

АНОТАЦІЯ

Моторнюк Д. Є. Оцінка акустичних параметрів приміщення як каналу мовленнєвої комунікації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу акустичних характеристик приміщення, ранніх і пізніх відбиттів звуку на розбірливість мовленнєвого сигналу, автоматизації оцінювання акустичних характеристик приміщення, автоматизації проведення артикуляційних випробувань на суб'єктивну розбірливість мовлення.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та перераховано задачі дослідження, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячено огляду публікацій з моделювання імпульсної характеристики приміщення, впливу реверберації на мовленнєвий сигнал, методів компенсації впливу реверберації та методів вимірювання часу реверберації. В розглянутих роботах з впливу приміщення на мовленнєвий сигнал бракує аналізу зв'язку об'єктивних показників якості мовлення із суб'єктивною розбірливістю. Окрім цього, запропонована методологія проведення суб'єктивних тестів дуже ресурсоемна і потребує автоматизації.

У другому розділі розглянуто вимірювання імпульсної характеристики і часу реверберації прямими методами (з використанням тестового сигналу). Запропоновано покращення алгоритму автоматичного оцінювання часу реверберації прямим методом, що полягає у автоматичному, віконному з перекриттям, аналізі записаного відгуку на збуджуючий сигнал. Запропонований алгоритм був використаний при дослідженні акустичних параметрів учбових приміщень кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Крім того,

розроблено рекомендації щодо коригування характеристик акустичної апаратури непрофесійного рівня якості при проведенні вимірювань якості та розбірливості мовлення із використанням штучної голови. Ефективність зазначених рекомендацій була перевірена експериментально, шляхом оцінювання акустичних характеристик університетських аудиторій малого, середнього та великого розміру, а також шляхом перевірки узгодження отриманих результатів із літературними даними.

У третьому розділі представлено результати модернізації відомого алгоритму сліпого вимірювання часу реверберації. Складність завдання полягає в тому, що при таких вимірюваннях в розпорядженні інженера є лише запис мовленнєвого сигналу, спотвореного реверберацією. В дисертаційній роботі запропоновано таке покращення зазначеного алгоритму, яке дозволило розширити діапазон вимірювання часу реверберації розглянутим методом. Достовірність та точність отриманих результатів перевірена із використанням комп'ютерного моделювання, шляхом порівняння результатів алгоритму-прототипу та модернізованого алгоритму.

В четвертому розділі дисертаційної роботи представлено результати розробки апаратно-програмної системи для автоматизації артикуляційних випробувань при суб'єктивному оцінюванні розбірливості мовлення. Використання розробленої системи дозволило співставити результати оцінювання якості мовленнєвих сигналів із результатами оцінювання розбірливості мовлення та зробити висновки щодо принципової можливості використання простих, з точки зору об'єму обчислень, оцінок якості сигналів замість складних оцінок розбірливості мовлення. Представлено результати експериментального порівняння розбірливості мовлення при діотичному та діхотичному прослуховуванні мовленнєвих сигналів. Виконано порівняння впливу ранньої та пізньої реверберації на результати суб'єктивного оцінювання розбірливості мовлення. Представлено результати комп'ютерного моделювання впливу ранньої реверберації на розбірливість мовлення в залежності від структури імпульсної характеристики приміщення.

Результати досліджень дозволили створити уточнені аналітичні та комп'ютерні моделі дії акустичних завад у вигляді шуму, ранніх та пізніх відбиттів звуку в приміщенні на якість мовленнєвих сигналів та на розбірливість мовлення. Виявлення негативної дії ранніх відбиттів звуку на розбірливість мовлення в середній частині приміщень дозволяє обґрунтувати необхідність прийняття відповідних дій для нейтралізації виявленого ефекту.

Результати, представлені у дисертації, можуть бути використані для експертизи та корекції акустичних характеристик приміщень шляхом розрахунку та вимірювання якості та розбірливості мовленнєвих сигналів у приміщеннях, що проектуються, будуються або піддаються реновації. Володіння інформацією щодо характеру та ступеня впливу шуму, ранніх відбиттів звуку та пізньої реверберації на якість та розбірливість мовлення в різних точках приміщень дозволить підвищити точність акустичної експертизи. Автоматизація вимірювань акустичних характеристик приміщення, в тому числі якості та розбірливості мовлення, дозволить підвищити точність вимірювань, знизивши при цьому витрати матеріальних, часових, фінансових та людських ресурсів.

Викладені у дисертації нові теоретичні та практичні результати досліджень знайшли застосування у освітньому процесі кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем за спеціальністю 171 Електроніка, освітньою програмою “Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації”, Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

В дисертаційній роботі отримано наступні наукові результати:

- вперше вказано умови, за яких об'єктивне оцінювання якості мовленнєвих сигналів, що маскуються шумовою завадою, може бути застосовано замість суб'єктивного оцінювання розбірливості мовлення;
- вперше вказано на можливість зниження розбірливості мови в окремих частинах приміщень через погіршення якості мовленнєвого сигналу, яке спричинене дією ранніх відбиттів звуку;

- вперше запропоновано, при автоматизації оцінювання розбірливості українського мовлення артикуляційним методом, спосіб фіксації сприйнятих слухачем звукових сполучень, що використовуються в якості елементів мовлення;
- вдосконалено алгоритми оцінювання часу реверберації прямим та сліпим методами, що дозволяє розширити границі застосування зазначених алгоритмів та підвищити ступінь автоматизації акустичних вимірювань;
- розроблено рекомендації щодо коригування характеристик акустичної апаратури непрофесійного рівня якості при проведенні вимірювань якості та розбірливості мовлення із використанням штучної голови.

Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

- показано можливість підвищення достовірності результатів артикуляційних випробувань та підвищення ступеня автоматизації таких випробувань, спрямованих на суб'єктивну оцінку розбірливості українського мовлення в приміщеннях;
- встановлено принципову можливість використання мір якості мовленнєвого сигналу замість мір розбірливості мовлення, що дозволяє спростити процедуру оцінювання розбірливості мови;
- розроблено програмно-апаратну систему для артикуляційних випробувань каналів передачі української мови в умовах дії шумової завади та реверберації, що дозволяє автоматизувати такі випробування, підвищити їх достовірність та суттєво знизити ресурсоемність випробувань;
- вдосконалено алгоритми оцінювання часу реверберації прямим та сліпим методами, що дозволяє розширити границі застосування зазначених алгоритмів та підвищити ступінь автоматизації акустичних вимірювань.

Ключові слова: імпульсна характеристика приміщення, реверберація, мовленнєвий сигнал, спотворення мовленнєвого сигналу, суб'єктивна розбірливість, автоматизація.

Список публікацій здобувача

1. A. Prodeus, V. Didkovskyi, M. Didkovska, I. Kotvytskyi, and D. Motorniuk, "Automated Subjective Assessment of Speech Intelligibility under Diotic and Dichotic Listening," Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2021, 48, pp. 1–16, January 2021, Springer, Cham, ISSN 2367-4512, e-ISSN 2367-4520, DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2_1

Scopus: <https://www.scopus.com/sourceid/21100975545>

2. A. Prodeus, M. Didkovska, K. Kukharicheva, D. Motorniuk, "Two Simplified Models of Early Sound Reflections in a Room", Electronics and Control Systems, No. 3(65), 2020, pp. 79-87. DOI:10.18372/1990-5548.65.14991, ISSN 1990-5548 (Published: 2020-11-27)

3. O. Dvornyk, A. Prodeus, D. Motorniuk, M. Didkovska, "Hardware and Software System "Artificial Head". Part 2. Evaluation of Speech Intelligibility in Classrooms," Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 22, no. 3, 2020, pp. 48-55, DOI: 10.20535/2523-4455.me.209928 (Опубліковано: Dec 28, 2020), ISSN 2523-4447, e-ISSN 2523-4455

4. O. Dvornyk, A. Prodeus, M. Didkovska, D. Motorniuk, "Artificial Software Complex "Artificial Head". Part 1. Adjusting the Frequency Response of the Path," Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 22, no. 1, 2020, pp. 56-64, DOI: 10.20535/2523-4455.me.198431, ISSN 2523-4447, e-ISSN 2523-4455

5. Ю.С. Костючок, Л.С. Мартинович, Д.Е. Моторнюк, В.А. Нечитайло, А.В. Храпачевский, А.Н. Продеус. Акустическая паспортизация учебных помещений. - ISSN 1811-4512. Electronics and Communications, 2016, Vol.21, No.2(91). – P.63-70

6. A. Prodeus, M. Didkovska, D. Motorniuk, O. Dvornyk, "The Effects of Noise, Early and Late Reflections on Speech Intelligibility" Proc. 2020 IEEE 40th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 488 - 492, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088854

7. A. Prodeus, M. Didkovska, K. Kukharicheva, D. Motorniuk, "Modeling the Influence of Early Sound Reflections on Speech Intelligibility," Proc. of 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 20-23 Oct. 2020, Kyiv, Ukraine.

DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255657

8. A. Prodeus, V. Didkovskyi, M. Didkovska, I. Kotvytskyi, D. Motorniuk, and A. Khrapachevskyi, "Objective and Subjective Assessment of the Quality and Intelligibility of Noised Speech," Proc. of 2018 IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T`2018), October 9-12, 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 71-74. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632125.

9. А. М. Продеус, І. В. Котвицький, М. В. Дідковська, В. С. Дідковський, К. А. Кухарічева, Д. Є. Моторнюк, О. О. Дворник Спосіб виявлення кліпування мовного та музичного сигналів // Патент UA 144291 U, МПК G01R 23/20, опубл. 25.09.2020.

SUMMARY

Motorniuk D.E. Assessment of an acoustic parameters of the room as a speech communication channel. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 171 “Electronics”. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the study of the influence of acoustic characteristics of the room, early and late sound reflections on the intelligibility of the speech signal, automation of evaluation of acoustic characteristics of the room, automation of articulation tests on the subjective intelligibility of speech.

The content of the dissertation research is presented in four sections, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and lists the objectives of the study, describes the research methods, provides information about the scientific novelty and practical significance of the results.

The first section is devoted to a review of publications on modeling the room impulse response, the impact of reverberation on the speech signal, methods of compensating for the impact of reverberation and methods of measuring reverberation time. The considered works on the influence of the room on the speech signal lack the analysis of the connection of objective indicators of speech quality with subjective intelligibility. In addition, the proposed methodology for conducting subjective tests is very resource-intensive and requires automation.

The second section considers the measurement of impulse response and reverberation time by direct methods (using a test signal). It is proposed to improve the algorithm for automatic estimation of reverberation time by the direct method, which consists in automatic windowed with overlap analysis of the recorded response to the test signal. The proposed algorithm was used in the study of acoustic parameters of the classrooms of the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". In addition, recommendations have been developed for adjusting the characteristics of non-professional quality acoustic equipment when measuring the quality and intelligibility of speech using an artificial

head. The effectiveness of these recommendations was tested experimentally, by evaluating the acoustic characteristics of university classrooms of small, medium and large size, as well as by checking the consistency of the results with the literature.

The third section presents the results of improvement of the known algorithm for blind reverberation time estimation. The complexity of the problem is that in such measurements, the engineer has only a record of the speech signal distorted by reverberation. In the dissertation such improvement of the specified algorithm which has allowed to expand the range of measurement of reverberation time by the considered method is offered. The reliability and accuracy of the obtained results were verified using computer modeling, by comparing the results of the prototype algorithm and the improved algorithm.

The fourth section of the work presents the results of hardware and software system development for automation of articulation tests in the subjective assessment of speech intelligibility. The use of the developed system allowed to compare the results of speech signal quality assessment with the results of speech intelligibility assessment and to draw conclusions about the fundamental possibility of using simple, in terms of computational volume, signal quality assessments instead of complex speech intelligibility assessments. The results of experimental comparison of speech intelligibility during diotic and dichotic listening of speech signals are presented. A comparison of the influence of early and late reverberation on the results of speech intelligibility subjective assessment is performed. The results of computer modeling of the influence of early reverberation on speech intelligibility depending on the structure of the room impulse response are presented.

The research results allowed to create refined analytical and computer models of the influence of acoustic interference in the form of noise, early and late reflections of sound in the room on the quality of speech signals and speech intelligibility. Discovery of the negative effect of early sound reflections on speech intelligibility in the middle of the rooms allows to justify the need to take appropriate action to neutralize the discovered effect.

The results presented in the dissertation can be used for examination and correction of room acoustic characteristics by calculating and measuring the quality and

intelligibility of speech signals in the rooms that are designed, built or renovated. Having information on the nature and extent of noise, early sound reflections and late reverberation on the speech quality and intelligibility in different parts of rooms will increase the accuracy of acoustic examination. Automation of measurements of room acoustic characteristic, including speech quality and intelligibility, will increase the accuracy of measurements, while reducing the cost of material, time, financial and human resources.

The new theoretical and practical research results presented in the dissertation were used in the educational process of the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems in the specialty 171 Electronics, educational program "Acoustic Electronic Systems and Acoustic Information Processing Technologies", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

The following scientific results were obtained in the dissertation:

- for the first time, the conditions under which the subjective assessment of the quality of speech signals masked by noise interference can be used instead of the speech intelligibility subjective assessment are indicated;
- for the first time the possibility of speech intelligibility reduction in some parts of the rooms due to the deterioration of the speech signal quality, which is caused by the action of early sound reflections is indicated;
- for the first time in the automation of Ukrainian speech intelligibility assessment by articulation method, a method of recording the perceived by the listener sound combinations, used as elements of speech, proposed;
- the algorithms for reverberation time estimation by direct and blind methods have been improved, which allows to expand the application limits of these algorithms and increase the degree of acoustic measurements automation;
- developed recommendations for adjusting the characteristics of acoustic equipment of non-professional quality level for measuring the speech quality and intelligibility using an artificial head.

The practical significance of the results obtained in the dissertation is as follows:

- the possibility of increasing the reliability of articulation tests results and increasing the degree of automation of such tests, aimed at the subjective assessment of Ukrainian speech intelligibility in the rooms is demonstrated;
- the principal possibility of speech signal quality measures usage instead of speech intelligibility measures is established, which allows to simplify the procedure of speech intelligibility assessment;
- a software and hardware system for articulation tests of Ukrainian speech transmission channels under conditions of noise interference and reverberation has been developed, which allows to automate such tests, increase their reliability and significantly reduce the resource consumption;
- the algorithms for reverberation time estimation by direct and blind methods have been improved, which allows to expand the application limits of these algorithms and increase the degree of acoustic measurements automation.

Keywords: room impulse response, reverberation, speech signal, distortion of speech signal, subjective intelligibility, automation.

List of applicant's publications

1. A. Prodeus, V. Didkovskyi, M. Didkovska, I. Kotvytskyi, and D. Motorniuk, "Automated Subjective Assessment of Speech Intelligibility under Diotic and Dichotic Listening," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021, 48, pp. 1–16, January 2021, Springer, Cham, ISSN 2367-4512, e-ISSN 2367-4520, DOI: 10.1007 / 978-3-030-43070-2_1

Scopus: <https://www.scopus.com/sourceid/21100975545>

2. A. Prodeus, M. Didkovska, K. Kukharicheva, D. Motorniuk, "Two Simplified Models of Early Sound Reflections in a Room", *Electronics and Control Systems*, No. 3 (65), 2020, pp. 79-87. DOI: 10.18372/1990-5548.65.14991, ISSN 1990-5548 (Published: 2020-11-27)

3. O. Dvornyk, A. Prodeus, D. Motorniuk, M. Didkovska, "Hardware and Software System "Artificial Head" Part 2. Evaluation of Speech Intelligibility in Classrooms,"

Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 22, no. 3, 2020, pp. 48-55, DOI: 10.20535/2523-4455.me.209928 (Published: Dec 28, 2020), ISSN 2523-4447, e-ISSN 2523-4455

4. O. Dvornyk, A. Prodeus, M. Didkovska, D. Motorniuk, "Artificial Software Complex "Artificial Head" Part 1. Adjusting the Frequency Response of the Path," Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 22, no. 1, 2020, pp. 56-64, DOI: 10.20535/2523-4455.me.198431, ISSN 2523-4447, e-ISSN 2523-4455

5. Yu. S. Kostyuchok, L. S. Martinovich, D. E. Motorniuk, V. O. Nechytailo, A. V. Khrapachevskyi, A. M. Prodeus. Acoustic certification of classrooms. – ISSN 1811-4512. Electronics and Communications, 2016, Vol.21, No. 2 (91). - P.63-70

6. A. Prodeus, M. Didkovska, D. Motorniuk, O. Dvornyk, "The Effects of Noise, Early and Late Reflections on Speech Intelligibility" Proc. 2020 IEEE 40th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 488 - 492, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088854

7. A. Prodeus, M. Didkovska, K. Kukharicheva, D. Motorniuk, "Modeling the Influence of Early Sound Reflections on Speech Intelligibility," Proc. of 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 20-23 Oct. 2020, Kyiv, Ukraine.

DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255657

8. A. Prodeus, V. Didkovskyi, M. Didkovska, I. Kotvytskyi, D. Motorniuk, and A. Khrapachevskyi, "Objective and Subjective Assessment of the Quality and Intelligibility of Noised Speech," Proc. of 2018 IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T'2018), October 9-12, 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 71-74.

DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632125.

9. A. M. Prodeus, I. V. Kotvitsky, M. V. Didkovska, V. S. Didkovskyi, K. A. Kukharicheva, D. E. Motorniuk, O. O. Dvornyk Method of detecting clipping of speech and music signals // Patent RU 144291 U, IPC G01R 23/20, publ. 09/25/2020