

УДК 534.6:7

## ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОННОГО СТЕТОСКОПА ЗМ LITTMANN 3200

В. Н. ОЛІЙНИК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ  
вул. Желябова, 8/4, 03680, МСП, Київ-180, Україна  
E-mail: v\_oliyuk@yahoo.com

Одержано 18.08.2014

Знання істинних робочих параметрів електронних стетоскопів важливе, зокрема, для створення й функціонування перспективних централізованих систем комп'ютерної обробки фонограм звуків серця і дихання, зареєстрованих інструментами різних типів і моделей. Виходячи з цього, було розроблено методику вимірювань і створено експериментальний стенд, за допомогою якого визначено амплітудно-частотну характеристику електронного стетоскопа ЗМ Littmann 3200. Це дозволило оцінити можливості дослідженого зразка стетоскопа в межах тракту прийому аускультативного сигналу, його акустоелектричного й аналого-цифрового перетворень і передачі на комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням. Надійність отриманих даних забезпечується використанням належного експериментального обладнання і відповідністю основних рис амплітудно-частотної характеристики робочим параметрам досліджуваної моделі, задекларованим фірмою розробником. Вказано можливі шляхи вдосконалення використаної методики, що дозволило б перейти до вимірювання акустичних властивостей електронних стетоскопів у строгому значенні цього слова.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** аускультация, електронні стетоскопи, амплітудно-частотна характеристика, вимірювання

Знание истинных рабочих параметров электронных стетоскопов важно, в частности, для создания и функционирования перспективных централизованных систем компьютерной обработки фонограмм звуков сердца и дыхания, зарегистрированных инструментами разных типов и моделей. Исходя из этого, была разработана методика измерений и создан экспериментальный стенд, с помощью которого определена амплитудно-частотная характеристика электронного стетоскопа ЗМ Littmann 3200. Это позволило оценить возможности исследованного образца в рамках тракта приема аускультативного сигнала, его акустоэлектрического и аналого-цифрового преобразования и передачи на компьютер с соответствующим программным обеспечением. Надежность полученных данных обеспечивается использованием надлежащего экспериментального оборудования и соответствием основных черт амплитудно-частотной характеристики рабочим параметрам модели, задекларированных фирмой разработчиком. Указаны возможные пути улучшения использованной методики, что позволило бы перейти к измерению акустических свойств электронных стетоскопов в строгом смысле этого слова.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** аускультация, электронные стетоскопы, амплитудно-частотная характеристика, измерения

Knowledge of true working parameters is important, in particular, for creating and functioning of advanced centralized systems for computer processing of cardiac and respiratory phonograms recorded by devices of different types and models. So, the measurement technique and experimental setup were developed for determining of amplitude-frequency response of ЗМ Littmann 3200 electronic stethoscope. The obtained results allowed the evaluation of performance of examined specimen of electronic stethoscope within the tract of auscultation signal receiving, acoustoelectric and analog-to-digit conversion and transfer to a computer with the installed special software. Reliability of the obtained data is provided by use of proper experimental equipment and correspondence of main features of the amplitude-frequency response to operating parameters of the model declared by its developer. The possible ways for improving of used methodology are directed, which would move to measuring of the acoustic properties of electronic stethoscope in the strict sense of the word.

**KEY WORDS:** auscultation, electronic stethoscopes, amplitude-frequency response, measurements

### ВСТУП

Винайдений у 1816 р. славетним клініцистом і дослідником Рене Лаеннеком [1] інструмент для вислуховування звуків життєдіяльності – стетоскоп – пройшов довгий шлях еволюції, набувши врешті сучасного вигляду й функціональності [2]. З того часу і ось уже майже двісті років інструментальна аускультация залишається одною з найпоширеніших діагностичних методик. Тому закономірним етапом її розвитку стали спроби створення

електроакустичних, а згодом і електронних стетоскопів. Історичний екскурс на цю тему становить самостійний інтерес і далеко виходить за рамки даної статті. Тому відзначимо лише, що піонерські зразки електроакустичних стетоскопів під назвами “стетофон” [3] і “магноскоп” [4] були запропоновані практично одночасно у 1920-х рр. Довгий час область застосування таких пристроїв обмежувалася виключно дослідницькими проектами, а інтерес практикуючих лікарів до них був дуже низьким. Це пояснювалось як технічними недолі-

ками, так і традиційною консервативністю медичної спільноти. Перша ж комерційна модель електронного стетоскопа Pentax ST-1A з'явилась лише у 1977 р. [2].

Протягом останніх років спостерігається по-жвавлення цікавості медиків до нових типів інструментів для аускультативної й респіраторної систем. На ринок медичного обладнання вийшли виробники електронних стетоскопів різних моделей, чутливість, роздільна здатність і шумозахищеність яких, судячи з рекламних повідомлень, суттєво переважають характеристики механічних аналогів [5–9, 13]. Окрім того, електронні стетоскопи забезпечують можливість підсилення слабкого сигналу і частотну фільтрацію в бажаному діапазоні. Так, спеціальними дослідженнями підтверджено більш високу ефективність застосування таких інструментів в умовах погіршеної шумової обстановки, зокрема, під час транспортування пацієнтів літаком [10].

Однак найпрогресивніша риса електронних стетоскопів полягає у їхній здатності передавати сигнал, перетворений в електричну форму, на зовнішні (зазвичай, цифрові) пристрої. Таким чином можна забезпечити зберігання фонограм, їхнє апостеріорне прослуховування, спектрально-часову обробку і передачу через сучасні комунікаційні мережі. Це виводить інструментальну аускультативну в розряд не лише об'єктивних, але й телемедичних діагностичних методик [11, 12]. У зв'язку з цим велика увага приділяється, зокрема, розробці портативних пристроїв, у яких би електронні стетоскопи поєднувалися зі смартфонами, нетбуками чи планшетними комп'ютерами, оснащеними відповідним програмним забезпеченням [12–14]. Такі можливості вже передбачено у деяких серійних моделях електронних стетоскопів [5, 6]. В окремих випадках з використанням хмарних комп'ютерних технологій навіть реалізовано можливість оперативного обміну, телемедичного навчання й консиліумів за участю діагностів – користувачів спеціалізованого програмного забезпечення 3M Littmann StethAssist [15].

На порядок денний виходить ще більш амбіційне завдання побудови інтегрованих систем реєстрації й аналізу аускультативних фонограм від багатьох стетоскопів, які через комунікаційні мережі (зокрема, Інтернет) зв'язані з потужним сервером, що здійснює централізовану обробку одержаних даних. Однак при спільному застосуванні індивідуальних інструментів різних типів неодмінно виникає проблема спряження, уніфікації й урахування відмінностей їхніх робочих параметрів (насамперед, частотних відгуків). Так, добре ві-

домо, що передаточні функції механічних стетоскопів різних моделей не стандартизовані й суттєво відрізняються [16–18]. Очевидно, аналогічних проблем можна очікувати й від електронних стетоскопів. Слід зазначити, що їхні виробники не надають повних даних про акустичні характеристики своїх продуктів. У кращому разі повідомляється про діапазон робочих частот і типові значення електронного підсилення сигналу.

Виходячи з цього, основна мета цієї роботи полягала в експериментальному визначенні амплітудно-частотної характеристики електронного стетоскопа популярної моделі 3M Littmann 3200 в його робочому діапазоні частот. По суті, шукана характеристика відповідає передаточній функції каналу прийому сигналу, його акустоелектричного і аналого-цифрового перетворень з подальшою частотною фільтрацією аудіозапису і його збереженням на комп'ютері, оснащеному спеціалізованим програмним забезпеченням.

Перше коротке повідомлення про результати даного дослідження було зроблене у доповіді [19]. Стаття, яка пропонується увазі читача, містить детальний опис методики проведення експериментів і розширений аналіз отриманих результатів.

## 1. ОПИС ЕЛЕКТРОННОГО СТЕТОСКОПА 3M LITTMANN 3200

Електронний стетоскоп 3M Littmann 3200 позиціонується виробником як пристрій для аускультативної, який забезпечує ефективне застосування при максимальній простоті користування [5]. Загальний його вигляд мало відрізняється від вигляду типового механічного стетоскопа/фонендоскопа з односторонньою приймальною голівкою (рис. 1).

Висока якість відтворення звуку досягається за рахунок розміщення у звукоприймальній голівці чутливого сенсора (ймовірно, мікрофонного типу), закритого силіконовою діафрагмою з поліуретановим захисним шаром. Діаметр діафрагми становить 2 дюйми (близько 5.1 см). У стетоскопі застосовано оригінальну систему зменшення зовнішніх шумів, подробиці якої не розкриваються. Попереднє тестування підтвердило низьку чутливість моделі 3M Littmann 3200 до зовнішніх шумів і вібрацій. Так, на відстані порядку трьох-чотирьох діаметрів діафрагми він практично не відчував навіть досить інтенсивних зовнішніх звуків (наприклад, розмови звичайним голосом чи роботи побутової техніки). Можна припустити, що значну роль у заглушенні акустичних завад, які передаються через повітряне середовище, відіграє масивний металевий корпус приймальної голівки, а



Рис. 1. Зовнішній вигляд стетоскопів 3M Littmann Master Cardiology (механічний, зліва) і 3M Littmann 3200 (електронний, справа)

зниженню передачі вібрацій сприяє високий клас обробки її поверхонь (полірування).

Зі зворотнього боку голівки, зверненого до діагносту, знаходяться рідкокристалічне табло і п'ятикнопова панель керування. Живлення здійснюється від одної 1.5 В батареї або акумулятора типу AA.

Повний опис функціональних можливостей стетоскопа 3M Littmann 3200 можна знайти у його штатній документації [5]. Тому надалі акцент робитимемо насамперед на параметрах, які визначають акустичні особливості досліджуваного інструмента.

У стетоскопі реалізовано цифрові частотні фільтри, перемикання яких уможливорює слухову диференціацію різних акустичних феноменів. Згідно з технічним описом, модель 3M Littmann 3200 пристосована до аускультативної звукув життєдіяльності у трьох режимах:

- “дзвін” (bell) – повний робочий діапазон (20...1000) Гц, але з переважним підсиленням у смузі (20...200) Гц – для зручності вислуховування звуків роботи серця;
- “діафрагма” (diaphragm) – повний робочий діапазон (20...2000) Гц, але з переважним підсиленням у смузі (100...500) Гц – для зручності вислуховування звуків дихання;
- “розширений” (extended) – повний робочий діапазон (20...2000) Гц з підсиленням у смузі (50...500) Гц, але нижчим, ніж у режимі “діафрагма”.

Ймовірно, що штучне підняття характеристики на середніх аудіочастотах здійснювалося для компенсації зниженої чутливості людського вуха у цій

смузі (відомості про криві рівної гучності див., наприклад, у [20]).

Для забезпечення аускультативної ослаблених звуків, які не сприймаються за допомогою традиційних фонендоскопів, передбачене дев'ятиступінчасте підсилення загального рівня сигналу до 24 разів (80 дБ) – 8 градацій з рівномірним кроком по 10 дБ. Усі електронні компоненти інтегровані до приймальної голівки.

Стетоскоп 3M Littmann 3200 здатний передавати аускультативні фонограми на персональний комп'ютер через радіоканал Bluetooth. Прийомопередавач відповідного стандарту також вмонтовано у голівку інструмента. Парний йому прийомопередавач може входити до стандартних портів комп'ютера чи підключатися через інтерфейс USB – відповідний адаптер входить до комплексу поставки стетоскопа. Можливе Bluetooth гаджетів бюджетного цінового рівня від сторонніх виробників.

При спільній роботі стетоскопа 3M Littmann 3200 з комп'ютером вони синхронізуються через радіоканал. При цьому використовується спеціалізоване програмне забезпечення 3M Littmann StethAssist [15], яке дозволяє зберігати результати аускультативного обстеження у вигляді бази даних, яка містить короткі відомості про пацієнта, положення точок аускультативної і до десяти аудіозаписів тривалістю до 1 хвилини кожен. За необхідності, передбачено можливість вставки додаткових текстових чи звукових коментарів. Окрім того, авторизовані користувачі можуть здійснювати обмін клінічними даними через систему TeleSteth за допомогою Інтернет.

Досліджувана модель стетоскопа також дозволяє робити аудіозапис до 12 доріжок тривалістю до 30 секунд кожна у автономному режимі з подальшою можливістю передачі на комп'ютер через порт Bluetooth. Однак, як показала практика, ця опція менш зручна і потребує досить тривалого тренування для набуття відповідних навичок.

В усіх випадках режим запису, які і інші функції, вмикається з контрольної панелі стетоскопа. Безпосередньо перед початком запису інструмент видає попереджувальний сигнал, який дозволяє мобілізувати увагу оператора. Отриманий акустичний сигнал стетоскоп трансформує в електричну форму, а далі – здійснює його аналого-цифрове перетворення з частотою дискретизації 4 кГц, достатньою для відтворення усього діапазону, в якому зосереджена переважна частина енергії звуків серця і дихання [21].

Під час безпосередньої роботи з електронним стетоскопом 3M Littmann 3200 були виявлені осо-

бливості, які важливо враховувати при інтеграції таких інструментів у системи отримання й обробки аускультативної інформації.

- Виявилось, що запис звуків життєдіяльності завжди відбувається у розширеній робочій смузі, а частотна фільтрація аудіоданих здійснюється вже на етапі прослуховування в реальному часі або відтворення фонограми.
- Опція підсилення рівня сигналу також не пов'язана з етапом його запису, а застосовується лише у тракті прослуховування. Тому при будь-якому значенні підсилення отримуємо фонограму з одним і тим же рівнем.

## 2. СХЕМА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ І СТРУКТУРА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ

За означенням амплітудно-частотна характеристика тракту прийому акустичного сигналу розглядається як частотний спектр амплітуди його відгуку на збудження зі спектральними складовими, рівномірно розподіленими по всьому діапазону частот. Загальновідомі приклади таких сигналів – білий шум або зосереджений (миттєвий) імпульс. Виходячи з цього, в основу розробленої експериментальної методики було покладено загальну ідею про забезпечення подачі на вхід приймального елемента стетоскопа збудження з якомога рівномірнішим спектром амплітуд у робочій смузі частот. У цьому разі результуючий спектр відгуку стетоскопа має відповідати його істинній амплітудно-частотній характеристиці (передаточній функції). З практичної точки зору, найзручніше оперувати вихідним сигналом, близьким до білого шуму, оскільки його генерація не викликає особливих проблем і дозволяє робити запис довільної тривалості. Як альтернативу можна застосувати свіп-сигнал зі сталою амплітудою й лінійно змінною частотою.

Тому, за нашим задумом, на вихідному етапі експерименту, який передуватиме вимірюванню амплітудно-частотного відгуку стетоскопа, на вхід звуковідтворюючих динаміків (колонок) подається згенерований білий шум. Зрозуміло, що у системі вихід генератора – динамік цей сигнал спотворюється, набуваючи спектрального забарвлення відповідно до її передаточної функції. Зареєструвавши сигнал з виходу динаміка за допомогою каліброваного мікрофона з відомою частотною характеристикою отримуємо передаточну функцію тракту генерації сигналу. За формою останньої можна знайти коригуючу функцію, модуляція спе-

ктру якою компенсує спотворення таким чином, щоб отримати на виході динаміка сигнал, максимально близький до білого шуму в робочій частотній смузі (рис. 2, а).

Другий етап передбачає верифікацію скоригованого тракту генерації. Для цього на вхід динаміка подається “скомпенсований” сигнал, який реєструється каліброваним мікрофоном. Таким чином можна упевнитись у рівномірності розподілу амплітуд випромінюваних частотних складових і, при необхідності, провести додаткову корекцію (рис. 2, б).

На третьому етапі у точці прийому замість мікрофона розташовується електронний стетоскоп, акустичні параметри якого є предметом досліджень. Спектр отриманого відгуку на “скомпенсований” сигнал відповідає амплітудно-частотній характеристиці стетоскопа в його робочому діапазоні (рис. 2, в).

На всіх етапах сигнали від мікрофона і стетоскопа фіксуються на комп'ютері. Деталі аналізу й обробки отриманих аудіозаписів будуть подані нижче.

Для того, щоб реалізувати цю схему, було створено експериментальний стенд (рис. 2), до складу якого увійшли:

- генератор сигналу на базі персонального комп'ютера, оснащеного звуковою картою і відповідним програмним забезпеченням;
- вихідний динамік – комп'ютерні колонки, сумісні з виходом звукової карти;
- приймальний сенсор:
  - на стадіях визначення й верифікації коригуючої функції для тракту генерації сигналу – мікрофон;
  - на стадії вимірювання амплітудно-частотної характеристики – електронний стетоскоп 3M Littmann 3200;
- пристрій для документування і обробки сигналу на базі персонального комп'ютера, оснащеного звуковою картою з мікрофонним входом, портом бездротового зв'язку Bluetooth (для спряження з електронним стетоскопом) і відповідним програмним забезпеченням.

## 3. ОБЛАДНАННЯ І УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Спершу, розглянемо характеристики обладнання, використаного в експериментальному стенді.

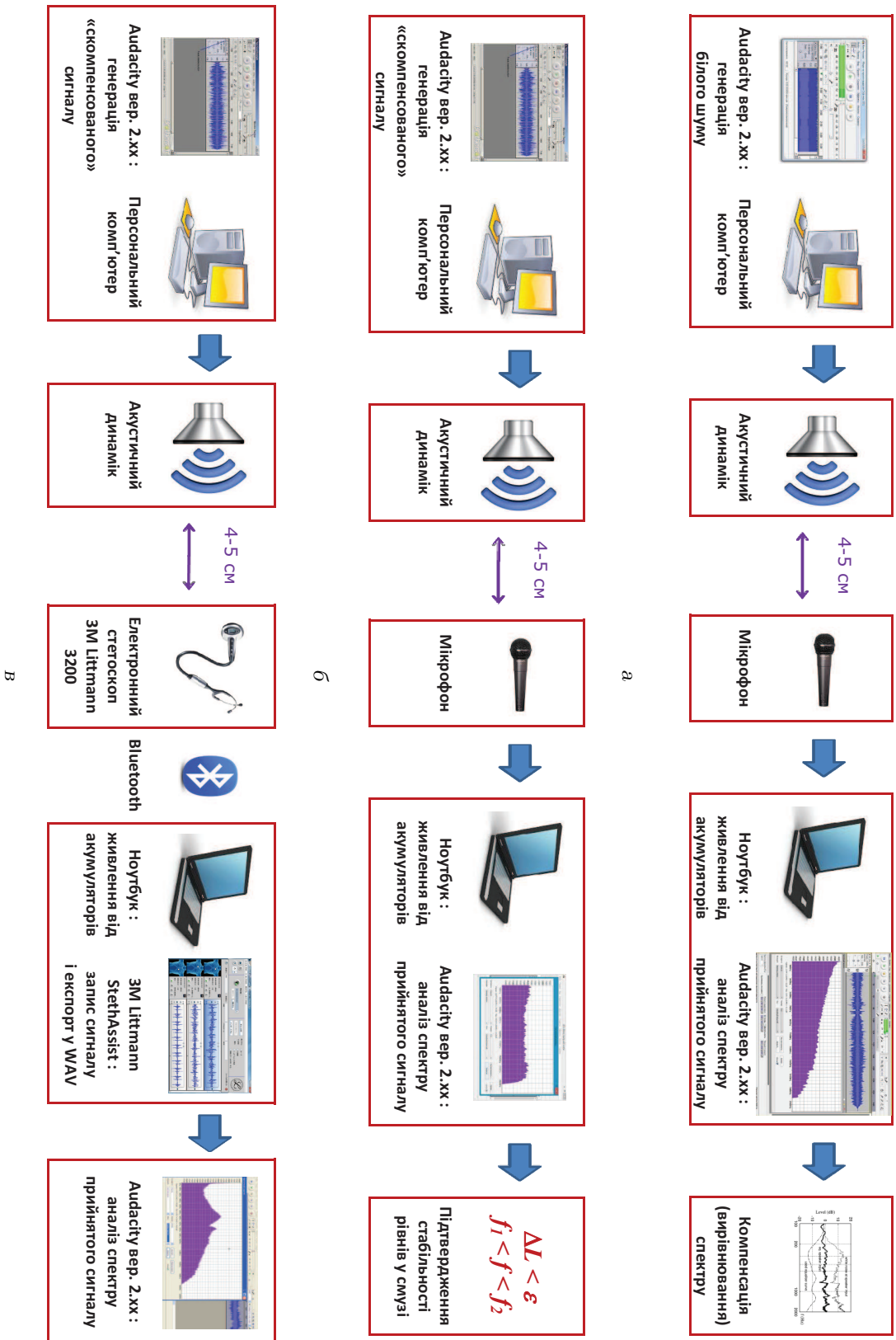


Рис. 2. Схеми експериментального стенду і етапи проведення вимірювань:

а – генерація білого шуму і визначення необхідної корекції спектру сигналу;

б – перевірка «скомпенсованого» сигналу на відповідність білому шуму;

в – зняття амплітудно-частотної характеристики електронного стетоскопа

Генератор сигналу був представлений персональним комп'ютером, оснащеним звуковою картою Realtek ALC1200, інтегрованою у материнську плату ASUS P5QL Pro (робочий діапазон (40...15000) Гц, нерівномірність характеристики не гірша за  $\pm 0.04$  дБ, рівень шуму  $-91.3$  дБА, динамічний діапазон  $91.4$  дБА, гармонічні спотворення  $0.0033$  %, інтермодуляційні спотворення плюс шум  $0.0095$  %).

На комп'ютері було встановлено аудіоредактор Audacity версії 2.03 під керуванням ОС Windows XP Professional SP3, який забезпечував генерацію сигналу у вигляді білого шуму довільної тривалості з заданим значенням частоти дискретизації від  $4$  до  $96$  кГц.

У ролі вихідного динаміка використовувались компактні комп'ютерні колонки Logitech Z320 (рис. 3), які розвивають вихідну акустичну потужність до  $10$  Вт і мають робочий діапазон частот ( $70$ ... $20000$ ) Гц [22]. Для запобігання паразитній взаємодії між вихідними каналами стереофонічного виходу системи при відтворенні сигналу вхід правого каналу вимикався програмним чином (через опції аудіоредактора). Конструктивна особливість колонок Z320 – наявність у кожній з них двох однотипних динаміків, фронтального і тильного, що має забезпечити рівномірне звучання в аудиторії. Тому для зменшення взаємодії між динаміками тильний закривали шаром вати.

З огляду на особливості шумозахисної системи електронного стетоскопа 3M Littmann 3200, було прийняте рішення про доцільність зняття його частотної характеристики у ближньому полі джерела. Тому під час експериментів і чутливий елемент мікрофона, і діафрагма стетоскопа розміщувались прямо навпроти працюючого динаміка на відстанях до  $5$  см від нього.

Одною з серйозних проблем, яка виникла під час підготовки й проведення експериментальних досліджень, став брак повірених вимірювальних мікрофонів з паспортизованими частотними характеристиками. Також не було відомостей про істинні параметри використаних неспеціалізованих звукових карт. Виходячи з цього, отримані в ході експериментів дані слід вважати не результатами вимірювань у строгому значенні цього слова, а лише оцінками шуканих характеристик. Для того, щоб підвищити надійність результатів, доцільно було передбачити використання у складі стенду мікрофонів різних типів. Вважалося, що близькість оцінок, отриманих за допомогою цих мікрофонів, свідчатиме про їхню достовірність.

Насамперед, було використано серійний мультимедійний мікрофон SVEN MK-100 [23] з номіналь-

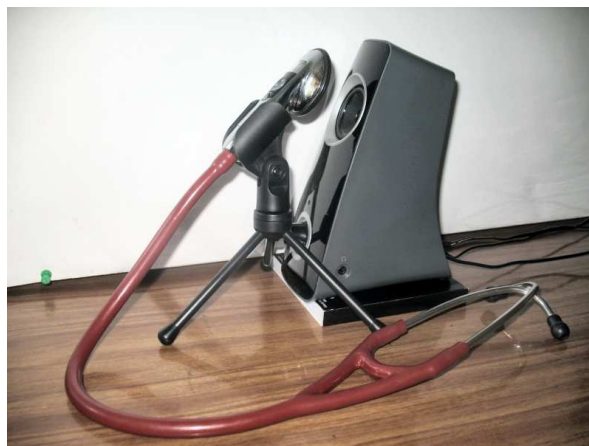


Рис. 3. Активна акустична колонка з комплекту Logitech Z320 при роботі на вхід електронного стетоскопа 3M Littmann 3200

ним робочим діапазоном ( $30$ ... $16000$ ) Гц і чутливістю  $-58$  дБ при нерівномірності характеристики до  $\pm 2$  дБ. Завдяки низьким масогабаритним параметрам і вдалій конструкції кріплення, призначеного для фіксації мікрофона на одязі, він виявився зручним для реєстрації сигналу у ближньому полі.

Спроби залучити до експериментів комп'ютерний мікрофон SVEN MK-630 з близькими до МК-100 робочими параметрами завершилися невдало. Основною причиною цього стали його конструктивні особливості: об'ємна сферична захисна сітка навколо чутливого елемента утруднювала його точне позиціонування на заданій відстані навпроти динаміка, що зробило надійну реєстрацію сигналу на дистанціях, менших за  $\sim 10$  см, практично неможливою. Зауважимо, що вже при віддаленні на ( $50$ ... $70$ ) см від джерела звуку обидва мікрофони показували практично однакові результати.

Для забезпечення максимально незалежної альтернативної оцінки спотворень, внесених у сигнал трактом випромінювання, використовувався вимірювальний мікрофон Behringer ECM8000 [24] з робочим частотним діапазоном ( $15$ ... $20000$ ) Гц, чутливістю  $-60$  дБ та ідеально рівною частотною характеристикою (за інформацією виробника). Вивчення графіків реальних характеристик окремих зразків мікрофонів цього типу, отриманих у приватному порядку, дозволило дійти висновку про ймовірний порядок нерівномірності до  $\pm 1$  дБ у діапазоні ( $100$ ... $2000$ ) Гц.

Behringer ECM8000, як і всі вимірювальні мікрофони конденсаторного типу, потребує для роботи попереднього підсилювача, який би забезпечував подачу фантомного живлення. З цією метою в ек-



Рис. 4. На передньому плані – мікрофони Behringer ECM8000 з адаптером Shure X2U (зліва) і SVEN MK-100 (справа), підключені до нетбука ACER ASPIRE ONE

периментах він спрягався зі студійним XLR/USB-адаптером – підсилювачем-конвертором Shure X2U [25] (робочий діапазон (20...20000) Гц, нерівномірність до  $\pm 1$  дБ, динамічний діапазон підсилення 40 дБ, рівень цифрового шуму не гірше –78 дБА). Важлива особливість Shure X2U – внутрішня аналого-цифрова конверсія прийнятого сигналу з частотами дискретизації до 48 кГц і виведення його на порт USB. Таким чином, з точки зору комп'ютера тандем ECM8000/X2U працює в обхід його звукової карти як висококласний зовнішній USB мікрофон. Це дозволяє значно знизити рівень власних шумів і нелінійних спотворень у тракці прийому сигналу.

Для запису прийнятих від мікрофона чи електронного стетоскопа аудіосигналів використовувався портативний комп'ютер – нетбук серії ACER ASPIRE ONE зі звуковою картою Realtek ALC662 у складі материнської плати I945GSE (робочий діапазон (40...15000) Гц, нерівномірність характеристики не гірша за  $\pm 0.16$  дБ, рівень шуму –89.1 дБА, динамічний діапазон 89.2 дБА, гармонічні спотворення 0.0062 %, інгермодуляційні спотворення плюс шум 0.011 %). Для роботи з електронним стетоскопом через порт USB підключався зовнішній адаптер Bluetooth.

На нетбуку було встановлено аудіоредактор

Audacity версії 2.02 для роботи з мікрофоном і спеціалізоване програмне забезпечення 3M Littmann StethAssist для спряження з електронним стетоскопом 3M Littmann 3200 (усе – під керуванням ОС Windows XP Home SP3).

Підготовчі тести показали, що при живленні тракту прийому сигналу від електричної мережі 220 В у власних шумах апаратури домінують гармоніки, кратні частоті 50 Гц – вони яскраво виражені на тлі рівномірно спадаючого з частотою спектра. Для зниження їхніх рівнів під час запису сигналу з мікрофона нетбук-реєстратор працював від батареї. Це дозволило знизити рівень мережевої наводки практично на 20 дБ.

Записи здійснювались у незаглушеній кімнаті з розмірами 5.6 м  $\times$  2.9 м  $\times$  2.9 м (довжина – ширина – висота). Її несучі стінки й перекриття виконані з бетону, а перегородки – з силікатних блоків (зсередини усе вкрите штукатуркою). Частина приміщення зайнято офісними меблями з жорсткими поверхнями (книжкові шафи, столи). Одну з коротших стінок займає вікно на повну ширину і більш, ніж половину висоти кімнати (підвіконня з додатковим виступом на 25 см по довжині кімнати). Вікно виходить на вулицю з низькою інтенсивністю автомобільного руху. Будівлю обладнано ліфтом.

Стандартна тривалість фонограми, яка підлягала аналізу, була визначена як 20 секунд. Для того, щоб зменшити вплив зовнішніх чинників, реєстрація сигналу під час кожного з вимірювань здійснювалась протягом кількох хвилин. При цьому на динамік подавався заздалегідь згенерований білий шум з частотою дискретизації 8 кГц. При роботі з електронним стетоскопом 3M Littmann 3200 максимальна тривалість запису програмно обмежувалась однією хвилиною. Далі з отриманих звукових файлів вибирались інтервали, на яких не було явно виражених шумів руху вуличного транспорту, звуків роботи ліфта, кроків у коридорі й грюкання дверима. Окрім того, для зменшення відбиття звуку від огорожувальних конструкцій і меблів у приміщенні розміщувались важкі портьери, м'які поролонові блоки з нерегулярним характером поверхні, тощо.

#### 4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Розглянемо частотні спектри отриманих за описаною вище методикою фонограм, побудовані в аудіоредакторі Audacity 2.03. При цьому для забезпечення промальовування найдрібніших деталей застосовувалось вікно Ханнінга з максимальною доступною шириною – 16384 відліки. Кожна кри-

ва на графіках відповідає усередненню по трьох – п'яти однотипних вимірюваннях, розкид результатів між якими не перевищував  $\pm 0.5$  дБ у смузі (100...4000) Гц. При частотах нижче 100 Гц стабільність результатів різко погіршувалась. Це пояснюється, з одного боку, обмеженим діапазоном відтворення колонок, а з другого – акустичними властивостями порівняно невеликого приміщення, в якому не можна ефективно випромінювати низькі аудіочастоти.

Щоб забезпечити максимальну амплітуду сигналу, рівень гучності на виході колонок і підсилення приймального тракту регулювались для кожного з мікрофонів і стетоскопа індивідуально. Оскільки вони не підлягали співставленню, проведені експерименти не дають інформації про абсолютну чутливість досліджуваного інструмента.

На рис. 5 показано спектри відгуків приймальних трактів, які включають у себе мікрофони ECM8000/X2U або МК-100, при подачі на вхід динаміка білого шуму. Між мікрофоном і динаміком було встановлено дистанцію 4 см, що забезпечувало достатній вихідний рівень для чутливого елемента електронного стетоскопа 3М Littmann 3200. Оскільки неідеальністю характеристик задіяних звукових карт можна знехтувати, а для мікрофонів верхня межа нерівномірностей у діапазоні вимірювань становить порядку  $\pm 2$  дБ, то можна стверджувати, що спектральні криві з практичної точки зору дають оцінки власних частотних спотворень, внесених у ближнє поле випромінювання сигналу колонкою Z320 і акустичними особливостями приміщення. З графіка видно, що у смузі (150...1500) Гц частотні відгуки мікрофонів МК-100 і ECM8000 мало відрізняються. Це свідчить про достатню надійність отриманих результатів. При цьому рівні прийнятих мікрофоном МК-100 сигналів у смузі (150...200) Гц перевищують рівні власних шумів на (6...16) дБ, а у смузі (200...2000) Гц – на 20 дБ і більше. Зауважимо, що рівень шумів мікрофона ECM8000/X2U в середньому на 24 дБ нижчий, ніж для МК-100, за виключенням окремих гармонічних складових, які відповідають наводкам від електромережі.

На базі результатів вимірювань за допомогою різних мікрофонів було сформовано два варіанти згладженої коригуючої функції, якою за допомогою програмного еквайзера Audacity модулювався частотний спектр сигналу на виході звукової карти. Це дозволило отримати в точці реєстрації “скомпенсований” сигнал зі спектром, близьким до рівномірного (рис. 6). Усі рівні на графіку приведені до  $-1.5$  дБ на частоті 140 Гц.

Звичайно, нерівномірність результуючих спе-

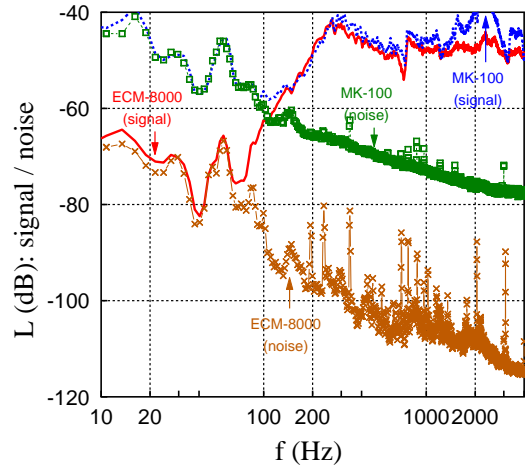


Рис. 5. Спектри відгуку мікрофонів при подачі білого шуму на динамік Z320 (дистанція 4 см):

неперервна – ECM8000;  $\times$  – ECM8000 (власні шуми); штрихова – МК-100;  $\square$  – МК-100 (власні шуми)

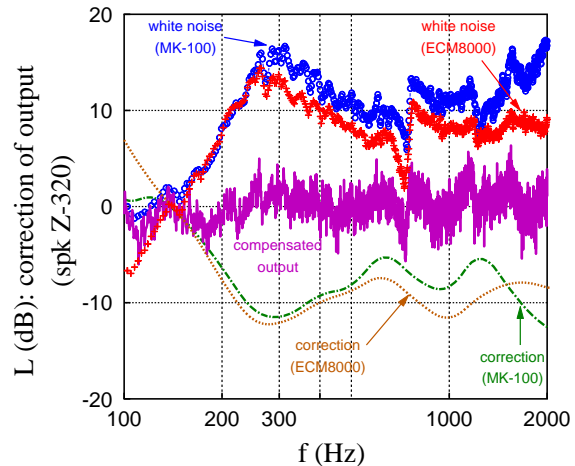


Рис. 6. Коригуючі спектральні функції і типовий спектр відгуку мікрофона при подачі “скомпенсованого” сигналу на динамік Z320:

$+$  – ECM8000 (білий шум);  $\circ$  – МК-100 (білий шум); штрихова – коригуюча функція (за даними ECM8000); штрих-пунктирна – коригуюча функція (за даними МК-100); неперервна – “скомпенсований” сигнал

ктральних рівнів у межах  $\pm 4$  дБ відрізняє новий сигнал від “істинного” білого шуму. Така неідеальність пояснюється, зокрема, труднощами ручного настроювання еквайзера. Втім, навіть цього виявилось достатньо для того, щоб оцінити частотну характеристику досліджуваного електронного стетоскопа.

Такий висновок можна зробити, проаналізувавши усереднені результати тестових серій при верифікації тракту обома мікрофонами (рис. 7). Із гра-



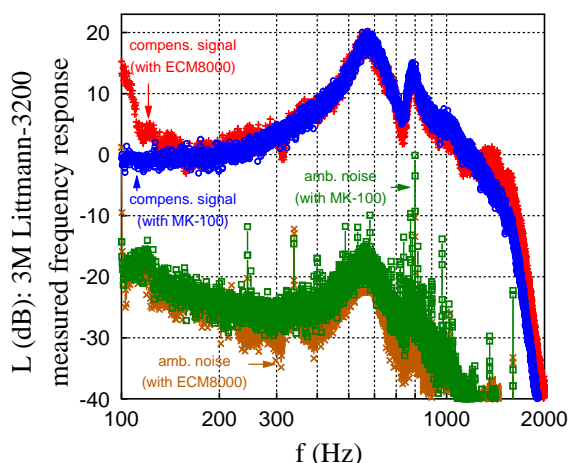


Рис. 7. Спектри відгуку електронного стетоскопа 3M Littmann 3200 при подачі “скомпенсованого” сигналу на динамік Z320 (дистанція 4 см):

- + – при корекції за допомогою ECM8000;
- o – при корекції за допомогою МК-100;
- x – власні шуми стетоскопа (експеримент з ECM8000);
- – власні шуми стетоскопа (експеримент з МК-100)

фіка видно, що в діапазоні (150...2000) Гц відгуки стетоскопа 3M Littmann 3200, отримані у “розширеному” режимі, не мають значущих відмінностей. Підйом низькочастотних (нижче 150 Гц) рівнів для серії експериментів з мікрофоном ECM8000 слід віднести до помилок, допущених при її проведенні.

На цьому ж графіку показані рівні власних шумів електронного стетоскопа, зареєстровані у двох незалежних експериментальних серіях. Очевидно, що при частотах (150...1500) Гц рівень сигналу на (20...30) дБ перевищував рівень шумів.

Проведемо короткий опис отриманої амплітудно-частотної характеристики стетоскопа. Так, на ній спостерігається низькодобротний максимум з амплітудою близько 20 дБ на частоті  $\sim 570$  Гц. Це корелює з інформацією від виробника про підсилення звуку в околі 500 Гц. На більш високих частотах помітні інші важливі деталі – мінімум поблизу 730 Гц і другий максимум на 785 Гц (його амплітуда становить 15 дБ).

Цікаво, що отриманий спектр має більш плавний характер, ніж для вихідного “скомпенсованого” сигналу. Вочевидь, причина цього полягає в інтегруючому ефекті дводоймової круглої мембрани у голівці стетоскопа – вона згладжує рівні акустичного тиску, які надходять з різних точок прийому.

Вище 1500 Гц спостерігається крутий завал характеристики зі швидкістю спаду порядку

(120...130) дБ/окт. Найімовірніша причина такої тенденції них пояснюється тим, що при  $\sim 1600$  Гц на діаметрі мембрани вкладається чверть звукової хвилі в повітрі. Для більш коротких хвиль на мембрані виникають усе більш яскраво виражені протифазні ділянки акустичного тиску, які починають взаємно компенсувати одна одну. Отже, незважаючи на прогин мембрани, сумарна зміна об’єму звукоприймальної камери буде близькою до нуля і флуктуації тиску всередині неї нівелюватимуться. Тому чутливий елемент стетоскопа вже “не відчуває” високочастотних складових звуку.

Таким чином, геометричні параметри приймальної голівки накладають природне обмеження на максимальну частоту звукових коливань, які він може фіксувати в повітрі. Це призводить до автоматичного відсікання високочастотних складових зовнішніх шумів. Не виключено, що цю властивість свідомо було використано при розробці стетоскопа як одна з компонент його шумозахисної системи.

## 5. ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕТОСКОПА ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЧАСТОТНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Для того, щоб дослідити, як впливає на відгук електронного стетоскопа 3M Littmann 3200 застосування цифрових фільтрів, збережену фонограму прийнятого “скомпенсованого” сигналу експортували в аудіоформат WAV при апостеріорному накладанні штатних режимів частотної фільтрації за допомогою програмного пакету 3M Littmann StethAssist.

На рис. 8 показані амплітудно-частотні характеристики досліджуваного стетоскопа для усіх трьох штатних режимів аускультатії (штрихпунктирна – “дзвін”, штрихова – “діафрагма”, неперервна – “розширений”). Зауважимо, що показане співвідношення їхніх рівнів відповідає реальному і знаходилось за допомогою програмної опції глобального співставлення амплітудних значень сигналу з подальшим уточненням його максимальної величини. Оскільки попередні дослідження вказують на відсутність різких змін кривих на вузьких інтервалах частот, видавалося доцільним перейти до згладжених спектрів (з вікном Ханнінга, звуженим до 1024 відліків). Правомірність вказаного підходу підтверджується повним узгодженням отриманої таким чином залежності для “розширеного” режиму і частотних спектрів, зображених на рис. 7.

Із графіка видно, що “розширений” режим роботи стетоскопа дійсно забезпечує аускультат

цію сигналу в найширшій смузі, причому його амплітудно-частотна характеристика – найрівномірніша з усіх трьох (її головні особливості описано у попередньому розділі).

Для режиму “діафрагма” рівень відгуку стетоскопа на низьких частотах буде приблизно на 10 дБ нижчим. Втім, за рахунок появи нового максимуму, розташованого на 230 Гц, з’являється своєрідна “поличка”, яка відповідає заявленому виробником акцентуванню на діапазоні (200...500) Гц. Максимум на частоті ~ 500 Гц дещо вужчий, ніж для “розширеного” режиму, а наступний за ним антирезонансний провал глибший. На частотах понад 1500 Гц – у зоні різкого спадання рівнів – обидві криві практично співпадають. Таким чином, режим “діафрагма” гірше пристосований до прослуховування високочастотних складових сигналів.

Режим “дзвін” при 100 Гц забезпечує той самий рівень, що й “розширений”, після чого спостерігається загальна тенденція до спадання з частотою. Тут також наявний максимум трохи вище 200 Гц і загалом його характеристика нагадує криву для режиму “діафрагма” з завалом порядку 20 дБ/окт. Зазначимо, що, оскільки вже при 400 Гц режим “дзвін” забезпечує рівень сигналу практично на 20 дБ нижчий, ніж для двох інших, він дійсно придатний лише для аускультатії в діапазоні до (200...300) Гц.

Підкреслимо, що для усіх режимів роботи електронного стетоскопа 3M Littmann 3200 його амплітудно-частотні характеристики виявились суттєво нелінійними й відмінними між собою. Тому при його включенні у комплекси з комп’ютерною обробкою аускультативної інформації для її коректної інтерпретації завжди необхідно проводити корекцію спектрів зареєстрованих сигналів відповідно до вибраного режиму. Це може суттєво утруднити застосування даної моделі електронного стетоскопа у розподілених системах, орієнтованих на отримання інформації від інструментів різних типів.

Є підстави вважати, що насправді первинна реєстрація сигналу в електронному стетоскопі 3M Littmann 3200 проводиться у певному “опорному” режимі – до накладання усіх фільтрів. При цьому первинна дискретизація при аналого-цифровому перетворенні сигналу відбувається з певною надлишковою частотою, зниження якої до 4 кГц здійснюється вже програмою StethAssist. На жаль, доступ користувача до запису у первинному його вигляді не передбачено.

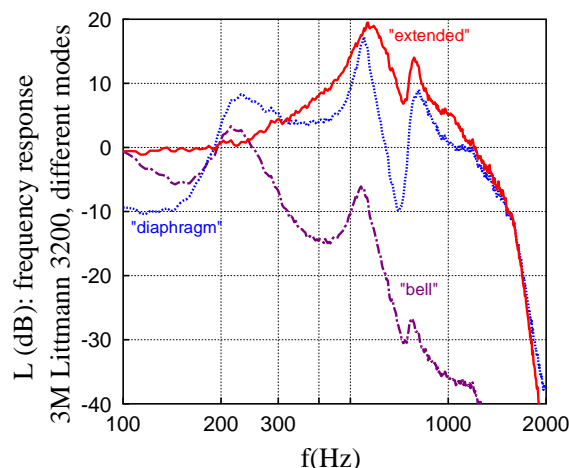


Рис. 8. Амплітудно-частотні характеристики електронного стетоскопа 3M Littmann 3200 для трьох режимів частотної фільтрації:

неперервна – “розширений”; штрихова – “діафрагма”; штрих-пунктирна – “дзвін”

## 6. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ

Оцінка сумарної похибки з урахуванням максимальних очікуваних нерівномірностей звукових карт і мікрофонів, а також розкиду результатів у серіях становить порядку  $\pm(3...4)$  дБ. Тому можна стверджувати, що проведені тести дозволили одержати досить надійні результати. Втім, існує ряд можливостей для підвищення точності результатів і переведення описаних експериментів із розряду оціночних у розряд вимірювань. Для цього необхідно:

- провести атестацію й калібрування мікрофона Behringer ECM8000 з адаптером Shure X2U для встановлення їхньої істинної частотної характеристики;
- розробити й виконати додаткові заходи щодо зменшення впливу акустичних властивостей приміщення на умови прийому сигналу і, по можливості, наблизити його до заглушеної камери;
- вивчити можливість уведення у програмний еквайзер Audacity більш детальної коригуючої функції, яка була б “дзеркальною” до частотної характеристики джерела (динаміка);
- дослідити ефективність використання у складі стенду комп’ютерних колонок різних моделей, а також інших широкодіапазонних акустичних джерел;

- розробити альтернативну методику тестування приймально-передавального тракту з використанням стандартного для перевірки комп'ютерних аудіосистем програмного пакету Right Mark Audio Analyzer, який має верифікований алгоритм знаходження передаточної функції.

## ВИСНОВКИ

1. З метою визначення акустичних характеристик електронних стетоскопів у діапазоні від 100 до 1500 Гц розроблено оригінальну методику вимірювань і створено експериментальний стенд.
2. Знайдено амплітудно-частотну характеристику електронного стетоскопа популярної моделі 3M Littmann 3200, яка відповідає передаточній функції пристрою у межах тракту від надходження аускультативного сигналу до його перетворення у цифрову форму, яка передається на зовнішнє комп'ютеризоване обладнання.
3. Досліджено відгуки стетоскопа у трьох штатних режимах частотної фільтрації та визначено їхні основні особливості. Показано, що відповідні характеристики суттєво нелінійні й відрізняються між собою. Це необхідно враховувати про використанні стетоскопа 3M Littmann 3200 у системах зі спектральною й спектрально-часовою обробкою аускультативних даних.
4. Відповідність отриманих кількісних даних відомостям про робочі параметри інструмента, задекларовані виробником, свідчить про достатню їхню надійність.
5. Проаналізовано недоліки використаної методики і вказано можливі шляхи її вдосконалення, що дозволило б перейти від оцінювання акустичних властивостей електронних стетоскопів до їхнього вимірювання у строгому значенні цього слова.

## ПОДЯКИ

Це дослідження виконане у рамках міжнародного наукового проекту ShifoSound за фінансової підтримки державної установи "Шведський інститут" (SI).

Автор висловлює глибоку вдячність колегам з департаменту клінічних досліджень, інтервенцій

і технології CLINTEC Каролінського інституту (Стокгольм, Швеція) за надану можливість проведення лабораторних досліджень з електронним стетоскопом 3M Littmann 3200.

1. Sakula A. R. T. H. Laënnec 1781–1826. His life and work: a bicentenary appreciation // *Thorax*.– 1981.– **36**.– P. 81–90.
2. Bishop P. J. Evolution of the stethoscope // *J. Roy. Med. Soc. Med.*– 1980.– **73**.– P. 448–456.
3. Frederick H. A., Dodge H. F. The "Stethophone", an electrical stethoscope // *Bell Syst. Thech. J.*– 1924.– **3**, № 4.– P. 531–549.
4. Sato A., Nukiyama H. The magnoscope, an electrical stethoscope // *Proc. Imper. Acad.*– 1927.– **3**, № 3.– P. 149–152.
5. 3M Littmann electronic stethoscope model 3200, 3M Health Care.– 2011.– P. 1–24.
6. Welch Allyn. Electronic Stethoscopes. [Електронний ресурс] // Welch Allyn Medical Diagnostic Equipment.– Режим доступу: [http://www.welchallyn.com/apps/products/product\\_category.jsp?catcode=STS&subcatcode=STS-E](http://www.welchallyn.com/apps/products/product_category.jsp?catcode=STS&subcatcode=STS-E).
7. Clinical Vi-Scope. [Електронний ресурс] // Cardionics. – Режим доступу: <http://www.cardionics.com/clinical-vi-scope.html>.
8. Stethoscope with SpO2 Sensor (CMS-M). [Електронний ресурс] // Contec Medical Systems.– Режим доступу: <http://contecmedical.en.made-in-china.com/product/VebJvSpUJTrR/China-Stethoscope-with-SpO2-Sensor-CMS-M-CE-Certified.html>.
9. Артемьев А. М., Макаренков А. П., Макаренкова А. А. Исследование эффективности электроакустических преобразователей электронных стетофонендоскопов // *Акуст. вісн.*– 2009.– **12**, № 1.– С. 3–10.
10. Tourtier J., Coste S., Fontaine E., Libert N., Viaggi M., Forsans E., Borne M. Auscultation in flight: comparison of amplified and traditional stethoscopes // *Crit. Care.*– 2010.– **14**, Suppl. 1.– P. S92–S93.
11. Телемедицина. Новые информационные технологии на пороге XXI века / Под ред. П. М. Юсупова, Р. И. Полонникова.– СПб.: СПИИА РАН, 1998.– 488 с.
12. Grinchenko V., Artemiev A., Makarenkov A., Makarenkova A., Olyinik V., Nabiev R., Gurenko O., Gnateiko V., Glazova A. Mobile end-user solution for system of monitoring of respiratory and cardiac sounds // *Proc. 34th IEEE Int. Conf. Electron. Nanotechnol., ELNANO-2014.*– Kyiv: NTUU KPI, 2014.– P. 299–302.
13. Nabiev R., Glazova A., Olyinik V., Makarenkova A., Makarenkov A., Rakhimov A., Fellander-Tsai L. Portable system for auscultation and lung sound analysis // *Studies in health technology and informatics. Vol. 196. Medicine Meets Virtual Reality 21.*– Clifton, VA: IOS Press, 2014.– P. 290–293.
14. Reyes B.A., Reljin N., Chon K. H. Tracheal sounds acquisition using smartphones // *Sensors.*– 2014.– **14**, № 8.– P. 13830–13850.
15. 3M Littmann StethAssist heart and lung sound visualization software. [Електронний ресурс] // 3M Littmann, 2011.– 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

16. Ertel P. Y., Lawrence M., Brown R. K., Stern A. M. Stethoscope acoustics: II. Transmission and filtration patterns // *Circulation*.– 1966.– **34**.– P. 899–909.
17. Abella M., Formolo J., Penney D. G. Comparison of the acoustic properties of six popular stethoscopes // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 1992.– **91**.– P. 2224–2228.
18. Riederer K. A. J., Backman J. Frequency response of stethoscopes // *Proc. Nord. Acoust. Meet. (NAM98)*.– Stockholm, Sweden, 1998.– P. 1–4.
19. Олійник В. Н. Определение передаточной функции электронного стетофонендоскопа // *Мат. XXI межд. науч.-тех. конф. “Прикладные задачи математики и механики”*.– Севастополь: СНТУ, 2013.– С. 25–29.
20. Ананьев А. Б. Элементы музыкальной акустики.– К.: Феникс, 2008.– 224 с.
21. Pasterkamp H., Kraman S. S., Wodicka G. R. Respiratory sounds. Advances beyond the stethoscope // *J. Respir. Crit. Care Med.*– 1997.– **156**.– P. 974–987.
22. Logitech Speaker System Z320 [Електронний ресурс] // Logitech. Компьютерные аксессуары. Мультимедиаколонки.– Режим доступа: <http://www.logitech.com/ru-ru/product/speaker-system-z320>.
23. Мікрофон МК-100 [Електронний ресурс] // SVEN. Продукція. Аудіо-відео техніка. Наушники, гарнітури і мікрофони.– Режим доступа: [http://sven.ua/ua/products/detail.php?SECTION\\_ID=1014&ID=695](http://sven.ua/ua/products/detail.php?SECTION_ID=1014&ID=695).
24. Measurement microphone ECM8000: Technical specifications, BEHRINGER Spezielle Studiotchnik GmbH.– 2000.– P. 1.
25. Shure XLR-to-USB signal adapter, Shure Inc.– 2009.– P. 16–25.