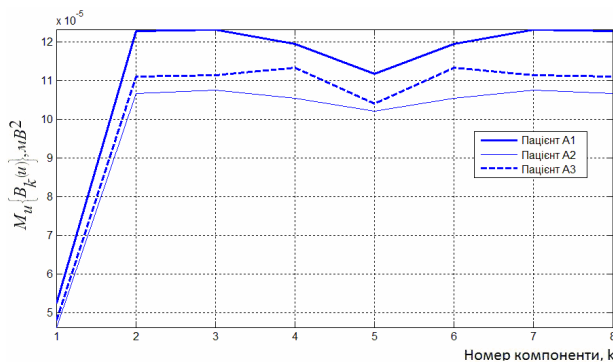
За умови наявності медичної статистики та реалізацій ДШ, відібраних від пацієнтів з окремими типами патології дихальної системи, на графіках, що наведені на рис. 4 та рис. 5, можна було б виділити окремі ділянки, значення кореляційних компонент в межах яких різнились би для стану медичної норми та патології.

Для верифікації математичної моделі необхідно показати можливість розрізнення станів норми та патології дихальної системи за результатами опрацювання ДШ синфазним та компонентним методами. Процедура визначення такого критерію є усереднення за зсувами кореляційних компонент згідно з виразом:

$$M_u \{ \hat{B}_k(u) \} = \frac{1}{N_u} \sum_{u=1}^{N_u} \hat{B}_k(u), \quad u = \overline{1, N_u}, \quad k = \overline{1, N_k}, \quad (8)$$

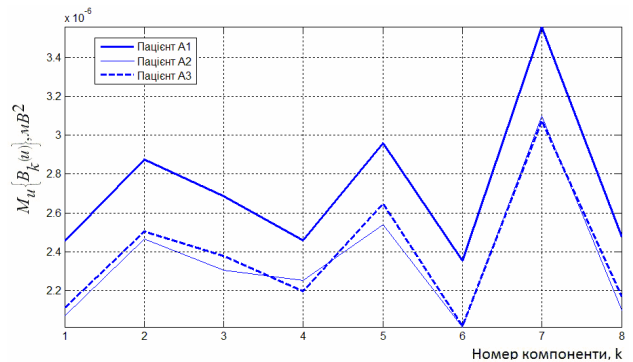
де k – номер кореляційної компоненти ДШ, u – зсув, N_u – довжина зсуву, N_k – кількість компонент.

Результати усереднення кореляційних компонент ДШ для шести реалізацій (норма – 3 пацієнти, патологія – 3 пацієнти), що обчислені за допомогою синфазного та компонентного методів для випадків медичної норми та патології, зображено на рис. 6-7.



Пацієнти А - норма

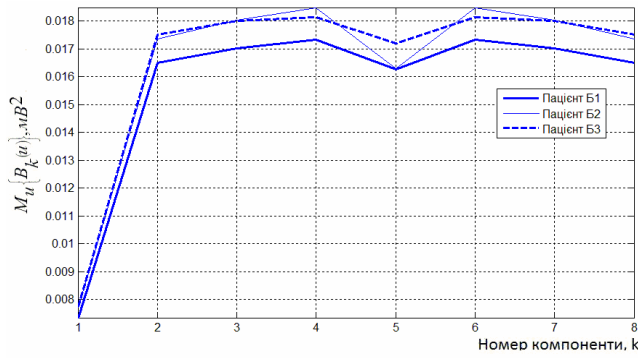
Синфазний метод опрацювання



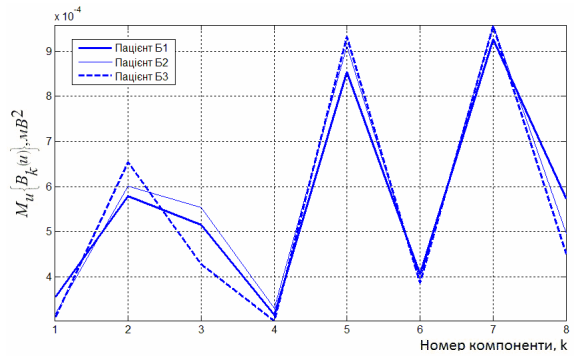
Пацієнти А - норма

Компонентний метод опрацювання

Рис. 6. Усереднені значення кореляційних компонент ДШ (норма) за зсувами



Пацієнти Б -патологія
Синфазний метод опрацювання



Пацієнти Б -патологія
Компонентний метод опрацювання

Рис. 7. Усереднені значення кореляційних компонент ДШ (патологія) за зсувами

Відповідно до рис. 6-7, усереднені значення кореляційних компонент, почислені синфазним та компонентним методами для сигналів ДШ, відібраних від пацієнтів, що знаходяться в стані медичної норми, видно, що вони відрізняються від усереднених значень кореляційних компонент, почислених цими методами для випадку патології. Відповідно, можна зробити висновок, що оцінки усереднених значень кореляційних компонент є чутливими показниками при розрізненні станів дихальної системи (норма чи патологія).

Для точнішого розрізнення станів дихальної системи (норма чи патологія) за кореляційними компонентами використано поріг розрізнення – відстань між двома реалізаціями усереднених кореляційних компонент ДШ в стані норми та невідомого стану. Для стану норми встановлено, що значення порогу для еталонної медичної норми належить області $[3.4268 \cdot 10^{-9}; 4.6139 \cdot 10^{-9}]$ при синфазному та $[0.9325 \cdot 10^{-12}; 1.5680 \cdot 10^{-12}]$ при компонентному методах опрацювання. Обчислені значення порогів дали підстави для твердження про індикативність усереднених кореляційних компонент, як показників функціонального стану дихальної системи людини. У результаті аналізу обчислених значень порогів між еталонною медичною нормою і патологією встановлено, що значення $\{0.0020; 0.0022; 0.0022\}$ (при застосуванні синфазного методу) та значення $\{2.8859 \cdot 10^{-6}; 3.0068 \cdot 10^{-6}; 2.9129 \cdot 10^{-6}\}$ (при застосуванні компонентного методу) не належать області порогів в стані норми. Цей факт дає підстави стверджувати про неналежність пацієнтів в стані патології до стану норми за усередненими кореляційними компонентами.

Враховуючи критерій Неймана-Пірсона та структуру кореляційних компонент ДШ як періодично корельованого випадкового процесу, отримано вираз для обчислення достовірності обчислених оцінок:

$$p_d = 1 - \Phi \left(\frac{\sqrt{D(\xi/H_0)} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m(\xi/H_0) - m(\xi/H_1)}{\sqrt{D(\xi/H_1)}} \right), \quad (9)$$

де $m(\xi/H_0), D(\xi/H_0)$ – математичне сподівання і дисперсія спектральної густини потужності ДШ як стаціонарного випадкового процесу, $m(\xi/H_1) = \frac{1}{N_u N_k} \sum_u \sum_k B_k(u)$

– математичне сподівання та $D(\xi/H_1) = \left(\sum_u^{N_u} \sum_k^{N_k} (B_k(u) - m(\xi/H_1))^2 \right) / ((N_u - 1)(N_k - 1))$ – дисперсія спектральних компонент нестационарного ДШ як ПКВП.

За результати обчислених значень достовірностей p_d кореляційних компонент ДШ при заданій ймовірності помилки $p_f = 0,001$ зпрогнозовано, що оцінки кореляційних компонент ДШ (рис.6-7) є слухними та чутливо-інформативними ознаками, за допомогою яких можна з високою достовірністю (0,973-0,999) оцінити стан дихальної системи людини (норма чи патологія).

Грунтуючись на обґрунтованій математичній моделі ДШ у вигляді періодично корельованого випадкового процесу та аналізі його часової структури, яка зображена на рис. 8,а (сигнал розглядається як амплітудно модульований шум), імітаційну модель побудовано у вигляді виразу:

$$\xi(i\Delta t) = \xi_{\text{обвідна}}(i\Delta t) \cdot n(i\Delta t) \cdot k, \quad i \in \mathbf{R}, \quad (10)$$

де $n(i\Delta t)$ – білий гаусівський шум; k – коефіцієнт нормування по амплітуді; $\xi_{\text{обвідна}}(i\Delta t)$ – обвідна ДШ (рис.8,а):

$$\xi_{\text{обвідна}}(i\Delta t) = \sum_{j=1}^M \chi_{D_j}(n\Delta t) s_j(i\Delta t + kN_T), \quad (11)$$

де $s_j(i\Delta t)$ – j -та хвиля обвідної ДШ (рис.8,б):

$$s_j(i\Delta t) = A_j \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (t + \psi_{T_j}) \cdot f_j) \cdot e^{-t \cdot K_j} \cdot S_j + \psi_{A_j}, \quad i\Delta t \in [0; N_{Tx_j}], \quad j = 1, 2, 3, \dots, M$$

де $\chi_{D_j}(i\Delta t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\Delta t \in D_j \\ 0, & \text{якщо } i\Delta t \notin D_j \end{cases}$ – індикаторна функція; $D_j = [N_{Tx_{j-1}}, N_{Tx_j})$, $Tx_0 = 0$;

j – номер хвилі, $j=1, 2, 3, \dots, M$; Tx_j – період j -ої хвилі; A_j – амплітуда j -ої хвилі; f_j – частоти коливань синусоїд (в даному випадку для півперіоду); K_j – коефіцієнти нахилу j -ої хвилі; S_j – масштабні коефіцієнти для j -ої хвилі; $\psi_{A_j} = \text{rnd}(M\{A_j\}, D\{A_j\})$ і $\psi_{T_j} = \text{rnd}(M\{T_j\}, D\{T_j\})$ – випадкові величини для амплітуд та тривалостей часових j -ої хвилі розподілених за нормальних законом із математичним сподіваннями $M\{A_j\} = M(Tx_j) = 0$ та дисперсіями $D\{A_j\}$, $D(Tx_j)$.

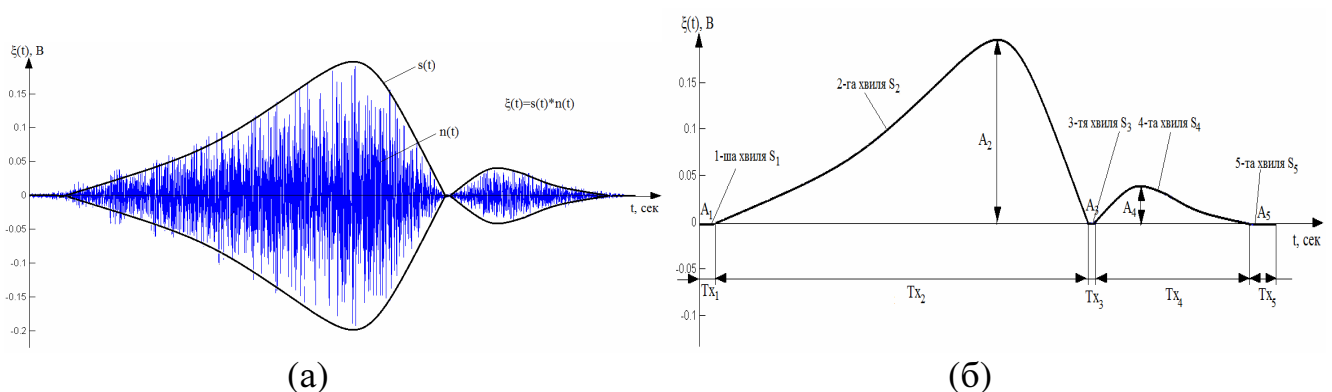


Рис. 8. Реалізація дихального шуму в межах одного періоду (а) та параметри його обвідної (б)

На рис.9 зображено реалізацію зімітованого ДШ у середовищі MATLAB 8.0.

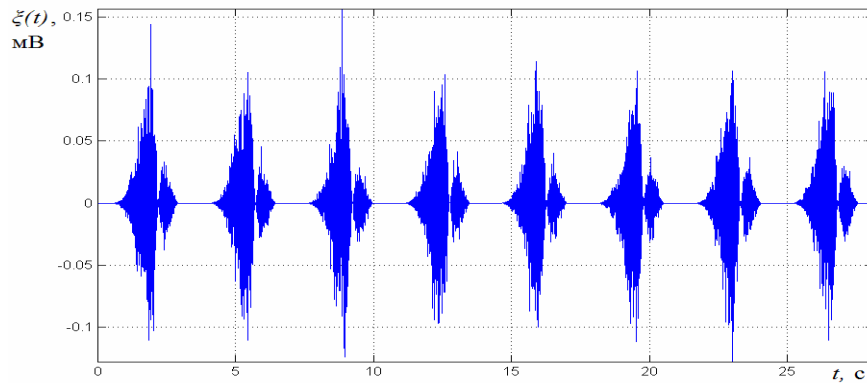


Рис. 9. Реалізація зімітованого ДШ (норма)

Реалізації усереднених оцінок кореляційних компонент зімітованого та експериментальних ДШ (норма) зображено на рис. 10.

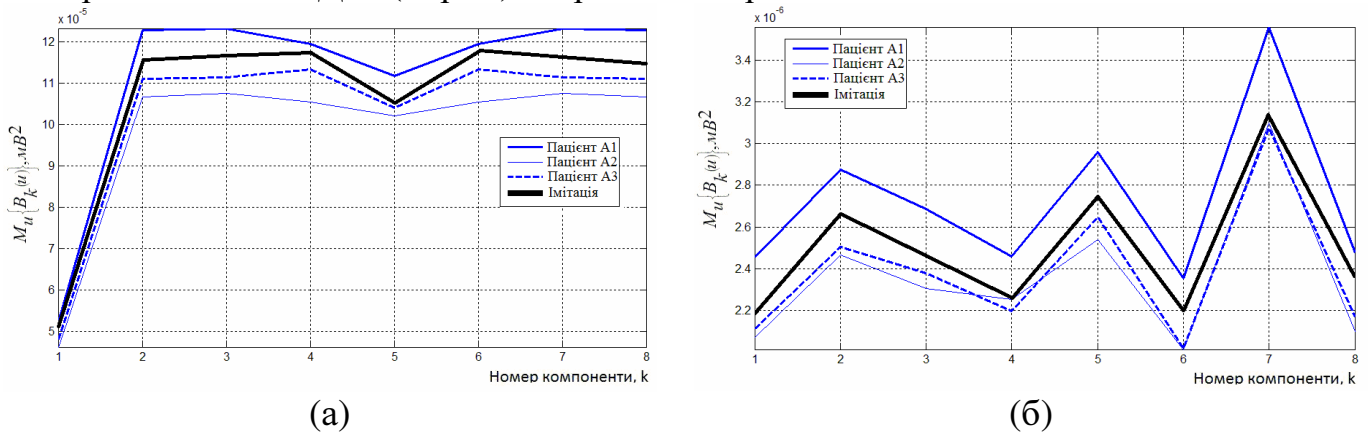


Рис. 10. Усереднені значення кореляційних компонент зімітованого та експериментальних ДШ (норма) одержані на основі: (а) – синфазного методу опрацювання, (б) – компонентного методу опрацювання

Відповідно до рис.10, а-б, значення максимумів амплітуд оцінок усереднених кореляційних компонент зімітованих ДШ локалізуються на тих самих компонентах, що і оцінки, почислені для експериментально відібраних сигналів (рис.6), а максимальне значення відносної похибки достовірностей експериментального і імітованого сигналу для норми становить 0,1%-2,7%, при мінімальній ймовірності помилки $p_f = 0.001$, що свідчить про високу точність імітаційного відтворення експериментального ДШ. Даний факт є підставою для верифікації методу комп'ютерного імітаційного моделювання ДШ.

На основі розробленої математичної моделі та методу аналізу ДШ створено пакет комп'ютерних програм для статистичного опрацювання та імітаційного моделювання ДШ як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих діагностичних аускультативних систем.

У додатках наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows 7), акти впровадження окремих результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі на кафедрі нормальної фізіології Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я.Горбачевського (м.Тернопіль) та в науково-виробничому експериментальному СМП „Медап” (м.Тернопіль).

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу, яка полягає в обґрунтуванні математичної моделі та методів опрацювання дихального шуму для підвищення інформативності аускультативних діагностичних систем. При цьому отримано такі результати:

1. У результаті проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей дихального шуму встановлено, що відомі математичні моделі не враховують у своїй структурі статистичну взаємопов'язаність між різними дихальними актами (циклами) дихального шуму однієї і тієї ж серії спостережень та мають обмежені можливості щодо застосування їх для задач оперативного виявлення змін у функціонуванні респіраторного тракту.

2. Вперше обґрунтовано математичну модель дихального шуму у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка, на відміну від відомих, дає змогу врахувати у своїй структурі періодичність та випадковість дихальних циклів.

3. Удосконалено методи статистичного опрацювання дихального шуму з використанням формалізованої і автоматизованої процедури, які дають змогу оцінити стан дихальної системи, зокрема її стан на ранній стадії захворювання.

4. Установлено, що обчислені значення кореляційних компонент за допомогою синфазного та компонентного методів є характеристиками інформативних ознак дихального шуму із достовірністю їх оцінювання 0,973-0,999 (для нестационарної моделі) та 0,78-0,86 (для стаціонарної моделі) при заданій ймовірності помилки 0.001 та характеризують функціональний стан дихальної системи людини.

5. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель дихального шуму на базі удосконаленої математичної моделі для потреб верифікації і тестування розроблених методів опрацювання дихальних шумів.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Драган Я.П. Обґрунтування математичної моделі дихальних шумів у вигляді періодично корельованого випадкового процесу [Текст] / Я.П. Драган, І.Ю. Дедів // Науковий вісник Чернівецького університету: Збірник наук. праць. Вип. 426: Фізика. Електроніка.: Тематичний випуск "Комп'ютерні системи та компоненти". – Чернівці : Рута, 2008. – С. 93-97.

2. Драган Я. Методи опрацювання фрикативних звуків для діагностики захворювань органів голосового апарату на ранніх стадіях [Текст] / Я. Драган, В. Дозорський, М. Хвостівський І. Дедів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Збірник наук. праць. Вип. 694: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, Львівська політехніка. – 2011. – 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, І.Ю. Дедів, В.Г. Дозорський // Вісник Хмельницького національного університету : Збірник наук. праць. Вип. №3 (177): Технічні науки. – Хмельницький. – 2011. – 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. Дедів І. Комп’ютерне опрацювання дихального шуму синфазним методом для підвищення інформативності аускультативних систем [Текст] / І. Дедів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : НУЛП, 2011. – №744. – С. 77-81.

6. Дедів І. Комп’ютерна імітаційна модель сигналу дихального шуму [Текст] / І. Дедів // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 3. – С. 160–164.

7. Дедів І. Синфазний метод опрацювання сигналу дихальних шумів для ранньої діагностики дихальної системи [Текст] / І. Дедів, В. Колчін // Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. І.Пулюя, 2009. – С. 15.

8. Дедів І. Опрацювання сигналу дихальних шумів компонентним методом [Текст] / І. Дедів, Г. Шадріна // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» присвяченої 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя. – Тернопіль : ТНТУ ім. І.Пулюя, 2010. – С. 430-431.

9. 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, 2011. – С. 24-25.

10. Дедів І.Ю. Застосування енергетичної теорії стохастичних сигналів для задач медичної діагностики [Текст] / Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів, В.Л. Дунець // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Технические науки. – Одесса : Черноморье, 2011. – Т. 3. – С 72-73.

11. Дедів І.Ю. Застосування алгебри алгоритмів для задач оптимізації синфазного методу опрацювання дихальних шумів людини [Текст] / І.Ю. Дедів // XI Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів” : Матеріали конференції. – Кременчук : КрНУ, 2012. – С. 128–129.

12. Дедів І.Ю. Модель сигналу дихального шуму для виявлення порушень стану дихальної системи [Текст] / І.Ю. Дедів, В.Г. Дозорський // Матеріали 17-го міжнародного молодіжного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» : Сб. материалов форума. – Харьков : ХНУРЭ, 2013. – Т.1. – С. 140-141.

13. Дедів І. Обґрунтування моделі дихального шуму для задачі медичної діагностики системи дихання / І.Дедів // Матеріали XV наукової конференції ТНТУ імені Івана Пулюя, 14—15 грудня, 2011. — Тернопіль, 2011. — С. 165.

14. Дедів І.Ю. Комп'ютерне імітаційне моделювання дихального шуму [Текст]/ І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський // X Міжнародна науково-технічна конференція "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів": Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2011. – С. 84–85.

15. Бачинський М.В. Обґрунтування інформативності ознак дихальних шумів для задачі діагностики дихальної системи [Текст] / М.В. Бачинський І.Ю. Дедів, // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011». – Выпуск 4. Том 5. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2011. – Т. 5. – С 83-85.

АНОТАЦІЯ

Дедів І.Ю. Математична модель дихальних шумів для підвищення інформативності аускультативних діагностичних систем. — 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 та методів опрацювання шумів дихання для виявлення функціональних змін діяльності дихальної системи людини в задачах медичної діагностики.

Обґрунтовано нове застосування періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі дихального шуму, яка враховує у своїй структурі поєднання властивостей періодичності із стохастичністю. На базі обґрунтованої моделі розроблено методи дослідження дихальних шумів з використанням формалізованої і автоматизованої процедури, що дало змогу оцінити стан органів дихальної системи на ранніх етапах розвитку їх захворювання. Установлено, що отримані кореляційні компоненти є інформативними ознаками дихального шуму та чутливими до змін у функціональному стані органів дихальної системи людини.

Розроблено метод імітаційного моделювання дихального шуму на основі періодично корельованої випадкової послідовності. Створено пакет комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання дихальних шумів та проведення імітаційних експериментів для автоматизованих аускультативних діагностичних систем.

Ключові слова: дихальний шум, періодично корельований випадковий процес, кореляційні компоненти, верифікація, комп'ютерне імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дедив И.Ю. Математическая модель дыхательных шумов для повышения информативности аускультативных диагностических систем. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные

методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2013 г.

В диссертации решена актуальная научная задача обоснования математической модели и методов обработки дыхательного шума, для выявления функциональных изменений деятельности респираторной системы человека в задачах медицинской диагностики.

Учитывая сложность и механизм формирования дыхательного шума проанализированы его характеристики в рамках детерминированного подхода и из позиций стохастического подхода (методами теории стационарных случайных процессов). Полученные результаты анализа методами гармонического анализа в рамках детерминированного подхода подтверждают, что получены амплитудные спектры дыхательного шума являются переменчивыми, то-есть содержат определенную случайность. Случайная стационарная модель отображает сложность дыхательного шума в спектральном распределении мощности, однако не отображает его фазово-часовой структуры, которая является важным показателем при выявлении часовых изменений в сигнале. Из анализа свойств вероятностных характеристик дыхательного шума и свойств периодически коррелируемых случайных процессов выплывает, 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-часовых отклонений с целью выявления момента проявления ранних изменений в функционировании дыхательной системы. На базе математической модели дыхательного шума в виде периодически коррелируемого случайного процесса разработаны методы исследования дыхательных шумов с использованием формализованной и автоматизированной процедуры, позволяющей оценить состояние органов респираторной системы на ранних этапах развития их заболевания. Установлено, что полученные корреляционные компоненты являются информативными признаками дыхательного шума и чувствительны к изменениям в функциональном состоянии органов респираторной системы человека. Применены методы статистической теории принятия решения для определения достоверности результатов оценивания корреляционных компонент дыхательного шума. В частности для оценивания достоверности корреляционных компонент дыхательного шума использован статистический критерий принятия решения Неймана-Пирсона. Результаты оценивания достоверности подтвердили актуальность использования корреляционных компонент дыхательного шума как информативных признаков, с помощью которых можно с высокой достоверностью (0,973-0,999) оценить состояние дыхательной системы.

Разработан метод имитационного моделирования дыхательного шума на основе периодически коррелированных случайной последовательности. Создан пакет компьютерных программ для автоматизированной обработки дыхательных шумов и проведения имитационных экспериментов для автоматизированных аускультативных диагностических систем.

Ключевые слова: дыхательный шум, периодически коррелированный случайный процесс, корреляционные компоненты, верификация, компьютерное имитационное моделирование.

SUMMARY

Dediv I. Mathematical model of respiratory noise for more informative auscultatory diagnostic systems. – Manuscript.

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

In dissertation the important scientific task of improving the mathematical model of respiratory noise and development the method of analysis of him for the problems of detection of changes in the human respiratory system functions for the tasks of medical diagnostics is solved.

New application of the periodically correlated random process as a mathematical model of respiratory noise is reasonable and depends on its structure combining the properties of periodicity and stochasticity. The methods of analysis of respiratory noise are developed on the basis of reasonable model using formalized and automated procedure. The obtained correlation components are informative signs of respiratory noise and sensitive to changes in the functional state of the respiratory system is established.

The method simulation based on the respiratory noise periodically correlated random sequences. A package of computer programs for automated processing of respiratory sounds and conduct simulation experiments for the automated auscultatory diagnostic systems.

Key words: respiratory noise, periodically correlated random process, correlation components, verification, computer simulation.