

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 4 (22), 2022

No. 4 (22), 2022

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2022

Kharkiv
2022

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодянский Євгеній Володимирович,
д-р техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артиух Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкорований Володимир Валентинович, д-р техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопсєнко Віктор, д-р техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р техн. наук, професор (Словаччина)
Лемешко Олександр Віталійович, д-р техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р екон. наук, професор;
Музика Катерина Миколаївна, д-р техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир Богданович, д-р техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р техн. наук, професор;
Сетлак Галина, д-р техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р техн. наук, професор (Фінляндія);
Тєлєтов Олександр Сергійович, д-р екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopeyenko Victors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oleksandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremaska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (Протокол № 11 від 8 грудня 2022 р.).

Свідectво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Барковська О. Ю.**
Дослідження роботи модуля перетворення мови в текст у запропонованій моделі автоматичного анотування промови спікера(eng.)
- 14 **Семенов С., Міньянз Ч. Ч., Енгаличев С., Смідович Л.**
Узагальнена модель процесу передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата в стеганографічній системі (eng.)
- 20 **Федоренко Г. Л., Фесенко Г. В., Харченко В. С.**
Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів (ua)

Сучасні технології управління підприємством

- 31 **Воробйов К. С., Гуржій Н. М.**
Конкурентний аналіз світового ринку кави (ua)

Інженерія та промислові технології

- Перепелиця О. М., Аврунін О. Г.**
- 47 Порівняння методу електрометричного визначення параметрів кореневого каналу та методу порогової сегментації рентгенограми (eng.)

Математичне моделювання та обчислювальні методи

- Матвієнко О. І., Манчинська Н. Б.**
- 56 Метод розрахунку дисперсій залежних змінних стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу (eng.)
- 68 **Алфавітний покажчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Barkovska O.**
Research into speech-to-text transformation module in the proposed model of a speaker's automatic speech annotation
- 14 **Semenov S., Minjian Z. Z., Yenhalychev S., Smidovych L.**
Generalized model of the ads-b unmanned aerial vehicle data transmission process in a steganographic system
- 20 **Fedorenko G., Fesenko H., Kharchenko V.**
Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects

Modern Enterprise Management Technologies

- 31 **Vorobiov K., Hurzhii N.**
Competitive analysis of the world coffee market

Engineering & Industry Technology

- 47 **Perepelytsia O., Avrunin O.**
Comparison of the method of electrometric determination of root canal parameters and the method of threshold segmentation of radiographs

Mathematical modeling & Computational Methods

- 56 **Matviienko, O., Manchynska, N.**
Method for calculation of dispersions of dependent variables of a stochastic model of quasi-stationary operating modes of the main water pipeline
- 68 **Alphabetical index**

O. BARKOVSKA

RESEARCH INTO SPEECH-TO-TEXT TRANSFORMATION MODULE IN THE PROPOSED MODEL OF A SPEAKER'S AUTOMATIC SPEECH ANNOTATION

The **subject** matter of the article is the module for converting the speaker's speech into text in the proposed model of automatic annotation of the speaker's speech, which has become more and more popular in Ukraine in the last two years, due to the active transition to an online form of communication and education as well as conducting workshops, interviews and discussing urgent issues. Furthermore, the users of personal educational platforms are not always able to join online meetings on time due to various reasons (one example can be a blackout), which explains the need to save the speakers' presentations in the form of audio files. The **goal** of the work is to elimination of false or corrupt data in the process of converting the audio sequence into the relevant text for further semantic analysis. To achieve the goal, the following **tasks** were solved: a generalized model of incoming audio data summarization was proposed; the existing STT models (for turning audio data into text) were analyzed; the ability of the STT module to operate in Ukrainian was studied; STT module efficiency and timing for English and Ukrainian-based STT module operation were evaluated. The proposed model of the speaker's speech automatic annotation has two major functional modules: speech-to-text (STT) i summarization module (SUM). For the STT module, the following **models** of linguistic text analysis have been researched and improved: for English it is wav2vec2-xls-r-1bz, and for Ukrainian it is Ukrainian STT model (wav2vec2-xls-r-1b-uk-with-lm). Artificial neural networks were used as a mathematical apparatus in the models under consideration. The following **results** were obtained: demonstrates the reduction of the word error level descriptor by almost 1.5 times, which influences the quality of word recognition from the audio and may potentially lead to obtaining higher-quality output text data. In order to estimate the timing for STT module operation, three English and Ukrainian audio recordings of various length (5s, ~60s and ~240s) were analyzed. The results demonstrated an obvious trend for accelerated obtaining of the output file through the application of the computational power of NVIDIA Tesla T4 graphic accelerator for the longest recording. **Conclusions:** the use of a deep neural network at the stage of noise reduction in the input file is justified, as it provides an increase in the WER metric by almost 25%, and an increase in the computing power of the graphics processor and the number of stream processors provide acceleration only for large input audio files. The following research of the author is focused on the study of the methods of the obtained text summarization module efficiency.

Keywords: STT; text; processing; summary; audiofile; model; neural networks.

Introduction

The period of the pandemic and the war conflict has urged the development and expansion of various digital educational platforms feature set [1, 2]. These information spaces are necessary at the various education levels in different countries all over the world – from primary schools to higher education institutions as well as educational courses in various business spheres, thus enabling to provide students with learning materials, communication with teachers as well as remote knowledge level assessment. Therefore, virtual interaction of the distributed user community is established [3–4]. The amount of interactive features of digital education platforms is constantly expanded, thus, giving more opportunities to students (students of higher education institutions, postgraduate students, course participants etc.)

One example of the expanded feature set is access to audio files available for listening, but not aimed for text file production. Thus, provision of this function requires transformation of audio files into text preserving only valuable and relevant information [5].

The given work proposes a model of speech text annotation formation. One of the research lines is speech processing and transformation of audio files into text at the same time preserving only valuable and relevant information. The topicality and, simultaneously, the difficulty lies in the fact that spontaneous speaking is unstructured, does not resemble the written materials, and includes bits of information, which is repeated or corrected [6]. This requires adaptation and improvement of the existing STT approaches to certain conditions – peculiarities of the speaker's speech style, sensor properties, and system requirements as for the end result.

Analysis of last achievements and publications

Speaking is the simplest form of communication; there exist certain problems with speech recognition such as speech fluidity, pronunciation, words confusion, speech impediment problems. These must be solved during speech processing [7]. Moreover, environment peculiarities add up in the process of audio materials recording.

The current speech recognition systems have undergone a long process of development from their old analogs. They can recognize the speech of several

speakers and use an enormous vocabulary in numerous languages [8–9].

The first experiments date back to the 1970s, but the developments in the sphere of parallel and distributed computing architectures, big data and artificial intelligence in the last years have given a great impetus to improve this technology and, thus, its reliability [10–11]. Compared to the past, the accuracy of transcription has actually improved to such a level that, on condition of a clear and clearly defined acoustic source, the accuracy level may well exceed 99%.

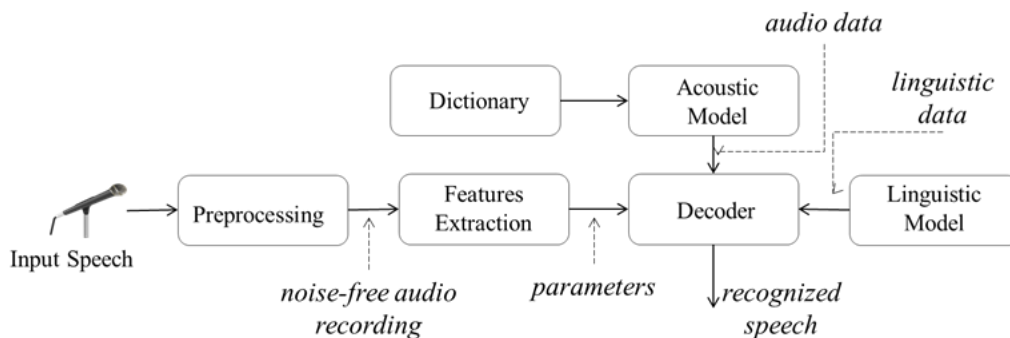


Fig. 1. Typical Speech-to-Text Scheme

The automatic transcription system core is automatic speech recognition, which combines the acoustic and the speech components (fig. 1). The acoustic component is responsible for the transformation of audio files into a sequence of tiny acoustic units. The "analog sound", i.e. vibrations produced during the speech, is transformed into digital signals, which can be scanned by software. Then, acoustic units are associated with the existing "phonemes", namely, the sounds, used in a certain language to form meaningful expressions. So, the linguistic component is responsible for the transformation of sequences of acoustic units into words, sentences and paragraphs. The linguistic component analyses all the previous words and their correlation in order to evaluate the possibility of applying a certain word in further speech. In technical terms, they are called "Hidden Markov Models" and are widely used in all speech recognition software [12]. Both components must be correctly "taught" to understand a certain language: the acoustic and the linguistic components are equally critical for transcription accuracy [13]. Figure 1 shows a flow diagram of a typical speech-to-text (STT) transformation system.

Certain advanced technological solutions by various technological companies currently exist. However, every solution has its own advantages and disadvantages, provided further (table 1). The following most common

disadvantages are inherent for the program solutions under study:

- high cost;
- limited language support capabilities;
- lack of possibility to modify solutions.

When transcribing speech documents, the speech is divided into spontaneous and prepared. A much higher accuracy of recognition can be achieved when transcribing the speech, read from the text, for example, a newsreader's speech during a news broadcast. The capability of automatic spontaneous speech recognition is currently limited due to the lack of the structure and the presence of repetitions and corrections. Transcription of audio data into text is made after the transformation of a physical signal into an electrical signal via analog-to-digital converters. The widespread STT conversion methods include:

- hidden Markov models (HMM)
- deep neural networks (recurrent neural networks, convolution neural networks).

The selected criteria for the existing solution methods comparison were:

- the amount of data necessary for learning;
- the speed of learning;
- recognition accuracy.

Dynamic time warping (DTW) as a relevant estimation method to determine the similarity of

two sequences different with regard to time and speed was earlier popular in speech recognition, but now has been replaced by more effective methods based on hidden Markov models. DTW was applied to analyse video, audio and graphic files as well as any data capable of being converted into linear representation [14]. This can be exemplified by determination of similarities in walking patterns if a person walked faster in one video and more slowly in another one.

Automatic speech recognition is a well-known task for working with variable frequency of speech. If formulated differently, sequences (e.g. time series) are distorted nonlinearly. Therefore, the results obtained applying DTW method are not satisfactory.

Table 1. Comparison of the Existing Solutions

Criteria	Program solutions		
	Amazon Transcribe	Dragon Anywhere	QuillBot
Support of voice conversion into text	supported	supported	no
Support of summarization feature	no	no	supported
Feature set, operating with Ukrainian	supported	no	no
Feature set, operating with English	supported	supported	supported
Operation mode variation	no	no	no

Phonemes (the simplest units of human speech) probabilities distribution in the audible alarm segment, with a certain probability, enables to distinguish hidden Markov models. This is necessary for further reproduction of what was said by the sound. Taking into account the fact that the same phoneme may sound differently (e.g. depending on the accent), the choice of the feature (phoneme) probability distribution function is stipulated by the possibility to make allowance for and summarize several probability distributions (namely, take into account different sounding of the same phoneme). Gaussian Mixture Model (GMM) best meets the abovementioned requirement. GMM-HMM model is so successful that any new method can hardly outperform it for acoustic modelling. Despite all the advantages, GMM has a substantial drawback – inefficiency for modelling data, with lie on or near the nonlinear variety in the data space.

An alternative way of speech recognition is deep neural network (DNN), which has a lot of hidden layers and learns by means of new methods, outperforming GMM, sometimes by far, in various speech recognition tests [15].

Due to the abovementioned drawbacks of HMM-based models along with the development of deep learning technologies, end-to-end LVCSR is used in more and more solutions. The end-to-end model is the system, which directly converts an input acoustic sequence into a word sequence or another grapheme. Its functional structure is presented in figure 2.

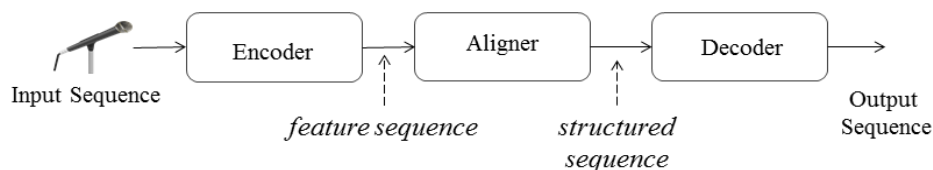


Fig. 2. Functional Structure of End-to-End Model

The majority of end-to-end speech recognition models include the following parts:

- encoder, which maps a sequence of speech input into a sequence of features;
- aligner, which implements alignment between the objects "sequence" and "language";
- decoder, which decodes the end result of the identification.

This distribution does not always take place because the end-to-end model itself is a seamless structure and it

is usually difficult to define which subtask is performed by which part.

Compared to an HMM-based model, an LVCSR model has the following advantages:

- several modules are combined into one network for collaborative learning. i.e. there is no need to represent the middle states;
- there is no data alignment problem, in particular for language recognition because the "subtle approach" to alignment is used, in which every audio frame

corresponds to all the possible states with certain probability distribution.

The aim of the work is to reduce false or corrupt data occurrence in the process of conversion of a sound series into a relevant text for further semantic analysis for English and Ukrainian input audio files.

In order to achieve the set aim, the following tasks must be solved:

- development of a generalized text summarization model for input audio data;
- review and analysis of the existing STT models (Speech-to-text models);
- provision of STT module processing of the Ukrainian language;
- quality assessment of STT modules working with Ukrainian and English;
- STT module operation timing evaluation;
- analysis of the obtained results.

Audio-to-text conversion under study is one of the modules of the hybrid model proposed in this work, which enables to recognize the speaker's speech, convert the available audio data into text and summarize the text obtained after input audio materials conversion, which is the final stage, preserving only the informative part of the lecture.

An important feature of the solution proposed by the author might be distributed data processing and scalability, which enable to apply the given approach to big data processing. The task of voice and text processing requires considerable resources, therefore, concurrent GPGPU processing paradigm is applied in order to optimize and accelerate the given task.

Materials and methods

Transcription of speech documents such as public speeches, oral project presentations, lectures and TV news are one of the basic applications of automatic speech recognition. Although speech is the most natural and successful form of human interaction, it is hard to quickly evaluate, obtain and reuse text documents, which are simply written as acoustical signals.

The given work researches the use of several speech-to-text models as components of the proposed speaker's speech annotation model. In order to fulfill the given task, a decision was made to develop modular microservice architecture, which would provide for semantic models change with minor impact on the whole complex [15].

Speech-to-text module receives a WAV sound record with the frequency of 16 kHz as input as this is the limit to audio series conversions and it requires high-quality input. Several audio series processing models have an urgent problem of obtaining an audio without ambient noise [16 – 17], which is not implemented in some solutions. The given function is not implemented in the model selected for research, either. Therefore, a decision was made to approach the task of audio series cleanup via a deep neural network, described in [18].

Text summarization module takes the result of speech recognition (ASR) module as input in the form of a JSON object. The given research also puts forward the idea to develop a service for input text filtering by means of marker words. Text filtering takes place at the stage of JSON object transition from the ASR module to the text summarization module.

Figure 3 shows the proposed automatic speaker's speech annotation model. The main functional modules of the proposed model are: speech-to-text (STT) and summarization modules (SUM). The main focus of the work lies on the STT module and the main task is automatic speech recognition (ASR).

Two models were tested for the given module: wav2vec2-xls-r-1b3 for English, which was an open source model by Facebook and available in the public domain; Ukrainian STT model (wav2vec2-xls-r-1b-uk-with-lm) for Ukrainian, which is a revised version of Facebook solution.

Traditional speech recognition models are primarily trained on transcribed and annotated speech audios; they require annotated big data, available for only a few languages.

In this case, model training differs – it is asked to predict what the speaker tells further through comparison of several options. The given approach studies a set of language units, which are shorter than phonemes, to describe the audio sequence of the speech. For the reason this set is finite, the model cannot represent all variations, such as background noise. On the contrary, units prompt the model to focus on the most important factors for speech audio representations.

The wav2vec2 model first processes the raw form of the speech audio signal using a multilayer convolutional neural network to produce latent sound representations of 25 ms each. This model studies the basic language units used to solve a self-monitored task. The model is trained to predict the correct language unit for the masked parts of the audio, along with learning what the language units should be. With only 10 minutes of transcribed speech

and 53 thousand hours of unlabeled speech, wav2vec 2.0 can simulate speech recognition with a word error rate

(WER) of 8.6 percent for noisy language and 5.2 percent for pure language on the standard LibriSpeech test.

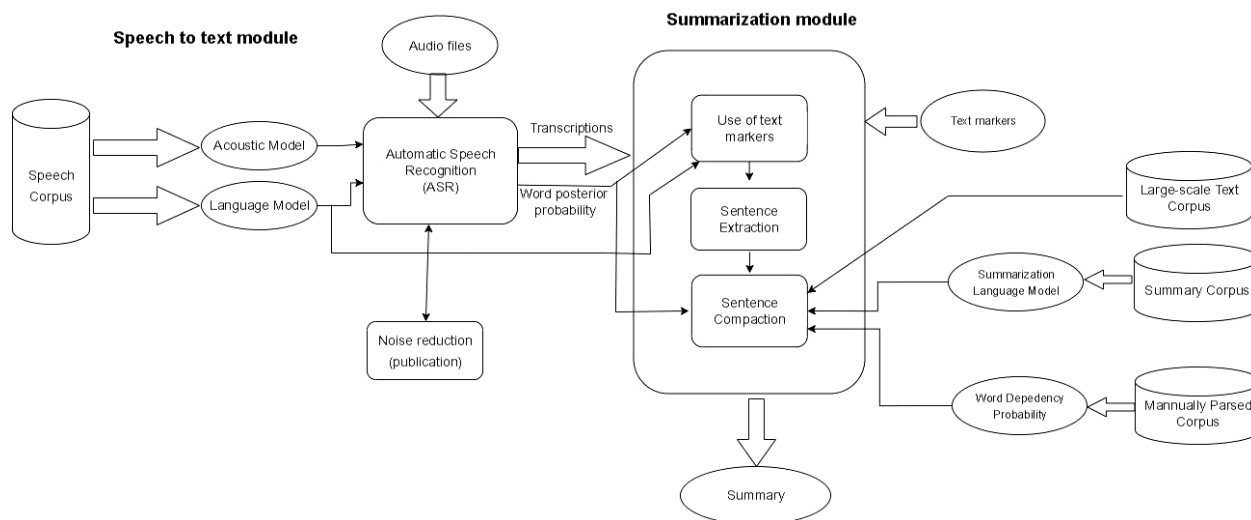


Fig. 3. The Proposed Automatic Speaker's Speech Annotation Model

For wav2vec, an architecture was developed, which consists of two-layered convolutional neural networks laid over each other. The encoder network maps raw audio input into a representation, in which each vector covers about 30 milliseconds (ms) of speech. The context network uses these vectors to create its own representations covering a larger span up to the second.

The number of neural layers in the extractor module is 7. The mozilla-foundation/common_voice_7_0 was used as the dataset to train the model. Common Voice dataset consists of unique wav recordings and corresponding text files. The major part of the 13,905 recorded hours in the dataset also contain demographic metadata, such as age, gender, and accent, which can help improve the accuracy of speech recognition mechanisms.

The dataset currently consists of 11,192 verified hours in 76 languages, but more voices and more languages are added all the time. An additional linguistic model was used for the model, which supports the Ukrainian language.

The results of the Common Voice 7 (WER) test evaluation without and with the additional Ukrainian linguistic model are shown in table 2.

On the basis of the obtained results, shown in table 2, a conclusion can be made about the reduction of the word error rate when using the additional Ukrainian linguistic model to recognize audio files, which are recorded in the Ukrainian language. This affects the quality of word recognition in the audio and can potentially provide for a better quality of output text.

Table 2. WER Results for Model, Which Supports Ukrainian

With linguistic model	Without linguistic model
14.62	21.52

In the process of preparation for the wav2vec2 model test, additional training of Ukrainian STT model was conducted; the results of training are presented below in table 3.

In contrast to conventional methods of minimum square error (MMSE)-based noise reduction, the proposed supervised speech enhancement method by means of the mapping function search between noisy and pure speech signals is performed on the basis of deep neural networks (DNNs). In order to be able to deal with a wide range of additive noise in real-life situations, a large training set covering many possible combinations of speech and noise types was initially developed.

The given DNN model was originally trained on 100 hours of noise speech data with 104 noise types. To improve the generalization ability of DNN under noise mismatch conditions, 3 hidden layers and 2048 hidden units for each hidden layer were used.

The experiment results demonstrate that the proposed framework can achieve significant improvements over the conventional MMSE-based technique. It is also worth noting that the proposed DNN approach can remove transient noise, which is difficult to process successfully. Furthermore, the obtained DNN model trained on artificially synthesized data is also effective for handling

noisy speech data recorded in real-world scenarios, without creating the annoying musical artifact typical for conventional enhancement techniques.

In table 4, a WER-metric-based comparison is presented with respect to its performance based on the rounded-up averages of the 3 wav format audio tracks.

In the case of using the Ukrainian language, this difference is important because the WER, being in the normal range when lecture speech is recognized, is 20–30.

In order to evaluate the STT module performance when using additional ukrainian linguistic model, 3 audio recordings in English and Ukrainian with different length were analyzed. Recordings classification is: short (5s), medium (~60s), long (~240s). The results of the time spent to process the audio signal in Ukrainian and English in the cloud solutions [19] and on the personal computer are shown in figure 4.

The experiment was conducted using computers with different performance. The following hardware

was used as an available computer on a personal computer – a central processor Intel Core i7-9750H (2.6 – 4.5 GHz), a graphic processor NVIDIA GeForce GTX 1650 Mobile. The hardware characteristics of the remote cloud solution are as follows – Intel Xeon 2.30GHz CPU, NVIDIA Tesla T4 GPU.

With reference to the obtained results, the trend for accelerating the longest recording under study is obvious. Word error rate (WER) was also measured for cleaned audio, which is the same for the both video cards, but different for the languages under study. The results of the measurements can be seen in table 5.

With regard to the obtained results, there is an upward trend for the level of errors in words along with data amount increase. This may be due to insufficient training of the model for the Ukrainian language and lead to the loss of the logical meaning of the record.

Table 3. Results of wav2vec2 Model Training

Training Loss	Epoch	Step	Validation Loss	Wer	Cer
1.2815	7.93	500	0.3536	0.4753	0.1009
1.0869	15.86	1000	0.2317	0.3111	0.0614
0.9984	23.8	1500	0.2022	0.2676	0.0521
0.975	31.74	2000	0.1948	0.2469	0.0487
0.8868	47.61	3000	0.1903	0.2257	0.0439
0.8424	55.55	3500	0.1786	0.2206	0.0423
0.8126	63.49	4000	0.1849	0.2160	0.0416
0.7901	71.42	4500	0.1869	0.2138	0.0413
0.7671	79.36	5000	0.1855	0.2075	0.0394
0.7467	87.3	5500	0.1884	0.2049	0.0389
0.731	95.24	6000	0.1877	0.2060	0.0387

Table 4. Ambient Noise Cleanup Efficiency

Language	Ukrainian	English
Audio series, cleared from noise, WER	29	3.9
Audio series, not cleared from noise, WER	38.7	5.2
Difference, %	25%	21%

Table 5. Word Error Rate (WER) Measurement Results for Cleared Sound Series in Ukrainian and English

Audio Series Length	Ukrainian, WER	English, WER
Short	24.6	3.4
Medium-length	28.4	3.7
Long	33.9	4.5

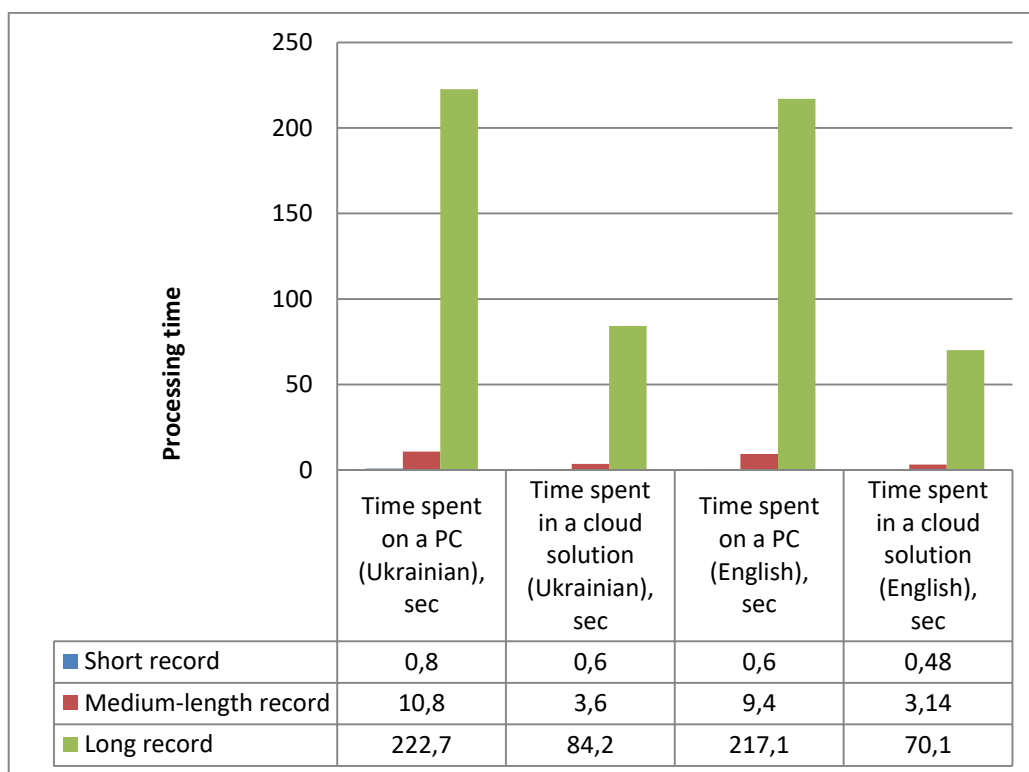


Fig. 4. Bar Chart of Time Spent on 5s, 60s and 240s-Long Audio Recordings

Conclusion

In order to reduce the appearance of false or distorted data during the conversion of a sound series into relevant text for further semantic analysis for input audio files in Ukrainian and English, a generalized model of incoming audio data summarization was proposed; the existing STT models (for turning audio data into text) were analyzed; the ability of the STT module to operate in Ukrainian was studied; STT module efficiency and timing for English and Ukrainian-based STT module operation were evaluated. The proposed model of the speaker's speech automatic annotation has two major functional modules: speech-to-text (STT) i summarization module (SUM). Two models were studied and improved for the STT module. For the English language, this is wav2vec2-xls-r-1b3 and for the Ukrainian language, this is Ukrainian STT model

(wav2vec2-xls-r-1b-uk-with-lm). wav2vec2, improved using the Ukrainian linguistic model, demonstrates the reduction of the word error level descriptor by almost 1,5 times, which influences the quality of word recognition from the audio and may potentially lead to obtaining higher-quality output text data. The application of a deep neural network at the input file noise suppression stage is also well-grounded as it provides for the increase in WER metric by nearly 25%. In order to estimate the timing for STT module operation, three English and Ukrainian audio recordings of various length (5s, ~60s & ~240s) were analyzed. The results demonstrated an obvious trend for accelerated obtaining of the output file through the application of the computational power of NVIDIA Tesla T4 graphic accelerator for the longest recording. The following research of the author is focused on the study of the methods of the obtained text summarization module efficiency.

References

- Liu, J., Wang, H. (2021), "An Analysis of the Educational Function of Network Platform from the Perspective of Home-School Interaction in Universities in the New Era", *2021 IEEE International Conference on Educational Technology (ICET)*, 2021, P. 112–116. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICET52293.2021.9563158>
- Ponomarova, H., Kharkivska, A., Petrichenko, L., Shaparenko, K., Aleksandrova, O., Beskorsa, V. (2021), "Distance Education In Ukraine In The Context Of Modern Challenges: An Overview Of Platforms", *International Journal of Computer Science & Network Security*, 21 (5), P. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.5.7>

3. Berrío-Quispe, M. L., Chávez-Bellido, D. E., González-Díaz, R. R. (2021), "Use of educational platforms and student academic stress during COVID-19," *2021 16th Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, P. 1–5. <https://doi.org/10.23919/CISTI52073.2021.9476308>
4. Malicieva, J., Kosenko, V., Malyyeva, O., & Svetlichnyj, D. (2019), "Creation of collaborative development environment in the system of distance learning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2 (8), P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.062>
5. Dong, Q., Ye, R., Wang, M., Zhou, H., Xu, S., Xu, B., & Li, L. (2021), "Listen, understand and translate: Triple supervision decouples end-to-end speech-to-text translation", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 35, No. 14, P. 12749–12759.
6. Gao, Jianqing, Wan, Genshun, Wu, Kui and Fu, Zhonghua (2022), "Review of the application of intelligent speech technology in education", *Journal of China Computer-Assisted Language Learning*, Vol. 2, No. 1, P. 165–178. DOI: <https://doi.org/10.1515/jccall-2022-0004>
7. Liu, J., Xiang, X. (2017) "Review of the anti-noise method in the speech recognition technology," *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, P. 1391–1394. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8283056>
8. Juang, Biing-Hwang, and Lawrence, R. Rabiner (2005), *Automatic speech recognition—a brief history of the technology development*, Georgia Institute of Technology, Atlanta Rutgers University and the University of California, Santa Barbara 1, 67 p.
9. Potamianos, G. (2009), "Audio-visual automatic speech recognition and related bimodal speech technologies: A review of the state-of-the-art and open problems," *2009 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition & Understanding*, P. 22–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/ASRU.2009.5373530>
10. Georgescu, A. L., Pappalardo, A., Cucu, H., & Blott, M. (2021), "Performance vs. hardware requirements in state-of-the-art automatic speech recognition", *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, No.1, P. 1–30.
11. Mohammed, A., Sunar, M. S., & hj Salam, M. S., (2021), "Speech recognition toolkits: a review", *The 2nd National Conference for Ummah Network 2021 (INTER-UMMAH 2021)*, No. 2, P. 250–255.
12. Kumar, T., Mahrishi, M., & Meena, G. (2022), "A comprehensive review of recent automatic speech summarization and keyword identification techniques", *Artificial Intelligence in Industrial Applications*, P. 111–126.
13. Kim, C. et al. (2019), "End-to-End Training of a Large Vocabulary End-to-End Speech Recognition System," *2019 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU)*, P. 562–569, DOI: <https://doi.org/10.1109/ASRU46091.2019.9003976>
14. Ping, L. (2022), "English Speech Recognition Method Based on HMM Technology," *2021 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, P. 646–649. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITBS53129.2021.00164>
15. Mykhailichenko, I., Ivashchenko, H., Barkovska, O., & Liashenko, O. (2022), "Application of Deep Neural Network for Real-Time Voice Command Recognition", *In 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916473>
16. Barkovska, O., Lytvynenko, V., (2022), "Study of the performance of neural network models in semantic analysis", *Modern trends in the development of information and communication technologies and management tools*, Vol.1, P. 136.
17. Barkovska, O., Kholiev, V., Lytvynenko, V. (2022), "Study of noise reduction methods in the sound sequence when solving the speech-to-text problem", *Advanced Information Systems*, No. 6.1, P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.08>
18. Xu, Y., Du, J., Dai, L. -R., and Lee, C. -H. (2015), "A Regression Approach to Speech Enhancement Based on Deep Neural Networks," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 23, No. 1, P. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2014.2364452>
19. Davydov, V., & Hrebenuk, D. (2020), "Development of the methods for resource reallocation in cloud computing systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 3 (13), P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.025>

Received 03.12.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барковська Олеся Юрївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Барковская Олеся Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электронных вычислительных машин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Barkovska Olesia – Ph.D (Engineering Sciences), Docent, Associate Professor Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОДУЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ МОВИ В ТЕКСТ У ЗАПРОПОНОВАНІЙ МОДЕЛІ АВТОМАТИЧНОГО АНОТУВАННЯ ПРОМОВИ СПІКЕРА

Предметом дослідження є модуль конвертації мови спікера в текст у запропонованій моделі автоматичного анотування промови спікера, що стає все більш затребуваним в Україні завдяки активному переходу спілкування, навчання, проходження тренінгів, співбесід, обговорення важливих питань тощо на форму онлайн. **Мета роботи** – скорочення появи хибних або спотворених даних під час перетворення звукового ряду в релевантний текст для подальшого семантичного аналізу. Для досягнення поставленої мети були виконані такі **завдання**: запропоновано узагальнену модель текстової сумаризації вхідних аудіоданих; проаналізовано наявні моделі STT (перетворення аудіоданих у текст); досліджено можливість роботи модуля STT з українською мовою; оцінено якість роботи модуля STT та таймінгу роботи з українською та англійською мовами. Запропонована модель автоматичного анотування промови спікера має два головних функціональних модулі: *speech-to-text* (STT) і *summarization module* (SUM). Для модуля STT досліджено та вдосконалено такі **моделі** лінгвістичного аналізу тексту: для англійської мови це *wav2vec2-xls-r-1b3*, а для української – *Ukrainian STT model (wav2vec2-xls-r-1b-uk-with-lm)*, математичним апаратом яких є нейронні мережі. Отримано такі **результати**: завдяки використанню додаткової української лінгвістичної моделі *wav2vec2* зменшується показник рівня помилок слів майже в 1,5 рази, що впливає на якість розпізнавання слів з аудіо й потенційно може сприяти отриманню більш якісних текстових даних на виході. Для оцінювання таймінгу роботи модуля STT було проаналізовано три аудіозаписи англійською та українською мовами різної довжини: 5 с, ~60 с та ~240 с. Результати показали помітну тенденцію прискорення отримання вихідного файлу за умови використання обчислювального ресурсу графічного прискорювача *NVIDIA Tesla T4* саме для найдовшого аудіозапису. **Висновки**. Використання глибокої нейронної мережі на етапі шумопригнічення у вхідному файлі є виправданим, оскільки забезпечує збільшення метрики WER майже на 25%, а збільшення обчислювальних потужностей графічного процесора та кількості потокових процесорів надають прискорення лише для вхідних аудіофайлів великого розміру. Подальші дослідження автора спрямовані на вивчення ефективності методів модуля сумаризації отриманого тексту.

Ключові слова: STT; текст; оброблення; анотація; реферат; аудіофайл; модель; навчання.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДУЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЧИ В ТЕКСТ В ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНОТИРОВАНИЯ РЕЧИ СПИКЕРА

Предметом исследования является модуль конвертации речи спикера в текст в предложенной модели автоматического аннотирования речи спикера, который становится все более востребованным в Украине из-за активного перехода общения, обучения, прохождения тренингов, собеседований, обсуждения важных вопросов и т.д. на форму онлайн. **Целью** работы является сокращение появления ложных или искаженных данных при преобразовании звукового ряда в релевантный текст для дальнейшего семантического анализа. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**: предложена обобщенная модель текстовой суммаризации входных аудиоданных; проанализированы существующие модели STT (превращение аудиоданных в текст); исследована возможность работы модуля STT на украинском языке; выполнена оценка качества работы модуля STT и тайминга работы на украинском и английском языках. Предлагаемая модель автоматического аннотирования речи спикера имеет два главных функциональных модуля: *speech-to-text* (STT) и *summarization module* (SUM). Для модуля STT исследованы и усовершенствованы следующие **модели** лингвистического анализа текста: для английского языка это *wav2vec2-xls-r-1b3*, а для украинского – *Ukrainian STT model (wav2vec2-xls-r-1b-ru-with-lm)*, математическим аппаратом которых являются нейронные сети. Получены следующие **результаты**: благодаря использованию дополнительной украинской лингвистической модели *wav2vec2* уменьшается показатель уровня ошибок слов почти в 1,5 раза, что влияет на качество распознавания слов по аудио и потенциально может привести к получению более качественных текстовых данных на выходе. Для оценки тайминга работы модуля STT было проанализировано три аудиозаписи на английском и украинском языках разной длины: 5 с, ~60 с и ~240 с. Результаты показали заметную тенденцию ускорения получения исходного файла при использовании вычислительного ресурса графического ускорителя *NVIDIA Tesla T4* именно для самой длинной аудиозаписи. **Выводы**. Использование глубокой нейронной сети на этапе шумоподавления во входном файле оправдано, поскольку обеспечивает увеличение метрики WER почти на 25%, а увеличение вычислительных мощностей графического процессора и количества потоковых процессоров предоставляют ускорение только для входных аудиофайлов большого размера. Последующие исследования автора сосредоточены на исследовании эффективности методов модификации суммаризации полученного текста.

Ключевые слова: STT; текст; обработка; аннотация; реферат; аудиофайл; модель; обучение.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Барковська О. Ю. Дослідження роботи модуля перетворення мови в текст у запропонованій моделі автоматичного анотування промови спікера. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.005>

Barkovska, O. (2022), "Research into speech-to-text transformation module in the proposed model of a speaker's automatic speech annotation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.005>

S. SEMENOV, Z. Z. MINJIAN, S. YENHALYCHEV, L. SMIDOVYCH

GENERALIZED MODEL OF THE ADS-B UNMANNED AERIAL VEHICLE DATA TRANSMISSION PROCESS IN A STEGANOGRAPHIC SYSTEM

The subject of the article is a model of the ADS-B data transmission process of an unmanned aerial vehicle in a steganographic system using direct spectrum expansion technology. **The aim** of the publication is to improve the security of unmanned aerial vehicles with an integrated ADS-B system. Particular scientific **tasks**: analysis of basic methods of ADS-B format data protection; development of the scheme of ADS-B drone data transfer in steganographic system with the use of direct spectrum expansion technology; improvement of the model of ADS-B drone data transfer in steganographic system with the use of direct spectrum expansion technology; determination of qualitative and quantitative characteristics as well as security properties of ADS-B format data. The following research **results** were obtained: as the result of the scientific works analysis the hypothesis about the perspectives of the ADS-B format steganographic data protection usage was put forward; the scheme of an unmanned aerial vehicle ADS-B data transmission in the steganographic system with the usage of the direct spectrum spreading technology was developed; the main safety properties as well as the safety parameters and characteristics of the ADS-B format information signal were formulated; the generalized model of an unmanned aerial vehicle ADS-B data transmission was further developed. This will improve the safety of UAVs. The advantages and disadvantages of the model were **revealed**, which allowed to determine the priority of further research and possible promising ways of solving the assigned tasks.

Keywords: unmanned aerial vehicles; security; ADS-B system; steganography; direct spectrum enhancement technology; data protection.

Introduction

Under the conditions of increased demand for the volume and speed of cargo and passenger delivery, the intensity of air transportation is steadily increasing every year. This, in turn, necessitates an increase in operational flexibility while maintaining or improving safety. The safe organization of increasingly large and complex air traffic requires the use of technologies that are more advanced, tools and means. One such important tool in the air traffic management process is aerial surveillance, in particular automatic dependent surveillance of the broadcast-type ADS-B.

Given the fact of increasing attention to unmanned aerial vehicles (UAVs), the issue of using ADS-B technology in them is also relevant.

However, ADS-B lacks explicit mechanisms to protect confidentiality, integrity and availability of data transmitted between UAVs and controlling personnel (air traffic controllers), which makes such system vulnerable to threats of cyberterrorist nature, which are especially relevant in connection with the modern development of computer technologies and programmable radio (SDR – Software Defined Radio). Therefore, the problem of increasing the security of the ADS-B data transmission process of an unmanned aerial vehicle is urgent.

Literature review

Article [1] provides an overview of the shortcomings of the ADS-B system. In addition, the paper analyzes a number of countermeasures aimed at reducing the risks of cyberattacks. However, the authors of the article do not focus on the highest-priority areas in the issue of improving ADS-B security. It should be emphasized that all the examples under consideration are more related to guided aircraft (aircraft and helicopters) and do not touch the problems of UAV.

Work [2] presents the results of comparative studies of methods to improve cybersecurity of UAVs with embedded ADS-B system. It analyzes the main types of cyber attacks on UAVs with embedded ADS-B system, developed a taxonomy of cyber attacks of modification and forced implementation of ADS-B messages. In addition, a broad review of cryptographic methods to enhance ADS-B data security was performed. The results of the review led to conclusions about their disadvantages in operation in the UAV management system, including the increased burden on the generation of public keys; the threat in case of a private key; increased hardware requirements, etc.

Also, the paper proposed the use of steganographic data methods to improve the security of the ADS-B UAV system.

In [3] an analytical report on promising directions and modern methods of steganographic data protection is presented. The paper notes the promising direction associated with the use of direct spectrum expansion technology in steganographic systems.

The analysis of the communication system with direct spectrum spreading, as well as the feasibility and effectiveness of using this technology are considered in [4]. Unfortunately, this analysis is limited only to the military field of use, which reduces the practical value of this research.

The paper [5] describes the technology of direct spectrum enhancement for data hiding in audio. The article shows the advantage of using this technology for data security.

In [6] the research of the technology of direct spectrum expansion in steganographic system is presented in a practical application to data hiding in images. The analysis of this paper allowed us to conclude about the wide possibilities of this technology in the implementation of different types of data.

The issue of using the technology of direct spectrum expansion in steganographic system is disclosed in [7]. It describes a mathematical model and a structural scheme of a steganographic information protection system using complex discrete signals of direct spectrum expansion technology. The paper modifies the structural scheme of receiving-transmitting information in a noise-protected digital communication system using the technology of direct spectrum spreading. This technology can be the basis for further research in the framework of the problem of increasing the security of UAV using the ADS-B system.

The analysis of these works allowed us to conclude that the problem of security of UAV with built-in ADS-B system is topical, the need to develop new methods and means to improve their security. In addition, the results of the analysis allowed us to put forward a hypothesis about the possibility of using steganographic methods of data protection to improve the security of UAV with built-in ADS-B system. The basis for the developed system can be the technology of direct spectrum expansion.

Main part

By analogy with the steganographic system model considered in [7], let us introduce and justify the basic operators of steganographic transformation of ADS-B UAV data. In the developed model, it is necessary to take

into account several factors, which have not found their representation in known models. Firstly, it is necessary to consider the factor that the direct spectrum expansion technology is proposed to be used as the basis for ADS-B steganographic data protection. Secondly, it is important to consider the factor of objective environmental interference and the means of their allocation. Thirdly, it is necessary to consider the peculiarities of format of transmitted digital data from ADS-B UAV devices.

The updated ADS-B UAV data transmission flowchart in the steganographic system using direct spectrum expansion technology is shown in fig. 1.

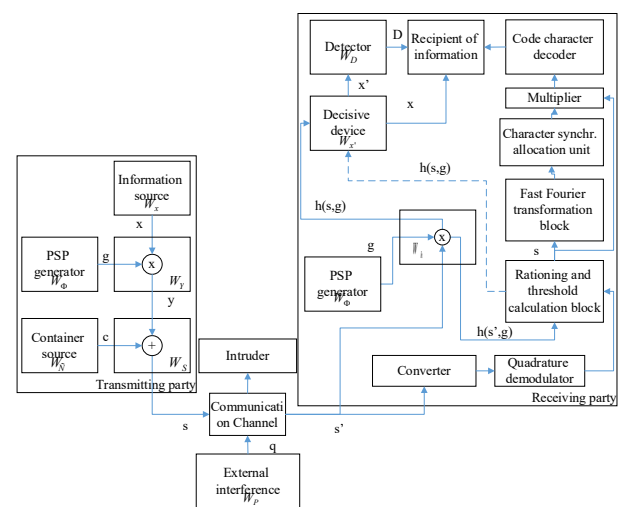


Fig. 1. Structure diagram of ADS-B UAV data transmission in steganographic system with the use of direct spectrum expansion technology

The information signal, which is formed on the basis of the digital identifier and is supposed to be embedded into the container of the ADS-B UAV data format, we denote as $x \in X$, and the operator, which formalizes the process of identifier formation, we denote as W_x . The information signal $x \in X$ in steganographic system is modeled by means of its multiplication by the expanding code signal $g = \Phi_i \in \Phi$ – a noise-like pseudo-random sequence from an ensemble $\Phi = \{\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_{M-1}\}$ of weakly correlated discrete signals. Functioning of a pseudo-random sequence generator is formalized by operator W_Φ . The extended signal can be represented in the form of the relation $y = xg \in Y$.

If we take into account the fact that the processes of information signal $x \in X$ formation, pseudo-random sequence $g = \Phi_i \in \Phi$ and extended signal $y = xg \in Y$

are equivalent to the processes taking place in a broadband communication system with direct spectrum expansion, the modulation process can be formalized in the form of mapping $\phi: X \times \Phi \rightarrow Y$.

The process of operation of the ADS-B UAV tool is represented by the operator W_S . Note that the embedding of the digital signal identifier in the ADS-B UAV data container can be described as

$$s = y + c, \quad (1)$$

where the modified ADS-B UAV data s is a mapping

$$\psi: Y \times C \rightarrow S \quad (2)$$

of the filled container $s = \psi(y, c)$, realized by the operator W_S of embedding the extended signal y into the container c using a complex discrete signal g . In this case S – is a set of filled containers.

Thus, the empty data container ADS-B UAV c should be interpreted as a noise e in the communication channel, and the process of embedding the information signal in the container can be represented as a process of transmitting an enhanced signal below the noise level in a broadband covert communication system

Taking into account the factor of external interference and impacts requires its representation in the form of a block of interference in the communication channel and formalized by the operator W_p . In this case, the result of interference can be represented as $s' = sq$, where q – external interference.

As in a digital communication system, the receiving side of a steganographic system is tasked with extracting a useful signal from a mixture of noise (an empty container). Thus, the transmission of the filled container $s = y + c$ is actually the transmission of a useful signal below the noise level, i.e. such a covert transmission of information in which the transmission itself is indistinguishable from noise (distortion of the container is not detected). Since the code signal $g = \Phi_i \in \Phi$ by its statistical properties similar to noise, then the resulting filled data container ADS-B UAV (as well as enhanced signal $y = xg$) is slightly distinguishable from an empty container (from the noise in the communication channel), which allows to implement a covert data transmission.

The process of extracting a UAV identifier from an ADS-B format data container at the receiving end of a steganographic system is similar to the operation of the receiving end of a broadband communications system. Filled ADS-B UAV data container s' is processed by the

correlation receiver. A multiplication procedure s' is performed to a synchronized copy of the expanding signal g . This calculates the correlation coefficient, the value of which determines the decision making rule:

$$\begin{aligned} h(s', g) &= s'g = xgg + cg = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} x(\Phi_{i_z} \Phi_{i_z}) + \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} c\Phi_{i_z} = x + h(c, g), \end{aligned}$$

where $h(c, g)$ – correlation coefficient of the initial ADS-B UAV signal c and expanding code signal.

The process of calculating the correlation coefficient and making a decision about the received information signal ADS-B UAV can be formalized in general terms by the operators W_h and $W_{x'}$, respectively.

The result of the operation $W_{x'}$ in the form of an evaluation x' is processed by a detector designed to confirm the authenticity of the identifier x' . This procedure can be formalized by the operator W_D . The formalized evaluation of the authenticity of the identifier x' and the result of the detector operation are then output to the control device.

When describing the receiving part of ADS-B data transmission systems, consider the signal preprocessing process in the signal converter, quadrature demodulator, and normalization and threshold calculation unit.

Signal registration and recording can be performed by Software Defined Radio (SDR) hardware and software [8]. For example, based on the PXI 1062 platform [9], with the NIPXI 5600 frequency reduction module and the NIPXI 5142 ADC [10]. The output signals of this converter are samples of in-phase and quadrature components, the frequency spectrum of which is shifted to the region of zero intermediate frequency.

The quadrature counts of the complex signal go to the quadrature demodulator, where the envelope of the input signal s' is extracted. The normalization block normalizes the demodulated signal in the range from 0 to 1 and calculates the threshold.

In [11] an example is presented when the signal amplitude is subject to random fluctuations as a result of interference. Figure 2 shows a de-modulated signal from the output of the quadrature demodulator of one of the ADS-B packages, illustrating this practical case.

To reduce the probability of error when demodulating such a signal, it is proposed to perform pre-processing in the block of normalization and calculation of the threshold. This will increase the accuracy of the extraction of symbolic synchronization signals from the received message.

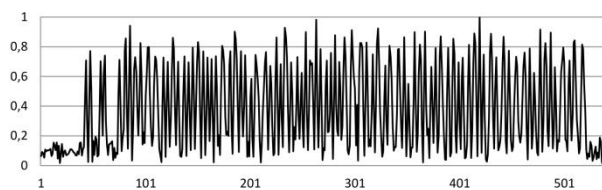


Fig. 2. Example of quadrature demodulator output signal

The analysis of the presented generalized model and the scheme of steganographic ADS-B identifier transmission system has shown that during the element-by-element addition of the modulated message with the ADS-B information signal a signal with new properties is formed. This process can be associated with the superposition of errors on the useful signal. In this case, only knowledge about the properties of the signal g makes it possible to extract the identifier, and taking into account the most important characteristics in the setup and configuration of the steganographic system will increase the level of security of the identifier.

The qualitative characteristic of the system to a large extent depends on such indicators as its noise immunity, stealth, resistance to unauthorized extraction, destruction and modification. These indicators have a great influence on the security of steganographic communication channel. Therefore, when organizing information exchange with ADS-B format data, it is necessary to take these properties into account.

It can also be noted that in a number of scientific studies [12 – 15] among the properties that characterize the security of signals, the following are noted: correlation, ensemble and structure properties.

In addition, the conducted research showed that the safety of the ADS-B UAV identifier transmission process is affected by the following characteristics: communication channel bandwidth, time of signal transmission and processing, etc.

Based on the above it can be concluded that the proposed model of ADS-B UAV data transfer in

steganography system using direct spectrum enhancement technology can be used to assess the safety level of the aircraft based on the composite index

$$F_{sec} = f(PR_{sign}, CH_{link}, CH_{steg}),$$

where PR_{sign} – signal properties;

CH_{link} – link characteristics;

CH_{steg} – steganographic system characteristics.

Direct estimation of the specified characteristics and properties within the framework of the generalized model is not possible. Therefore, the study of the characteristics and properties of the complex safety indicator is possible through the implementation of mathematical models of different configuration. Such models will be the object of further research.

Conclusion

The analysis of methods to improve the cybersecurity of unmanned aerial vehicles with built-in ADS-B system, as well as promising directions in the development of formalized data protection systems was carried out. Conclusions are made about the promising direction of steganographic protection of ADS-B UAV format data.

An analysis of steganographic data protection methods has been made. A promising direction of direct spectrum enhancement technology has been singled out.

A scheme of ADS-B UAV data transmission in steganographic system with the use of direct spectrum enhancement technology has been developed.

On the basis of the developed scheme the generalized ADS-B UAV data transmission model was further developed. The model differs from the known ones by inclusion of steganographic data protection system into the existing information exchange process using the direct spread spectrum technology. This will improve the cybersecurity of the UAV with the built-in ADS-B system.

References

1. Manesh, Mohsen Riahi & Kaabouch, Naima (2017), "Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Vol. 19 (C), P. 16–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.10.002>
2. Semenov, S., & Zhang, M. J. (2022), "Comparative studies of methods for improving the cyber security of unmanned aerial vehicles with the built-in ADS-B system", *Advanced Information Systems*, 6 (4), P. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.4.10>
3. Kuznetsov, A., Serhiienko, R., Kovtun, V., Botnov, A. (2010), "Use of Complex Discrete Signals for Steganographic Information Security", *Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP2010)*, P. 143 – 146.
4. Yihong, Gao (2022), "The analysis on the direct sequence spread spectrum communication system", *Proc. SPIE 12175, International Conference on Network Communication and Information Security (ICNCIS 2021)*, Vol. 12175. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2628421>

5. Kuznetsov, A, Onikiychuk, A, Peshkova, O, Gancarczyk, T, Warwas, K, Ziubina, R. (2022), "Direct Spread Spectrum Technology for Data Hiding in Audio", *Sensors (Basel)*, Vol. 22 (9), P. 3115–3138. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093115>
6. Kuznetsov, A., O. Smirnov, A. Arischenko, I. Chepurko, A., Onikiychuk, and Kuznetsova, T. (2019), "Pseudorandom Sequences for Spread Spectrum Image Steganography" *In Proceedings of the International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) Co-Located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks*, Vol. 2654.
7. Smirnov, O. A. (2012), "Method steganography hiding and withdrawal given in spatial area of the scenes with use the direct expansion of the spectrum", *Information Processing Systems*, Vol. 3 (101), P. 56–61.
8. Natarajan, Thangadurai & Kh, Chetna. (2017), "A Review on Recent Trends in Software Defined Radio Design and Applications", *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 6, P. 1021–1025.
9. Iranian, M. E., Mohseni, M., Aghili, S., Parizad, A., Baghaee, H. R. and Guerrero, J. M. (2022), "Real-Time FPGA-Based HIL Emulator of Power Electronics Controllers Using NI PXI for DFIG Studies", in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 10, No. 2, P. 2005–2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3023100>
10. Gaurav, Jajoo, Yogesh, Kumar, Sandeep, Kumar Yadav, Bibhas, Adhikari, Ashok, Kumar, "Blind signal modulation recognition through clustering analysis of constellation signature", *Expert Systems with Applications*, Vol. 90, 2017, P. 13–22, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.07.053>
11. Soulat, H., Stephen, E.P., Beck, A.M. et al. (2022), "State space methods for phase amplitude coupling analysis". *Scientific Reports* 12, No. 15940. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18475-3>
12. Kuznetsov, A., Smirnov, A., Gorbacheva, L., Babenko, V. (2020), "Hiding Data in Cover Images Using a Pseudo-Random Sequences", *In Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Vol. 2608, P. 646–660.
13. Kostenko, P. YU., Simonenko, C. N., Semenov, S. G., Vasyuta, K. S. (2009), "Povysheniye skrytnosti khaoticheskikh signalov pri peredache binarnykh soobshcheniy", *Radioelektronika*, Vol. 52, No. 8, P. 13–25.
14. Knyazev, V., Lazurenko, B., Serkov, A. (2022), "Methods and tools for assessing the level of noise immunity of wireless communication channels", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (19), P. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.092>
15. Ruban, I., Kuchuk, H., Kovalenko, A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Kharkiv., No. 1 (1), P. 75–81.

Received 21.12.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Семенов Сергій – доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: s_semenov@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4472-9234>

Семенов Сергей – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, профессор кафедры кибербезопасности и информационных технологий, Харьков, Украина.

Semenov Serhii – doctor of technical sciences, professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, professor department cyber security and information of technologies, Kharkiv, Ukraine.

Миньянг Чанг Чжецзян – Nova intelligent technology co. Ltd, Чжецзян, Китай e-mail: minjianzhang.s@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-1689>

Миньянг Чанг Чжецзян – Nova intelligent technology co. Ltd, Чжецзян, Китай.

Minjian Zhang Zhejiang – Nova Intelligent Technology Co. Ltd, Zhejiang, China.

Енгальчев Сергій – аспірант, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, кафедра кібербезпеки та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: Ser.engalichev@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5298-2251>

Енгальчев Сергей – аспирант, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, кафедра кибербезопасности и информационных технологий, Харьков, Украина.

Yenhalychев Serhii – graduate student, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine.

Смидович Леонід Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: lsonlinel@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6156-9506>

Смидович Леонид Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", доцент кафедры компьютерных наук и информационных технологий; Харьков, Украина.

Smidovych Leonid Serhiyovych – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies; Kharkiv, Ukraine.

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ADS-B БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА В СТЕГANOГРАФІЧНІЙ СИСТЕМІ

Предметом вивчення статті є модель процесу передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата в стеганографічній системі з використанням технології прямого розширення спектра. **Мета** публікації – підвищення безпеки безпілотних літальних апаратів із вбудованою системою ADS-B. Конкретні наукові **завдання**: аналіз основних методів захисту даних формату ADS-B; розроблення схеми передачі даних ADS-B безпілотних літальних апаратів у стеганографічній системі з використанням технології прямого розширення спектра; удосконалення моделі процесу передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата в стеганографічній системі з використанням технології прямого розширення спектра; визначення якісних і кількісних характеристик, а також властивостей безпеки даних формату ADS-B. Отримано такі **результати** досліджень: унаслідок аналізу наукових робіт висунуто гіпотезу про перспективність використання стеганографічного захисту даних формату ADS-B; розроблена схема передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата в стеганографічній системі з використанням технології прямого розширення спектра; сформульовано основні властивості безпеки, а також показники та характеристики безпеки інформаційного сигналу формату ADS-B; отримала подальший розвиток узагальнена модель передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата, що відрізняється від відомих залученням у процес інформаційного обміну, стеганографічної системи захисту даних із використанням технології прямого розширення спектра. Це дозволить підвищити безпеку БПЛ. **Виявлено** переваги й недоліки моделі, що дало змогу визначити пріоритетність подальших досліджень і можливі перспективні шляхи вирішення поставлених завдань.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; безпека; система ADS-B; стеганографія; технологія прямого розширення спектра; захист даних.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ADS-B БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СТЕГANOГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Предметом изучения в статье является модель процесса передачи данных ADS-B беспилотного летательного аппарата в стеганографической системе с использованием технологии прямого расширения спектра. **Цель** публикации – повышение безопасности беспилотных летательных аппаратов со встроенной системой ADS-B. Частные научные **задачи**: анализ основных методов защиты данных формата ADS-B; разработка схемы передачи данных ADS-B беспилотных летательных аппаратов в стеганографической системе с использованием технологии прямого расширения спектра; усовершенствование модели процесса передачи данных ADS-B беспилотного летательного аппарата в стеганографической системе с использованием технологии прямого расширения спектра; определение качественных и количественных характеристик, а также свойств безопасности данных формата ADS-B. Получены следующие **результаты** исследований: вследствие анализа научных работ выдвинута гипотеза о перспективности использования стеганографической защиты данных формата ADS-B; разработана схема передачи данных ADS-B беспилотного летательного аппарата в стеганографической системе с использованием технологии прямого расширения спектра; сформулированы основные свойства безопасности, а также показатели и характеристики безопасности информационного сигнала формата ADS-B; получила дальнейшее развитие обобщенная модель передачи данных ADS-B беспилотного летательного аппарата, которая отличается от известных включением в существующий процесс информационного обмена, стеганографической системы защиты данных с использованием технологии прямого расширения спектра. Это позволит повысить безопасность БПЛ. **Виявлені** достоїнства і недоліки моделі, що дозволило визначити пріоритетність подальших досліджень і можливі перспективні шляхи рішення поставлених задач.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; безопасность; система ADS-B; стеганография; технология прямого расширения спектра; защита данных.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Семенов С., Міньян Ч. Ч., Енгаличев С., Смідович Л. Узагальнена модель процесу передачі даних ADS-B безпілотного літального апарата в стеганографічній системі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.014>

Semenov, S., Minjian, Z. Z., Yenhalychev, S., Smidovych, L. (2022), "Generalized model of the ADS-B unmanned aerial vehicle data transmission process in a steganographic system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (22), P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.014>

Г. ФЕДОРЕНКО, Г. ФЕСЕНКО, В. ХАРЧЕНКО

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ГАРАНТОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Предметом дослідження в статті є методи виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. **Мета роботи** – розроблення основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. У статті розв’язуються такі **завдання**: аналіз наявних підходів щодо застосування традиційних одиничних та комбінованих, а також нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розроблення класифікаційної таблиці методів виявлення вибухонебезпечних предметів за фізичними принципами, аналіз переваг та недоліків розглянутих методів виявлення вибухонебезпечних предметів, створення порівняльної таблиці методів виявлення вибухонебезпечних предметів, формулювання основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Застосовуються такі **методи**: порівняння, абстрагування, аналіз і синтез, наукова індукція. Здобуто такі **результати**: проаналізовано особливості наявних традиційних і нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів. Запропоновано класифікацію методів виявлення вибухонебезпечних предметів з урахуванням параметрів, що впливають на ймовірність виявлення та продуктивність. У табличному вигляді запропоновано результати порівняльного аналізу методів виявлення вибухонебезпечних предметів за такими показниками: тип взаємодії з вибухонебезпечними предметами, тип платформи, потенційна продуктивність, підтримка інформаційних технологій, параметри якості, економічні показники. Сформульовано основні положення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. **Висновки**. Низька продуктивність наявних методів не дає змоги швидко й ефективно розчищати забруднені вибухонебезпечними предметами території, що призводить до значної кількості вражень і загибелі людей унаслідок підриву вибухонебезпечних предметів. Самостійне використання окремих методів виявлення не може суттєво збільшити ймовірність виявлення вибухонебезпечних предметів. Для підвищення продуктивності та безпеки виконання робіт із пошуку та знешкодження вибухонебезпечних предметів доцільно використовувати безпілотні інтелектуальні платформи доправлення інформаційно-вимірювальних засобів.

Ключові слова: методи виявлення та розпізнавання; вибухонебезпечні предмети; безпілотні апарати; продуктивність; ймовірність виявлення.

Вступ

Мотивація

У різних галузях діяльності людини виникає необхідність пошуку об’єктів у товщі середовища, що їх вкриває. Це археологічні пошуки, обстеження підземних комунікацій, контроль за пересуванням заборонених предметів, пошук вибухонебезпечних предметів (ВНП), гуманітарне розмінування, операції з пошуку людей під завалами та багато іншого. Щодо рівня небезпеки, техногенних загроз та негативних наслідків для екології значну небезпеку створюють забруднення територій ВНП.

Події, що спричиняють забруднення територій ВНП, трапляються внаслідок порушення правил зберігання ВНП, терористичних актів, збройних конфліктів та війн.

Найбільш руйнівними й масштабними за наслідками є збройні конфлікти та війни, які останні десять років трапляються все частіше. Так, у період

з 2012 до 2022 рр. збройними конфліктами охоплено 62 країни [1].

Найбільш масштабна війна за останні десятиліття сталася в Україні внаслідок агресії з боку російської федерації.

Збільшення кількості та масштабів конфліктів, інтенсивності використання боєприпасів, а також повільне очищення забруднених територій призводить до зростання територій, забруднених ВНП, і збільшення вражень і загибелі людей унаслідок підриву ВНП.

Вибухи ВНП спричиняють важкі поранення та загибель значної кількості осіб, до того ж необхідно зазначити, що найбільше потерпає цивільне населення, зокрема діти.

Показники, які характеризують процеси пошуку та розпізнавання ВНП, розглянемо за чотирма основними напрямками:

– площа забруднення ВНП;

– кількість нещасних випадків (вражень від вибухів);

- терміни очищення територій;
- економічна оцінка.

Мета статті полягає в розробленні основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Для реалізації цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**: проаналізувати наявні підходи щодо застосування традиційних одиничних і комбінованих, а також нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розробити класифікаційну таблицю методів виявлення вибухонебезпечних предметів за фізичними принципами, проаналізувати переваги та недоліки розглянутих методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розробити порівняльну таблицю методів виявлення вибухонебезпечних предметів, сформулювати основні положення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів та обґрунтувати напрями подальших досліджень.

Аналіз проблеми та наявних методів виявлення вибухонебезпечних предметів

Площа забруднення ВВП

За оцінками міжнародних організацій, таких як ООН та ОБСЄ, забруднені площі у світі сягають мільйони квадратних кілометрів, крім того, на думку експертної групи Асоціації саперів України, потенційно-небезпечні території, які можуть містити ВВП і підлягають обстеженню для визначення рівня забруднення, становлять щонайменше 132 023 км² [2]. Україна є однією з найбільш замінованих країн світу.

Кількість нещасних випадків (уражень від вибухів)

Території, що забруднені ВВП, є вибухонебезпечними об'єктами (ВНО). Нещасні випадки внаслідок вибуху ВВП призводять до важких поранень і загибелі тисяч людей.

На рис. 1 наведена інформація про жертви від вибухів ВВП за період з 2013 до 2020 рр., а з огляду на війну в Україні 2022 р., ці трагічні показники, імовірно, зростатимуть [3].

До того ж необхідно зазначити, що від ВВП найбільше потерпає цивільне населення. Згідно зі статистикою, жертвами вибухів ВВП стають 10 % військових і 90 % цивільних осіб, зокрема значна

кількість дітей. Останні роки кількість загиблих дітей зростає (рис. 2) [1].

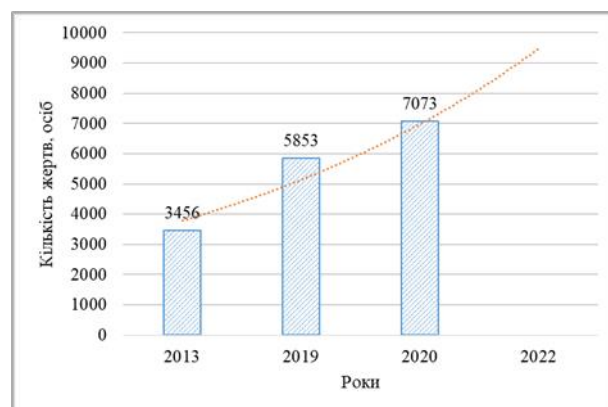


Рис. 1. Статистичні показники щодо жертв від вибухів ВВП

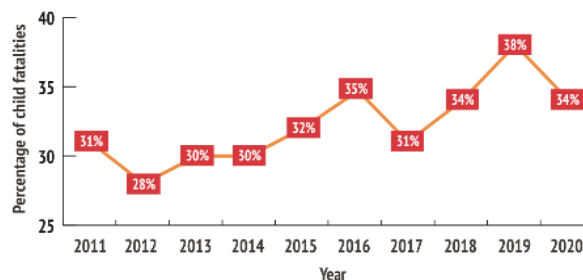


Рис. 2. Відсоток загиблих дітей протягом 2010–2020 рр.

Терміни очищення територій

Розчищення територій від забруднення ВВП потребує великих фінансових витрат і триває десятиріччями. Відповідно до заяви представників Великої Британії, 2020 р. було повністю завершено розмінування території Фолклендських (Мальвінських) островів, що були забруднені ВВП внаслідок війни між Великою Британією та Аргентиною 1982 р. Процес тривав 38 років і фактична середня швидкість становить трохи більше ніж 320 км² на рік. Королівство Камбоджа, де роботи з очищення території тривають понад 30 років, оголосило, що зможе звільнитися від мін лише до 2025 р.

Згідно з інформацією, наведеною в праці [1], упродовж 2020–2021 рр. середні темпи знешкодження залишків касетних боєприпасів становлять 63,39 км² та 61,07 км² 2020 та 2021 рр. відповідно (без урахування робіт в Україні). Показники щодо очищення території України від ВВП, згідно з дослідженням [4], подані в табл. 1.

Таблиця 1. Щорічні темпи очищення території України від ВНП

Період	Кількість залучень піротехнічних підрозділів	Кількість знешкоджених ВНП, од.	Площа очищеної території, кв. км
2014	7 090	151 100	30,30
2015	8 081	50 152	106,67
2016	10 327	80 011	81,53
2017	13 167	112 728	688,36
2018	10 917	168 812	867,20
2019	11 891	67 415	69,49
2020	14 166	73 375	49,39
2021	12 909	89 614	45,52

Економічна оцінка

Війни завжди призводять не тільки до людських втрат, а й завдають значних економічних збитків, як в період воєнних дій, так і після їхнього завершення. Українська економіка, за прогнозами, скоротиться на 45 %, а загальні збитки країни вже оцінюються в мільярди доларів. Тільки в сільському господарстві збитки становлять 4,3 млрд доларів США [5]. Україні потрібно залучати значні фінансові ресурси для розчищення територій. Орієнтовна вартість обстеження та розмінування сільськогосподарських угідь України становить близько 436 млн доларів США. За оцінками Асоціації саперів України, ринкова вартість послуг із гуманітарного розмінування становить 3–4 долари США/м².

Особливості проведення аналізу методів виявлення ВНП

Ураховуючи важливість розчищення територій від ВНП, численні дослідження проводилися щодо: аналізу та класифікації наявних методів пошуку [6–8], сучасних більш ефективних методів, зокрема з одночасним використанням декількох методів, що ґрунтуються на використанні комбінованих методів, коли пошук ведеться зокрема із застосуванням безпілотних апаратів [9–11]. Досліджуються та випробовуються також біологічні методи пошуку, що ґрунтуються на особливих властивостях тварин [12], комах [13] та мікроорганізмів [14].

Необхідно зазначити, що, попри великий обсяг досліджень, класифікації методів розроблені без урахування чіткого розрізнення демаскувальних ознак ВНП, фізичних принципів виявлення й розпізнавання, а також платформ, що використовуються для доправлення устаткування до місця пошуку.

Аналіз показує, що наявні методи виявлення й розпізнавання, залежно від характеристик об'єктів пошуку та навколишніх умов, мають обмеження в імовірності виявлення й не забезпечують необхідного рівня продуктивності пошуку.

Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розроблення методології, моделей та інформаційних технологій створення та використання багатопільових безпілотних інтелектуальних систем (ББІС) пошуку та знешкодження ВНП.

Для проведення аналізу методів виявлення ВНП визначимо такі елементи системи: ВНП, перешкоди (покривне та навколишнє середовище); інформаційно-вимірвальні засоби (сенсори), які використовують методи виявлення; платформи, що здійснюють доправлення інформаційно-вимірвальних засобів (ББІС), та елементи інформаційних технологій (ІТ).

Вибухонебезпечні предмети

З огляду на те, що методи виявлення визначаються залежно від об'єктів пошуку та їхніх характеристик, почнемо з розгляду саме об'єктів пошуку (ВНП) та їхніх демаскувальних ознак. На сьогодні розроблено, виготовляється та застосовується понад 700 видів ВНП [15]. Доправлення може здійснюватися різними способами: вручну, літальними апаратами й реактивними снарядами. Демаскувальні ознаки ВНП обумовлені низкою факторів, основні з яких мають місце практично завжди:

- наявність вибухової речовини (ВР);
- наявність локально розташованої маси металу чи іншого матеріалу;
- характерна форма;
- неоднорідності покривного середовища (порушення поверхні ґрунту, кольору рослинності, снігового покриву тощо).

Додатковими демаскувальними факторами є:

- дотові лінії управління;
- годинникові механізми або електронні таймери;
- сейсмічні, магнітні або оптичні датчики цілі;
- антени з радіоприймачем.

Отже, ВВП може виявлятися переважно завдяки трьом факторам: наявності хімічної речовини; характерної конструкції корпусу; порушення ґрунту. Демаскувальні ознаки та перешкоди визначають методи виявлення, розпізнавання та набір інформаційно-вимірвальних засобів.

Для пошуку нових методів виявлення необхідно проаналізувати наявні методи з урахуванням фізичних властивостей демаскувальних ознак та інформаційно-вимірвальних засобів (сенсорів). Тому наведемо класифікацію відомих методів за фізичними принципами, що використовуються для виявлення та розпізнавання ВВП.

Методи виявлення

На відміну від інших авторів [9, 10], нами запропоновано підхід до класифікації, який відрізняється тим, що методи виявлення розглядаються за фізичними принципами взаємодії з демаскувальними ознаками та окремо від інформаційно-вимірвальних засобів і платформ, на яких ці засоби розташовані. Класифікація з урахуванням цих підходів наведена в табл. 2. Розглядати основні методи необхідно разом із параметрами, що впливають на ймовірність виявлення та продуктивність.

Таблиця 2. Класифікація методів виявлення за фізичними принципами

№	Метод	Характеристика
1	Механічний	Контактний
		Механізований
2	Електромагнітний	Радіохвильовий
		Оптичний
		Рентгенівський
		Гамма-випромінювання
3	Хімічний	Газоаналітичний
		Біофізичний
4	Магнітний	Магнітометричний
5	Акустичний	Сейсмоакустичний

До механічних методів виявлення та знешкодження ВВП належать ручні, коли пошук і розмінування виконуються безпосередньо людиною, і механізовані, що виконуються спеціальними

броньованими машинами. Сучасні машини розмінування є більш безпечними та ефективними в розмінуванні ВВП із вмістом вибухівки до 15 кг (наприклад, міни, саморобні вибухові пристрої та касетні боєприпаси). Принцип дії цього методу ґрунтується на механічному пошуку та знешкодженні ВВП. Робочим елементом машин для розмінування є приводи з цівками, фрезами, культиваторами та спеціальними захватами [16]. Для підвищення якості знешкодження застосовуються комбіновані системи, наприклад, культиватора та цівків. Такі платформи багатofункціональні, на них можна встановлювати різні інструменти, системи пошуку, навігації, дистанційного керування тощо. Основні технічні характеристики розглянемо на прикладі платформи *MineWolf MW370* компанії *Pearson Engineering*: вага 23 т, ширина очищення 2,75 м, глибина очищення до 350 мм, швидкість очищення до 2,3 км/год, продуктивність розмінування до 30 000 м²/день, витрати палива 40–50 л/г і відстань дистанційного керування до 1000 м [17].

Отже, механічний метод виявлення та розмінування є простим, але забезпечує високу ймовірність виявлення та знешкодження ВВП, а потужний броньований захист і системи дистанційного керування зменшують ризик травмування технічного персоналу.

Недоліки:

- незначна продуктивність та обмеженість використання залежно від рельєфу (неможливість працювати на мокрому та кам'янистому ґрунті, на уклінах понад 35°);
- високі вартість обладнання та витрати на виконання робіт;
- певні пошкодження екології.

Електромагнітні методи – це загальна назва групи методів, що працюють у різних частотних діапазонах і широко застосовуються для виявлення, побудови зображень та визначення властивостей об'єктів, що розташовані, зокрема, в оптично непрозорих середовищах, таких як ґрунт, бетон, цегляна кладка, асфальт, камінь, дерево та лід. Виявлення ВВП за допомогою електромагнітних методів ґрунтується на відмінності електромагнітних властивостей об'єкта та перешкод.

Умовно електромагнітне випромінювання, залежно від використовуваних частот, поділяється на: радіохвильове, оптичне, іонізуюче (рентгенівське та гамма-) випромінювання.

Системи, створені на базі цих методів, відрізняються робочою частотою, смугою електромагнітного спектра, типом сигналів, що передаються, інтерпретацією відбитих сигналів, типом передавача та приймача, а також алгоритмами оброблення.

Радіохвильовий метод – це найбільш поширений метод виявлення. На базі цього методу побудовані металодетектори (*Metal Detector*, MD), георадари (*Ground Penetrating Radar*, GPR), мікрохвильові радары (MWR), радары міліметрового діапазону (MMWR), радары електроімпедансної томографії (EIT).

Метод електромагнітної індукції (EMI) використовується в металодетекторах. Переваги цього методу – здатність виявляти металеві предмети розміром меншим за 1 см на глибині 50 см [18], незалежність від погодних умов і вологості ґрунту, низька вартість.

Недоліки методу:

- нездатність виявляти ВНП із незначним вмістом металу (наприклад, у пластиковому корпусі);
- неможливість розрізнити ВНП та металеві уламки, що спричиняє високий відсоток помилкових тривог;
- мала дистанція пошуку.

Георадари, радіолокаторы підповерхневого зондування або підповерхневі радіолокаторы – це загальна назва радіолокаційних пристроїв, що реалізують технології використання електромагнітних хвиль для побудови зображень і визначення властивостей об'єктів, що розташовані в оптично непрозорих середовищах, таких як, наприклад, ґрунт, бетон, цегла, асфальт, камінь, дерево та лід. Зазвичай, радіолокатор такого типу з дальністю дії 1 м працює в діапазоні частот від 300 МГц до 3300 МГц [19].

Для підвищення ймовірності виявлення та мінімізації хибних спрацьовувань застосовується поєднання методів: георадара та високочутливого металодетектора. Ці технології успішно використовуються для створення ручних мобільних приладів.

Розглянуті два методи реалізовані в міношукачі AN/PSS-14, спеціально розробленому для армії США. Додатково було застосовано алгоритми оброблення інформації, що забезпечило високі технічні характеристики за умови малої ваги: ймовірність виявлення до 98,7 %, глибина виявлення ВНП до 300 мм, швидкість пошуку 3,2 м/хв, відстань сканування до 10 см, дистанційне керування не передбачено [20].

Мікрохвильові радары основані на використанні коротких радіоімпульсів та вимірюванні часу повернення відбитків. Відображення виникають на межах матеріалів із різною діелектричною проникністю. Підвищення частоти передачі забезпечує підвищення роздільної здатності, але водночас зростають і втрати в перешкодах.

Оптичний. Випромінювання в оптичному діапазоні (довжина хвилі 380–780 нм, частота $7,89 \times 10^{14}$ – $3,84 \times 10^{14}$ Гц) умовно поділене на ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне. Методи, що застосовують фізичні властивості цього випромінювання, успішно використовуються для виявлення та розпізнавання ВНП.

Ультрафіолетове випромінювання охоплює діапазон довжин хвиль 100–400 нм. У цьому діапазоні прямих демаскувальних ознак ВНП не виявлено, але в процесі застосування певного зовнішнього впливу, можуть з'являтися додаткові демаскувальні ознаки. Наприклад, у разі розпилення над забрудненою територією спеціального штаму бактерій, які проростають за декілька годин і флуоресціюють під ультрафіолетовим випромінюванням за наявності в ґрунті вибухових речовин [14].

Видиме випромінювання, що використовується для виявлення ВНП, передбачає захоплення світла у видимому діапазоні хвиль за допомогою оптичної системи для формування зображень. Використання сучасних широкоформатних багатоспектральних фотокамер дає змогу обстежувати значні території за короткий термін. Швидкість обстеження визначається швидкістю платформи, на якій розташовані оптичні сенсори. У разі використання літальних апаратів швидкість обстеження може перевищувати 100 км/год.

ВМС США продемонстрували прототип єдиної системи багатоцільового виявлення мін із повітря (SMAMD), розроблений компанією *BAE Systems*. У системі SMAMD використовується набір бортових оптичних датчиків, розміщених на борту безпілотного літального апарата (БПЛА) *MQ-8C Fire Scout* [21].

Обмеженням цього методу є те, що виявляти можна тільки ВНП, які розташовані на поверхні ґрунту. Також на якість виявлення впливають погодні умови та наявність маскувальних факторів (камуфляж, рослинність тощо).

Використання **інфрачервоного випромінювання** для виявлення ВНП ґрунтується на наявності різниці теплових характеристик між похованими об'єктами та навколишнім ґрунтом, що призводить до різниці температур між похованим об'єктом і ґрунтом. Цей температурний контраст вимірюється за допомогою термографічної камери, яка виявляє випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра.

Перевагами методу є те, що він пасивний, отже, не впливає на системи керування ВНП, які можуть спричинити вибух; також цей метод дозволяє підвищувати швидкість / продуктивність обстеження за допомогою застосування БПЛА як платформи.

Недоліки: на якість виявлення впливають параметри навколишнього середовища (сонячне світло, дощ та ін.) та перешкоди (покривний шар ґрунту, рослинність тощо). Це значно звужує можливості застосування.

Рентгенівське випромінювання. Фотони характерного (тобто що випускається під час переходів в електронних оболонках атомів) рентгенівського випромінювання мають енергію від 10 еВ до 250 кеВ, що відповідає випромінюванню з частотою від 3×10^{16} до 3×10^{19} Гц і довжиною хвилі 0,005–100 нм. Цей метод ґрунтується на тому, що спостережувані частоти залежать від взаємодії між електричним квадрупольним моментом ядра та градієнтом електричного поля, що створюється в ядерному центрі зовнішніми зарядами. Усі звичайні вибухові речовини містять квадрупольне ядро, яке генерує три набори резонансних частот, забезпечуючи однозначний метод виявлення та ідентифікації вибухової речовини [22]. Він є похідним від ядерного магнітного резонансу та використовується без зовнішнього магнітного поля. *Недоліком* методу є виявлення тільки однієї групи, яка має бути відома заздалегідь.

Гамма-випромінювання. Ядерно-фізичні методи розрізняють за типом і енергією, що використовує джерело нейтронів, а також видом і енергією вторинного гамма-випромінювання, яке виникає під час взаємодії нейтрона з об'єктом пошуку – азотом (вуглецем чи киснем), що міститься у вибуховій речовині.

Недоліком цих приладів, що впливає із фізичного принципу їхньої роботи, можна вважати те, що вони не мають вибірковості щодо вибухових або наркотичних речовин.

Хімічний метод. Широке застосування набув хімічний аналіз повітря на наявність випарів у місцях розташування ВНП. Він ґрунтується на виявленні та кількісній оцінці специфічних хімічних вибухових речовин та їхніх компонентів, які містяться у ВНП і дифундують у навколишнє середовище. Цей метод дає змогу виявляти сліди вибухових речовин у ґрунті або в повітрі в місцях встановлення ВНП. Дифузія речовин на поверхню відбувається в малих кількостях і залежить від конструкції ВНП, що вкривають середовище та погодні умови.

Ураховуючи малі концентрації речовин, неоднорідність поширення, різноманітні маскувальні фактори, необхідно застосовувати дуже чутливі датчики. Вважаємо, доцільною є думка, що цей метод містить газоаналітичні та біофізичні методи.

Газоаналітичні прилади є досить численним класом і забезпечують високу чутливість. Газоаналітичні методи здебільшого стосуються випарів тротилу, гексогену та ПЕТ, тому їх можна розглядати як підземні джерела пари. Ця пара може транспортуватися за допомогою таких явищ, як молекулярна дифузія та процеси турбулентності. Ідея цього методу полягає у створенні газових датчиків, здатних виявляти малі концентрації хімічних речовин ВНП. Існують певні обмеження в цій галузі досліджень, що пояснюється неможливістю встановити мінімальний рівень виявлення через мінливу природу парів.

Біофізичні методи. Необхідно наголосити на успішному використанні тварин для пошуку ВНП за хімічними ознаками. Для виявлення ВНП ще за часів Другої світової війни застосовувалися собаки (*Mine detection dog*, MDD). Окрім собак, у різних країнах ведуться дослідження з використання інших тварин для пошуку ВНП, які більш пристосовані для певних територій і дозволяють зменшити витрати на вирошування та підготовку [12].

За програмою *HeroRATs* ведуться роботи з використання африканських гігантських мішкоподібних щурів (*Mine detection rat*, MDR), які допомагають знаходити наземні міни [23]. Навчені щури можуть обстежити територію розміром із тенісний корт (23,77x10,97 м) за 30 хв. Також вивчаються особливості використання для пошуку ВНП інших тварин та комах. Необхідно зазначити, що тварини мають і кращі газоаналітичні здібності, ніж електронні газоаналізатори. Це дає змогу виявляти вибухові речовини в нижчих концентраціях та з більшою ймовірністю.

За інформацією *Marshall Legacy Institute* (MLI) [24], MDD-команди зазвичай здійснюють пошук не тільки у 30 разів швидше, ніж команди, які використовують ручний спосіб пошуку, а й безпечніше. Жоден із фахівців з MDD не загинув під час операцій з розмінування.

Штучне виявлення випарів конкурує з тваринами або використовується разом із ними. Однак тварини більш чутливі та можуть виявляти багато різних запахів одночасно, що досить важко відтворити штучно.

Окремо необхідно наголосити на перспективах застосування тварин у створенні інтелектуальних автоматизованих систем виявлення і знешкодження ВВП. Концепція основана на розміщенні на тваринах мобільної інтелектуальної системи, яка забезпечує навігацію, дистанційне наведення та спостереження. Такі системи підвищують імовірності виявлення ВВП.

Недоліками газоаналітичних методів є:

- необхідність переладнання / перенавчання в разі появи нових хімічних компонентів у ВВП;
- велика залежність якості вимірювань від навколишнього середовища та погодних умов;
- робота в небезпечній зоні (безпосередньо біля ВВП).

Магнітометричний метод. Використання магнітометрів як металопшукачів основане на явищі локального спотворення природного магнітного поля Землі феромагнітними матеріалами, наприклад залізом. Порівняно з розглянутими вище принципами, магнітометри мають набагато більшу дальність виявлення залізних предметів. Залізні предмети створюють аномалії, які фіксуються цими приладами.

Цей принцип розвивається з метою розроблення якісного відеоаналізу, схованого під поверхнею об'єкта, силові магнітні лінії від якого знімають магнітометром.

Основні *переваги* цього методу:

- можливість виявлення у природних покривних середовищах;
- більша глибина й висока швидкість пошуку.

Недоліки методу:

- не детектує діелектричні матеріали;
- низька вибірковість та завадостійкість.

Акустичний метод. Акустичні хвилі можуть бути ефективним інструментом для виявлення та ідентифікації наземних мін. Ультразвукові методи та методи перетворення акустичних даних на сейсмічні (A/S) є поширеними методами акустичного

виявлення. *Недоліками* цього методу є низька роздільна здатність та залежність від щільності ґрунту. Тому цей метод має малу ефективність для пошуку ВВП, особливо за наявності декількох перешкод із різними властивостями, наприклад, повітря-ґрунт.

За результатами аналізу методів виявлення та розпізнавання, визначені основні характеристики та виконане порівняння. Результати порівняння методів виявлення за основними характеристиками наведені в табл. 3.

Концепція гарантованого виявлення й розпізнавання вибухонебезпечних предметів

Аналіз методів дає змогу зробити висновок про суперечність між (а) – необхідністю підвищення продуктивності обстеження територій із високою ймовірністю наявності різних типів вибухонебезпечних предметів та забезпечення необхідної достовірності їхньої ідентифікації для знешкодження, а також (б) – наявністю методів і технологічних рішень мобільних роботизованих комплексів, а саме флотів БПЛА, з одного боку, та відсутністю цілісної концепції, методів, засобів і технологій створення і використання багатоцільових надійних і безпечних інтелектуальних систем БПЛА для пошуку та розпізнавання ВВП, з іншого боку.

Для подолання цієї суперечності важливо, насамперед, створити концепцію, на основі якої розробити методологію, моделі та інформаційні технології гарантованого виявлення і розпізнавання ВВП з використанням мобільних розподілених багатoversійних інтелектуальних систем. Принципи побудови та застосування, математичні моделі та методи забезпечення надійності та безпечності таких систем запропоновано та досліджено в роботах [25, 26].

Концепція ґрунтується на двох положеннях, що поєднують прагнення забезпечити високу продуктивність і достовірність пошуку, виявлення та розпізнавання ВВП для їхнього подальшого знешкодження.

По-перше, високопродуктивне виявлення ВВП на визначеній території забезпечується шляхом:

- застосування багатофункційного флоту БПЛА, оснащеного різними типами інформаційно-вимірвальних засобів;
- планування оптимальних маршрутів руху БПЛА з урахуванням багатопараметричного покриття під час виконання поставлених завдань.

Таблиця 3. Порівняння методів виявлення ВВП

Характеристика	Контактний	Механізований	Радіохвильовий	Оптичний	Рентгенівське випромінювання	Гамма-випромінювання	Газоаналітичний	Біофізичний	Магнітометричний	Сейсмоакустичний
Тип взаємодії з ВВП (А – активний, П – пасивний)	А	А	А	П	А	А	П	П	П	А
Тип платформи (Ст – стаціонарний, Моб – мобільний)	Ст	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Ст
Потенційна продуктивність	Low	Medium	High	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	Low
<i>Підтримка інформаційних технологій</i>										
Оброблення даних та їхнє зберігання	–	–	+	+	+	+	–	–	+	+
Доступ до мережі та покриття	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
Передача даних у режимі реального часу	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
<i>Параметри якості</i>										
Безпека під час виконання робіт	Low	Medium	High	Low	High	High	High	High	Low	Medium
Імовірність виявлення	High	High	Medium	Low	High	High	High	High	Medium	Medium
Роздільна здатність (вибірковість)	High	Low	Medium	Medium	High	High	High	Low	Low	Low
Надійність	High	High	High	High	High	High	Low	Low	Medium	Medium
<i>Економічні показники</i>										
Вартість	Low	Medium	Medium	Medium	High	High	Medium	Low	Medium	Medium

По-друге, висока достовірність виявлення і розпізнавання ВВП досягається шляхом:

- дворівневого інтелектуального оброблення інформації в розподіленій архітектурі літальних граничних обчислень (*Flying Edge Computing*) з урахуванням кореляції інформації, отриманої від БПЛА з різними інформаційно-вимірними засобами;

- донавання відповідних нейромережних структур упродовж виконання завдань на різних територіях.

Запропонована концепція гарантованого пошуку та розпізнавання ВВП дає змогу сформулювати завдання, що необхідно розв'язати для її реалізації:

- розробити методологію (концепцію, принципи та структуру взаємозв'язків моделей, методів, програмно-апаратних засобів та інформаційних технологій) створення та використання надійних і безпечних ББІС пошуку та знешкодження ВВП;

- розробити системні моделі та комплекс показників ефективності надійних і безпечних ББІС;

- розробити та дослідити моделі та ієрархічні структури бортових комплексів ББІС для пошуку, ідентифікації та знешкодження ВВП із різними

варіантами розподілу функцій та конфігурування апаратних і програмних компонентів;

- удосконалити методи пошуку та виявлення ВВП із застосуванням ББІС;

- розробити та вдосконалити методи планування використання ББІС пошуку та знешкодження ВВП на територіях із фіксованою конфігурацією та типами ВВП;

- розробити та дослідити моделі та методи підвищення надійності ББІС та їхніх компонентів;

- розробити структуру та засоби ІТ для створення, планування використання та забезпечення надійного функціонування ББІС пошуку та знешкодження ВВП;

- розробити та дослідити модель і метод аналізу та оцінювання ризику виникнення небезпечного стану "підрив на вибухонебезпечному предметі".

Висновки

За результатами виконаного аналізу методів виявлення ВВП можна зробити висновки, що:

- зростання кількості та інтенсивності озброєних конфліктів і війн у світі, висока інтенсивність

застосування боєприпасів різних типів та інтенсивність використання призводить до збільшення площі територій, забруднених ВВП;

– низька продуктивність наявних методів не дозволяє швидко й ефективно розчищати забруднені ВВП території, що призводить до значної кількості уражень і загибелі людей унаслідок підриву ВВП;

– самостійне використання окремих методів не може суттєво підвищити ймовірність виявлення ВВП;

– для підвищення продуктивності та безпеки виконання робіт із пошуку та знешкодження ВВП доцільно використовувати безпілотні

інтелектуальні платформи доправлення інформаційно-вимірювальних засобів.

Подальші дослідження доцільно проводити таким чином: проаналізувати стан і тенденції розвитку методів, технологій і математичного апарата для створення та застосування систем виявлення й розпізнавання ВВП на базі флотів БПЛА та інших роботизованих засобів (ББІС); удосконалити методи пошуку та виявлення ВВП із застосуванням БПЛА; дослідити методи підвищення ефективності пошуку ВВП за допомогою використання програмно-апаратних засобів та інформаційних технологій.

References

1. "Landmine Monitor 2022", available at: <http://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2022/landmine-monitor-2022.aspx> (last accessed 18.11.2022).
2. "Ukraine: Mine Action – 5W Situation Report (as of 01 June 2022)", available at: <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-mine-action-5w-situation-report-01-june-2022> (last accessed 18.11.2022).
3. Kenny, P., "Landmines killed 7,073 in 2020, says UN institute", available at: <https://www.aa.com.tr/en/world/landmines-killed-7-073-in-2020-says-un-institute/2417253> (last accessed 18.11.2022).
4. "An analysis of work on cleaning the territory of Ukraine from explosive objects in 2021" ["Analiz vykonannya robit shchodo ochyshchennia terytorii Ukrainy vid vybukhonebezpechnykh predmetiv u 2021 rotsi"], available at: <https://dsns.gov.ua/uk/protiminna-diyalnist/gumanitarne-rozminuvannya> (last accessed 18.11.2022).
5. "Review of war damage in the agriculture of Ukraine: an indirect damage assessment" ["Ohliad zbytkiv vid viiny v silskomu hospodarstvi Ukrainy: nepriama otsinka poshkodzhen"], available at: https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/06/Damages_report_issue1_ua-1.pdf (last accessed 18.11.2022).
6. Robledo, L., Carrasco, M., Mery, D. (2009), "A survey of land mine detection technology", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, Issue 9, P. 2399–2410. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802549435>
7. Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., Abd El-Samie, F. E. (2010), "A comparative study of landmine detection techniques", *Sensing and Imaging*, Vol. 11, Issue 3, P. 89–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x>
8. Haidarly, H. S. (2020), *Demining of territory and facilities by engineering units of the Armed Forces of Ukraine in international operations to maintain peace and security (1992–2018)* [Rozminuvannya terytorii i ob'ektiv inzhenernymy pidrozdilamy zbroinykh syl Ukrainy u mizhnarodnykh operatsiakh z pidtrymannia myru i bezpeky (1992–2018)]; PhD Dissertation: 20.02.22, Kyiv, 2020, 274 p.
9. Molochko, S. M., Bashynskiy, V. H., Kalamurza, O. H., Zhurakhov, V. A. (2021), "Analysis of the current state, characteristics and prospects for the development of sensors for detecting explosive objects installed on UAC" ["Analiz suchasnoho stanu, kharakterystyk ta perspektyv rozvytku datchykyv vyjavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv, vstanovlenykh na BpAK"], *Scientific works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification* [Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki], No. 2 (8), P. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.8.2021.09>
10. Fernandez, M. G., Lopez, Y. A., Arbolea, A. A., Valdes, B. G., Vaqueiro, Y. R., Andres, F. L. H., Garcia, A. P. (2018), "Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle", *IEEE Access*, Vol. 6, P. 45100–45112. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863572>
11. Pajares, G. (2015), "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 81, Issue 4, P. 281–329. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>
12. "Field trials of the smart system and technical survey dogs in Cambodia: Final report 2021", available at: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/SMART_Cambodia_v13_1_01.pdf (last accessed 18.11.2022).
13. Filipi, J., Stojnić, V., Muštra, M., Gillanders, R. N., Jovanović, V., Gajić, S., Turnbull, G. A., Babić, Z., Kezić, N., Risojević, V. (2022), "Honeybee-based biohybrid system for landmine detection", *Science of The Total Environment*, Vol. 803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150041>
14. Shemer, B., Palevsky, N., Yagur-Kroll, S., Belkin, S. (2015), "Genetically engineered microorganisms for the detection of explosives' residues", *Frontiers in Microbiology*, Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01175>
15. "Challenges for Mine Action due to russian aggression against Ukraine", available at: https://www.mineaction.org/sites/default/files/2.1.1_challenges_for_mine_action_in_ukraine.pdf (last accessed 18.11.2022).

16. "A Study of Mechanical Application in Demining", available at: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/Mechanical_study_complete.pdf (last accessed 18.11.2022).
17. "The MW370 is a powerful mine and route clearance platform used for the effective clearance of landmines across large areas", available at: <https://www.pearson-eng.com/product/mw370/> (last accessed 18.11.2022).
18. van Verre, W., Podd, F. J., Daniels, D. J., Peyton, A. J. (2021), "A Review of Passive and Active Ultra-Wideband Baluns for Use in Ground Penetrating Radar", *Remote Sensing*, Vol. 13, Issue 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101899>
19. Song, X., Liu, T., Xiang, D., Su, Y. (2019), "GPR Antipersonnel Mine Detection Based on Tensor Robust Principal Analysis", *Remote Sensing*, Vol. 11, Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080984>
20. Schweitzer, K. M., Davis, B. M., Pettijohn, B. A., Clark, R. D., Davison, A. D., Staszewski, J. J., "Optimization of Army-Navy/Portable Special Search (AN/PSS)-14 Operator Training", available at: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA457012.pdf> (last accessed 18.11.2022).
21. "U.S. Navy Demos MCM Equipment Prototype On MQ-8C", available at: <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/u-s-navy-demos-mcm-equipment-prototype-on-mq-8c> (last accessed 18.11.2022).
22. Vyzhva, S. A., Onyshchuk, I. I., Cherniaiev, O. P (2012), *Nuclear geophysics [Yaderna heofizyka]*: textbook, Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet", Kyiv, 608 p.
23. "Efficiency and Effectiveness Study using MDR capability", available at: <https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/APOPO-GICHD-Mine-Detection-Rats-30Jun2016.pdf> (last accessed 18.11.2022).
24. "Mine detection dog programs", available at: <https://www.marshall-legacy.org/mine-detection-dog-programs> (last accessed 18.11.2022).
25. Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Rucinski, A., Fesenko, H., Illiashenko, O. (2022), "UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application", *Smart Cities*, Vol. 5, Issue 3, P. 1151–1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>
26. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Morozova, O., Sachenko, A. (2022), "UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application", *Sensors*, Vol. 22, Issue 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176444>

Received 01.12.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федоренко Геннадій Леонідович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", докторант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: g.fedorenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0162-7422>

Федоренко Геннадий Леонидович – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", докторант кафедры компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Fedorenko Gennadiy – PhD, Doctoral candidate of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Фесенко Герман Вікторович – доктор технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: h.fesenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4084-2101>

Фесенко Герман Викторович – доктор технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", профессор кафедры компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Fesenko Herman – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Харченко Вячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

Харченко Вячеслав Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", заведующий кафедрой компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Kharchenko Vyacheslav – Doctor of Sciences (Engineering), Head of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

ANALYSIS OF METHODS AND DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF GUARANTEED DETECTION AND RECOGNITION OF EXPLOSIVE OBJECTS

The **subject** of the article are the methods of detection and recognition of explosive objects. The **aim** of the work is to develop the main provisions of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. The following **tasks** were solved

in the article: an analysis of existing approaches to the use of traditional single and combined, as well as non-traditional (biological) methods of detecting explosive objects, development of a classification table of methods of detection of explosive objects according to physical principles, analysis of advantages and disadvantages of the considered methods of detection of explosive objects, development of comparative table methods of detecting explosive objects, formulation of the introductory provisions of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. The following **methods** are used – methods of comparison, methods of abstraction, methods of analysis and synthesis, methods of scientific induction. The following results were obtained – an analysis of the features of the existing traditional and non-traditional (biological) methods of detecting explosive objects was carried out. A classification of methods for detecting explosive objects is proposed, taking into account the parameters that affect the probability of detection and productivity. The results of a comparative analysis of explosive object detection methods are presented in tabular form according to the following indicators: type of interaction with explosive objects, platform type, potential productivity, information technology support, quality parameters, and economic indicators. The main provisions of guaranteed detection and recognition of explosive objects are formulated. **Conclusions:** the low productivity of the existing methods does not allow for quick and effective clearing of the territory contaminated by explosive objects, which leads to a large number of injuries and deaths of people due to the detonation of explosive objects. The use of individual detection methods alone cannot significantly increase the probability of detecting explosive objects. To increase the productivity and safety of the search and disposal of explosive objects, it is advisable to use unmanned intelligent platforms to deliver information and measurement tools.

Keywords: methods of detection and recognition; explosive objects; unmanned aerial vehicles; performance; probability of detection.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ГАРАНТИРОВАННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Предметом исследования в статье являются методы выявления и распознавания взрывоопасных предметов. **Цель работы** – разработка основных положений концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. В статье решаются следующие **задачи:** анализ существующих подходов по применению традиционных единичных и комбинированных, а также нетрадиционных (биологических) методов обнаружения взрывоопасных предметов, разработка классификационной таблицы методов обнаружения взрывоопасных предметов по физическим принципам, анализ преимуществ и недостатков рассмотренных методов обнаружения взрывоопасных предметов, разработка сравнительной таблицы методов обнаружения взрывоопасных предметов, формулирование основных положений концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. Используются следующие **методы:** сравнение, абстрагирование, анализ и синтез, научная индукция. Получены следующие **результаты:** проведен анализ особенностей существующих традиционных и нетрадиционных (биологических) методов обнаружения взрывоопасных предметов. Предложена классификация методов обнаружения взрывоопасных предметов с учетом параметров, влияющих на вероятность обнаружения и производительность. В табличном виде представлены результаты сравнительного анализа методов обнаружения взрывоопасных предметов по следующим показателям: тип взаимодействия с взрывоопасными предметами, тип платформы, потенциальная производительность, поддержка информационных технологий, параметры качества, экономические показатели. Сформулированы основные положения концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. **Выводы.** Низкая производительность существующих методов не позволяет быстро и эффективно расчищать загрязненные взрывоопасными предметами территории, что приводит к большому количеству поражений и гибели людей в результате взрыва взрывоопасных предметов. Самостоятельное использование отдельных методов обнаружения не может существенно повысить вероятность обнаружения взрывоопасных предметов. Для повышения производительности и безопасности выполнения работ по поиску и обезвреживанию взрывоопасных предметов целесообразно использовать беспилотные интеллектуальные платформы доставки информационно-измерительных средств.

Ключевые слова: методы обнаружения и распознавания; взрывоопасные предметы; беспилотные аппараты; производительность; вероятность обнаружения.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Федоренко Г. Л., Фесенко Г. В., Харченко В. С. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020>

Fedorenko, G., Fesenko, H., Kharchenko, V. (2022), "Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020>

К. Воробйов, Н. Гуржій

КОНКУРЕНТНИЙ АНАЛІЗ СВІТОВОГО РИНКУ КАВИ

У дослідженні систематизовано інформацію щодо тенденцій розвитку світового ринку кави для виявлення проблем упродовж 2016–2021 рр. Саме тому автори не тільки систематизують інформацію, але й проводять конкурентний аналіз на підставі статистичних баз даних. **Предметом** дослідження є конкурентний аналіз світового ринку кави. **Мета** статті – дослідження поточного стану світового ринку кави, визначення ключових гравців на ньому, які є засновниками процесів його розвитку, оцінювання їхньої конкурентоспроможності. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз поточного стану світового ринку кави та тенденції його розвитку; визначення ключових гравців світового ринку кави та аналіз їхніх фінансових показників; оцінювання конкурентоспроможності найбільших компаній із виробництва кави у світі за певними параметрами. **Методи**, що застосовуються: аналіз, синтез, порівняння, згрупування, комплексне оцінювання. Отримані **результати**: вивчено поточний стан світового ринку кави, ціни на зелене кавове зерно, світові обсяги внутрішнього виробництва кави (врожай) та експорту; визначено основні країни-імпортери та експортери кавового зерна, роздрібні ціни на обсмажене кавове зерно серед країн світу, обсяги продажів готової кавової зернової, розчинної продукції у світі, частки ринку роздрібною торгівлі найбільших світових виробників зернової та розчинної кавової продукції, співвідношення продажів готової кавової продукції у світі за географічною ознакою. Проаналізовано фінансові показники найбільших компаній із виробництва кавової продукції у світі, а саме *Nestle, Jacobs Douwe Egbert, Luigi Lavazza S.p.A, Strauss Group, Illycaffè S.p.A.*, за період 2016–2021 рр. Оцінено конкурентоспроможність досліджуваних компаній із виробництва готової кавової продукції за певними параметрами, що дало змогу визначити трьох лідерів на світовому ринку. **Висновки**. Результати проведеного конкурентного аналізу світового ринку кави можуть бути використані в роботі консалтингових компаній, бізнес-аналітиків та власників кавового бізнесу. Практична користь дослідження полягає у визначенні на підставі статистичних баз даних ключових показників функціонування ринку та у формуванні структурного підходу до проведення конкурентного аналізу не лише світового, а й національного ринку кави.

Ключові слова: світовий ринок кави; конкурентний аналіз; світові виробники кави; кавові бренди; кавова продукція.

Вступ

У сучасному світі кавовий напій став невід'ємним продуктом щоденного споживання, що своїми властивостями додає тону організму та є приємним на смак. Протягом останнього десятиліття серед споживачів світу зростає попит на зернову каву, а на розчинну – зменшується. Тому з кожним роком на світовому ринку з'являється все більша кількість новостворених виробників кавової продукції, які стають конкурентами найбільшим транснаціональним компаніям з виробництва кави. Тому актуальним є проведення конкурентного аналізу поточного стану світового ринку кави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Світовий ринок кави та його проблеми протягом 2014–2017 рр. досліджували В. Ходикіна та О. Родіна [1]. Питання особливостей розвитку світового та українського ринку кави впродовж 2016–2019 рр. вивчали І. Мандрик та Д. Гурній [2]. Формування особливостей географічних кавових ідентифікаторів

розглядав закордонний експерт А. Рам [3]. Особливості економічного аналізу діяльності компаній із виробництва кави у Європі досліджували експерти С. Баттіно й Ц. Донато [4]. Проведенням аналізу стійкості кавового виробництва займався зарубіжний експерт С. Крістіан [5]. Однак проведені дослідження не охоплюють проміжок часу з 2016 до 2021 рр. та не містять конкурентний аналіз світового ринку кави.

Визначення невирішених аспектів загальної проблеми

Залишається невирішеним питання щодо проведення конкурентного аналізу світового ринку кави протягом 2016–2021 рр. на основі вибірки із статистичних баз даних *International Coffee Organization* [6] та *Euromonitor International* [7], які дають змогу комплексно оцінити конкурентоспроможності найбільших світових виробників кави. **Мета роботи** полягає у проведенні конкурентного аналізу світового ринку кави, що передбачає вирішення таких завдань: аналіз поточного стану світового ринку кави та вивчення

тенденцій його розвитку; визначення ключових гравців світового ринку кави та з'ясування їхніх основних фінансових показників; оцінювання конкурентоспроможності найбільших компаній із виробництва кави у світі за визначеними параметрами.

Матеріали та методи

Конкурентний аналіз світового ринку кави варто розпочати з вивчення тенденцій його розвитку та динаміки середніх цін за один мішок кавового зерна вагою 60 кг "Арабіки" та "Робуста" за період 2016–2021 рр. (див. рис. 1). Інформація сформована на основі щомісячних звітів *International Coffee Organization* [6].

Відповідно до наведених на рис. 1 показників, середня вартість одного мішка кавового зерна вагою 60 кг сорту "Арабіка" 2016 р. становила \$216,75, 2019 р. ціна знизилась до \$172,80, що пов'язано із гарним врожаєм "Арабіки" за цей період. 2021 р. ціна зросла до максимальних значень – \$230,26. Це пояснюється зниженням врожайності впродовж 2020–2021 рр., оскільки кавові дерева увійшли в трирічний цикл, і світовою фінансово-економічною кризою, спричиненою пандемією Covid-19. Щодо кавових зерен сорту "Робуста", то динаміка коливання цін та причини цього є аналогічними.

У табл. 1 наведені показники щодо загальних обсягів зібраного врожаю серед країн світу, які вирощують кавові зерна, та загальних обсягів експорту протягом 2016–2021 рр. [8, 9, 10].

Як видно з табл. 1, за період 2016–2019 рр. світові обсяги внутрішнього виробництва (врожай) кави зросли на 10 %, протягом 2019–2020 рр. спостерігається циклічне зменшення врожайності на 4 %, з 2020 до 2021 рр. збільшуються обсяги на 2 %. Загалом за досліджуваний період (2016–2021 рр.) приріст становив 8 %. З 2016 до 2021 рр. обсяги експорту країн світу, які вирощують кавові зерна, збільшився на 12 %, протягом 2020–2021 рр. обсяги залишились майже без змін, що й пояснює зростання середніх цін на каву в цей проміжок часу (див. рис. 1). Необхідно зауважити, що зменшення обсягів експорту впродовж 2020–2021 р. може бути пов'язано із зменшенням попиту на каву та падінням купівельної спроможності споживачів, викликаним світовою фінансово-економічною кризою, яка почалась 2019 р. Також можна стверджувати, що виробництво (вирощування) кави в країнах світу спрямовано не на задоволення внутрішніх потреб, а на експортування кави для розвитку економіки (ВВП).



Рис 1. Середні ціни за один мішок кавового зерна вагою 60 кг сортів "Арабіка" та "Робуста" протягом 2016–2021 р., \$/60 кг

Таблиця 1. Світові обсяги внутрішнього виробництва кави (врожай) та експорту протягом 2015/16–2020/21 рр., тис. мішків вагою 60 кг

Показник / рік	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
1	2	3	4	5	6	7
Обсяг внутрішнього виробництва (врожай)	156126,00	162320,00	163693,00	172461,00	165053,00	169064,00
Обсяг експорту	116396,00	121334,00	119519,00	126598,00	130098,00	130033,00
Частка експорту	74,55%	74,75%	73,01%	73,41%	78,82%	76,91%

Країни світу, що вирощують та експортують кавові зерна (зелену каву), поділені на три групи, відповідно до звітів *International Coffee Organization*:

1) квітнева група країн-експортерів, у якій 100 % кавових плантацій є дерева та кущі "Арабіки";

2) липнева група країн-експортерів, у якій 80 % кавових плантацій є дерева та кущі "Арабіки", а решта 20 % – кущі "Робусти";

3) жовтнева група – одна з найбільших груп країн-експортерів, – у якій 50 % кавових плантацій є кущі "Арабіки" та інші 50 % – кущі "Робусти" [8].

У табл. 2 запропонована інформація щодо обсягів виробництва (врожаю) кавових зерен п'яти найбільших

країн-виробників світу, а також обсяги експорту в період з 2015/16 до 2020/21 рр. [8, 9,10, 11, 12].

Відповідно до показників, наведених в табл. 2, найбільшими країнами-виробниками зерен зеленої кави та експортерами є Бразилія, В'єтнам, Колумбія, Індонезія та Гондурас. Зазначимо, що ці країни експортують від 47 % до 99 % зібраного врожаю, з 2016 до 2021 рр. спостерігається коливання обсягів виробництва та експорту кави, з 2019 до 2021 рр. обсяги виробництва та експорту кави зменшуються.

У табл. 3 наведена інформація щодо найбільших країн-імпортерів кавових зерен протягом 2015/16–2020/21 рр. [13, 14].

Таблиця 2. Загальні обсяги виробництва (врожаю) кави та обсяги експорту ТОП-5 країн-виробників з 2015/16 до 2020/21 рр., тис. мішків вагою 60 кг

Країна / рік / показник	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	Приріст 2015/21, %	Приріст 2020/21, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Бразилія								
Обсяг виробництва	52871,00	56788,00	52740,00	65131,00	58211,00	69000,00	30,51	18,53
Експорт	37563,00	34269,00	30925,00	35637,00	40698,00	44848,00	19,39	10,20
Частка експорту	71,22%	60,35%	58,69%	54,72%	69,91%	65,00%	8,45	7,02
В'єтнам								
Обсяг виробництва	31090,00	29819,00	33432,00	31583,00	30487,00	29000,00	-6,72	-4,88
Експорт	21944,00	29721,00	25092,00	31385,00	27400,00	25625,00	16,77	-6,48
Частка експорту	70,58%	99,67%	75,05%	99,37%	89,87%	88,36%	25,19	-1,68
Колумбія								
Обсяг виробництва	14009,00	14634,00	13824,00	13866,00	14100,00	14300,00	2,08	1,42
Експорт	12716,00	12831,00	12985,00	12808,00	13672,00	12499,00	-1,71	-8,58
Частка експорту	90,77%	87,68%	93,33%	92,37%	96,96%	87,41%	-3,70	-9,85
Індонезія								
Обсяг виробництва	12585,00	11541,00	10852,00	9618,00	11433,00	12100,00	-3,85	5,83
Експорт	8379,00	6545,00	8198,00	4539,00	6334,00	7278,00	-13,14	14,90
Частка експорту	66,58%	56,71%	75,54%	47,19%	55,40%	60,15%	-9,66	8,57
Гондурас								
Обсяг виробництва	5786,00	7457,00	7560,00	7153,00	6931,00	6100,00	5,43	-11,99
Експорт	5030,00	5306,00	7341,00	7144,00	6765,00	5009,00	-0,42	-25,96
Частка експорту	86,93%	71,15%	97,10%	99,87%	97,60%	82,11%	-5,54	-15,87

Таблиця 3. ТОП-5 країн-імпортерів кавових зерен за період 2015/16–2020/21 рр., тис. мішків вагою 60 кг

Країна / рік	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	Приріст 2015/21, %	Приріст 2020/21, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Разом імпорт у світі	121378,00	127632,00	126063,00	129947,00	134944,00	132319,00	9,01	-1,95
США	27708,00	28838,00	29488,00	28918,00	30854,00	29242,00	5,54	-5,22
Частка від світового імпорту	22,83%	22,59%	23,39%	22,25%	22,86%	22,10%	-3,19	-3,34
Німеччина	21316,00	22368,00	21765,00	22147,00	22432,00	22077,00	3,57	-1,58
Частка від світового імпорту	17,56%	17,53%	17,27%	17,04%	16,62%	16,68%	-4,99	0,37
Італія	9328,00	10224,00	10020,00	10639,00	10914,00	10775,00	15,51	-1,27
Частка від світового імпорту	7,69%	8,01%	7,95%	8,19%	8,09%	8,14%	5,96	0,68
Франція	6809,00	6738,00	6967,00	7624,00	7993,00	7996,00	17,43	0,04
Частка від світового імпорту	5,61%	5,28%	5,53%	5,87%	5,92%	6,04	7,72	2,02

Відповідно до табл. 3, загальні обсяги імпорту кави у світі з 2015/16 до 2020/21 рр. зросли на 9,01 % (+10941 тис. мішків вагою 60 кг), однак за період 2019/20–2020/21 рр. відбулось зменшення на 1,95 % (-2625 тис. мішків вагою 60 кг). Серед країн світу США має найбільшу частку імпорту, що становить від 22 % до 23 % від загального обсягу. Друге місце посідає Німеччина з часткою імпорту кави від 16 % до 18 %. Частки імпорту Італії та Франції коливаються від 5 % до 9 %, частки усіх інших країн-імпортерів кави не перевищують 5 %.

Необхідно зауважити, що у США та Німеччині спостерігається тенденція зменшення обсягів імпорту зерен кави за період 2015/16–2020/21 рр., тоді як у Італії та Франції спостерігається динаміка збільшення обсягів імпорту зерен кави.

Інформація щодо середніх роздрібних цін на обсмажену каву в країнах світу впродовж 2016–2021 рр. дає змогу визначити ТОП-5 країн із найвищими роздрібними цінами за 1 кг обсмажених кавових зерен за 2016–2021 рр. (див. табл. 4) [15].

Таблиця 4. Найвищі середні роздрібні ціни за 1 кг обсмажених кавових зерен серед країн світу протягом 2016–2021 рр., \$/кг

Країна / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Велика Британія	42,00	36,20	37,80	40,80	39,00	39,00	-7,14%	0,00%
Мальта	28,40	29,60	31,20	33,60	31,70	33,00	16,20%	4,10%
Італія	16,60	16,50	17,00	18,00	16,20	17,00	2,41%	4,94%
російська федерація	14,30	14,80	17,40	16,40	15,80	16,20	13,29%	2,53%
Чехія	12,80	13,60	14,60	16,10	14,90	14,70	14,84%	-1,34%

Відповідно до табл. 4, визначено п'ять країн із найвищими цінами. Собівартість кожної пачки обсмаженої кави вагою 1 кг містить: енергоносії – 6 %, логістика – 8 %, адміністративні витрати – 16 %, амортизація – 1 %, заробітна плата – 6 %, упаковка та вторинна сировина – 10 %, решта доданої вартості припадає на орендовану полицю в супермаркеті без

урахування податків. Найвищі роздрібні ціни на обсмажену каву у Великій Британії, однак з 2016 до 2021 рр. ціна зменшилась на 7,14 % (або \$3,00), упродовж 2020–2021 рр. ціна залишилась незмінною. Друге місце посідає Мальта, де з 2016 до 2021 рр. ціни зросли на 16,20 % (або \$4,60), з 2020 до 2021 рр. приріст становив 4,10 % (або \$1,30). Також найвищі

роздрібні ціни на зерна обсмаженої кави в Італії, російській федерації та Чехії, значення яких з 2016 до 2021 рр. коливалися від \$12 до \$18 за 1 кг.

Також нами визначено ТОП-5 країн із найнижчими середніми роздрібними цінами на зерна обсмаженої кави протягом 2016–2021 рр. (див. табл. 5) [15].

Як видно з табл. 5, найнижча ціна у Швеції, яка з 2016 до 2021 рр. зменшилась на 3,90 % (або \$0,30), а з 2020 до 2021 рр. зросла на 2,56 % (або \$0,40). Ціна у Франції є трохи вищою, ніж у Швеції, зокрема з 2016 до 2021 рр. приріст становив 11,11 % (або \$0,80), а з 2020 до 2021 рр. – +2,56 % (або \$0,20). На території Польщі розташована значна кількість як національних фабрик із виробництва та обсмаження кави, так і транснаціональних компаній, де за період 2016–2021 рр. ціни на зерна обсмаженої кави зросли на 21,43 % (або \$1,50) та на 2,56 % (або \$0,20) відповідно. В Іспанії та Фінляндії роздрібні ціни на обсмажену каву з 2016 до 2021 рр. варіювались від \$8,00 до \$10,00. Отже, з 2020 до 2021 рр. спостерігається динаміка загального підвищення цін на каву у світі (див. табл. 4, 5) [15].

Розглянемо обсяги продажів категорії "готова кавова продукція" у світі в натуральному та

грошовому еквіваленті протягом 2016–2021 рр. Скористаємося даними міжнародної компанії *Strauss Coffee*, що сформувала узагальнену інформацію з джерела *Euromonitoring* (див. табл. 6). У табл. 7 запропоновано більш детальні показники щодо обсягів продажів та частки світового ринку в підкатегоріях "зернова готова кавова продукція" та "розчинна готова кавова продукція" [6, 7, 15, 16].

Відповідно до табл. 6, з 2016 до 2021 рр. обсяги продажів готової кавової продукції в грошовому еквіваленті збільшились на 17,32 % (або 14,10 млн \$) та на 12,37 % (або 0,70 млн т), з 2020 до 2021 рр. обсяги в грошовому еквіваленті зменшились на 0,31 % (або 0,30 млн \$) та в натуральному на 1,59 % (0,10 млн т). Отже, отримані результати вказують на стабільне зростання частки кавового ринку за всіма категоріями товарного кавового асортименту від розчинної до зернової кавової готової продукції у період з 2016 до 2020 рр. Однак упродовж 2020–2021 рр. обсяги продажів кави в обох еквівалентах зменшились. Це пояснюється світовою фінансово-економічною кризою, спричиненою пандемією Covid-19 [6, 7, 15, 16].

Таблиця 5. Найнижчі середні роздрібні ціни за 1 кг обсмажених кавових зерен серед країн світу за період 2016–2021 рр., \$/кг

Країна / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фінляндія	8,10	9,10	9,40	8,90	9,20	9,30	14,81%	1,09%
Іспанія	8,30	8,50	9,10	8,10	8,70	9,20	10,84%	5,75%
Польща	7,00	7,70	8,30	7,90	8,30	8,50	21,43%	2,41%
Франція	7,20	7,50	8,20	7,70	7,80	8,00	11,11%	2,56%
Швеція	7,70	7,90	7,20	6,80	7,00	7,40	–3,90%	5,71%

Таблиця 6. Обсяги продажів готової кавової продукції у світі протягом 2016–2021 рр.

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяги продажів у грошовому еквіваленті, млрд \$	81,40	86,00	86,50	88,50	95,80	95,50	17,32%	–0,31%
Обсяги продажів у натуральному еквіваленті, млн т	5,50	5,70	5,80	6,10	6,30	6,20	12,73%	–1,59%

Таблиця 7. Обсяги продажів та доля світового ринку зернової готової та розчинної готової кавової продукції протягом 2016–2021 рр.

Показник / рік	Зернова готова кавова продукція				Розчинна готова кавова продукція			
	Частка світового ринку в грошовому еквіваленті, %	Частка світового ринку в натуральному еквіваленті, %	Обсяги продажів у грошовому еквіваленті, млрд \$	Обсяги продажів у грошовому еквіваленті, млрд \$	Частка світового ринку в грошовому еквіваленті, %	Частка світового ринку в натуральному еквіваленті, %	Обсяги продажів у грошовому еквіваленті, млрд \$	Обсяги продажів у натуральному еквіваленті, млн т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2016	63,40	72,70	51,60	4,00	36,60	27,40	29,70	1,50
2017	64,00	71,50	54,40	4,10	35,90	29,10	31,00	1,70
2018	64,80	71,90	55,30	4,20	35,20	28,60	31,00	1,70
2019	63,10	72,70	55,80	4,30	36,90	29,10	33,00	1,70
2020	66,20	72,80	63,40	4,50	33,80	27,20	32,40	1,70
2021	66,40	72,80	63,40	4,50	33,80	27,20	32,10	1,70
Приріст 2016/21, %	4,73%	0,14%	22,87%	12,50%	-7,65%	-0,73%	8,08%	13,33%
Приріст 2020/21, %	0,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,93%	0,00%

Відповідно до інформації, поданої в табл. 7, частка готової зернової кавової продукції в грошовому еквіваленті за період з 2016 до 2021 рр. збільшилася на 4,73 %, що дорівнює збільшенню обсягів продажів на 11,8 млрд \$ або на 0,50 млн т. З 2020 до 2021 рр. обсяги продажів не змінилися, частка в грошовому еквіваленті збільшилася на 0,30 %. Окрім того, з 2016 до 2021 рр. відбулося зростання обсягів продажів розчинної готової кавової продукції на 8,08 % (або на 2,4 млрд \$) у грошовому еквіваленті або на 0,2 млн т (або на 13,33 %)

у натуральному еквіваленті. Упродовж 2016–2021 рр. частка зменшилася на 7,65 %. Відповідно до показників 2020–2021 рр., частка не зазнала змін, обсяги продажів розчинної кави в натуральному еквіваленті також залишилися незмінними, зниження показника в грошовому еквіваленті за аналогічний період може бути спричинено коливанням цін на ринку.

На світовому ринку кави існує значна кількість гравців. На рис. 2 наведені частки найбільших виробників зернової та розчинної кавової продукції з 2016 до 2021 рр. [6, 7, 15, 16].

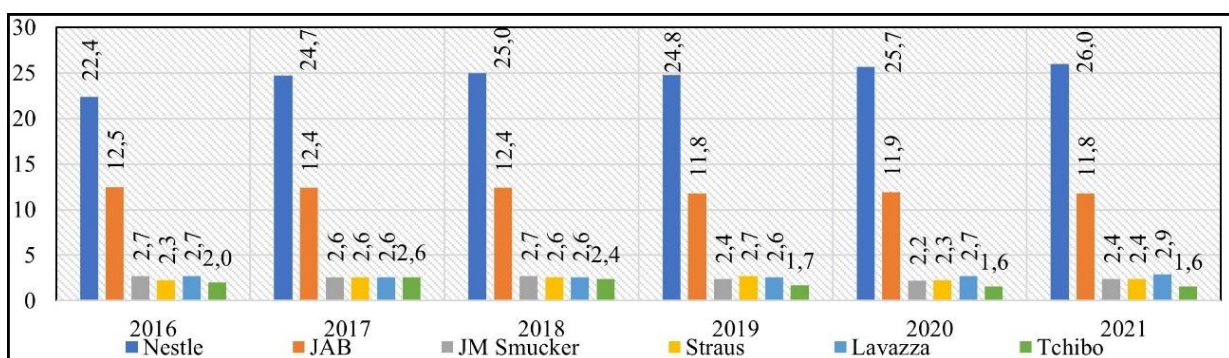


Рис. 2. Частки ринку роздрібної торгівлі найбільших світових виробників зернової та розчинної кавової продукції впродовж 2016–2021 рр., %

Відповідно до інформації, поданої на рис. 2, до найбільших компаній, що відіграють ключову роль на світовому ринку кавової продукції та співпрацюють із найбільшими країнами-експортерами та країнами-імпортерами кави, належать: *Nestle*, *JAB*, *JM Smucker*,

Strauss Group, *Lavazza*, *Tchibo*. Перше місце на ринку посідає виробник *Nestle*, його ринкова частка компанії з 2016 до 2021 рр. зростає на 3,6 %. Станом на 2021 р. цей виробник охоплює 1/4 світового ринку кави (26,0 %), що надає йому безумовне лідерство

та можливість впливати не лише на конкурентів, а й на ринок загалом. З 2016 до 2021 рр. друге місце посідає виробник *JAB*. Саме ця компанія зливається з такими організаціями, як *Heinze (Kraft Food)* та *Mondeles* для протистояння світовому гіганту *Nestle*, водночас створює значну кількість різноманітного асортименту продукції для збільшення своєї присутності на світовому ринку. Однак у досліджуваній період спостерігається зменшення її частки ринку на 0,7 %, що свідчить про послаблення конкурентних позицій компанії. Частки ринку виробників *JM Smucker*, *Strauss Group*, *Lavazza*, *Tchibo* є значно меншими, на відміну від лідерів ринку, і протягом 2016–2021 рр. їхні значення коливались приблизно в однакових діапазонах від 2,0 % до 2,9 %. Динаміка зменшення частки ринку спостерігається в *JM Smucker* та *Strauss Group*, а в *Lavazza* відбувається приріст. Серед досліджуваних

компаній найменша частка ринку у виробника *Tchibo*. З 2016 до 2021 рр. вона зменшується на 0,4 %, також послаблюються конкурентні позиції цієї компанії на світовому ринку кавової продукції. Безперечно, міжнародний виробник *Nestle* є серйозним гравцем на ринку кавової продукції. Для утримання своїх ринкових позицій інші гравці вдаються до злиття бізнесів, оскільки *Nestle* є не тільки виробником, але й реалізатором продукції компаній *Starbucks*, *Seattle's Best Coffee* та *Teavana TM/MC*, а в перспективі присутність *Nestle* тільки збільшуватиметься на світовому ринку, відповідно, зростатиме показник частки ринку та розширюватиметься товарний портфель.

На рис. 3 запропоновані частки найбільших виробників зернової обсмаженої кавової продукції (зокрема свіжі кавові зерна, мелені кавові зерна та капсули) у світі з 2016 до 2021 рр. [6, 7, 15, 16].

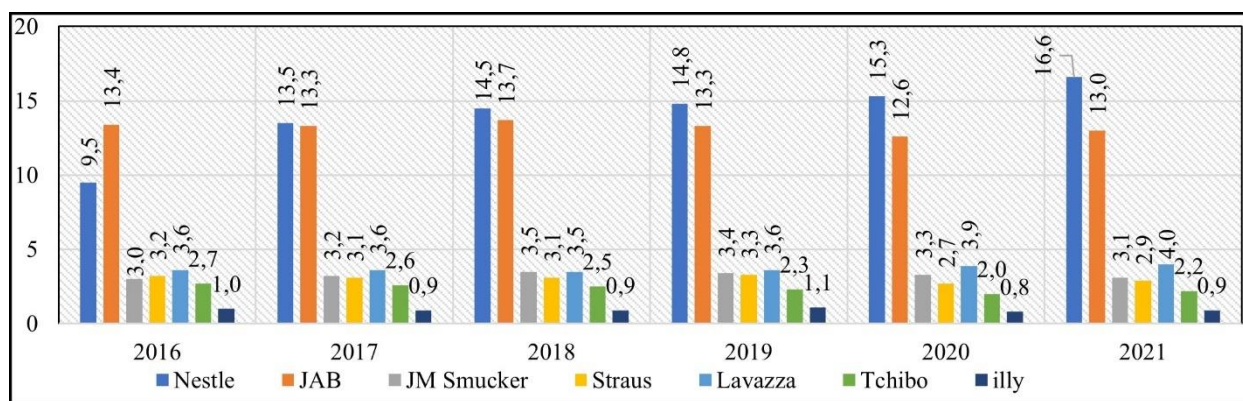


Рис. 3. Частки ринку роздрібної торгівлі найбільших світових виробників зернової кавової продукції протягом 2016–2021 рр., %

Необхідно зауважити, що на світовому ринку кави частка компаній, які працюють у сегменті зернового обсмаженого кавового продукту, є меншою, ніж компаній сегменту розчинної кавової продукції (див. рис. 4). Показники, наведені на рис. 3, свідчать про те, що найбільший транснаціональний виробник кавової продукції *Nestle* (рис. 2) у сегменті обсмаженого зернового кавового продукту з 2017 р. витіснив із позиції лідерства компанію *JAB*, частка ринку якої за період 2016–2021 рр. зменшилась з 13,4 % до 13,0 %. Водночас частка *Nestle* з 2016 до 2021 рр. зростає з 9,5 до 16,6 %, що обумовлено переглядом товарного асортименту, зосередженням на сегменті зернової кави та придбанням прав на реалізацію зернової кави *Starbucks* та *Blue Bottle*. Зростає частка ринку компанії *Lavazza* (з 3,6 %

до 4,0 %). Усі інші компанії за досліджуваній період мали коливання частки ринку то в бік збільшення, то в бік зменшення. Наприклад, з 2019 до 2021 рр. *Strauss Group* втратила 0,4 % частки ринку, протягом 2018–2021 рр. *JM Smucker* також втратила 0,4 %, з 2019 до 2021 рр. *illy* втратила 0,2 %. У компанії *Tchibo* з 2016 до 2021 рр. частка ринку зменшилась із 2,7 % до 2,2 %. Зменшення часток ринку компаній пов'язано не лише із стрімким розвитком частки ринку компанії *Nestle*, а також із появою значної кількості нових виробників обсмаженої зернової кави.

На рис. 4 подані частки найбільших виробників розчинної кавової продукції у світі з 2016 до 2021 рр. [6, 7, 15, 16].

Відповідно до показників, наведених на рис. 4, компанія *Nestle* має позицію лідера на світовому

ринку в цьому сегменті. 2020 р. частка ринку компанії досягла найбільшого значення – 39,4 %, 2021 р. вона зменшилась на 0,3 %, проте з 2016 до 2021 рр. виробник охоплює понад 1/3 ринку, не послаблюючи своїх конкурентних позицій. З 2016 до 2021 рр. компанія *JAB* втратила 2,1 % частки ринку, спостерігається динаміка зменшення, що насамперед може бути пов'язано із появою на світовому ринку розчинної кавової продукції значної кількості середніх та малих виробників. Аналогічною є ситуація із компанією *Dongsuh Foods Co. Ltd*, частка ринку якої з 2016 до 2021 рр. зменшилась із 3,5 % до 3,0 %. Усі інші компанії за період 2016–2021 рр. зазнали коливання часток на ринку. З 2018 до 2021 рр. компанія *Strauss Group* втратила 0,2 % частки світового ринку розчинної кави, що є негативною тенденцією. Компанія *Ajinomoto Co. Inc.* з 2016 до 2021 рр. збільшила частку ринку з 1,4 % до 1,9 %. Упродовж 2017–2020 рр.

частка ринку компанії *Prima Abadi PT Java* залишалась незмінною – 1,5%, 2021 р. частка зменшилась на 0,1 %. 2018 р. частка ринку компанії *Tchibo* була найбільшою – 1,5%, з 2018 до 2021 рр. спостерігається динаміка зменшення показника на 0,3 %. Компанія *Mayora Inda Tbk PT*, попри позитивну динаміку протягом 2016–2020 рр., 2021 р. також зменшила частку ринку та зазнала послаблення своїх конкурентних позицій. 2020 р. на світовому ринку розчинної кави з'явилась нова компанія *Kapal Api Group* з часткою ринку 1,3 %, 2021 р. показник залишився незмінним. Не можна не зважати на те, що поява 2020 р. нового потужного гравця на ринку спричинила послаблення конкурентних позицій досліджуваних компанії 2021 р., частка ринку яких коливається з 1 % до 2 % [6, 7, 15, 16].

У табл. 8 наведена інформація щодо географічної структури світових продажів готової кавової продукції.

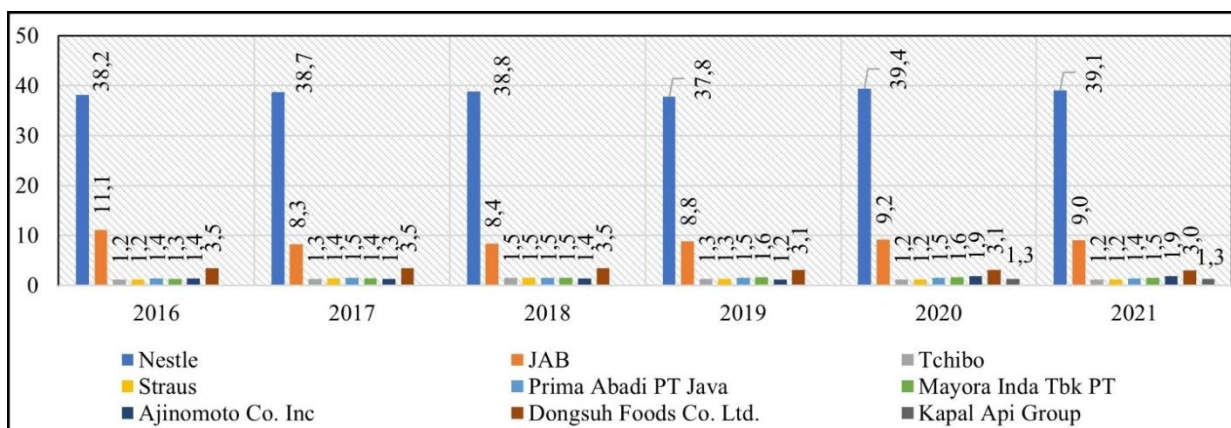


Рис. 4. Частки ринку роздрібної торгівлі найбільших світових виробників розчинної кавової продукції впродовж 2016–2021 рр., %

Таблиця 8. Географічна структура продажів готової кавової продукції у світі за період 2016–2021 рр.

Географічна частина / рік	Західна Європа	Східна Європа	Північна Америка	Латинська Америка	Близький Схід та Африка	Азія, Австралія, Океанія
1	2	3	4	5	6	7
2016	23,00%	9,00%	15,00%	19,00%	9,00%	25,00%
2017	22,00%	8,00%	15,00%	19,00%	10,00%	26,00%
2018	22,00%	8,00%	14,00%	19,00%	10,00%	26,00%
2019	22,00%	9,00%	14,00%	19,00%	10,00%	26,00%
2020	22,00%	8,00%	14,00%	19,00%	11,00%	26,00%
2021	23,00%	9,00%	14,00%	20,00%	9,00%	25,00%

Відповідно до табл. 8, станом на 2021 р. частка продажів готової кавової продукції збільшилась

у Західній та Східній Європі, Латинській Америці, натомість зменшилась на Близькому Сході, Африці,

Азії, Австралії та Океанії. Найбільша частка продажів готової кавової продукції у світі належить Азії, Австралії та Океанії, однак тенденція з 2020 до 2021 р. вказує на те, що Західна Європа стрімко збільшує обсяги продажів та має перспективу посісти позиції лідера.

Розглянемо компанії з виробництва кави з найбільшими обсягами продажів, розміром капіталу та кількістю персоналу у світі.

Швейцарська транснаціональна корпорація *Nestle* – найбільший у світі виробник продуктів харчування. Ця велика компанія очолює кавовий бренд *Nescafe*. 1938 р. каву *Nescafe* вперше виготовлено в промислових умовах. Продукція поширена в усіх континентальних частинах світу [17, 18]. Станом на 2021 р. компанії належать 461 фабрика та промислові підприємства у 83 країнах світу. Також *Nestle* посилили свою присутність у категорії преміальних кавових продуктів, придбавши право продавати кавову продукцію брендів *Starbucks* та *Blue Bottle*. У табл. 9 наведені результати щодо обсягів продажів і власного капіталу компанії *Nestle* [17, 18].

Відповідно до табл. 9, з 2016 до 2021 рр. обсяги продажів збільшились на 3252,00 млрд \$ (або 15,65 %), проте впродовж 2020–2021 рр. відбулось зменшення на 1042,00 млрд \$ (або 4,16 %). З 2016 до 2021 рр. відбулось зменшення власного капіталу компанії на 15842,00 млрд \$ (або 25,38 %). Станом на 2021 р. кількість персоналу компанії налічує 250 тис. осіб.

Jacobs Douwe Egberts – провідна світова компанія зі штаб-квартирою в Нідерландах, що спеціалізується на виробництві кави. В її складі об'єднані компанії *Mondeles International* та колишня компанія *D. E. Master Blenders 1753 B. V.*, що після злиття отримала назву *Douwe Egberts*. Протягом 2014–2015 рр. відбулося об'єднання підрозділів *Mondelez*, що виготовляють каву, з аналогічними структурами *D. E. Master Blenders 1753 B. V.*

У Нідерландах була заснована компанія *Jacobs Douwe Egberts*, якій було передано бренди кави *Carte Noire* та *Tassimo*. Крім головного кавового бренду *Jacobs*, ця велика компанія виготовляє продукти під назвами суббрендів *Moccona*, *Senseo*, *L'OR*, *Douwe Egberts*, *Kenco*, *Pilão* та *Gevalia* [19, 20, 21]. Кавова продукція *JDE* присутня у понад 140 країнах світу. Основний ринок збуту – країни Північної та Східної Європи, країни колишнього СРСР, виробничі майданчики розташовані в низці країн збуту. У табл. 10 наведені показники щодо обсягів продажів та власного капіталу компанії *Jacobs Douwe Egbert* упродовж 2016–2021 рр. (з 2015 до 2017 рр. – злиття *JDE Holding* з *Mondeles*, з 2019 до 2021 рр. – об'єднання компаній у єдину материнську компанію *JDE Peets*) [19, 20, 21].

Відповідно до табл. 10, за період 2016–2021 рр. обсяги продажів компанії зросли на 1,99 млрд \$ (або 34,92 %), з 2020 до 2021 рр. приріст становив 0,38 млрд \$ (або 5,26 %). Протягом 2016–2021 рр. власний капітал зменшився на 3,59 млрд \$ (або 22,65 %), однак з 2020 до 2021 рр. приріст становив 0,92 млрд \$, спостерігається тенденція збільшення. Персонал компанії налічує по 19 тис. осіб у кожній країні світу.

Компанія *Luigi Lavazza S.p.A.* – італійський виробник кави. Крім власних продажів, компанія працює зі світовими роздрібними мережами, такими як *Starbucks*, *Caribou Coffee*. *Lavazza* має чотири виробничі підприємства в Італії та сім філій у Європі та Америці (Франція, Німеччина, Іспанія, Велика Британія, Португалія, Австрія, США). Продукти *Lavazza* продаються у 80 країнах світу. 2016 р. було викуплено французький бренд *Carte Noir* у компанії *JDE* [19, 20, 21]. Табл. 11 містить інформацію щодо обсягів продажів та власного капіталу компанії *Luigi Lavazza S.p.A.* [22, 23, 24].

Таблиця 9. Фінансові показники транснаціональної компанії з виробництва кавової продукції *Nestle* протягом 2016–2021 рр., млрд \$

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяг продажів	20784,00	21375,00	22040,00	23349,00	25078,00	24036,00	15,65%	-4,16%
Власний капітал	62338,00	64590,00	60956,00	57363,00	52035,00	46514,00	-25,38%	-10,61%

Таблиця 10. Фінансові показники компанії з виробництва кавової продукції *Jacobs Douwe Egbert* протягом 2016–2021 рр., млрд \$

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяг продажів	5,71	7,18	7,33	7,64	7,32	7,70	34,92%	5,26%
Власний капітал	15,87	16,15	15,26	10,36	11,36	12,28	-22,65%	8,03%

Таблиця 11. Фінансові показники компанії з виробництва кавової продукції *Luigi Lavazza S.p.A.* протягом 2016–2021 рр., млрд \$

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяг продажів	2,08	1,88	2,06	2,24	2,09	2,16	3,69%	3,65%
Власний капітал	2,36	2,37	2,49	2,63	2,35	2,47	4,40%	4,94%

Відповідно до табл. 11, з 2016 до 2021 рр. обсяг продажів збільшився на 0,8 млрд \$ (або 3,69 %), протягом 2020–2021 р. приріст становив 0,7 млрд \$ (або 3,65 %). Приріст власного капіталу з 2016 до 2021 рр. – 0,11 млрд \$, спостерігається позитивна тенденція. Станом на 2021 р. кількість персоналу компанії становить 3836 осіб у країнах присутності.

Міжнародна компанія *Strauss Group* спеціалізується на виробництві продуктів харчування та напоїв. Компанія має 29 виробничих майданчиків у 22 країнах світу, що працюють над якістю продукції, яка відповідає уявленням про здоров'я та правильне харчування. *Strauss Coffee* веде діяльність у Центральній та Східній Європі, Бразилії та Ізраїлі. Кавові бренди: *Strauss coffee*, *Ambassador*, *Fort*, *Totti Caffè*, *Elite Health Line*, "Чорна карта" [13].

У табл. 12 наведені відомості щодо обсягів продажів та власного капіталу компанії *Strauss Group* підрозділу *Strauss Coffee* [16, 25, 26].

Відповідно до табл. 12, за період 2016–2021 рр. обсяги продажів компанії зменшились на 0,17 млрд \$

(–4,74 %), проте з 2020 до 2021 рр. відбувся приріст на 0,22 млрд \$ (або 6,71 %), що свідчить про позитивну тенденцію. Власний капітал упродовж 2016–2021 рр. збільшився на 0,14 млрд \$ (або 5,19 %), з 2020 до 2021 рр. приріст становив 0,25 млрд \$. Станом на 2021 р. кількість персоналу компанії становила 14 тис. осіб.

Італійська компанія з обсмажування кави *Illycaffè S.p.A.* виготовляє еспресо та розвиває кавову культуру з погляду культури чи науки кавової філософії. На сьогодні *Illycaffè S.p.A.* є великою міжнародною компанією, що продає свою продукцію приблизно в 140 країнах світу. Група *illy* містить кілька компаній, розташованих у Північній Америці, Франції, Німеччині, Іспанії та країнах Бенілюксу. Крім того, *Illycaffè* та *JAB* спільно заявили про ліцензійну угоду щодо випуску та продажу 2019 р. алюмінієвих капсул марки *illy* для випуску якісної капсульної кави *LÓR* у капсулі *illy*. У табл. 13 наведена інформація щодо обсягів продажів і власного капіталу компанії *Illycaffè S.p.A.* [27, 28].

Таблиця 12. Фінансові показники компанії з виробництва кавової продукції *Strauss Group* підрозділу *Strauss Coffee* протягом 2016–2021 рр., млрд \$

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяг продажів	3,67	4,10	3,95	3,73	3,28	3,50	-4,74%	6,71%
Власний капітал	2,54	1,96	2,10	2,28	2,43	2,68	5,19%	9,99%

Таблиця 13. Фінансові показники компанії з виробництва кавової продукції *Illycaffè S.p.A.* протягом 2016–2021 рр., млн \$

Показник / рік	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Приріст 2016/2021, %	Приріст 2020/2021, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обсяг продажів	515,45	526,27	539,56	624,48	538,43	575,40	11,63%	6,87%
Власний капітал	19,20	15,17	17,90	18,35	17,46	17,78	-7,38%	1,86%

Відповідно до табл. 13, протягом 2016–2021 рр. обсяги продажів компанії зросли на 59,95 млн \$ (або 11,63 %), з 2020 до 2021 рр. приріст становив 36,97 млн \$ (або 6,87 %). Однак власний капітал з 2016 до 2021 рр. зменшився на 1,42 млн \$, але впродовж 2020–2021 рр. збільшився на 0,32 млн. дол. (або 1,86 %). Станом на 2021 р. кількість персоналу компанії становила 1294 особи.

Незважаючи на те, що *Nestle* є найбільшим виробником розчинної кави у світі, компанія підхопила тенденцію зростання обсягів споживання зернової та меленої кави, унаслідок чого було укладено контракт на продаж зернової кави компанії *Starbucks* для утримання значної частки ринку. Однак, попри всі зусилля *Nestle* утримати ринок, новостворена 2015 р. компанія *JDE* (у минулому *Mondeles, D.E Master Blenders 1753 B.V.*) і десятки підрозділів об'єдналися з метою витіснення позицій *Nestle*. Також не варто виключати і кроки щодо об'єднання з конкурентом *illy* у сфері преміум кави в сегменті *Ho.Re.Ca.* 2019 р. *JDE* було укладено договір на постачання капсульної кави із використанням технології *illy*. Поява нових продуктів та виробників на світовому ринку сприяла динамічному зростанню продажів розчинної та зернової / меленої кави із незначною собівартістю продукції та високою роздрібною ціною.

На підставі розглянутих фактів можемо оцінити конкурентоспроможність основних гравців світового ринку кави за моделлю Портера, використавши

інформацію їхніх фінансових та оглядових звітів за такими параметрами: сума продажів, капітал, присутність у певних країнах, відсоток споживання кавового продукту споживачами в країнах присутності, натуральне значення споживання готової продукції, асортимент продукції, що споживається, собівартість продукції, вартість кави, частка ринку та персонал.

У табл. 14 запропонована система оцінювання параметрів конкурентоспроможності компаній із виробництва кави.

Наведені в табл. 14 показники дозволять сформулювати оцінку й визначити, до якого діапазону рівня конкурентоспроможності (від низького до лідера світового ринку) належить компанія.

У табл. 15 міститься інформація з параметрами для складання підсумкової таблиці щодо оцінки конкурентоспроможності компаній із виробництва та реалізації кавової продукції.

Відповідно до розрахунків множин $N \in M$, $L \in K$, $G \in Q$, $D \in C$, $W \in P$, сформовано табл. 16 з результатами для побудови діаграми з оцінками конкурентоспроможності компаній.

На основі табл. 16 з балами множин $N \in M$, $L \in K$, $G \in Q$, $D \in C$, $W \in P$ побудовано підсумкову діаграму оцінки конкурентоспроможності компаній із виробництва готової кавової продукції за визначеними параметрами (див. рис. 5).

Таблиця 14. Система оцінювання параметрів конкурентоспроможності компаній із виробництва готової кавової продукції на світовому ринку

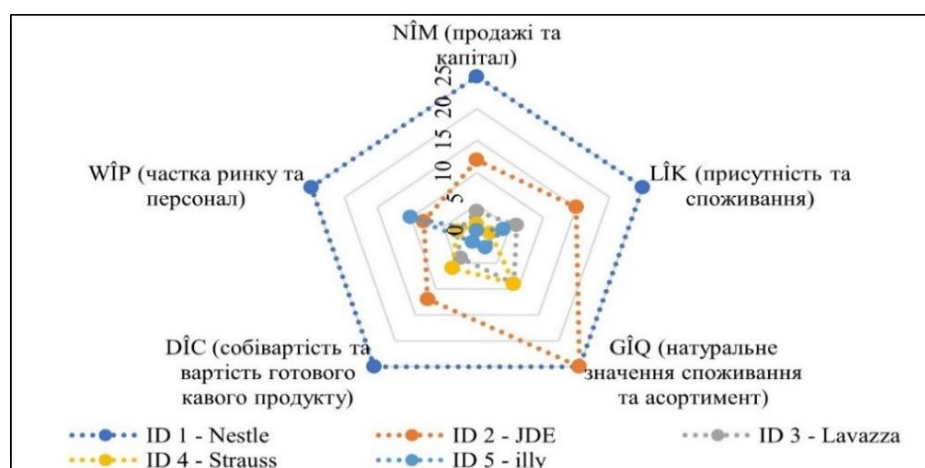
Характеристика оцінки / діапазон балів	Низька конкурентоспроможність	Середня конкурентоспроможність	Достатня конкурентоспроможність	Висока конкурентоспроможність	Лідер світового ринку
1	2	3	4	5	6
Діапазон балів, N	(0–10)	(15–30)	(35 – 40)	(45 – 70)	(75 – 100)

Таблиця 15. Оцінка конкурентоспроможності компаній із виробництва кави

Розрахунок параметра N = продажі, M = капітал					
Параметри	M1 (10–200 млн)	M2 (2–5 млрд)	M3 (10–20 млрд)	M4 (30–40 млрд)	M5 (>50 млрд)
1	2	3	4	5	6
N1 (200–500 млн)	1	2	3	4	5
N2 (1–2 млрд)	2	4	6	8	10
N3 (2,5–3,5 млрд)	3	6	9	12	15
N4 (4–5 млрд)	4	8	12	16	20
N6 (6–9 млрд)	5	10	15	20	25
Результат NЄM	ID 1 = Nestle 25	ID 2 = JDE 12	ID 3 = Lavazza 4	ID 4 = Strauss 2	ID 5 = illy 1
Розрахунок параметра L = показник присутності компаній в країнах світу, K= відсоток споживання на мільйон л-осіб у середньому в кожній країні					
Параметри	K1 (500–900 тис.)	K2 (1–2 млн)	K3 (3–3,5 млн)	K4 (4–4,5 млн)	K5 (>5 млн)
L1 (20–30 країн)	1	2	3	4	5
L2 (40–60 країн)	2	4	6	8	10
L3 (80–100 країн)	3	6	9	12	15
L4 (120–140 країн)	4	8	12	16	20
L5 >160 країн	5	10	15	20	25
Результат LЄK	ID 1 = Nestle 25	ID 2 = JDE 15	ID 3 = Lavazza 6	ID 4 = Strauss 2	ID 5 = illy 4
Розрахунок параметра G = натуральне значення споживання, Q = асортимент продукції					
Параметри	Q1 (3–6)	Q2 (8–12)	Q3 (15–25)	Q4 (30–35)	Q5 (>40)
G1 (1–2 тис. т)	1	2	3	4	5
G2 (3,5–10 тис. т)	2	4	6	8	10
G3 (13–55 тис. т)	3	6	9	12	15
G4 (60–110 тис. т)	4	8	12	16	20
G5 > 120 тис. т	5	10	15	20	25
Результат GЄQ	ID 1 = Nestle 25	ID 2 = JDE 25	ID 3 = Lavazza 9	ID 4 = Strauss 9	ID 5 = illy 2
Розрахунок параметра W = собівартість продукції, P = вартість готового кавового продукту					
Параметри	P1 (9–10 \$)	P2 (11–12 \$)	P3 (13–16 \$)	P4 (17–28 \$)	P5 (> 35)
W1 (6–9 \$)	1	2	3	4	5
W2 (10–11 \$)	2	4	6	8	10
W3 (12–14 \$)	3	6	9	12	15
W4 (16–16,5 \$)	4	8	12	16	20
W5 >17 \$	5	10	15	20	25
Результат GЄQ	ID 1 = Nestle 8	ID 2 = JDE 8	ID 3 = Lavazza 3	ID 4 = Strauss 3	ID 5 = illy 10
Розрахунок параметра D = частка ринку, C = кількість персоналу					
Параметри	C1 (800–2500)	C2 (3000–9000)	C3 (12000–25000)	C4 (30000–50000)	C5 (> 60000)
D1 (1,5–2 %)	1	2	3	4	5
D2 (2,5–5 %)	2	4	6	8	10
D3 (6–9 %)	3	6	9	12	15
D4 (11–18 %)	4	8	12	16	20
D5 >24 %	5	10	15	20	25
Результат DЄC	ID 1 = Nestle 25	ID 2 = JDE 12	ID 3 = Lavazza 4	ID 4 = Strauss 6	ID 5 = illy 1

Таблиця 16. Підсумкова таблиця оцінки конкурентоспроможності компаній із виробництва готової кавової продукції

Множина компаній / множина результатів за обраними параметрами	ID 1 = Nestle	ID 2 = JDE	ID 3 = Lavazza	ID 4 = Strauss	ID 5 = illy
1	2	3	4	5	6
$N \in M$	25	12	4	2	1
$L \in K$	25	15	6	2	4
$G \in Q$	25	25	9	9	2
$D \in C$	25	12	4	6	1
$W \in P$	25	8	3	3	10

**Рис. 5.** Підсумкова діаграма оцінки конкурентоспроможності компаній із виробництва готової кавової продукції за визначеними параметрами

Результати дослідження та їхнє обговорення

На основі отриманої підсумкової діаграми оцінки конкурентоспроможності компаній із виробництва готової кавової продукції за визначеними параметрами, яка подана на рис. 5, можна зробити такий висновок: за результатами оцінювання *Nestle* є беззаперечним лідером на світовому ринку з виробництва готової кавової продукції, оскільки отримала максимальну оцінку за визначеними параметрами в 125 балів (це стосується всіх підсумкових параметрів). *JDE* отримала 45 балів, що свідчить про високу конкурентоспроможність, оскільки компанія існує на ринку п'ять років та має досить високі оцінні параметри. Компанії *Lavazza* та *Strauss Group*, що отримали 16 і 18 балів відповідно, потрапили в діапазон середньої конкурентоспроможності. Насамперед це викликано тим, що вони не мають широкого асортименту продукції, значної частки ринку та кількості персоналу, на відміну від великих транснаціональних компаній, таких як *Nestle* та *JDE*. Останні займають два великі сегменти

світового ринку зернової, меленої та розчинної кави. Компанія *illy* потрапила в діапазон низької конкурентоспроможності, однак це не заважає їй продавати свій готовий кавовий продукт у ціновому діапазоні 35 \$/кг. Продукція *illy* зосереджена здебільшого в сегменті *Ho.Re.Ca*, але саме ця компанія виробляє алюмінієву капсульну продукцію для *JDE*, оскільки саме зернова кава бренду *illy* є взірцем *specialty coffee*, а компанія є одним із небагатьох засновників кавової філософії у світі.

Висновки та перспективи подальшого розвитку

Світовий кавовий ринок невпинно вдосконалюється завдяки підтримці великих кавових брендів, створених фондів, що намагаються адаптувати природні ресурси до тривалого використання, підвищити мотиваційну допомогу фермерів кавових плантацій. Однак світова криза, пандемія, природні катаклізми та коливання попиту на готовий кавовий продукт створюють дисбаланс у світовий кавовий ринок. 2021 р. ціна на кавові зерна арабіки зростає до максимальних значень – 230,26 \$/кг, що пов'язано

як із зниженням урожайності протягом 2020–2021 рр., так і з тим, що кавові дерева увійшли в трирічний цикл, а також із світовою фінансово-економічною кризою, спричиненою пандемією Covid-19. 2021 р. обсяги внутрішнього виробництва (врожаю) кави залишилися майже без змін, що й обумовлює зростання середніх цін на каву в цей проміжок часу. За прогнозом Міжнародної організації кави (ICO) очікується, що виробництво тільки арабіки протягом 2021/22 знизиться на 7,1 % порівняно із сезоном 2020/21 (із 101,16 млн мішків вагою 60 кг до 93,97 млн мішків вагою 60 кг). Загальні обсяги імпорту кави у світі з 2015/16 до 2020/21 рр. зросли на 9,01 % (+10941 тис. мішків вагою 60 кг), однак протягом 2019/20–2020/21 рр. відбулось зменшення на 1,95 % (–2625 тис. мішків вагою 60 кг). Було визначено, що найвищі середні роздрібні ціни на обсмажену каву у Великій Британії, Мальті, Італії, російській федерації та Чехії. Найнижчі – у Швеції, Франції, Польщі, Іспанії та Фінляндії. Світові обсяги продажів готової кавової продукції в грошовому еквіваленті збільшились на 17,32 % (або 14,10 млн \$) та на 12,37 % (або 0,70 млн т), з 2020 до 2021 р. обсяги в грошовому еквіваленті зменшились на 0,31% (або 0,30 млн \$) та в натуральному на 1,59 % (0,10 млн т). Це свідчить про стабільне зростання частки кавового ринку за всіма категоріями товарного кавового асортименту від розчинної до зернової готової кавової продукції протягом 2016–2020 рр. Однак з 2020 до 2021 рр. відбулось зменшення обсягів продажів кави в обох еквівалентах, що спричинено світовою фінансово-економічною кризою, яка виникла внаслідок

пандемії COVID-19. Частка готової зернової кавової продукції в грошовому еквіваленті впродовж 2016–2021 рр. збільшилася на 4,73 %, що відповідно дорівнює збільшенню обсягів продажів на 11,8 млрд \$ або на 0,50 млн т. З 2020 до 2021 рр. обсяги продажів не зазнали змін, частка в грошовому еквіваленті збільшилась на 0,30 %. Протягом 2016–2021 рр. відбулось зростання обсягів продажів розчинної готової кавової продукції на 8,08 % (або на 2,4 млрд \$) у грошовому еквіваленті або на 0,2 млн т (або на 13,33 %) у натуральному еквіваленті. З 2016 до 2021 рр. відбулось зменшення частки на 7,65 %. За період 2020–2021 рр. частка не зазнала змін, обсяги продажів розчинної кави в натуральному еквіваленті також залишилися незмінними, зниження показника в грошовому еквіваленті за аналогічний період може бути спричинене коливанням цін на ринку. Найбільшими світовими кавовими виробниками є такі компанії: *Nestle* з ринковою часткою компанії 1/4 світового ринку кави – 26,0 %; *JAB* – 11,8 %; *JM Smucker* – 2,4 %; *Straus Group* – 2,4 %; *Lavazza* – 2,9 %; *Tchibo* – 1,6 %. Побудована підсумкова діаграма оцінки конкурентоспроможності компаній з виробництва готової кавової продукції за визначеними параметрами, дала змогу визначити таку трійку лідерів на світовому ринку кави: *Nestle*, *JDE*, *Lavazza*, що встановлюють правила гри на ньому та створюють високі вимоги новим гравцям для входження на ринок. Перспективним напрямом подальших досліджень є визначення позиціонування кожного кавового бренду з погляду клієнта та параметричного оцінювання стійкості кавових брендів у мінливих умовах сучасного ринкового середовища.

References

1. Khodykina, V. V., Rodina, O. H. (2018), The world coffee market: current state and problematic issues ["Svitovyi rynek kavy: suchasnyi stan ta problemni pytannia"], *Menedzher*. No. 2 (79), P. 148–156, available at: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/5332/1/Nzhm_2018_2_22%5B1%5D.pdf (last accessed 23 November 2022).
2. Mandryk, I., Hurnyi, D. (2021), Modern features of the development of the world and Ukrainian coffee market ["Suchasni osoblyvosti rozvytku svitovoho ta ukrainskoho rynku kavy"], *SUSPILNO-HEOHRAFICHNI CHYNNYKY ROZVYTKU REHIONIV, Materialy V Mizhnarodnoi nauково-praktychnoi Internet-konferentsii*, No. 5, P. 119–121, available at: <https://konfgeolustk.wordpress.com/2021/04/07/suchasni-osoblyvosti-rozvytku-svitov/> (last accessed 23 November 2022).
3. Ram, A. S. (2017), Geographical Indications on Coffee, *First Dali Binchuan Zhukula International Coffee Forum. Specialty Coffee Society of Yunnan*, P. 257–280, available at: https://www.researchgate.net/publication/323014375_Geographical_Indications_on_Coffee (last accessed 23 November 2022).
4. Battino, S., Donato, C. (2017), Una analisi esplorativa, spaziale e di perfomance economica, delle imprese di lavorazione del caffè nell'Europa comunitaria, An exploratory, spatial and economic performance analysis of the coffee companies in EU, *Bollettino della ASSOCIAZIONE ITALIANA di CARTOGRAFIA*, No. (159), P. 80–92. DOI: <https://doi.org/10.13137/2282-572X/21314>
5. Krishnan, S. (2017), Sustainable Coffee Production, *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*, P. 1–35. DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.224>

6. Daily Coffee Prices, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: https://www.ico.org/coffee_prices.asp (last accessed 23 November 2022).
7. Euromonitor International, Coffee market share, available at: <https://www.euromonitor.com/search?term=market+share+coffee> (last accessed 23 November 2022).
8. Total production in thousand 60-kg bags, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf> (last accessed 23 November 2022).
9. 2a – Exports – calendar year/ Exports of all forms of coffee by all exporting countries in thousand 60kg bags, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/2a-exports.pdf> (last accessed 23 November 2022).
10. Trade Statistics April 2021, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/> (last accessed 23 November 2022).
11. Coffee production by exporting countries 2020/21 year in thousand 60-kg bags, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf> (last accessed 23 November 2022).
12. EXPORTS OF ALL FORMS OF COFFEE BY EXPORTING COUNTRIES TO ALL DESTINATIONS JANUARY 2022, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/prices/ml1-exports.pdf> (last accessed 23 November 2022).
13. Imports by selected importing countries in thousand 60-kg bags, INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/2b-imports.pdf> (last accessed 23 November 2022).
14. IMPORTS BY SELECTED IMPORTING COUNTRIES FROM ALL SOURCES NOVEMBER (2021), INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/prices/m4-imports.pdf> (last accessed 23 November 2022).
15. Retail prices of roasted coffee in selected importing countries in US\$/lb. 3b – Retail prices INTERNATIONAL COFFEE ORGANISATION, available at: <https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/3b-retail-prices.pdf> (last accessed 23 November 2022).
16. Strauss Group LTD, Annual Report as at December 31 (2021), available at: <https://mayafiles.tase.co.il/rpdf/1437001-1438000/P1437839-00.pdf> (last accessed 23 November 2022).
17. Nestle, available at: <https://www.nestle.com/> (accessed 23 November 2022).
18. Nestl, Annual Report 2021, available at: <https://www.nestle.com/sites/default/files/2022-03/2021-annual-review-en.pdf> (last accessed 23 November 2022).
19. Peet's, available at: <https://www.jdepeets.com/> (last accessed 23 November 2022).
20. Wikipedia, JDE Peet's, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/JDE_Peet%27s (last accessed 23 November 2022).
21. JDE Peet's reports full-year results (2021), available at: <https://www.jdepeets.com/siteassets/documents/jde-peets-full-year-results-2021-report.pdf> (last accessed 23 November 2022).
22. Wikipedia, Luigi Lavazza S.p.A, available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lavazza> (last accessed 23 November 2022).
23. Luigi Lavazza S.p.A, available at: <https://www.lavazza.com/en.html> (last accessed 23 November 2022).
24. Sustainability Report, Luigi Lavazza S.p.A. (2020), available at: https://www.lavazzagroup.com/content/dam/lavazza/lavazza-corporate/come-lavoriamo/BilancioSostenibile2020_ENG_def.pdf (last accessed 23 November 2022).
25. Wikipedia, Strauss Group, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Strauss_Group (last accessed 23 November 2022).
26. Strauss Group, available at: <https://www.strauss-group.com.ua/en/> (last accessed 23 November 2022).
27. Illycaffè S.p.A, available at: <https://www.illy.com/en-ww/home> (last accessed 23 November 2022).
28. Sustainable value report Illycaffè S.p.A. (2020), available at: <http://valuereport.illy.com/pdf/2020/Sustainable-value-report-illy-2020-ENG.pdf> (last accessed 23 November 2022).

Received 21.11.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воробйов Костянтин Сергійович – аспірант, Запорізький національний університет, аспірант кафедри підприємництва, менеджменту організацій та логістики, Запоріжжя, Україна; e-mail: vorobiovks@gmail.com; ORCID ID: 0000-0001-5669-4062

Воробьев Константин Сергеевич – аспірант, Запорожский национальный университет, аспірант кафедры предпринимательства, менеджмента организаций и логистики, Запорожье, Украина.

Vorobiov Kostyantín – the graduate student, Zaporizhia national university, the graduate student of department of entrepreneurship, management of the organizations and logistics Zaporizhia, Ukraine.

Гуржій Наталія Миколаївна – доктор економічних наук, професор, Запорізький національний університет, професор кафедри підприємництва, менеджменту організацій та логістики, Запоріжжя, Україна; e-mail: madlen2020@ukr.net; ORCID ID: 0000-0002-4955-9548

Гуржий Наталия Николаевна – доктор экономических наук, профессор, Запорожский национальный университет, профессор кафедры предпринимательства, менеджмента организаций и логистики, Запорожье, Украина.

Hurzhiu Natalia – the Doctor of Economics, Professor, Zaporizhia national university, the Doctor of Economics, Professor of department of entrepreneurship, management of the organizations and logistics, Zaporizhia, Ukraine.

COMPETITIVE ANALYSIS OF THE WORLD COFFEE MARKET

The research is directed to systematization of information on trends in the development of the world coffee market in order to identify problems for the period from 2016 to 2021. That is why the authors not only systematize information, but also conduct competitive analysis based on statistical databases. **The subject** of the research is a competitive analysis of the world coffee market. **The goal** of the article is research and analysis of the current state of the world coffee market, identification of key players on it who are the main founders of its development processes, building a profile of their competitiveness. The following **tasks** are solved in the article: analysis of the current state of the world coffee market and determination of the trend of its development; identification of key players in the global coffee market and analysis of their financial indicators; assessment of the competitiveness of the largest coffee production companies in the world according to certain parameters. **The methods** used are: analysis and synthesis, comparison and grouping, comprehensive assessment. **The results** have been obtained: determining the current state and trends in the world coffee market, prices for green coffee beans, world volumes of domestic coffee production (harvest) and exports, main countries-importers and exporters of coffee beans, retail prices of roasted coffee beans among the countries of the world, volumes of sales of ready-made coffee beans, soluble products in the world, shares of the retail market trade of the world's largest producers of grain and instant coffee products, the ratio of sales of finished coffee products in the world by geographical indication. An assessment of the competitiveness of the researched companies for the production of ready-made coffee products was carried out according to parameters, which made it possible to identify three leaders in the world market. **Conclusions.** The results of the competitive analysis of the global coffee market can be used in the work of consulting companies, business analysts and coffee business owners. The practical benefit of this research lies in the determination of key indicators of market functioning and the formation of a structural approach to conducting a competitive analysis of not only the world, but also the national coffee market, based on information from statistical databases.

Keywords: world coffee market; competitive analysis; world coffee producers; coffee brands; coffee products.

КОНКУРЕНТНЫЙ АНАЛИЗ МИРОВОГО РЫНКА КОФЕ

Проведенное исследование направлено на систематизацию информации о тенденциях развития мирового рынка кофе для определения проблем за период 2016–2021 гг. Именно поэтому авторы не только систематизируют информацию, но и проводят конкурентный анализ на основе статистических баз данных. **Предметом** исследования является конкурентный анализ мирового рынка кофе. **Цель** статьи – исследование текущего состояния мирового рынка кофе, определение ключевых игроков на нем, которые являются основателями процессов его развития, оценка их конкурентоспособности. В статье решаются следующие **задания:** анализ текущего состояния мирового рынка кофе и определение тенденций его развития; определение ключевых игроков мирового рынка кофе и анализ их финансовых показателей; оценка конкурентоспособности крупнейших компаний по производству кофе в мире по определенным параметрам. **Применяемые методы:** анализ, синтез, сравнение, группировка, комплексная оценка. **Полученные результаты:** изучены текущее состояние мирового рынка кофе, цены на зеленое кофейное зерно, мировые объемы внутреннего производства кофе (урожай) и экспорта; определены основные страны-импортеры и экспортеры кофейного зерна, розничные цены на обжаренное кофейное зерно среди стран мира, объемы продаж готовой кофейной зерновой, растворимой продукции в мире, доли рынка розничной торговли крупнейших мировых производителей зерновой и растворимой кофейной продукции, соотношение продаж готовой кофейной продукции в мире по географическому признаку. Проанализированы финансовые показатели крупнейших компаний по производству кофейной продукции в мире, а именно: *Nestle, Jacobs Douwe Egbert, Luigi Lavazza S.p.A, Strauss Group, Illycaffè S.p.A.*, за период 2016–2021 гг. Проведена оценка конкурентоспособности исследуемых компаний по определенным параметрам, что позволило определить трех лидеров на мировом рынке. **Выводы.** Результаты проведенного конкурентного анализа мирового рынка кофе могут использоваться в работе консалтинговых компаний, бизнес-аналитиков и владельцев кофейного бизнеса. Практическая польза данного исследования состоит в определении ключевых показателей функционирования рынка и в формировании структурного подхода к проведению конкурентного анализа не только мирового, но и национального рынка кофе, опираясь на информацию из статистических баз данных.

Ключевые слова: мировой рынок кофе; конкурентный анализ; мировые производители кофе; кофейные бренды; кофейная продукция.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Воробійов К. С., Гуржій Н. М. Конкурентний аналіз світового ринку кави. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 31–46. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.031>

Vorobiov, K., Hurzhii, N. (2022), "Competitive analysis of the world coffee market", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 31–46. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.31>

O. PEREPELYTSIA, O. AVRUNIN

COMPARISON OF THE METHOD OF ELECTROMETRIC DETERMINATION OF ROOT CANAL PARAMETERS AND THE METHOD OF THRESHOLD SEGMENTATION OF RADIOGRAPHS

The **subject matter** of the article is X-ray images of teeth during endodontic operations. The **goal** of the work is to compare the developed method of segmentation of the radiograph to determine the length of the root canal with the electrometric and mathematical methods in practice. The article uses the following **methods**: principles of endodontic preparation of teeth; methods of determining the working length of the root canal (radiological, electrometric); threshold segmentation method; method of segmentation of bone structures on tomographic images. The following **results** were obtained: the existing methods of determining the working length of the root canal were analyzed, the main advantages and disadvantages of each method were highlighted. The mathematical method is fast, but inaccurate and can only serve as a preliminary estimate. Electrometric is the most accurate, but has very strict requirements for measurement in the area of canal moisture, as well as invasiveness of the method has a number of disadvantages. Radiological is the most promising for research because of its painlessness to the patient, low radiation dose during intraoral radiography and the possibility of using image processing algorithms to refine the measurement results. This work formulated principles for segmentation and extraction of tooth contours on the X-ray image to determine working length and conducted practical studies to compare all methods of analysis. **Conclusions.** The application of the electrometric length determination method gives the most accurate result, but the segmentation of the radiograph allows the doctor to obtain additional information about the architectonics of the root canal. As well as the possibility of using image processing such as segmentation, contour extraction and automatic determination of the apical constriction zone make this method the most perspective. The most optimal is the combination of these two methods in practice, which requires additional research.

Keywords: root canal; radiograph; threshold method; segmentation.

Introduction

For root canal treatment, endodontists need to accurately determine the working length of the root canal. This is an extremely important parameter that affects the choice of necessary instruments, surgical techniques and postoperative condition of the patient. Working length is the distance from the external landmark on the crown of the tooth to the zone of apical constriction (narrowing). If the instrument goes beyond the working length, or incomplete filling, these are dangerous situations that lead to complications in the form of post-filling pain, the development of inflammatory and destructive changes in the periodontium, etc.

Among the methods used in medical practice are mathematical (determination of the length, according to tables with average indicators), electrometric (determination of the length using an apex locator) and radiological (using an intraoral X-ray). Analyzing the methods used on the basis of existing publications [1, 2] and their comparative characteristics [3, 4] – it can be concluded that the radiological method of research is less accurate. Due to the non-invasive nature of the method and the development of technologies and equipment,

in particular intraoral visigraphs – this area is becoming necessary for the study of new means of improvement.

The goal of the article is a practical comparison of mathematical, electrometric and radiological methods of searching for the apical construction zone. A key feature of the study is the use of segmentation of the radiological image. This makes it possible to exclude the possibility of a doctor's error in the analysis of the image.

For the electrometric determination of the working length of the root canal, devices are used that determine the impedance using the ratio method and alternating currents of different frequencies. This way it is possible to localize the apical narrowing. This measurement is reliable and stable, but there are cases of differences when working in too wet canals, so sometimes doctors have to dry them. This provides smooth visualization of all processes of the instrument passing in the canal and high accuracy of determining the location of the physiological apex of the root. Nevertheless, visualization in apex locators is only sound, that is, the doctor can get to know the location indirectly. Algorithms of modern electrometric determination of the working length do not combine the data obtained from the radiograph, do not have an extension. Therefore, the development of new

methods and techniques for displaying electrometric data on the radiograph for a more accurate locating of the physiological apex of the root is very important.

Intraoral X-ray is a non-invasive technique that allows you to obtain the necessary information about the direction of the curvature of the root canals and determine the operating length. But the X-ray by its physical properties is not able to reproduce the entire anatomy of the apical part of the root – often there are images layering and distortion. If the X-ray image is used together with the input file, there is a possibility of error in the interpretation of the image, which is associated with the subjectivity of the result by experts. Therefore, it may be inappropriate to be guided only by this method of determining the working length. In this article, the task of comparing the methods of detecting the apical constriction zone in endodontic treatment of teeth was solved. The accuracy of measurements with the apical locator [5] has been practically proved. Therefore, it is taken as a guide. The addition of algorithms for machine image analysis, segmentation of this image and automatic determination of the working length make the method of radiological examination more accurate. Clear research results and their analysis are given in the conclusions.

Electrometric method

In the apical structure, there are three zones: the apex (radiological peak of the tooth root), the large apical hole and the apical constriction (the smallest diameter area of the apical part). The apical constriction zone is recommended as the limit for root canal treatment [6, 7]. The apical constriction often has a complex configuration. The physiological tip is located at a distance of 1.0 mm from the anatomical tip – this is the final working length for the doctor. For an example, look at fig. 1 below.

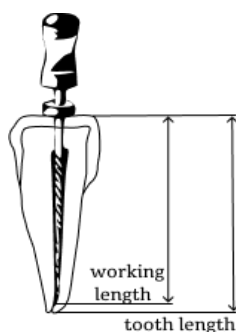


Fig. 1. Definition of the working length

The method of apexology is based on the difference in electrical resistance of tissues. Hard tooth tissues have a higher resistance than the oral mucosa and periodontal tissues. The electrical circuit between the electrodes placed on the lip (lip electrode) and in the root canal (file electrode with calibration stop) remains closed while periodontal tissue reaches the file. In the area of apical narrowing, there is a sharp resistance drop, the circuit closes, and this is fixed by the apex locator [8].

Devices for electrometric detection of the working length of the root canal determine the resistance using alternating currents of different frequencies. Using the ratio method, they allow you to find the general resistance coefficient, indicating the position of the file in the canal (fig. 2).

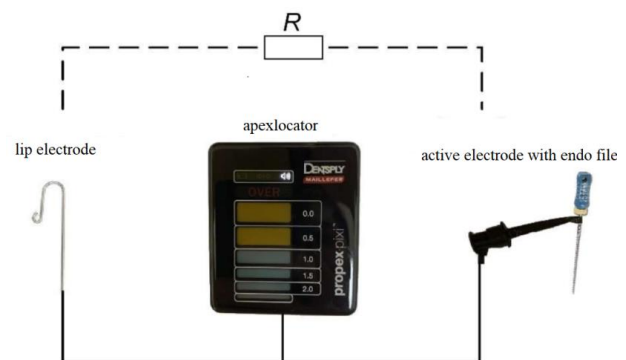


Fig. 2. Schematic of apex locator

This measurement indicates the electrolyte availability in the pulp tissues, it is stable and provides high degree of measurement accuracy. A significant drawback of the method is the requirement to work in comparatively dry canals.

The method of electrometric detection of the root canal length was performed in two stages. The first stage – using the Propex Pixi device [9], the previous working length was determined. In the process of root canal treatment, the diameter is widening and taper is occurring. The second stage – after the final processing of the canal, another measurement was carried out by electrometric method. This value was defined as the final working length of the canal. Pictures of the measurements are given below (fig. 3–4).

The working length was marked with a fixation ring. From the beginning of the working file to the fixing ring, the length can be measured with an endodontic line. The results are recorded in a table and presented in this article.

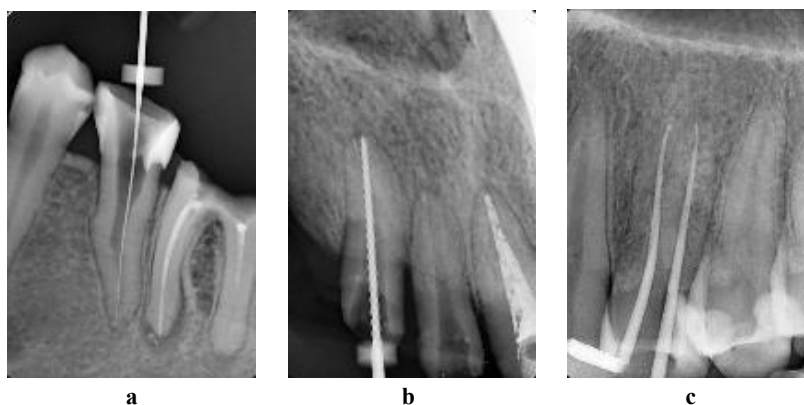


Fig. 3. Tooth image **a** – object №1, **b** – object №2, **c** – object №3

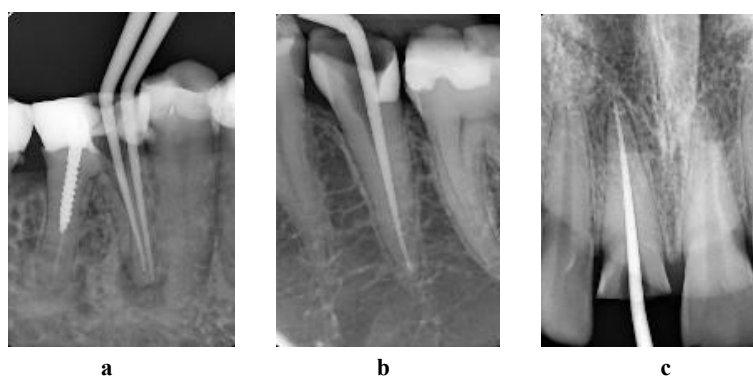


Fig. 4. Tooth image **a** – object №4, **b** – object №5, **c** – object №6

Method of radiological determination of the root canal length

An intraoral radiograph of a tooth is an image that uses a monochrome photometric interpretation (the brightness of the image pixels is shown on a gray scale with pointers from 0 to 255, where the brightness value of 0 means a pixel with black color, the value of 255 means white) [10].

The study used data obtained using the Planmeca ProSensor HD visiograph, which has a resolution of 1020×688 pixels.



Fig. 5. Planmeca ProSensor radiovisiograph

Matlab 2019 Image Processing Toolbox [11] was chosen as the environment for developing software for segmentation and canal length measurement. Segmentation (selection of a segment in the image) was performed using the thresholding method. The threshold method is a binarization method based on dividing the image into 2 parts based on threshold values. The value (T) is selected according to the task to be performed (from 0 to 255). The task can be to highlight both the filled area of the tooth (filled canal) and the un-filled area, then the value of T will change appropriately. For a sealed canal, all brightness values that are in the range of values above T are called object values, everything below is called background values. Further research is to create a boundary layer – a curved line that separates the object and background elements. A segment along this line is selected if it satisfies the condition of low-frequency noise filtering. Figures 6 – 11 show histograms.

Histogram analysis is the result of the program with graphs of distribution of image elements with different brightness. The horizontal axis shows the brightness from 0 to 255, and the vertical axis – the number of pixels with a certain brightness value on the relevant images of the teeth.

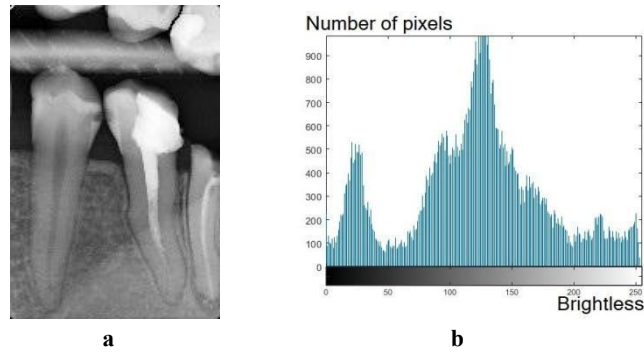


Fig. 6. Histogram analysis of image №1:
a – image of tooth №1, **b** – relevant histogram

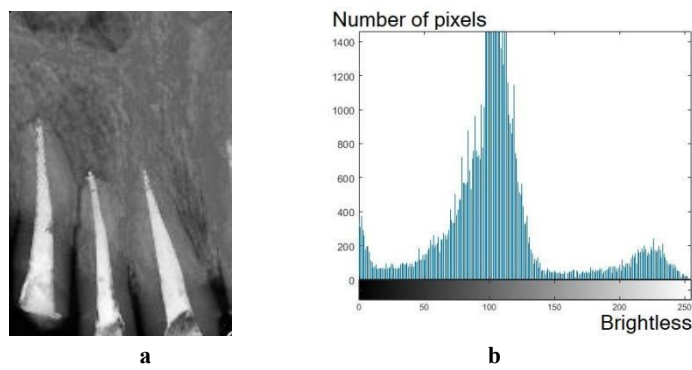


Fig. 7. Histogram analysis of image №2:
a – image of tooth №2, **b** – relevant histogram

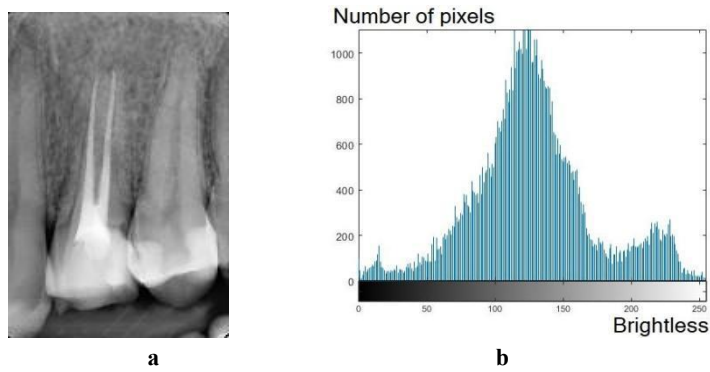


Fig. 8. Histogram analysis of image №3:
a – image of tooth №3, **b** – relevant histogram

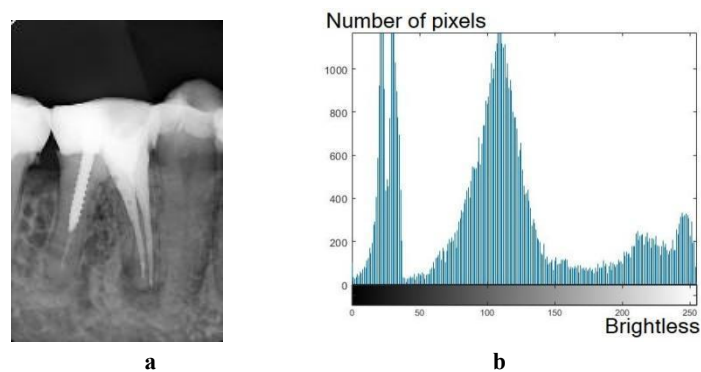


Fig. 9. Histogram analysis of image №4:
a – image of tooth №4, **b** – relevant histogram

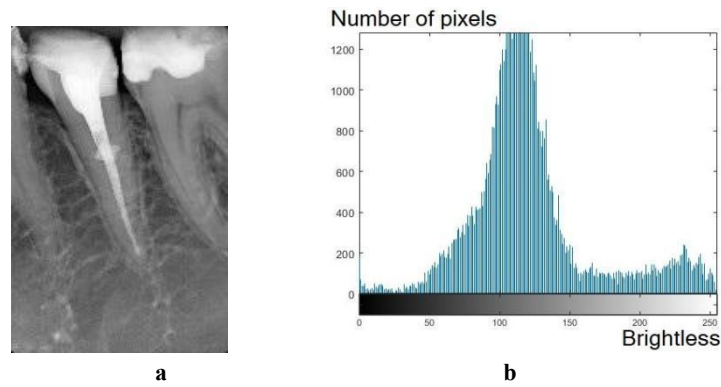


Fig. 10. Histogram analysis of image №5: **a** – image of tooth №5, **b** – relevant histogram

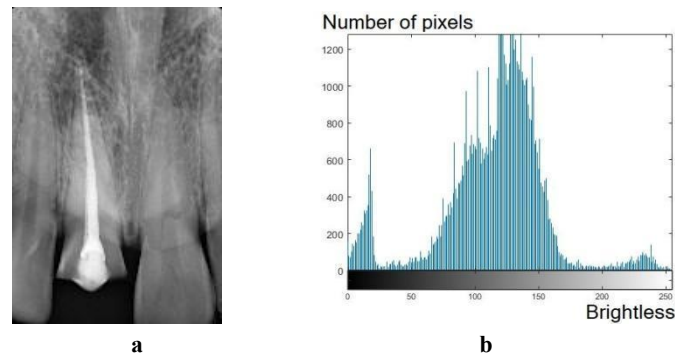


Fig. 11. Histogram analysis of image №6: **a** – image of tooth №6, **b** – relevant histogram

Physiologically filled root canal corresponds to intervals with high brightness values. To select these areas, it is enough to choose the value of T and determine all points that have $f(x, y) > T$, which belong to the object, and if not, belong to the background [12]. Then the output image (g) is defined by the following expression:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) > T \\ 0, & \text{if } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

here 1 – object value; 0 – background value.

The threshold $T = 210$ was chosen for binarization of the tooth root image. Given the resolution, filtering with the removal of segments with less than 1500 pixels was used to exclude binarization

artifacts [13, 14]. X-ray images always contain small details and noise that often interfere with the analysis process. Pre-processing or correction is a step that allows to solve this problem, for example, using low-pass and median filtering algorithms. If the correction of smoothing (noise removal) is performed on individual images, the pre-processing of sets of sections ensures the alignment of geometric and bright-contrast characteristics of images in the set. For this we use methods of alignment of brightness histograms in the sequence of images and reconstruction [15]. The result of pre-processing is a set of images with relatively the same brightness-contrast characteristics and smooth surface [16]. The result of binarization is shown in figs. 12–13.

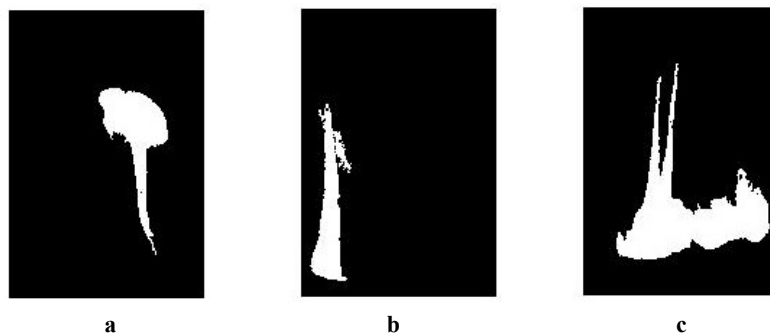


Fig. 12. The result of binarization of images with threshold $T = 210$:
a – segmented tooth №1, **b** – segmented tooth №2, **c** – segmented tooth №3

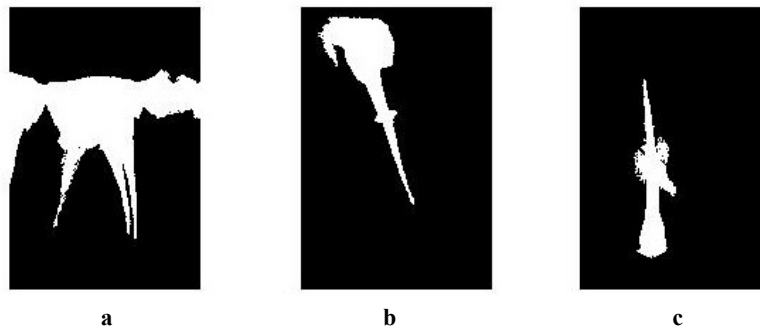


Fig. 13 The result of binarization of images with threshold $T = 210$:
a – segmented tooth №4, b – segmented tooth №5, c – segmented tooth №6

In threshold segmentation it is necessary to take into account the connection of components. Two points are considered connected if there is a path along which the characteristic function is constant. Marking objects on a discrete binary image consists in selecting

the point of the object from which the study actually begins. In the next step, neighboring points are marked (except for those already marked) [17]. Upon completion of this recursive procedure, we obtain a closed loop (fig. 14–15).

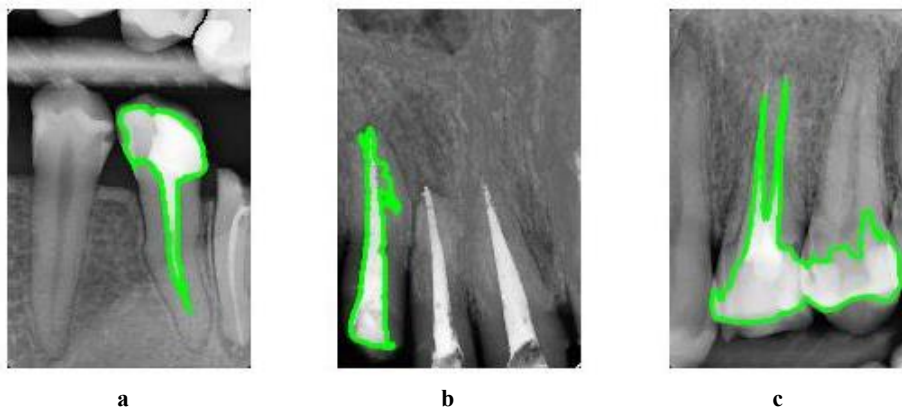


Fig. 14. The result of placing segmented contours of tooth roots on the original image:
a – object №1, b – object №2, c – object №3

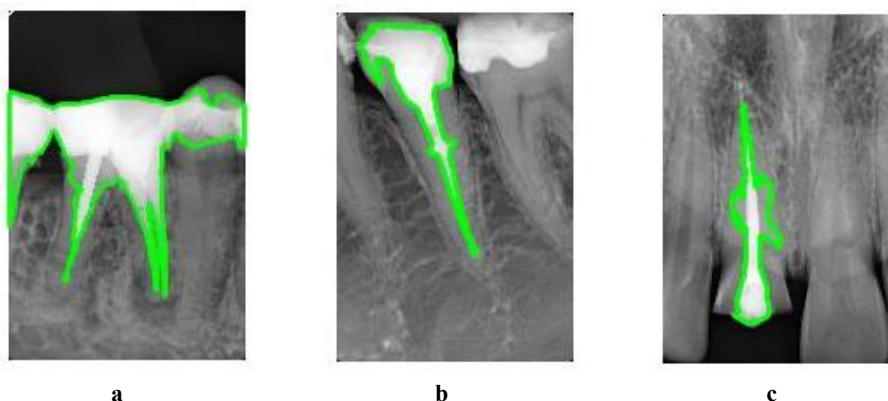


Fig. 15. The result of placing segmented contours of tooth roots on the original image:
a – object №4, b – object №5, c – object №6

Results and discussion

As a result of the work performed, the segmentation of tooth root canal structures was carried out and their length

was determined. Comparison (table 1) of the electronic determination of the working length with the radiological one showed that the electronic length and the radiological length determined by the program do not coincide.

In the case of lateral curvature of the canal, the X-ray image may show a shorter working length than that of the apex locators [18, 19], and there is a possibility of incorrect segmentation of the tooth crown due to the low brightness of the crown pixels and, as a result, the crown is not taken into account.

Table 1. Comparison of measurements made using different methods

Objects	Mathematical method (arithmetic mean) by J.I. Ingle, L.K. Buckland [20].	Electrometric method	X-ray method with segmentation
object No1	22.9 mm	22.2 mm	20.6598 mm
object No2	20.5 mm	20.7 mm	20.4345 mm
object No3	19.0 mm	19.8 mm	18.7147 mm
object No4	19.2 mm	19.7 mm	19.7961 mm
object No5	20.1 mm	21.2 mm	20.4582 mm
object No6	23.3 mm	18.8 mm	18.3045 mm

Conclusion

It is important to note that the electrometric method of measuring the length of the root canal has a high accuracy of measurement, about 0.5 mm. The radiological method has in most cases lower quantitative indicators. First of all, this is due to the physical principle of obtaining an image, that is, the projection of the tooth can overlap each other and we have a lot of shadows in the image. The shadow may not fall within the range of acceptable values (in the study $T=210$) and then a certain area in the image is segmented not as an object, but as a background and the resulting length will be smaller. Secondly, the images do not display canal curvatures that occur perpendicular to the X-rays. This can also make the resulting length smaller.

The key feature of the chosen method of radiological examination is the application of a special developed algorithm of image segmentation. It makes it possible to determine the working length of the tooth more accurately, preventing the doctor's mistake. The main

advantages of the radiological method are non-invasiveness and speed. Non-invasiveness allows the doctor to quickly obtain more accurate visual data without harm to the patient and predict the surgical intervention before it begins. Compared to the electrometric method, on the one hand, we have a more accurate method, and on the other hand, more indicative and fast. The most optimal is the combination of these two methods in reality, and it requires additional research.

Special attention should be paid to the features of the methods of segmentation and processing of the obtained diagnostic images to ensure the highest quality visualization of root canal contours. An important parameter in segmentation is the threshold of binarization, below which the algorithm assigns the pixel value of the background, and above – the object. For the correct definition, it is necessary to conduct a histogram analysis of the obtained images and in the post-processing process to filter out local artifacts using morphological operations. Automation of this process will speed up the processing rate and remove the human error factor.

References

1. Verma, S. *et al.* (2021), "Measuring the canal length – a review", *Journal of Evolution of Medical and Dental Sciences*, 10 (33), P. 2824–2829. DOI: <https://doi.org/10.14260/jemds/2021/575>
2. Chandler, N. P., Friedlander, L. T. and Alothmani, O. S. (2013), "Radiographic assessment of endodontic working length", *Saudi Endodontic Journal*, 3 (2), p. 57. DOI: <https://doi.org/10.4103/1658-5984.118145>
3. Orosco, F.A. *et al.* (2012), "In vivo accuracy of conventional and digital radiographic methods in confirming root canal working length determination by Root Zx", *Journal of Applied Oral Science*, 20 (5), P. 522–525. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-77572012000500005>
4. Kishor, K. M. N. (2012), "Comparison of working length determination using Apex Locator, conventional radiography and radiovisiography: An in vitro study", *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 13 (4), P. 550–553. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-1184>

5. Thorley, W. (2021), "Working Length Determination", *British Dental Journal*, 230 (1), P. 5–5. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41415-020-2562-y>
6. www.mednovosti.by. (n.d.), "Methods for determining the working length of the root canal" ["Metod opredeleny`ya rabochej dly`n kornevogo kanala"], available at: <http://www.mednovosti.by/journal.aspx?article=2740> [Accessed 16 Dec. 2022].
7. www.mednovosti.by. (n.d.), "Comparative evaluation of the effectiveness of methods for determining the working length of the root canal" ["Sravny`tel'naya ocenka efekty`vnosty` metodov opredeleny`ya rabochej dly`ny kornevogo kanala"], available at: <http://www.mednovosti.by/journal.aspx?article=2758> [Accessed 16 Dec. 2022].
8. Perepelytsia, O. M. (2021), "Segmentation of dental X-ray in endodontic treatment", *Biophysical Bulletin*, (45), P. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2021-45-02>
9. Dentsplysirona.com, available at: https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/manufacturer/Endodontics/Motors_Apex_Locators/Apex_Locators/Propex_Pixi/PROPEX%20PIXI%20EUROP_DFU_1018_MASTER_DS_E_EN.pdf (Accessed: December 16, 2022).
10. Perepelytsia, O. and Nosova, T. (2022), "Determining the working length of a root canal using intraoral radiography segmentation", *Informatyka, Avtomatyka, Pomiry w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 12 (1), P. 44–46. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2878>
11. Image Processing Toolbox (no date) Mathworks.com, available at: <https://www.mathworks.com/products/image.html> (Accessed: December 16, 2022).
12. Avrunin, O. G. et al. (2021), "Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the Computer Tomography Data", *Sensors*, 21 (4), p. 1198. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041198>
13. Avrunin, O. et al. (2019), "Computed Tomography Dataset Analysis for stereotaxic neurosurgery navigation", *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/caol46282.2019.9019459>
14. Avrunin, O. et al. (2019), "Computed Tomography Dataset Analysis for stereotaxic neurosurgery navigation", *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/caol46282.2019.9019459>
15. Kolisnyk, K. et al. (2021), "Applying discriminant analysis to improve telemedicine diagnostics quality", *IEEE EUROCON 2021 – 19th International Conference on Smart Technologies*. DOI: <https://doi.org/10.1109/eurocon52738.2021.9535576>
16. Selivanova, K., Avrunin, O. and Kazimirov, N. (2020), "Determination of the basic parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological research with the introduction of Multitouch Technology", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 1 (11), P. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.147>
17. Avrunin, O. (2017), "Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1 (5), P. 104–107. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2017.05.20>
18. Khomenko, L. A. (2002), *Prakticheskaya endodontiya, Instrumenty. materialy i metody*.
19. Sharma, M. and Arora, V. (2010), "Determination of Working Length of Root Canal", *Medical Journal, Armed Forces India*, 66 (3), P. 231–234. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-1237\(10\)80044-9](https://doi.org/10.1016/S0377-1237(10)80044-9)
20. John Ide Ingle and Edward Edgerton Beveridge (1976), *Endodontics*

Received 21.11.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Перепелиця Олексій Миколайович – аспірант кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: oleksii.perepelytsia@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6850-2013>

Перепелица Алексей Николаевич – аспірант кафедри біомедицинської інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Perepelytsia Oleksii Mykolaiovych – PhD student at the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Аврунін Олег Григорович – завідувач кафедри біомедичної інженерії, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>

Аврунин Олег Григорьевич – заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Avrunin Oleg Grigorovich – Head of the Department of Biomedical Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМЕТРИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОРЕНЕВОГО КАНАЛУ ТА МЕТОДУ ПОРОГОВОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ РЕНТГЕНОГРАМИ

Предметом дослідження є рентгенівські знімки зубів під час виконання ендодонтичних операцій. **Мета** роботи – практичне порівняння розробленого методу сегментації рентгенограми для визначення довжини кореневого каналу з електрометричним і математичним методом. У статті використовуються такі **методи**: принципи ендодонтичного препарування зубів; методи визначення робочої довжини кореневого каналу (рентгенологічний, електрометричний); метод порогової сегментації; метод сегментації кісткових структур на томографічних зображеннях. Здобуто такі **результати**: проаналізовано наявні методи визначення робочої довжини кореневого каналу, виокремлено основні переваги та недоліки кожного з методів. Математичний метод є швидким, але неточним і може слугувати лише для попереднього оцінювання. Електрометричний – найбільш точний, проте має дуже жорсткі вимоги для вимірювання в ділянці вологості каналів, крім того, інвазивність методу передбачає низку недоліків. Рентгенологічний – найперспективніший для досліджень завдяки його безболісності для пацієнта, низькій дозі опромінення під час інтраоральної рентгенограми та можливості застосування алгоритмів оброблення зображень для уточнення результатів вимірювання. У межах цієї роботи сформульовано принципи сегментації та виділення контурів зуба на рентгенівському знімку для визначення робочої довжини та проведено практичні дослідження для порівняння всіх методів аналізу. **Висновки**. Застосування методу електрометричного визначення довжини дає найточніший результат, але сегментація рентгенограми дає змогу лікареві отримати додаткову інформацію щодо архітекtonіки кореневого каналу. Крім того, можливість оброблення зображень, таких як сегментація, виділення контурів і автоматичне визначення зони апікального звуження, роблять цей метод найбільш перспективним. Найоптимальнішою є комбінація цих двох методів на практиці, що потребує додаткових досліджень.

Ключові слова: кореневий канал; рентгенограма; пороговий метод; сегментація.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЕВОГО КАНАЛА И МЕТОДА ПОРОГОВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ РЕНТГЕНОГРАММЫ

Предметом исследования в статье являются рентгеновские снимки зубов при выполнении эндодонтических операций. **Цель** работы – практическое сравнение разработанного метода сегментации рентгенограммы для определения длины корневого канала с электрометрическим и математическим методом. В статье используются следующие **методы**: принципы эндодонтического препарирования зубов; методы определения рабочей длины корневого канала (рентгенологический, электрометрический); метод пороговой сегментации; метод сегментации костных структур на томографических изображениях. Получены следующие **результаты**: проанализированы существующие методы определения рабочей длины корневого канала, выделены основные достоинства и недостатки каждого из методов. Математический метод является быстрым, но неточным и может служить лишь для предварительной оценки. Электрометрический является наиболее точным, однако имеет очень жесткие требования для измерения в области влажности каналов, а также инвазивность метода имеет ряд недостатков. Рентгенологический – наиболее перспективный для исследований благодаря его безболезненности для пациента, низкой дозе облучения при интраоральной рентгенограмме и возможности применения алгоритмов обработки изображений для уточнения результатов измерения. В рамках данной работы сформулированы принципы сегментации и выделения контуров зуба на рентгеновском снимке для определения рабочей длины и проведены практические исследования для сравнения всех методов анализа. **Выводы**. Применение метода электрометрического определения длины дает самый точный результат, но сегментация рентгенограммы позволяет врачу получить дополнительную информацию об архитектонике корневого канала. Кроме этого, возможность применения обработки изображений, таких как сегментация, выделение контуров и автоматическое определение зоны апикального сужения, делают данный метод наиболее перспективным. Оптимальным является комбинация этих двух методов на практике, что требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: корневой канал; рентгенограмма; пороговый метод; сегментация.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Перепелиця О. М., Аврунун О. Г. Порівняння методу електрометричного визначення параметрів кореневого каналу та методу порогової сегментації рентгенограми. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.047>

Perepelytsia, O., Avrunin, O. (2022), "Comparison of the method of electrometric determination of root canal parameters and the method of threshold segmentation of radiographs", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.047>

O. MATVIENKO, N. MANCHYNSKA

METHOD FOR CALCULATION OF DISPERSIONS OF DEPENDENT VARIABLES OF A STOCHASTIC MODEL OF QUASI-STATIONARY OPERATING MODES OF THE MAIN WATER PIPELINE

The **subject** of research in the article is a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of water supply and distribution systems, which adequately describes the actual operating modes of the water supply system for a given time interval and can be used as a basic model for setting and solving problems of optimal stochastic control of the development and operation of supply and distribution systems. water. The **goal** of the work is to develop a method for calculating estimates of the dispersions of dependent variables depending on the given values of mathematical expectations and dispersions of independent variables for a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit as a subsystem of the water supply and distribution system. To achieve this goal, it is necessary to solve the following **tasks**: to build a deterministic equivalent of a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit; calculate estimates of mathematical expectations of dependent variables; calculate estimates of variances of dependent variables. To calculate estimates of the variances of dependent variables depending on the variances of independent variables, we will use the **method** of statistical linearization. To obtain estimates of mathematical expectations of dependent variables, the deterministic equivalent of the stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit is solved by the modified Newton method. The following **results** are obtained: a method for calculating estimates of the dispersions of dependent variables for a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit. **Conclusions**: the paper proposes an approximate method for calculating the statistical properties of dependent variables depending on the statistical properties of the parameters and independent variables of the stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit. The proposed method is based on the construction of a deterministic equivalent of a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water conduit and its use for calculating estimates of variances of dependent variables depending on the given values of mathematical expectations and variances of independent variables. Compared with the simulation method, the proposed approximate method does not require significant time and computational resources. The use of the proposed method was demonstrated by an example.

Keywords: stochastic model; dispersion; main water conduit; quasi-stationary regime; deterministic equivalent.

Introduction

At present, considerable experience has been accumulated in mathematical modeling and optimization of water transport and distribution regimes in water supply systems [1 – 12]. In works [1, 10] quasi-stationary operation modes of water supply systems and their application for modeling and optimization are considered; in publications [3 – 6, 12] issues of zoning of water supply systems for the purpose of energy and resource saving are studied; in works [8, 11] stochastic models of water supply networks and gas pipelines with leaks are proposed. The stochastic model of quasi-stationary operation modes of water supply and distribution systems developed in studies [7 – 9] adequately describes the actual operation modes of the water supply system at a given time interval. Also, this model can be used as a basic model for formulating and solving problems of optimal stochastic control of development and functioning of water supply and distribution systems. This is an important and urgent task for water utilities,

as optimization is aimed primarily at reducing energy costs and water losses. For effective application of this model, it is necessary to obtain estimates of mathematical expectations and variances of dependent variables. The aim of the article is to develop a method for calculating estimates of dispersions of dependent variables for given values of mathematical expectations and dispersions of independent variables for stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water pipeline.

A simple, but extremely time-consuming method of calculating statistical properties of dependent variables from statistical properties of parameters and independent variables of a stochastic model of quasi-stationary operation modes of water supply and distribution systems is the method of simulation (computer) modeling. At that, it is assumed that model equations should be solvable for any realizations of random variables included in this system. In order to obtain unbiased, efficient, and consistent estimates of the model's dependent variables, the number of experiments N must be at least

1000 to 10 000. This approach guarantees, if, obtaining unbiased, efficient, and consistent estimates, but requires considerable time and computational resources.

To reduce time costs and computing resources, we use an approximate method for calculating the statistical properties of the dependent variables in accordance with the statistical properties of the parameters and independent variables of the stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water pipeline (MP) [10 – 13]. The proposed method is based on the construction of a deterministic equivalent of the stochastic model of quasi-stationary operation modes of MP and its use to calculate estimates of mathematical expectations (ME) and dispersions of dependent variables for given values of ME and dispersions of independent variables. The approximated method involves solving the following problems: building a deterministic equivalent of a stochastic model of quasi-stationary modes of operation of a main water pipeline; calculating estimates of mathematical expectations of dependent variables; calculating estimates of dispersions of dependent variables.

Stochastic model of quasi-stationary modes of operation of the main water pipeline

Let us consider a stochastic model of quasi-stationary modes of MP operation, the structure of which can be represented as an interconnected sequence of multi-process pumping stations (PSs) with clean water reservoirs (CWR) at their inlets, which are connected by multi-line sections of main pipelines, and CWRs at MP outlets [14 – 17].

To represent MP structure in the form of an orgraph $G(V, E)$, where V is the set of vertices, E is the set of arcs ($e = \text{Card}(E)$, $v = \text{Card}(V)$), the real MP is added by zero vertex and dummy chords connecting zero vertex with all MP inputs and outputs. The set E of MP graph arcs can be represented as $E = L \cup M \cup K \cup R$, where L is the set of MP graph arcs corresponding to sections with pump units (PU); M is the set

of MP graph arcs corresponding to passive sections ($M = M_1 \cup M_2$, M_1, M_2 correspond to the set of branches and real chords of the graph tree); K is the set of fictitious MP sections ($K = I \cup N$, where I is the set of dummy arcs corresponding to MP inputs, N is the set of fictitious arcs corresponding to MP outputs); R is the set of MP graph arcs corresponding to regulating gate valves (GV). For mathematical formulation of the problem the following MP coding is performed: MP graph tree is selected so that fictitious sections of MP become chords, sections corresponding to HU and GV become branches. At the same time, the real sections partially become chords and partially become branches of the tree. We divide each set M, N, I into two, which correspond to tree branches M_1, N_1, I_1 and chords M_2, N_2, I_2 ($N_1 \neq \emptyset$) [7]. Since each node corresponding to the input or output of MP is given a head or flow value, each of the sets I_1, I_2, N_2 is split into two, depending on whether these arcs are given the flow I_{11}, I_{21}, N_{21} or the head I_{12}, I_{22}, N_{22} . The branch of the tree that corresponds to one of the outputs from the CWR is assigned number 1, the other branches from 2 to $v-1$, the chords of real sections from v to $v + \eta_2 - 1$, the fictitious ones with given nodal rates from $v + \eta_2$ to $v + \eta_2 + \xi_1 - 1$, where η_2 is the number of chords of real sections; the chords with other outputs from CWR from $v + \eta_2 + \xi_1$ to e , where ξ_1 is the number of outputs with given nodal rates, the number of MP (from CWR) (chords) inputs. $\xi_2 = e - (v + \eta_2 + \xi_1)$ the number of MP (from CWR) (chords) inputs. ($\text{Card}(I_1)=1$; $\text{Card}(I_2)=\xi_2 = e - (v + \eta_2 + \xi_1)$; $\text{Card}(N_2)=\xi_1$; $\text{Card}(M_1)=v$; $\text{Card}(M_2)=\eta_2$).

The control interval $[0, T]$ is divided into K subintervals $[0, k \cdot \Delta t]$, ($k = 1, 2, \dots, K$). Then the stochastic mathematical model of quasi-stationary modes of MP operation for each subinterval $[k, k + 1]$ at a given time interval $[0, T]$ will look like this:

$$M_{\omega} \left(h_r(q_r(\omega, k)) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) \right) = 0, \quad (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \quad (1)$$

$$M_{\omega} \left(h_r^s(q_r(\omega, k)) - H_1(\omega, k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} (b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) + h_i^s) \right) = 0, \quad (2)$$

$$(r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1),$$

$$M_{\omega} \left(h_r(q_r(\omega, k)) + h_r^s - H_z(\omega, k) + H_1(\omega, k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} (b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) + h_i^s) \right) = 0, \quad (3)$$

$$(r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad z = 1, \dots, Z),$$

$$M_{\omega} \left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_r(\omega, k) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_r(\omega, k) - q_i(\omega, k) \right) = 0, \quad (i = 1, \dots, v-1), \quad (4)$$

$$P(q_i(\omega, k) > 0) \geq \alpha, \quad \alpha \cong 1, \quad i \in L. \quad (5)$$

$$h_i(q_i(\omega, k)) = \text{sgn } q_i(\omega, k) S_i(\omega) q_i^2(\omega, k), \quad i \in M, \quad (6)$$

$$h_{NAi}(q_i(\omega, k)) = a_{0i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + a_{1i}(\omega) q_i(\omega, k) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + a_{2i}(\omega) q_i^2(\omega, k), \quad i \in L, \quad (7)$$

$$\eta_{NAi}(q_i(\omega, k)) = 1 - \frac{1 - d_{0i}(\omega) - d_{1i}(\omega) q_i(\omega, k) - d_{2i}(\omega) q_i^2(\omega, k)}{(n_{0i} / n_{1i})^{0,36}}, \quad i \in L, \quad (8)$$

$$N_{NAi}(q_i(\omega, k)) = c_{0i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^3 + c_{1i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 q_i(\omega, k) + c_{2i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right) q_i^2(\omega, k), \quad i \in L, \quad (9)$$

$$N_{NAi}(q_i(\omega, k)) = \frac{9,81 \cdot h_{NAi}(q_i(\omega, k)) \cdot q_i(\omega, k)}{0,9 \cdot \eta_{NAi}(q_i(\omega, k))}, \quad i \in L, \quad (10)$$

$$h_{RZi}(q_i(\omega, k)) = \frac{q_i(\omega, k) C_i(\omega)}{E_i^2}, \quad i \in R, \quad (11)$$

$$H_z(\omega, k) = H_z(\omega, k-1) + c_z(q_{zvh}(\omega, k) - q_{zvih}(\omega, k)), \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (12)$$

$$P(H_z^{\min} \leq H_z(\omega, k)) \geq \beta_1, \quad \beta_1 \cong 1, \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (13)$$

$$P(H_z(\omega, k) \leq H_z^{\max}) \geq \beta_2, \quad \beta_2 \cong 1, \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (14)$$

$$P(h_r^c(q_r(\omega, k)) \geq h_r^+) \geq \gamma, \quad \gamma \cong 1, \quad (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1), \quad (15)$$

where random variables characterize: $q_i(\omega, k)$ – water flow rate at the i -th pipeline section at the k -th time interval; $h_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – head of the i -th PU at the k -th time interval; $h_r^c(q_r(\omega, k))$ – free head at the r -th MP node at the k -th time interval ($r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1$); h_r^+ – minimum allowable head at the r -th MP node. $S_i(\omega)$ – evaluation of hydraulic resistance of the i -th pipeline section ($i \in M$); $h_{RZi}(q_i(\omega, k))$ – evaluation of head drop on the i -th HV at the k -th time interval; $\eta_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – evaluation of efficiency of the i -th PU at the k -th time interval; $a_{0i}(\omega), a_{1i}(\omega), a_{2i}(\omega), d_{0i}(\omega), d_{1i}(\omega), d_{2i}(\omega)$ – evaluation of PU parameters ($i \in L$); $C_i(\omega)$ – evaluation of HV parameters ($i \in R$); E_i – degree of HV opening ($E_i \in (0, 1]$); h_i^s – geodetic mark of the i -th pipeline section ($i \in M$); b_{1ri} – element of cyclomatic matrix; $N_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – estimation of PU

power at the k -th time interval; $H_z(\omega, k)$ – estimation of water level in z -th CWR at the k -th time interval; $H_1(\omega, k)$ – estimation of water level in CWR that corresponds to tree branch number 1 at the k -th time interval; H_z^{\min}, H_z^{\max} – given limits of water level change in z -th CWR; $q_{zvh}(\omega, k), q_{zvih}(\omega, k)$ – volume water supply in z -th CWR and volume water withdrawal from z -th CWR at the k -th time interval; c_z – normalizing multiplier for z -th CWR.

The stochastic model (1) – (15) of quasi-stationary MP operation modes allows the calculation of parameters and the state of the quasi-stationary MP operation mode at a given time interval $[0, T]$. It is assumed that all random variables included in the model have normal distribution with known statistical characteristics – ME and variances. Boundary conditions are also set as random variables having normal distribution and are also set by their parameters – ME of pressures or water discharge at MP inlets and outlets and their dispersions.

At the same time, a boundary condition in the form of ME head must be set at one of MP inlets or outlets.

Such setting of boundary conditions allows to calculate parameters and state of stochastic model of quasi-stationary mode of MP operation. At the made assumptions about normality of distribution law, the solution of system of equations of mathematical model (1) – (15) is reduced to calculation of statistical characteristics (ME and dispersions) of dependent variables according to statistical properties of parameters and independent variables of model (1) – (15).

Deterministic equivalent of stochastic model of quasi-stationary modes of MP

To construct a deterministic equivalent of the stochastic model (1) – (15) to calculate values of ME estimates of dependent variables from given values of ME estimates of independent variables, we will use an approximate method by replacing ME of nonlinear implicit functions of random arguments (1) – (4) by values of these functions from ME of their arguments.

The deterministic equivalent of the stochastic model of quasi-stationary modes of MP is as follows:

$$f_r = \bar{h}_r(\bar{q}_r(k)) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} \bar{h}_i(\bar{q}_i(k)) = 0, \quad (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \quad (16)$$

$$f_r = \bar{h}_r^c(\bar{q}_r(k)) - \bar{H}_1(k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\bar{h}_i(\bar{q}_i(k)) + h_i^g) = 0, \quad (17)$$

$$(r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1),$$

$$f_r = \bar{h}_r(\bar{q}_r(k)) + h_r^g - \bar{H}_z(k) + \bar{H}_1(k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i(k)) + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\bar{h}_i(\bar{q}_i(k)) + h_i^g) = 0, \quad (18)$$

$$(r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad z = 1, \dots, Z),$$

$$\bar{q}_i(k) = \sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} \bar{q}_r(k) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} \bar{q}_r(k), \quad (i = 1, \dots, v-1), \quad (19)$$

$$\bar{q}_i(k) > 0, \quad i \in L. \quad (20)$$

$$\bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) = \bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} \bar{q}_i(k) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} \bar{q}_i^2(k), \quad i \in L, \quad (21)$$

$$\bar{\eta}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) = 1 - \frac{1 - \bar{d}_{0i} - \bar{d}_{1i} \bar{q}_i(k) - \bar{d}_{2i} \bar{q}_i^2(k)}{(n_{0i} / n_{1i})^{0.36}}, \quad i \in L, \quad (22)$$

$$\bar{N}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) = \bar{c}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^3 + \bar{c}_{1i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 \bar{q}_i(k) + \bar{c}_{2i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right) \bar{q}_i^2(k), \quad i \in L, \quad (23)$$

$$\bar{N}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) = \frac{9,81 \cdot \bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i(k)) \cdot \bar{q}_i(k)}{0,9 \cdot \bar{\eta}_{NAi}(\bar{q}_i(k))}, \quad i \in L, \quad (24)$$

$$\bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i(k)) = \frac{\bar{q}_i(k) \bar{C}_i}{E_i^2(k)}, \quad i \in R, \quad (25)$$

$$\bar{h}_i(\bar{q}_i(k)) = \text{sgn} \bar{q}_i(k) \bar{S}_i \bar{q}_i^2(k), \quad i \in M, \quad (26)$$

$$\bar{H}_z(k) = \bar{H}_z(k-1) + c_z (\bar{q}_{zv}h(k) - \bar{q}_{zv}h(k)), \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (27)$$

$$H_z^{\min} \leq \bar{H}_z(k), \quad (28)$$

$$\bar{H}_z(k) \leq H_z^{\max}, \quad (29)$$

$$\bar{h}_r^c(\bar{q}_r(k)) \geq h_r^+. \quad (30)$$

The deterministic equivalent of the stochastic model of quasi-stationary modes of MP operation is an interrelated system of nonlinear algebraic equations (16) – (18), systems of coupling equations

(19), (21) – (27) and systems of one-sided inequalities (20), (28) – (30).

The peculiarity of the system of equations (16) – (19) is that it contains $\eta_2 + \xi_2$ equations with $e - (\xi_1 - 1) = e - \xi_1 + 1$

unknowns. In this case, the number of equations is less than the number of unknowns by an amount equal to the total number of inputs and outputs MP $\xi_1 + \xi_2$. To meet the necessary conditions for solvability of the system of equations (16) – (19) (coincidence of the number of equations with the number of unknowns) it is augmented with values of boundary conditions, which are treated as independent variables. As independent variables of model (16) – (19) we will use ME boundary conditions: pressures $\bar{H}_r (r \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22})$, set on tree branch number 1 (I_{12}) and on MP inputs I_{22} and outputs N_{22} MP, which correspond to fictitious chords; flows $\bar{q}_i (i \in I_{21} \cup N_{21})$, set on MP inputs I_{21} and outputs N_{21} MP. As shown in [7], the obtained system of nonlinear algebraic equations (16) – (19) coincides with the system of equations of steady-state flow distribution and has a single solution if conditions (19) – (30) are satisfied.

Statistical linearization method

As a result of solution of the interrelated systems of nonlinear algebraic equations (16) – (18), systems of

connection equations (19), (21) – (27) and systems of one-sided inequalities (20), (28) – (30) we got estimates of ME of dependent variables. To calculate the variance of dependent variables depending on the variance of independent variables, we will use the method of statistical linearization [11]. The system of equations (16) – (18) will be treated as a system of implicitly given functions of dependent variables from independent variables. The entire set of variables will be divided into two subsets: independent and dependent variables. We will use ME boundary conditions as independent variables of model (16) – (18): pressures $\bar{H}_r (r \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22})$, set on branch of the tree number 1 (I_{12}) and at the inputs I_{22} and outputs N_{22} of MP, which correspond to fictitious chords; flows $\bar{q}_i (i \in I_{21} \cup N_{21})$, set at the inputs I_{21} and outputs N_{21} of MP. The dependent variables are the flow rates in the real chords and at MP inputs and outputs with the given heads $q_r (r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22})$; and the flow rates at MP inputs and outputs with the given flows $H_r (r \in I_{21} \cup N_{21})$.

For further calculations, we present the system (16) – (18) in the form:

$$f_r(\omega) = \text{sgn } q_r(\omega) S_r(\omega) q_r^2(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} \text{sgn } q_i(\omega) S_i q_i^2(\omega) = 0, \quad (r \in M_2), \quad (31)$$

$$f_r(\omega) = H_r(\omega) - \bar{H}_1 + \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\text{sgn } q_i(\omega) \bar{S}_i q_i^2(\omega) + h_i^g) = 0, \quad (r \in N_{21}), \quad (32)$$

$$f_r(\omega) = \bar{H}_1 - H_r(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\text{sgn } q_i(\omega) \bar{S}_i q_i^2(\omega) + h_i^g) = 0, \quad (r \in I_{21}), \quad (33)$$

$$f_r(\omega) = \text{sgn } q_r(\omega) \bar{S}_r q_r^2(\omega) + h_r^g - H_r(\omega) + \bar{H}_1 + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\text{sgn } q_i(\omega) \bar{S}_i q_i^2(\omega) + h_i^g) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} = 0, \quad (r \in I_{22} \cup N_{22}), \quad (34)$$

$$q_i(\omega) = \sum_{r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r \in I_{21} \cup N_{21}} b_{1ri} q_r(\omega), \quad (i \in M_1 \cup I_{12}). \quad (35)$$

The resulting system of implicit functions can be represented as:

$$f(q_r(\omega), r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}; H_1(\omega); H_j(\omega), j \in I_{22} \cup N_{22}; q_j(\omega), j \in I_{21} \cup N_{21}) = 0, \quad (36)$$

$$f(H_r(\omega), r \in I_{21} \cup N_{21}; H_1(\omega); H_j(\omega), j \in I_{22} \cup N_{22}; q_j(\omega), j \in I_{21} \cup N_{21}) = 0. \quad (37)$$

Let us decompose functions (36), (37) into Taylor series approximately the point $\bar{H}_j (j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22})$, $\bar{q}_j (j \in I_{21} \cup N_{21})$, which corresponds to the steady-state

flux distribution mode, and limit ourselves to the linear terms of the expansion, and then we obtain:

$$q_r(\omega) = q_r(\bar{H}_1, \bar{H}_j, (j \in I_{22} \cup N_{22}); \bar{q}_j (j \in I_{21} \cup N_{21})) + \sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \delta H_j(\omega) + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \delta q_j(\omega), \quad (38)$$

$$r \in I_{22} \cup N_{22},$$

$$H_r(\omega) = H_r(\bar{H}_1, \bar{H}_j, (j \in I_{22} \cup N_{22}); \bar{q}_j (j \in I_{21} \cup N_{21})) + \sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \delta H_j(\omega) + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \delta q_j(\omega), \quad (39)$$

$$r \in I_{21} \cup N_{21},$$

where the derivatives are calculated at the decomposition point, and

$$\delta H_j(\omega) = H_j(\omega) - \bar{H}_j, \quad \delta q_j(\omega) = q_j(\omega) - \bar{q}_j. \quad (40)$$

For (36):

$$M_\omega \left[q_r(\omega) - \bar{q}_r(\bar{H}_1, \bar{H}_j, (j \in I_{22} \cup N_{22}); \bar{q}_j (j \in I_{21} \cup N_{21})) \right]^2 =$$

$$= M_\omega \left[\sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \delta H_j(\omega) + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \delta q_j(\omega) \right]^2, \quad r \in I_{22} \cup N_{22}, \quad (41)$$

$$\sigma_{q_r}^2 = M_\omega \left[\sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{\delta H_j}^2 + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{\delta q_j}^2 + 2 \sum_{\substack{i \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22} \\ j \in I_{21} \cup N_{21}}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta H_i} \sigma_{\delta q_j} + \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{\substack{i, j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22} \\ i < j}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta H_i} \sigma_{\delta H_j} + 2 \sum_{\substack{i, j \in I_{21} \cup N_{21} \\ i < j}} \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta q_i} \sigma_{\delta q_j} \right], \quad r \in I_{22} \cup N_{22}. \quad (42)$$

Taking into account that independent quantities, so all their correlation coefficients $k_{ij} = 0$, $i \neq j$, we obtain estimates of the variances of the dependent variables:

$$M_\omega(\delta H_j(\omega)) = M_\omega(\delta q_j(\omega)) = 0, \quad \sigma_{\delta q_j}^2 = \sigma_{q_j}^2, \quad \sigma_{\delta H_j}^2 = \sigma_{H_j}^2,$$

and $H_1; H_j, j \in I_{22} \cup N_{22}; q_j, j \in I_{21} \cup N_{21}$ are

$$\sigma_{q_r}^2 = \sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{H_j}^2 + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\left(\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{q_j}^2, \quad r \in I_{22} \cup N_{22}. \quad (43)$$

For (37)

$$M_\omega \left[H_r(\omega) - H_r(\bar{H}_1, \bar{H}_j, (j \in I_{22} \cup N_{22}); \bar{q}_j (j \in I_{21} \cup N_{21})) \right]^2 =$$

$$= M_\omega \left[\sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \delta H_j(\omega) + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \delta q_j(\omega) \right]^2, \quad r \in I_{21} \cup N_{21}, \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{H_r}^2 = & M \left[\sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{\delta H_j}^2 + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{\delta q_j}^2 + \right. \\ & + 2 \sum_{\substack{i \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22} \\ j \in I_{21} \cup N_{21}}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta H_i} \sigma_{\delta q_j} + 2 \sum_{\substack{i, j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22} \\ i < j}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta H_i} \sigma_{\delta H_j} + \\ & \left. + 2 \sum_{\substack{i, j \in I_{21} \cup N_{21} \\ i < j}} \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_i(\omega)} \right)^0 \left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 k_{ij} \sigma_{\delta q_i} \sigma_{\delta q_j} \right], \quad r \in I_{21} \cup N_{21}. \end{aligned} \quad (45)$$

Taking into account that coefficients $k_{ij} = 0$, $i \neq j$, we obtain estimates of the variances of the dependent variables: $M(\delta H_j(\omega)) = M(\delta q_j(\omega)) = 0$, $\sigma_{\delta q_j}^2 = \sigma_{q_j}^2$, $\sigma_{\delta H_j}^2 = \sigma_{H_j}^2$, and $H_i; H_j, j \in I_{22} \cup N_{22}; q_j, j \in I_{21} \cup N_{21}$ are independent quantities, so all their correlation

$$\sigma_{H_r}^2 = \sum_{j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}} \left(\left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{H_j}^2 + \sum_{j \in I_{21} \cup N_{21}} \left(\left(\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right)^0 \right)^2 \sigma_{q_j}^2, \quad r \in I_{21} \cup N_{21}. \quad (46)$$

To obtain derivatives $\partial q_r / \partial H_j$, $j \in I_{12} \cup I_{22} \cup N_{22}$ and $\partial q_r / \partial q_j$, $j \in I_{21} \cup N_{21}$ we will consider the system of equations (31)–(34) as a system of implicit functions:

$$\begin{aligned} f_1(q_r(\omega), r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}; q_t(\omega), t \in I_{21} \cup N_{21}; H_1(\omega); H_r(\omega), r \in I_{22} \cup N_{22}) = 0, \\ \dots \\ f_{n1}(q_r(\omega), r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}; q_t(\omega), t \in I_{21} \cup N_{21}; H_1(\omega); H_r(\omega), r \in I_{22} \cup N_{22}) = 0. \end{aligned} \quad (47)$$

For clarity, let us introduce the following notations:

$$Y_i = q_r(\omega), \quad r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}, \quad i \in 1, \dots, n1, \quad (48)$$

$$X_i = q_t(\omega), \quad t \in I_{21} \cup N_{21}, \quad i \in 1, \dots, n2, \quad (49)$$

$$X_i = H_1(\omega), \quad i \in 1 + n2, \quad (50)$$

$$X_i = H_r(\omega), \quad r \in I_{22} \cup N_{22}, \quad i \in n2 + 2, \dots, n4, \quad (51)$$

$$n1 = \text{Card}(M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}), \quad n2 = \text{Card}(I_{21} \cup N_{21}), \quad (52)$$

$$n3 = \text{Card}(I_{22} \cup N_{22}), \quad n4 = n2 + n3 + 1. \quad (53)$$

Then the system of implicit functions (47) can be expressed as:

$$\begin{cases} f_1(Y_1, \dots, Y_{n1}, X_1, \dots, X_{n4}) = 0 \\ f_2(Y_1, \dots, Y_{n1}, X_1, \dots, X_{n4}) = 0 \\ \dots \\ f_{n1}(Y_1, \dots, Y_{n1}, X_1, \dots, X_{n4}) = 0 \end{cases} \quad (54)$$

Partial derivatives are calculated by the formula:

$$\frac{\partial Y_j}{\partial X_k} = - \frac{D(f_1, \dots, f_{n1})}{D(X_1, \dots, X_{n4})} \cdot \frac{D(f_1, \dots, f_{n1})}{D(Y_1, \dots, Y_{n1})}, \quad (55)$$

where $\frac{D(f_1, \dots, f_{n1})}{D(Y_1, \dots, Y_{n1})}$ – Jacobian of functions f_1, \dots, f_{n1} on variables Y_1, \dots, Y_{n1} .

The elements of the Jacobi matrix are calculated by the formulas:

$$\frac{\partial f_r(\omega)}{\partial q_r(\omega)} = 2 \text{sgn } q_r(\omega) \bar{S}_r q_r(\omega) + \sum_{i \in M_1} 2b_{1ri}^2 \text{sgn } q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri}^2 \left(\bar{a}_i \frac{n_{li}}{n_{oi}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri}^2 \frac{\bar{C}_i}{E_i^2}, \quad (r \in M_2), \quad (56)$$

$$\frac{\partial f_r(\omega)}{\partial q_k(\omega)} = \sum_{i \in M_1} 2b_{1ri} b_{1ki} \operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri} b_{1ki} \left(\bar{a}_{1i} \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} b_{1ki} \frac{\bar{C}_i}{E_i^2},$$

$$(r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}), (k \in I_{22} \cup N_{22}), \quad (57)$$

$$\frac{\partial f_r(\omega)}{\partial q_t(\omega)} = \sum_{i \in M_1} 2b_{1ri} b_{1ti} \operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri} b_{1ti} \left(\bar{a}_{1i} \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} b_{1ti} \frac{\bar{C}_i}{E_i^2},$$

$$(r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}), (t \in I_{21} \cup N_{21}), \quad (58)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_1(\omega) = 0, \quad (r \in M_2), \quad (59)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_1(\omega) = 1, \quad (r \in I_{22}), \quad (60)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_1(\omega) = -1, \quad (r \in N_{22}), \quad (61)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_k(\omega) = 0, \quad (r \in M_2), (k \in I_{22} \cup N_{22}), \quad (62)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_r(\omega) = -1, \quad (r \in I_{22}), \quad (63)$$

$$\partial f_r(\omega) / \partial H_r(\omega) = 1, \quad (r \in N_{22}). \quad (64)$$

To obtain the derivatives $\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_1(\omega)}$, $\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)}$,

$j \in I_{22} \cup N_{22}$; $\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)}$, $j \in I_{21} \cup N_{21}$ we present

equations (32), (33) in the following form:

$$H_r(\omega) = H_1(\omega) - \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} +$$

$$+ \sum_{i \in M_1} b_{1ri} \left(\operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i^2(\omega) + h_i^g \right) = 0, \quad (r \in N_{21}), \quad (65)$$

$$H_r(\omega) = H_1(\omega) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{0i} \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + \bar{a}_{1i} q_i(\omega) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + \bar{a}_{2i} q_i^2(\omega) \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{q_i(\omega) \bar{C}_i}{E_i^2} +$$

$$+ \sum_{i \in M_1} b_{1ri} \left(\operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i^2(\omega) + h_i^g \right) = 0, \quad (r \in I_{21}). \quad (66)$$

Then the derivatives of the corresponding variables will be:

$$\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_1(\omega)} = 1 \pm \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{1i} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)} \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)} \right) +$$

$$+ \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{\bar{C}_i}{E_i^2} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} 2 \operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)}, \quad (67)$$

$$\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)} = \pm \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{1i} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)} \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{\bar{C}_i}{E_i^2} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)} +$$

$$+ \sum_{i \in M_1} b_{1ri} 2 \operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)}, \quad j \in I_{22} \cup N_{22}, \quad (68)$$

$$\frac{\partial H_r(\omega)}{\partial q_j(\omega)} = \pm \sum_{i \in L} b_{1ri} \left(\bar{a}_{1i} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + 2\bar{a}_{2i} q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial q_j(\omega)} \right) + \sum_{i \in R} b_{1ri} \frac{\bar{C}_i}{E_i^2} \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial q_j(\omega)} +$$

$$+ \sum_{i \in M_1} b_{1ri} 2 \operatorname{sgn} q_i(\omega) \bar{S}_i q_i(\omega) \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial q_j(\omega)}, \quad j \in I_{22} \cup N_{22}. \quad (69)$$

Let us use formula (35) to obtain partial derivatives

$$\frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)}, \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)}, \quad j \in I_{22} \cup N_{22}; \quad \frac{\partial q_i(\omega)}{\partial q_j(\omega)}, \quad j \in I_{21} \cup N_{21};$$

$$\frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_1(\omega)} = \sum_{r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}} b_{1ri} \frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_1(\omega)}, \quad i \in M_1, \quad (70)$$

$$\frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)} = \sum_{r \in M_2 \cup I_{22} \cup N_{22}} b_{1ri} \frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)}, \quad (71)$$

$$i \in M_1, \quad j \in I_{22} \cup N_{22}.$$

The procedure for calculating derivatives $\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_1(\omega)}$,

$\frac{\partial q_r(\omega)}{\partial H_j(\omega)}$, $j \in I_{22} \cup N_{22}$; $\frac{\partial q_i(\omega)}{\partial H_j(\omega)}$, $j \in I_{21} \cup N_{21}$, was considered above.

Study results

Let us apply the proposed method for an MP consisting of an interconnected sequence of multi-processing NSs with CWRs at their inputs, interconnected by multi-line sections of trunk pipelines, and CWRs at MP outputs [18 – 20].

An example of calculation of dispersions of dependent variables in accordance with the statistical properties of parameters and independent variables of the stochastic model of quasi-stationary modes of MP operation is given in tables 1 and 2.

Table 1. Estimates of dispersion of free pressures in nodes that correspond to outputs with given flow rates (\bar{q}_0)

Nod	Input data		Calculation results	
	$\bar{q}_0, \text{m}^3/\text{c}$	$\sigma_{\bar{q}_0}$	\bar{h}^c, m	$\sigma_{\bar{h}^c}$
1	0,00348989	0,00058	26,89	2,05
2	0,00142236	0,00024	63,22	4,80
3	0,00142236	0,00024	59,7	13,29
4	0,2024136	0,03374	15,25	13,84
5	1,11676467	0,18613	47,41	13,87
6	0,00069798	0,00012	34,66	10,14
7	0,06979779	0,01163	53,75	2,80
8	0,06979779	0,01163	43,26	4,49
9	0,00348989	0,00058	42,72	5,06
10	0,00139596	0,00023	51,56	10,14
11	0,8724724	0,14541	11,1	13,56
12	0,00139596	0,00023	42,85	10,15
13	0,8724724	0,14541	2,31	13,56
14	0,27919117	0,04653	46,6	13,87

Table 2. Estimates of expenditure dispersion, which correspond to chords with active sources

Chord	H, m	σ_H	$q, \text{m}^3/\text{c}$	σ_q
1	2	0,333	0,3316	0,0635
2	2	0,333	0,3765	0,064
3	2	0,333	0,3968	0,0638
4	2	0,333	0,4082	0,0632
5	2	0,333	1,4671	0,1734
6	2	0,333	1,2815	0,1633
7	2	0,333	1,1874	0,1472
8	2	0,333	0,6868	0,0809
9	2	0,333	0,6868	0,0809
10	2	0,333	1,2522	0,1707
11	2	0,333	1,2913	0,1899
12	2	0,333	1,6573	0,2051
13	2	0,333	1,6894	0,2403
14	2	0,333	-0,704	0,1173
15	2	0,333	-1,268	0,2114
16	2	0,333	-2,525	0,4208
17	2	0,333	-0,806	0,1343
18	1,45	0,2116	0,2259	0,0377
19	1,45	0,2116	-4,14	0,5721

References

1. Levin, A. A., Chistyakov, V. F., Chistyakova, E. V. (2015), "Calculation of hydraulic circuits in the quasi-stationary approximation" ["Raschet gidravlicheskih tsepey v kvazistatsionarnom priblizhenii"], *Pipeline systems of power engineering. Methodical and applied problems of mathematical modelling*, P. 100–109.
2. Tevyashev, A. D., Matvienko, O. I. (2016), "Assessment of the potential for resource and energy saving in the management of the development and operation of the main water pipeline" ["Otsenka potentsiala resurso- i energosberezheniya pri upravlenii razvitiem i funkcionirovaniem magistral'nogo vodovoda"], *Underwater technologies. Industrial and civil engineering*, No. 4, P. 27–38.
3. Perelman, L. S., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Whittle, A. J. (2015), "Automated Sub-Zoning of Water Distribution Systems", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 65, P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>
4. Diao, K., Jung, D., Farmani, R., Fu, G., Butler, D., Lansey, K. (2021), "Modular interdependency analysis for water distribution systems", *Water Research*, Vol. 201, 117320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117320>
5. Zheng, F., Zecchin, A. C., Simpson, A. R. (2013), "A decomposition and multi-stage optimization approach applied to the optimization of water distribution systems with multiple supply sources", *Water Resources Research*, Vol. 49, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR013160>
6. Nardo, A. D., Natale, M. D., Santonastaso, G. F., Venticinque, S. (2011), *Graph Partitioning for Automatic Sectorization of a Water Distribution System*, 841 p.
7. Tevyashev, A. D., Matvienko, O. I. (2015), "Mathematical model and method of optimal stochastic control of the operating modes of the main water conduit" ["Matematicheskaya model' i metod optimal'nogo stokhasticheskogo upravleniya rezhimami raboty magistral'nogo vodovoda"], *East European Journal of Advanced Technologies*, No. 6/4 (78), P. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55469>
8. Tevyashev, A. D., Kozyrenko, S. I., Nepochatova, V. D. (2015), "Stochastic model of quasi-stationary modes of operation of water supply systems and the method of its construction for water supply networks with leaks" ["Stokhasticheskaya model' kvazistatsionarnykh rezhimov raboty sistem vodosnabzheniya i metod ee postroeniya dlya vodoprovodnykh setey s utechkami"], *Pipeline systems of power engineering. Methodical and applied problems of mathematical modelling*, P. 205–220.
9. Tevyashev, A. D., Matvienko, O. I. (2015), "On a class of optimal stochastic control problems with probabilistic constraints on phase variables" ["Ob odnom klasse zadach optimal'nogo stokhasticheskogo upravleniya s veroyatnostnymi ogranicheniyami na fazovye peremennye"], *Information systems and technologies: abstracts. 4th International Scientific and Technical Conference*, September 21-27, P. 140–142.
10. Tevyashev, A. D., Tevyasheva, O. A., Frolov, V. A. (2011), "About one class of stochastic models of quasi-stationary operation modes of gas transportation systems" ["Ob odnom klasse stokhasticheskikh modeley kvazistatsionarnykh rezhimov raboty gazotransportnykh system"], *Radio electronics and computer science*, No. 3, P. 75–81.
11. Tevyashev, A. D., Kozyrenko, S. I., Nepochatova, V. D. (2010), "Method for constructing a model of quasi-stationary modes of operation of water supply networks with leaks" ["Metod postroeniya modeli kvazistatsionarnykh rezhimov raboty vodoprovodnykh setey s utechkami"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 9 (44), P. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2738>
12. Samoylenko, N. I., Gavrilenko, I. A., Senchuk, T. S. (2015), "Development of mathematical models for ordering the edges of the pipeline distribution network graph" ["Razrabotka matematicheskikh modeley uporyadochivaniya reber grafa truboprovodnoy raspredelitel'noy seti"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4 (75), P. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42811>
13. Nardo, A. D., Natale, M. D., Giudicianni, C., Santonastaso, G. F., Savic, D. (2018), "Simplified Approach to Water Distribution System Management via Identification of a Primary Network", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 144 (2). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000885](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000885)
14. Elhay, S., Deuerlein, J., Piller, O., Simpson, A. R. (2018), "Graph Partitioning in the Analysis of Pressure Dependent Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 144 (4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000896)
15. Pesantez, J. E., Berglund, E. Z., Mahinthakumar, G. (2019), "Multiphase Procedure to Design District Metered Areas for Water Distribution Networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 145 (8). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001095)

16. Santonastaso, G., Nardo, A. D., Natale, M. D., Giudicianni, C., Greco, R. (2018), "Scaling-Laws of Flow Entropy with Topological Metrics of Water Distribution Networks", *Entropy*, No. 20 (2), P. 95–109. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20020095>
17. Natale, M. D., Giudicianni, C., Greco, R., Santonastaso, G. F. (2017), "Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning", *Applied Network Science*, No. 2 (1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41109-017-0033-4>
18. Bezkorovayniy, V. V., Berezovskiy, G. V. (2017), "Evaluation of the properties of technological systems using fuzzy sets" ["Otsinka vlastyivostey tekhnolohichnykh system iz vykorystanniam nechitkykh mnozhyn"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 1 (1), P. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>
19. Bezkorovayniy, V. V. (2017), "Parametric synthesis of models of multi-criteria assessment of technological systems" ["Parametrychnyy syntez modeley bahatokryterial'noho otsynuyannya tekhnolohichnykh system"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
20. Davidich, Yu. O., Galkin, A. S., Davidich, N. V., Galkina, O. P. (2018), "Estimation of energy costs of end users of the logistics system in the process of mastering the material flow" ["Otsinka velychyny enerhetychnykh vytrat kintsevykh spozhyvachiv lohistychnoyi systemy v protsesi osvoyennya material'noho potoku"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.005>

Received 25.11.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Матвієнко Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: olha.matviienko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-7616>

Матвиенко Ольга Ивановна – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры прикладной математики, Харьков, Украина.

Matviienko Olha – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

Манчинська Наталія Борисівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: natali.manchinska@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8855-4029>

Манчинская Наталья Борисовна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры прикладной математики, Харьков, Украина.

Manchynska Nataliia – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДИСПЕРСІЙ ЗАЛЕЖНИХ ЗМІННИХ СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ КВАЗІСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ МАГІСТРАЛЬНОГО ВОДОВОДУ

Предметом дослідження є стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи систем подання та розподілення води. Зазначена модель адекватно описує фактичні режими роботи системи водопостачання на заданому часовому інтервалі. Також вона може використовуватися як базова модель для постановки та вирішення завдань оптимального стохастичного управління розвитком та функціонуванням систем подання та розподілення води. **Мета роботи** – розроблення методу розрахунку оцінок дисперсій залежних змінних за умови заданих значень математичних сподівань та дисперсій незалежних змінних для стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу як підсистеми системи подання та розподілення води. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі **завдання**: побудувати детермінований еквівалент стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу; розрахувати оцінки математичних сподівань залежних змінних; розрахувати оцінки дисперсій залежних змінних. Для розрахунку оцінок дисперсій залежних змінних, відповідно до дисперсій незалежних змінних, використовується **метод** статистичної лінеаризації. Для отримання оцінок математичних сподівань залежних змінних детермінований еквівалент стохастичної моделі квазістаціонарних

режимів роботи магістрального водоводу розв'язується модифікованим методом Ньютона. **Результатом** роботи є метод розрахунку оцінок дисперсій залежних змінних для стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу. **Висновки:** у роботі запропоновано наближений метод розрахунку статистичних властивостей залежних змінних відповідно до статистичних властивостей параметрів та незалежних змінних стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу. Наближений метод оснований на побудові детермінованого еквівалента стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу та його використанні для розрахунку оцінок математичних сподівань і дисперсій залежних змінних за умови заданих значень математичних сподівань та дисперсій незалежних змінних. На відміну від методу імітаційного моделювання, запропонований метод не потребує значних часових витрат та обчислювальних ресурсів. Застосування наближеного методу показано на прикладі.

Ключові слова: стохастична модель; дисперсія; магістральний водовід; квазістаціонарний режим; детермінований еквівалент.

МЕТОД РАСЧЕТА ДИСПЕРСИЙ ЗАВИСИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ВОДОВОДА

Предметом исследования в статье является стохастическая модель квазистационарных режимов работы систем подачи и распределения воды. Эта модель адекватно описывает фактические режимы работы системы водоснабжения на заданном интервале времени и может использоваться в качестве базовой модели для постановки и решения задач оптимального стохастического управления развитием и функционированием систем подачи и распределения воды. **Целью** работы является разработка метода расчета оценок дисперсий зависимых переменных при заданных значениях математических ожиданий и дисперсиях независимых переменных для стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода как подсистемы системы подачи и распределения воды. Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи:** построить детерминированный эквивалент стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода; рассчитать оценки математических ожиданий зависимых переменных; рассчитать оценки дисперсий зависимых переменных. Для расчета оценок дисперсий зависимых переменных, в зависимости от дисперсий независимых переменных, будем использовать **метод** статистической линеаризации. Для получения оценок математических ожиданий зависимых переменных детерминированный эквивалент стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода решается модифицированным методом Ньютона. **Результатом** работы является метод расчета оценок дисперсий зависимых переменных для стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода. **Выводы:** в работе предложен приближенный метод расчета статистических свойств зависимых переменных в соответствии со статистическими свойствами параметров и независимыми переменными стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода. Приближенный метод основан на построении детерминированного эквивалента стохастической модели квазистационарных режимов работы магістрального водовода и его использовании для расчета оценок дисперсий зависимых переменных при заданных значениях математических ожиданий и дисперсиях независимых переменных. В отличие от метода имитационного моделирования, предложенный метод не требует значительных временных затрат и вычислительных ресурсов. Использование приближенного метода показано на примере.

Ключевые слова: стохастическая модель; дисперсия; магістральний водовод; квазістаціонарний режим; детермінований еквівалент.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Матвієнко О. І., Манчинська Н. Б. Метод розрахунку дисперсій залежних змінних стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 56–67. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.056>

Matviienko, O., Manchynska, N. (2022), "Method for calculation of dispersions of dependent variables of a stochastic model of quasi-stationary operating modes of the main water pipeline", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 56–67. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.056>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аврунін О. Г.	47
Барковська О. Ю.	5
Воробйов К. С.	31
Гуржій Н. М.	31
Енгаличев С.	14
Манчинська Н. Б.	56
Матвієнко О. І.	56
Мінъянг Чанг Чжэцзян	14
Перепелиця О. М.	47
Семенов С.	14
Смідович Л. С.	14
Федоренко Г. Л.	20
Фесенко Г. В.	20
Харченко В. С.	20

ALPHABETICAL INDEX

Avrunin Oleg	47
Barkovska Olesia	5
Vorobiov Kostyantyn	31
Hurzhiy Natalia	31
Yenhalychev Serhii	14
Manchynska Nataliia	56
Matviienko Olha	56
Minjian Zhang Zhejiang	14
Perepelytsia Oleksii	47
Semenov Serhii	14
Smidovych Leonid	14
Fedorenko Gennadiy	20
Fesenko Herman	20
Kharchenko Vyacheslav	20

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

SCIENTIFIC PUBLICATION

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

Щоквартальний науковий журнал

Quarterly scientific journal

№ 4 (22), 2022

№ 4 (22), 2022

Відповідальний секретар журналу *І.Г. Перова*
Відповідальний за випуск *А.А. Коваленко*
Відповідальний за ліцензування *В.В. Косенко*
Редактор *Л.В. Кузьміна*
Комп'ютерна верстка *Л.Ю. Светайло*

Responsible secretary of journal *I. Perova*
Responsible for release *A. Kovalenko*
Responsible for licensing *V. Kosenko*
Editor *L. Kuzmina*
Computer layout *L. Svietailo*

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 11,5.
Тираж 150 прим.

Format 60×84/8. Conventional printed sheets 11,5.
Edition of 150 copies.

Віддруковано з готових оригінал-макетів
в типографії ФОП Андреев К.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб
та фізичних осіб-підприємців.
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

Printed from ready-made original layouts
in the printing house
of Individual Entrepreneur Andreev K.V.
Unified State Register of Legal Entities
and Individual Entrepreneurs.
Entry No. 24800170000045020 of 30.05.2003.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com

fl. 50, 9, Acad. Bogomolets Str., Kharkiv, 61157,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com