

БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

UDC 004.9

М. Н. Boreiko¹, М. М. Budnyk^{1,2}, І. А. Chaikovskyy¹STUDYING IMPACT OF PAIN TO HEART RATE
VARIABILITY¹Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

Abstract. The method of pain estimation based on some heart rate variability parameters was proposed. Software for calculating these parameters was developed. A positive correlation between RMSSD/SDNN ratio and HF/LF ratio with pain level was obtained. The use of this method in resuscitative medicine and in combat operations is suggested.

Key words: heart rate variability, pain, software development.

Анотація. На індивідуальне сприйняття болю впливають демографічні фактори, стать, вік, етнічні особливості, а також емоційний і фізичний стан пацієнта. Більш об'єктивні методи оцінки болю ті, що засновані на кореляції між певними фізіологічними показниками людини та ступенем болювого синдрому. Розроблено інформаційного засобу (програми) для дослідження впливу болювого синдрому на різні показники варіабельності ритму серця (ВРС), такі як RMSSD, SDNN, LF, HF, Coherence Ratio. Були проведені клінічні дослідження у Головному військовому клінічному госпіталі міста Києва. Знято ЕКГ 18-ти пацієнтів в різному стані. Після зняття ЕКГ пацієнтів оцінювали рівень болю за вербальною оціночною шкалою. Отримані записи ЕКГ було оброблено програмою HRV Analyzer, розробленою в контексті цієї роботи.

Найкраща кореляція з рівнем болю у показника HF/LF – 76%. Також висока ступінь кореляції у показника RMSSD/SDNN – 74%. Показник когерентності має найгіршу кореляцію – 42%. Отже знайдено інтегральний показник ВРС, що дозволяє оцінювати рівень болювого синдрому та може використовуватися в екстренній медицині, реанімації, реабілітації, під час бойових дій тощо.

Ключові слова: варіабельність ритму серця, болювий синдром, програмне забезпечення.

Анотация. На индивидуальное восприятие боли влияют демографические факторы, пол, возраст, этнические особенности, а также эмоциональное и физическое состояние пациента. Более объективные методы оценки боли те, что основаны на корреляции между определенными физиологическими показателями человека и степенью болювого синдрома. Разработана программа для исследования влияния болювого синдрома на различные показатели вариабельности ритма сердца (ВРС), такие как RMSSD, SDNN, LF, HF, Coherence Ratio. Были проведены клинические исследования в Главном военном госпитале города Киева. Снято ЭКГ 18-ти пациентов в различном состоянии. После снятия ЭКГ пациентов оценивали уровень боли по вербальной оценочной шкале. Полученные записи ЭКГ было обработано программой HRV Analyzer, разработанной в контексте этой работы. Лучшая корреляция с уровнем боли у показателя HF / LF – 76%. Также высокая степень корреляции у показателя RMSSD / SDNN – 74%. Показатель когерентности имеет худшую корреляцию – 42%. Итак, найдено интегральный показатель ВРС, что позволяет оценивать уровень болювого синдрома и может использоваться в экстренной медицине, реанимации, реабилитации, во время боевых действий.

Ключевые слова: вариабельность ритма сердца, болювой синдром, программное обеспечение.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-4-11>.

Introduction

The determination of the pain syndrome intensity and the changes of this intensity in time are important tasks in the practice of extreme conditions medicine, especially military medicine.

Recent guidelines on the management of pain, agitation, and delirium in adult patients recommend a systemic and rigorous evaluation of pain in critically ill patients, particularly because pain is consistently undertreated in this population [1]. Whilst evaluation of pain could be helpful in improving patient comfort and avoiding over sedation, this could be a difficult task in sedated non-communicative critically ill patients. Behavioral pain scale (BPS), and critical care pain observation tool (CPOT) provide acceptable levels of validity and reliability and are recommended for nonverbal pain screening. However, these scores have some limitations, including the inter-rater variability, their impossible use in patients receiving neuromuscular-blocking agents, and the discontinuous assessment of pain [2]. In addition, these scores take into account only the physical component of the pain and do not determine the level of anxiety and discomfort [3].

Adequate treatment of acute pain syndrome – one of the important ways to prevent a number of complications: thrombotic-embolus, respiratory, ischemic, etc., which reduces the length of hospitalization. Also, qualitative analgesia prevents chronic pain and the development of hyperalgesia.

Objective

The individual perception of pain is influenced by demographic factors, gender, age, ethnicity, as well as the emotional and physical condition of the patient. Existing pain level estimation methods require immediate contact with the patient, as well as the patient being in the mind.

Finding an objective, reliable, accurate, fast way to determine the intensity of the pain without the direct involvement of the patient began many decades ago. The most promising in this context is the analysis of the autonomic nervous state systems. The physiological basis of the method lies quite a well-known phenomenon of heart rate variability (HRV), which consists of the incidence of intervals between sequences of QRS complexes.

The variability of the cardiac rhythm decreases or disappears when brain deaths, myocardial infarction, diabetic dysautonomia, and some other diseases. It is known that the regulation of cardiac rhythm is the result of the rhythmic activity of the pacemaker cells of the sinus node, modulating effect autonomic and central nervous systems, humoral and reflexive influences. HRV depends on the tone of the autonomic nervous system under the influence of pain stimuli.

The task of this work is to develop method and software for evaluation of the effectiveness of HRV (heart rate variability) in the detection of pain in sedated, non-communicative, critically ill patients especially having combat trauma.

Method

Since the heart rhythm is a universal body response to any changes in the external environment. Some parameters of the heart rate variability (HRV) are indicators of vagal activity and may correlate with the level of pain [4], [5]. These parameters in the time domain are RMSSD (Root mean square of the successive differences) and SDNN (Standard deviation of R-R intervals) [6]. The SDNN indicator reflects the effect of both the sympathetic and parasympathetic nervous systems. The RMSSD is an indicator of vagal parasympathetic activity.

In the frequency domain, the analog of the SDNN indicator is the spectrum power in the low-frequency range from 0.04 Hz to 0.15 Hz, which is denoted as LF (low frequency) [7]. In the frequency domain, the analog of the RMSSD is the spectrum power in the high-frequency range from 0.15 Hz to 0.4 Hz, denoted as HF (high frequency). Accordingly, the HF / LF ratio is analogous to the RMSSD / SDNN ratio.

In a [8], research has shown that negative emotions such as frustration, anger, anxiety, and pain also result in such an incoherent model of the heart rate – that is, the heart rhythm varies greatly and is unpredictable (Fig. 1), at that time as positive emotions, on the contrary – are much more coherent and represent stable harmonic vibrations of the heart rhythm (Fig. 2).

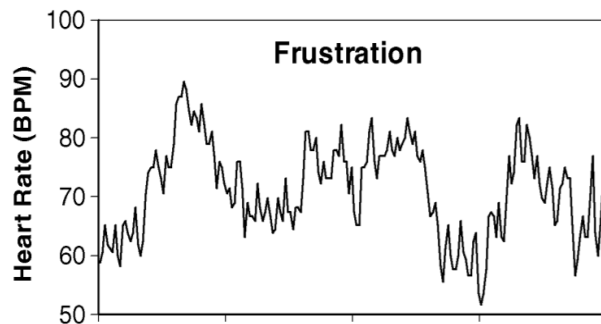


Figure 1 – Change of heart rate under the influence of negative emotions (in this case, disappointment) [5]

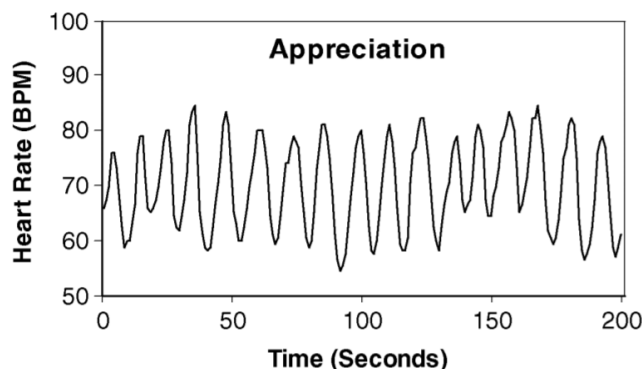


Figure 2 – Changing the heart rate under the influence of positive emotions (in this case – approval) [5]

In general, negative emotions and pain lead to less synchronization between the parasympathetic and sympathetic nervous system. Thus, the coherence approximates the ratio $LF / (VLF + HF)$, where VLF is very low frequency (0.0033 Гц – 0.04 Гц).

Calculation of hrv parameters

A SDNN and RMSSD parameters

The standard deviation of R-R intervals (SDNN) is the integral characteristic of the autonomic nervous system (ANS) functioning [9]. This parameter depends on the activity of both the sympathetic and parasympathetic links of the autonomic nervous system; in particular, the increase in SDNN indicates an increase in parasympa-

thetic nerve regulation, while the decrease is due to the growth of sympathetic effects and the suppression of the autonomous circuit activity.

$$SDNN = \sqrt{\frac{\sum_i (RR_i - \overline{RR})^2}{N}} \quad (1)$$

RMSSD (Root mean square of the successive differences) is an indicator of vagal-parasympathetic activity.

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2} \quad (2)$$

B Spectrum calculation

The best method to obtain a spectrum of HRV is the auto-regression method because it works even with a very limited amount of data and allows for clear, well-differentiating peaks in the spectrum. There are also several algorithms for calculating the autoregressive model. The developed software implements the Yule-Walker algorithm and the Burg algorithm. Both give similar results. The optimal order of the model is calculated automatically according to criteria AIC (Akaike Information Criteria) [10].

C Calculation of Coherence Ratio

According to [8], the peak of coherence is called the peak on the HRV spectrum in the frequency range from 0.04 Hz to 0.26 Hz. The algorithm for calculating the coherence ratio is the following:

1. Find the largest peak on the spectrum in the frequency range from 0.04 Hz to 0.26 Hz.
2. Calculate the peak power in a 0.015 Hz window above and below the peak frequency.
3. Calculate of total spectral power (from 0.033 Hz to 0.4 Hz).
4. Calculate the coherence ratio using the following equation:

$$Coherence = \frac{PP}{TP - PP}; \quad (3)$$

where PP is the power of the peak of coherence, TP is the total power of the spectrum.

Software development

For this project, special software was developed in the C # programming language for heart rate variability analysis. The developed software has the following functionality [11]:

- *Calculation of basic HRV time-domain parameters*
Calculation of typical HRV parameters such as heart rate, SDNN, RMSSD, pNN50, and others.
- *Calculation of the R-R intervals distribution histogram*
The histogram allows the user to visually estimate the distribution of R-R intervals. A duration of "bin" on histogram can be determined both automatically and manually.
- *Interpolation of R-R intervals*
A raw set of R-R intervals is not suitable for frequency domain analysis because it is not equidistant in time. It is necessary to interpolate this series with a constant time step in order to correctly apply frequency analysis algorithms. The standard for HRV analysis is an interpolation with a 4 Hz sampling frequency. This is enough to build a spectrum up to 2 Hz. Cubic spline interpolation was implemented in our software.
- *Calculation of the power spectral density by Fourier transform*
Fourier method with different window functions. Input data are multiplied by a window function. The type of window function can be selected from the list. By default, the Gaussian window function is used, which allows you to vary the smoothing using the alpha parameter.
- *Calculation of the power spectral density by Autoregression method*
Autoregression method is more suitable for HRV analysis, because it works even with very limited data, and allows for clear, well-differentiated peaks in the spectrum. There are also several algorithms for calculating the autoregressive model. The program implements the Yule-Walker and Burg algorithms. Both give similar results. The optimal order of the model is calculated automatically according to the Akaike Information Criteria, but it can also be set manually.

Flowchart of HRV Analyzer processing is shown in fig. 3:

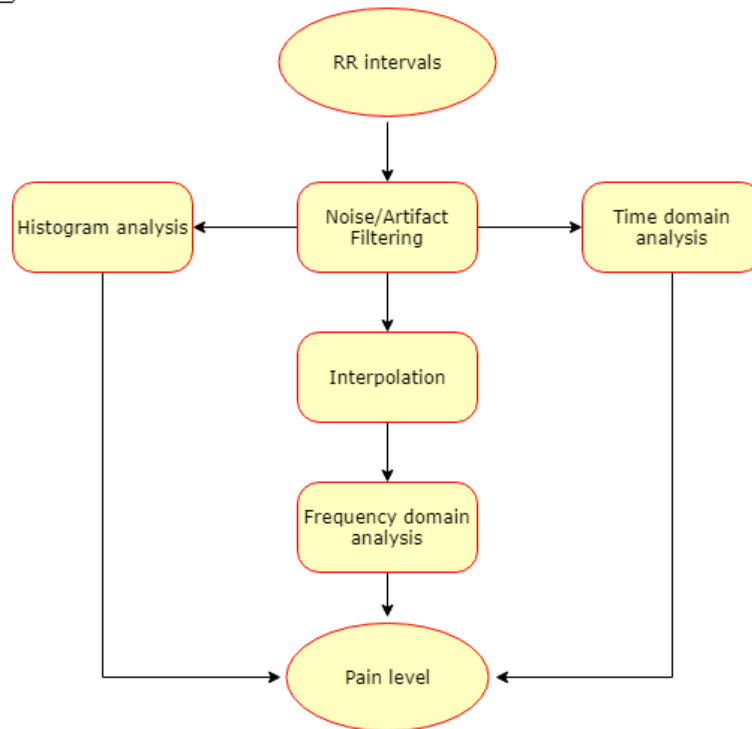


Figure 3 – Flowchart of the algorithm of software data processing

A screenshot of the software window with target HRV parameters (RMSSD/SDNN, LF/HF, Coherence) is shown in fig. 4.

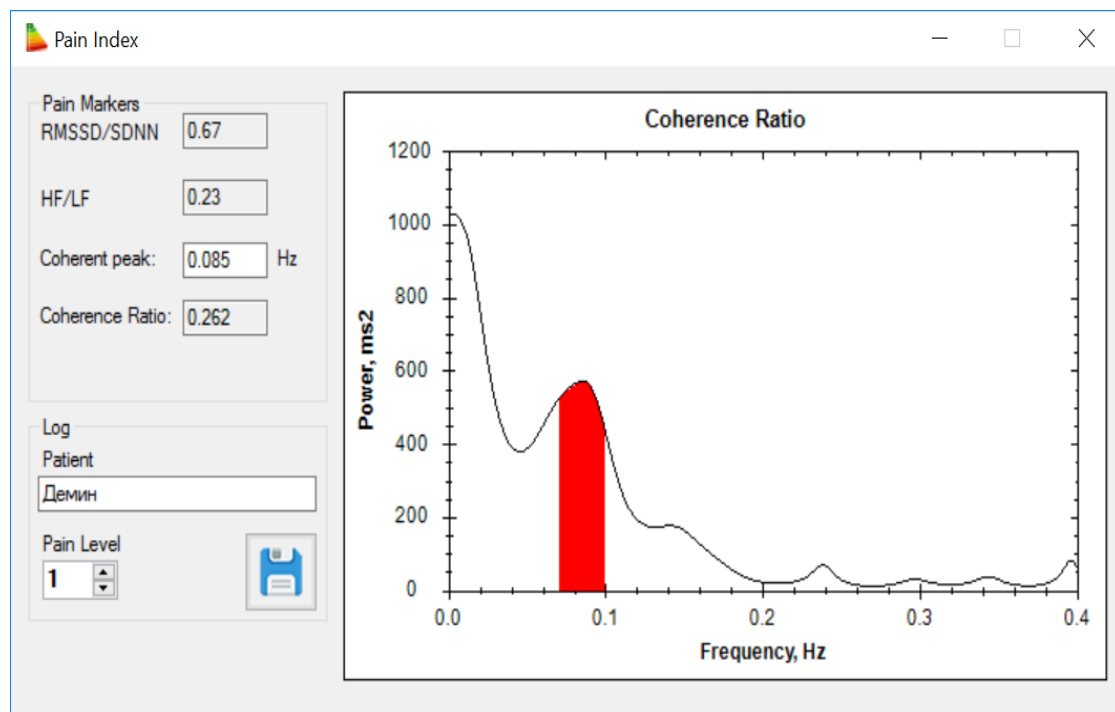


Figure 4 – Screenshot from HRV Analyzer software. Here are HRV parameters correlated with pain level

Clinical trials

Clinical trials were performed in the Kyiv Military Hospital to check the correlation between selected HRV parameters and the level of pain.

Clinical studies have been made in accordance with modern international standards and other regulations for medical devices and clinical trials including ethics of experimentation in accordance with the Declaration of Helsinki.

ECG signals were recorded in different states from eighteen servicemen and volunteers having combat trauma during military conflict with pro-Russian terrorists in East Ukraine. Age and gender profile of examined patients are shown in Table 1.

Table 1 – Age-gender distribution of examined patients

Age group	Male	Female	Total
18-39	3	1	4
40-59	6	4	10
60+	2	2	4
Total	11	7	18

Despite the fact that amount of examined patients are small, it is still valuable. As shown in paper [11] with very low variance, both false positives and false negatives occurred at sample size(N) $N < 8$, but data shape was always clearly identified at $N \geq 8$. With high variance, accurate inference was stable at $N \geq 25$. In our model we use linear regression, which is a model with low variance, so our data set size (18 patients) is enough to obtain informative results.

The duration of each record was 3 minutes. After ECG recording, patients evaluated the pain level according to the verbal scale (no pain – 0 points, weak – 1 point, moderate – 2 points, strong – 3 points, strongest – 4 points) [12].

The received ECG recordings were annotated by the PulseWave software developed at the Kyiv Institute of Cybernetics. The received annotations (the sequence of detected ECG waves (P, Q, R, S, T)) were imported into the HRV Analyzer software developed by the authors and HRV parameters were calculated.

Dependency between HRV parameters and subjective pain level are shown on figures 5–7.

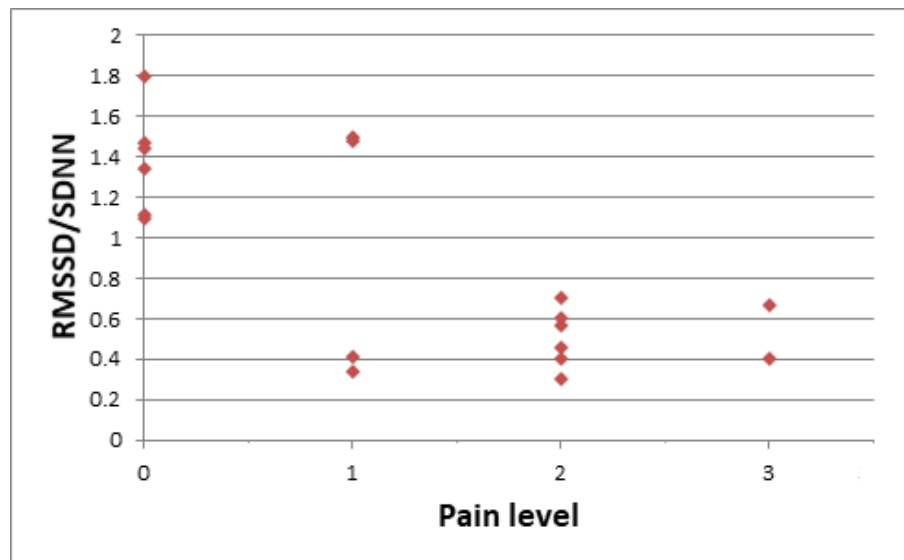


Figure 5 – Dependency between RMSSD / SDNN and pain level

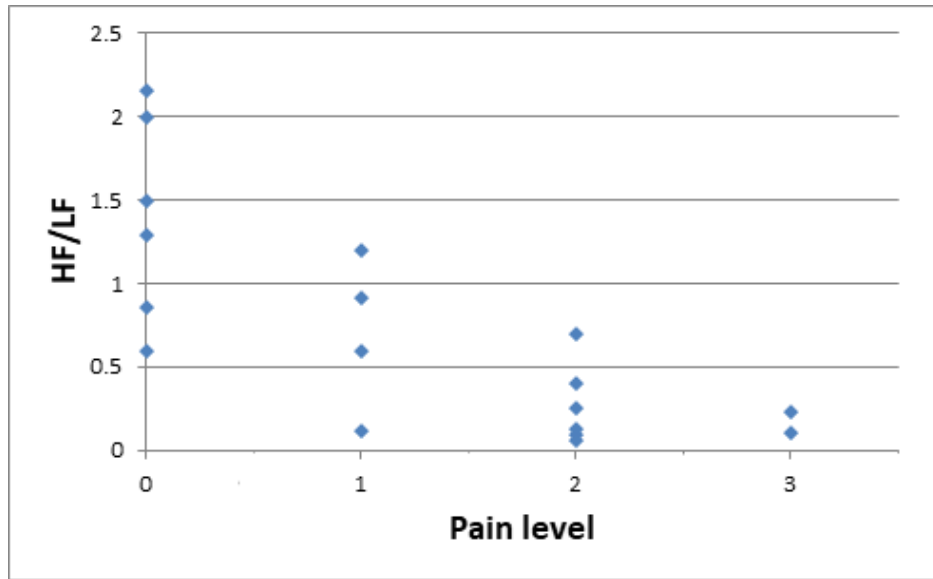


Figure 6 – Dependency between HF / LF ratio and pain level

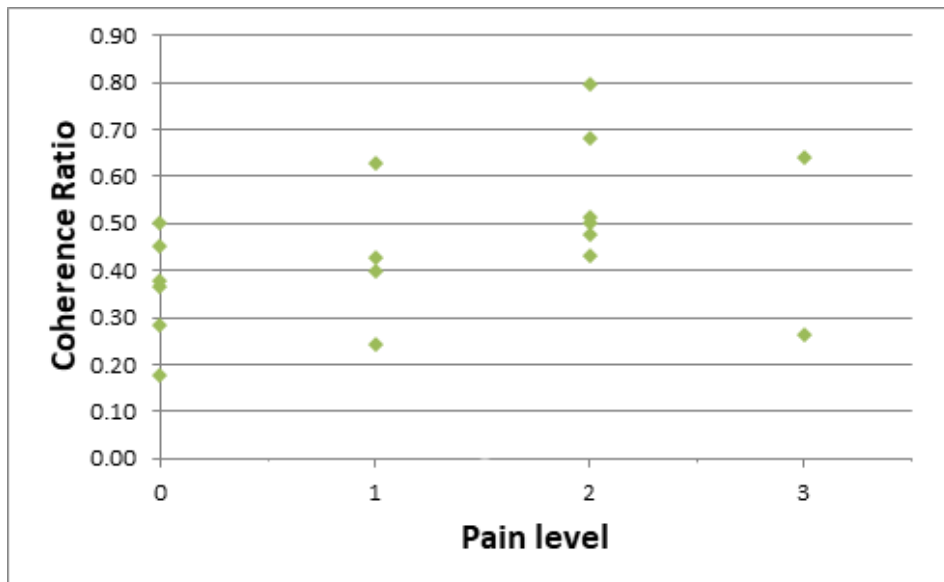


Figure 7 – Dependency between coherence ratio and pain level

The figures show that the HF / LF is the best correlate with the pain level. Correlation coefficients were also calculated:

$$R_{\frac{RMSSD}{SDNN}} = 74\%; \quad R_{\frac{HF}{LF}} = 76\%; \quad R_{\text{Coherence}} = 42\%;$$

Thus, it is clear that the best result gives an assessment of the pain syndrome by the HF / LF index, and a bit worse – by RMSSD / SDNN. It should be noted that in order to more accurately select the best indicator for assessing the level of pain, clinical trials should be conducted in more patients to reduce the statistical error.

On the basis of these data, a linear regression model was constructed, according to which the pain level can be estimated with the following expression:

$$\text{Pain} = 2.54 - 0.63 * \frac{RMSSD}{SDNN} - 0.88 * \frac{HF}{LF} - 0.38 * \text{Coh} \quad (4)$$

The calculated overall pain index has a correlation coefficient of 77%.

Results and discussion

We have proposed an original index for determining the intensity of pain syndrome based on estimating the power of high-frequency oscillations, others in words – the strength of vagal influence on the variability of the heart rate.

This algorithm is implemented in the software "HRV analyzer" developed within the project IK-2015/2 "Development of Portable software-hardware complex to determine the depth of the shock state in the field conditions for military medicine" within the framework of the Target Research Program of NASU "Research and development for increasing the defense and security of the state" (2015–2016).

Indicator of the intensity of pain is calculated on the basis series of intervals R-R after their filtration and normalization.

The analysis consists of five steps:

1. ECG signal filtration and correction of false QRS complexes (eg extrasystole replaced by an artificial complex R);
2. Extraction of RR-intervals from ECG (time intervals between normal QRS complexes);
3. HRV analysis
4. Identification of signs related to pain;
5. Calculation of the intensity index of the pain syndrome.

Conclusion

The method of assessing the pain level according to the following HRV parameters:

- a. RMSSD / SDNN;
- b. HF / LF;
- c. Coherence ratio.

Calculation of coherence ratio using the autoregressive model and use RMSSD / SDNN as an indicator of pain level is new in the HRV analysis field. A software tool has been created to calculate the above HRV parameters.

Preclinical trials have been conducted, the result of which is the calculated integral HRV index, which correlates with a subjective pain level at a 77% level.

Finally, the result of the work is an integral HRV index, which estimates the level of pain and can be used in clinical medicine, resuscitation, during rehabilitation, combat medicine, etc. We believe that optical-based pulsometric devices are a promising tool instead of an ECG recorder for HRV signal recording [13], especially for long-time monitoring [14].

References

- [1] G. Chanques, A. Pohlman, JP. Kress, N. Molinari, A. de Jong, S. Jaber et al, «Psychometric comparison of three behavioural scales for the assessment of pain in critically ill patients unable to self-report», *CritCare*, 18: R160, 2014.
- [2] K. Puntillo, A. Max, JF. Timsit, L. Vignoud, G. Chanques, G. Robleda et al, «Determinants of procedural pain intensity in the intensive care unit: The Europain1 study», *Am J Respir Crit Care Med*, 189, pp. 39–47, 2014.
- [3] S. Jaber, G. Chanques, C. Altairac, M. Sebbane, C. Vergne, PF. Perrigault et al, «A prospective study of agitation in a medical-surgical ICU: Incidence, risk factors, and outcomes», *Chest*, 128, pp. 2749–2757, 2005.
- [4] J. Koenig, «Heart Rate Variability and Experimental: A systematic review», *The European Journal of Pain*, 06 August, 2013.
- [5] Céline Broucqsault-Dérdian, «Measurement of Heart Rate Intensity to Assess Pain in Sedated Critical Ill Patients: A Prospective Observational Study», 2016.
- [6] J. Koenig, A. Loerbroks, «Chronic Pain and Heart Rate Variability in a Cross-Sectional Occupational Sample: Evidence for Impaired Vagal Control», 2016.
- [7] Nikhil S Padhye, Amber L Williams, «Heart Rate Variability in Response to Pain Stimulus in VLBW Infants Followed Longitudinally During NICU Stay», 2009.
- [8] Rollin McCraty, «The Coherent Heart Heart-Brain Interactions, Psychophysiological Coherence, and the Emergence of the System-Wide Order», *Induced Pain in Healthy Pupils*, 2009.
- [9] V. M. Mikhailov, *Variability of heart rhythm. Experience of practical application*. Ivanovo, 2000.
- [10] H. Akaike, «A new look at the statistical model identification», *IEEE Transactions on Automatic Control*, T. 19, pp. 716-723, 1974.
- [11] David G. Jenkins, Pedro F. Quintana-Ascencio, «A solution to minimum sample size for regressions», *PLoS ONE*, 15(2), 2020.

- [12] I. Chaykovskyy, K. Talalaiev, M. Tverezovskiy, M. Boreiko, «Dynamic assessment of human functional status as a prediction of some somatic diseases», in *Proc 1st Intern. Sci.-pract. Conf. "Epidemiological research in clinical and prophylactic medicine*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 72-76.
- [13] V. Dehtiaruk, M. Khodakovskiy, I. Chaikovskiy, V. Budnyk, T. Ryzhenko, M. Mudrenko, M. Dordiienko, M. Budnyk, «Development of devices for non-invasive pulsometry», in *Proc. the 1st Intern. Sci.-pract. Conf. "Information Systems and Technologies in Medicine (ISM-2018)"*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 274–276.
- [14] M. Boreiko, M. Budnyk, «Development of software- hardware system for monitoring physiological state in yachtsmen», *Proceedings of the Vernadsky Tauride Natl Univ, Series: Technical Sciences*, no. 3, vol. 29 (68), pp.101–104, 2018.

Стаття надійшла: 20.06.2020.

Information about the authors

Борейко Максим Геннадійович – аспірант, Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

Будник Микола Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Чайковський Ілля Анатолійович – кандидат медичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

М. Г. Борейко¹, М. М Будник^{1,2}, І. А. Чайковський¹

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БОЛЬОВОГО СИНДРОМУ НА ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ РИТМУ СЕРЦЯ

¹Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

М. Г. Борейко¹, Н. Н. Будник^{1,2}, И. А. Чайковский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОЛЕВОГО СИНДРОМА НА ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ РИТМА СЕРДЦА

¹Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Киев

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Киев

УДК 004.9

І. О. Сироп'ятов^{1,2}, М. М. Будник^{1,3}, І. А. Чайковський¹

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТПД НА ЕКГ СИГНАЛИ У СТАНДАРТНИХ ВІДВЕДЕННЯХ

¹Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ²Інститут ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України, Київ³Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Анотація. Протягом багатьох років ішемічна хвороба серця залишається основною причиною смерті в світі. Поширеним та економічно-ефективним методом оцінки стану серцево-судинної системи є електрокардіографія, але, на жаль, рутинна електрокардіографія не володіє достатньою чутливістю та специфічністю для вирішення завдань сучасного рівня. Тому постає питання розробки моделей та методів оцінки ЕКГ сигналу, які би дозволили підвищити ефективність електрокардіографічних досліджень для своєчасного виявлення патологічних змін. За допомогою інтерактивної програми ECGSim проведено моделювання змін у вузлі на передній поверхні серця, шляхом зміни на ± 5 та ± 10 відсотків основних характеристик трансмембранного потенціалу дії: потенціалу спокою, амплітуди, часу деполізації та реполізації і нахилу кривої у фазі «плато» та фазі реполізації. Запропоновано 2 показники для оцінки відмінностей отриманих кривих від ЕКГ кривих умовної норми: один з них вказує тенденцію змін, а другий використовує абсолютні значення і більш наглядно демонструє ступінь виразності змін. Отримані результати відповідають електрофізіологічним показникам, що свідчить про валідність запропонованих показників для вимірювання відстаней між адаптованими та референтними кривими ЕКГ.

Ключові слова: електрокардіографія, моделювання, ECGSim.

Анотация. На протяжении многих лет ишемическая болезнь сердца остаётся основной причиной смерти в мире. Распространённым и экономически эффективным методом оценки состояния сердечно-сосудистой системы является электрокардиография, но, к сожалению, рутинная электрокардиография не обладает достаточной чувствительностью и специфичностью для решения заданных современного уровня. Поэтому встаёт вопрос разработки моделей и методов оценки ЭКГ сигнала, которые бы позволили повысить эффективность электрокардиографических исследований для своевременного выявления патологических изменений. С помощью интерактивной программы ECGSim проведено моделирование изменений в узле на передней поверхности сердца, путём изменения на ± 5 и ± 10 процентов основных характеристик трансмембранного потенциала действия: потенциала покоя, амплитуды, времени деполаризации и реполаризации и наклона кривой в фазе «плато» и фазе реполаризации. Предложено 2 показателя для оценки различий полученных кривых от ЭКГ кривых условной нормы: один из них указывает тенденцию изменений, а второй использует абсолютные значения и более наглядно демонстрирует степень выраженности изменения. Полученные результаты соответствуют электрофизиологическим показателям, что свидетельствует о валидности предложенных показателей для измерения расстояний между адаптированными и референтными кривыми ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиография, моделирование, ECGSim.

Abstract. For many years, coronary heart disease has remained the leading cause of death in the world. Electrocardiography is a common and cost-effective method for assessing the state of the cardiovascular system, but, unfortunately, routine electrocardiography does not have sufficient sensitivity and specificity to solve modern problems. Therefore, there is a question of developing models and methods for evaluating the ECG signal, which would increase the effectiveness of electrocardiographic studies for early detection of pathological changes. Using the interactive ECGSim program, changes in the node on the anterior surface of the heart were modeled by changing the main characteristics of the transmembrane action potential by ± 5 and ± 10 percent: the resting potential, amplitude, time of depolarization and repolarization, and the slope of the curve in the "plateau" and repolarization phases. Two indicators are proposed to evaluate the differences between the obtained curves and the ECG curves of the conditional norm: one of them indicates the trend of changes, and the second one uses absolute values and more clearly demonstrates the degree of severity of changes. The results obtained correspond to electrophysiological indicators, which indicates the validity of the proposed indicators for measuring the distances between the adapted and reference ECG curves.

Key words: electrocardiography, modeling, ECGSim.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-12-17>.

Вступ

Важливим питанням сучасної біомедицини є питання дослідження ішемічної хвороби серця (ІХС), так як згідно даних Всесвітньої організації охорони здоров'я ІХС є однією з основних причин смертності в світі [1]. Наслідками ішемії міокарду є розвиток в міокарді аномальної електричної активності, що може призвести до виникнення аритмій та до поступового пошкодження структури клітин і, як наслідок, інфаркту міокарда [2]. Тому необхідною є розробка методів неінвазивної діагностики, які би дозволяли своєчасно виявити патологічні зміни.

Актуальність

Вже тривалий час основним неінвазивним методом дослідження стану серцево-судинної системи та серцевих патологій залишається електрокардіографія. Але на жаль рутинна електрокардіографія, тобто реєстрація стандартних відведень та їх інтерпретація, не володіє достатньою чутливістю та специфічністю для вирішення задач сучасної електрокардіографії. Вслід чого постає нагальність розробки комп'ютерних технологій, а саме комп'ютерних та математичних моделей, які би могли доповнити стандартні ЕКГ методи для підвищенні їх інформативності [3, 4].

Мета

Дослідження чутливості загальноприйнятих 12 відведень ЕКГ до змін характеристик трансмембранного потенціалу дії та перевірка валідності показників, введених для оцінки відмінності кривих, адаптованих в програмі для моделювання, від референтних кривих ЕКГ здорової людини (відстаней між кривими).

Задачі

1. Моделювання патологічних змін в стінці міокарду за допомогою програми для інтерактивного моделювання ECGSim шляхом зміни параметрів трансмембранного потенціалу дії.
2. Введення показників для оцінки адаптованих ЕКГ кривих шляхом порівняння цих кривих з ЕКГ кривими умовної норми.
3. Дослідити чутливість 12 електрокардіографічних відведень за допомогою запропонованих показників.

Розв'язання задач

Дослідження чутливості до змін трансмембранного потенціалу дії проводилось засобами програми для інтерактивного моделювання ECGSIM. Принцип роботи програми ECGSIM заснований на біологічній моделі, яка пов'язує між собою локальні трансмембранні потенціали дії на площині тканин міокарду з ЕКГ. Ця модель включає в себе геометричні параметри передсердь, шлуночків та торсу, що були реконструйовані зі знімків людей, отриманих за допомогою магнітно-резонансної томографії [5, 6]. В даній симуляції за модель еквівалентного генератора серця приймається еквівалентний подвійний шар. Ця модель описує всю електричну активність в шлуночках та передсердях за допомогою еквівалентного генератора серця в вигляді подвійного шару, який знаходиться на замкнутій поверхні, що обмежує міокард передсердь та шлуночків відповідно. Вся поверхня міокарду розбита на невеликі трикутники, 1500 вузлів, які позначають розташування елементів подвійного шару. Для будь-якої позиції на поверхні (вузла) залежність від часу потужності локального джерела (генератора) подвійного шару вважається пропорційною до трансмембранного потенціалу дії ближніх міоцитів [7, 8].

Дана біофізична система має шість основних параметрів, що описують форму сигналу трансмембранного потенціалу дії в вибраному вузлі: потенціал спокою, мінімум трансмембранного потенціалу (мВ); амплітуда, максимальна амплітуда сигналу (мВ); час деполяризації (мс); час реполяризації, що визначається моментом максимального спадного ухилу під час реполяризації (мс); нахил плато, параметр поєднаний з кутовим коефіцієнтом (нахилом) реполяризації, обмежений бути не більше останнього (мВ/мс); нахил реполяризації, параметр поєднаний з нахилом плато, обмежений бути не менше останнього (мВ/мс). Так як система інтерактивна, то ефект, який мають зміни вхідних параметрів на потенціали в серці та на поверхні тіла, відображається негайно. Ці зміни можливо відобразити в вигляді наступних систем відведень: стандартна 12-канальна система відведень, векторкардіограма, поверхове ЕКГ картування (64 відведення), монтаж 9 незважених сигналів та одне відведення, з розміщенням на будь-якому грудному вузлі.

Для дослідження було вирішено обрати вузол 56 на передній поверхні серця (рис.1) та загальноприйнятну систему 12 відведень: три стандартні (I, II, III), три стандартні посилені однополосні (aVR, aVL, aVF) та шість грудних відведень (V1 – V6).

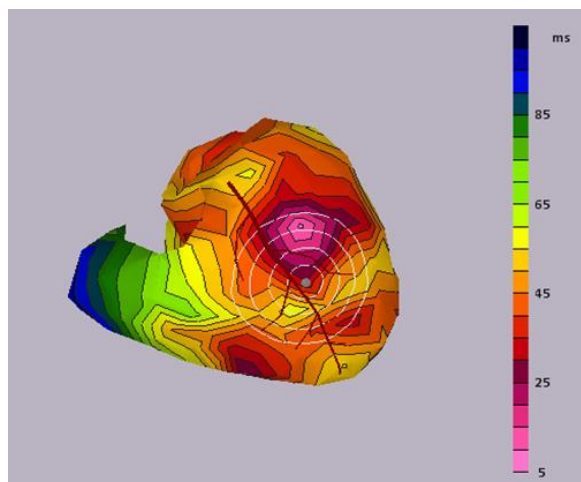


Рисунок 1 – Положення вузла 56 на поверхні моделі серця

Основні параметри змінювались в чотири кроки – два кроки в сторону збільшення, на 5% та 10%, та 2 кроки відповідно в сторону зменшення. Виключенням став показник потенціалу спокою, так як не було можливості збільшити показник на 10% зважаючи на обмеження, що закладені в програму. Таким чином, ми отримали криві 12 відведень для кожного з 23 симульованих станів. Слід відмітити, що кожна з отриманих кривих мала 505 часових відліків. Наступним кроком було питання оцінки відмінності отриманих кривих від відповідних кривих, що описують стан здорової людини. Для оцінки відмінності обрано показник (1), особливістю якого є монотонність:

$$L = \frac{100}{505} \times \sum_{i=1}^{505} \begin{cases} \frac{|y_i| - |n_i|}{|y_i| + |n_i|}, n_i \geq 0 \\ 2 - \frac{|y_i| - |n_i|}{|y_i| + |n_i|}, n_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

де L – значення показника для певної кривої; n_i – значення кривої ЕКГ здорової людини в даному відліку, мВ; y_i – значення кривої адаптованої ЕКГ в даному відліку.

Після цього була оцінена чутливість отриманих показників для 12 відведень до змін вхідних характеристик. Оцінка проводилась двома способами (2, 3):

$$K_{1p} = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{L_p(10\%) - L_p(5\%)}{5} \quad (2)$$

$$K_{2p} = |L_p(+10\%) - L_p(+5\%)| + \frac{|L_p(+5\%) - L_p(-5\%)|}{2} + |L_p(-5\%) - L_p(-10\%)| \quad (3)$$

де $L_p(x\%)$ – значення показника L при зміні значення характеристики трансмембраного потенціалу дії p на $x\%$, K_{1p} – чутливість, розрахована першим способом, K_{2p} – чутливість, розрахована другим способом.

Дані за результатами розрахунків чутливості показників розміщені у табл.1 та 2.

Таблиця 1 – Значення першого показника чутливості для 12 загальноприйнятих відведень

	K_{1dt}	K_{1rt}	K_{1amp}	K_{1rs}	K_{1ps}	K_{1rp}
I	-0,2417	-2,5012	0,841	0,0695	-0,1144	0,3832
II	0,0006	0,1513	0,0643	0,0027	-0,121	1,1198
III	-10,621	-0,9926	-7,018	-6,7281	-12,5306	-1,13
V1	-0,0046	0,4552	0,1159	-0,0334	0,0565	1,0195
V2	-0,2799	12,3128	-0,0273	0,1736	-0,1321	1,0057
V3	-0,2165	-3,4865	0,3844	0,0787	-0,2076	0,4589
V4	-0,0621	-0,896	-0,2163	0,0157	0,0104	0,4942
V5	0,123	-0,5574	-0,2297	0,0071	-0,0935	0,3852
V6	-0,0095	-0,1238	-0,0513	0,0029	-0,0173	0,2077
aVR	0,0375	0,6368	0,0359	-0,0051	0,0943	-0,3958
aVL	-0,017	1,3283	3,4294	0,1283	-0,2018	-0,1393
aVF	-0,1953	0,3461	0,1116	0,0172	0,0323	1,8451

Таблиця 2 – Значення другого показника чутливості для 12 загальноприйнятих відведень

	K_{2dt}	K_{2rt}	K_{2amp}	K_{2rs}	K_{2ps}	K_{2rp}
I	5,6516	23,9305	6,1811	1,5369	1,3769	12,1902
II	0,3096	2,1485	0,696	0,0461	0,9348	6,0425
III	63,8808	58,0414	83,0007	42,0793	88,5023	67,911
V1	0,4927	9,6897	1,9788	0,5911	0,8083	6,7993
V2	3,4441	81,813	3,7864	4,2204	1,3094	11,3882
V3	2,6863	32,5966	5,7376	1,764	2,0531	8,0456
V4	1,5766	12,095	3,3221	0,3331	1,175	3,938
V5	0,9696	6,9687	2,9549	0,1464	0,8118	3,0277
V6	0,3585	1,6957	0,7862	0,0537	0,228	2,1169
aVR	0,5439	8,3569	1,0296	0,1167	1,2238	4,6939
aVL	7,8658	19,4967	19,0375	1,2022	2,24	20,7743
aVF	2,2476	19,2374	18,1205	0,3233	8,2427	30,3356

Показники чутливості обрані таким чином, що один з них враховує тенденцію змін (знак) (рис. 2), а другий (рис. 3) використовує абсолютні значення і більш наглядно демонструє зміну чутливості.

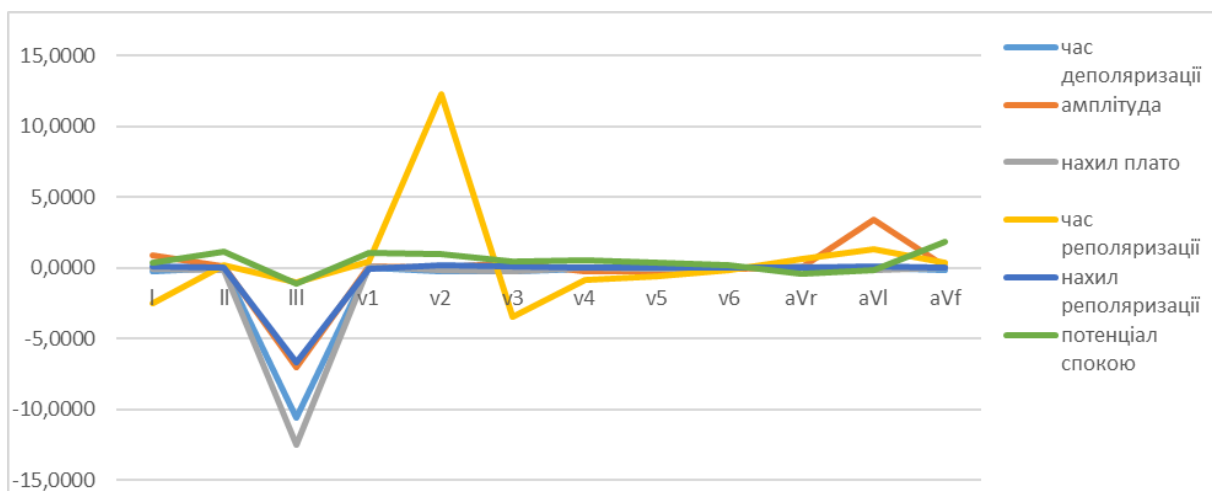


Рисунок 2 – Графік зміни першого показника чутливості (2) для шести вхідних характеристик 12 загальноприйнятих відведень

Так як обраний для дослідження вузол розташований на передній поверхні серця, то закономірною є чутливість відведення грудних відведень V2, V3 та посиленого відведення aVL, котре відображає передньо-бокову стінку серця. Велике по модулю, але від'ємне значення чутливості стандартного третього відведення є теж референтним для цієї ділянки серця.

Відповідність отриманих нами даних електрофізіологічним показникам свідчить про валідність запропонованих показників для вимірювання відстаней між адаптованими та референтними кривими ЕКГ.

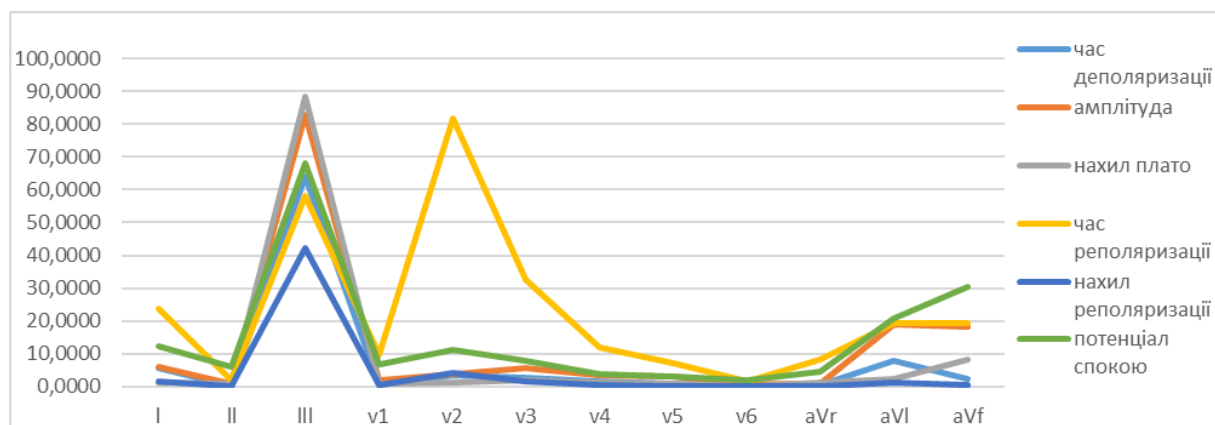


Рисунок 3 – Графік зміни другого показника чутливості (3) для шести вхідних характеристик і 12 загальноприйнятих відведень

Висновки

1. В ході роботи виконано моделювання патологічних змін точки на епікарді на передній поверхні міокарду шляхом зміни шести основних параметрів трансмембранного потенціалу дії в. П'ять параметрів збільшувались та зменшувались на 5% та 10% відповідно, потенціал спокою зменшувався на 5% та 10% та збільшувався лише на 5% через обмеження моделі.

2. Було введено показник для оцінки відстаней між отриманими адаптованими ЕКГ кривими та ЕКГ кривою умовної норми та два показники для оцінки чутливості 12 відведень до змін характеристик трансмембранного потенціалу дії.

3. В ході дослідження чутливості загальноприйнятих 12 електрокардіографічних відведень було виявлено, що найбільш чутливими до змін характеристик трансмембранного потенціалу дії є III стандартне, грудні відведення V2, V3 та посилене відведення aVL.

Список літератури

- [1] *The top 10 causes of death* [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/>.
- [2] N. Sperelakis, *Physiology and pathophysiology of the heart*. Boston, USA: Martinus Nijhoff Publishing, 1984. 846 p.
- [3] И. А. Чайковский, О. В. Баум, Л. А. Попов и др., «Параметры реполяризации сердечной мышцы на электрокардиограмме при изменении анатомической и электрической позиции сердца», *Биофизика*, т. 59, вып. 5, с. 1006–1016, 2014.
- [4] О. В. Баум, И. А. Чайковский, Л. А. Попов и др., «Ишемия миокарда и ее отражение на электрокардиограмме: реальные измерения и биофизические модели», *Биофизика*, т. 55, вып. 5, с. 925–936, 2010.
- [5] A. van Oosterom, T. Oostendorp, «ECGSIM; an interactive tool for studying the genesis of QRST waveforms», *Heart*, №90, p. 165–168, 2003.
- [6] P. van Dam, T. Oostendorp, A. van Oosterom, «Interactive Simulation of the Activation Sequence: replacing Effect by Cause», *Computers in Cardiology*, №38, p. 657–660, 2011.
- [7] D. Geselowitz, «On the theory of the electrocardiogram», *Proc IEEE*, №77/66, p. 857–876, 1989.
- [8] D. Geselowitz, «Description of cardiac sources in anisotropic cardiac muscle. Application of bidomain model», *Electrocardiol*, №25S, p. 65–67, 1992.

Стаття надійшла: 19.06.2020.

References

- [1] *The top 10 causes of death* [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/>.
- [2] N. Sperelakis, *Physiology and pathophysiology of the heart*. Boston, USA: Martinus Nijhoff Publishing, 1984. 846 p.
- [3] I. A. Chaikovskii, O. V. Baum, L. A. Popov i dr., «Parametry repolyarizatsii serdechnoi myshcy na elektrokardiogramme pri izmenenii anatomicheskoi i elektricheskoi pozitsii serdtsa», *Biofizika*, t. 59, vyp. 5, s. 1006–1016, 2014.
- [4] O. V. Baum, I. A. Chaikovskii, L. A. Popov i dr., «Ishemiia miokarda i yeio otrazheniie na elektrokardiogramme: realnyie izmereniia I biofizicheskie modeli», *Biofizika*, t. 55, vyp. 5, s. 925–936, 2010.

- [5] A. van Oosterom, T. Oostendorp, «ECGSIM; an interactive tool for studying the genesis of QRST waveforms», *Heart*, №90, p. 165–168, 2003.
- [6] P. van Dam, T. Oostendorp, A. van Oosterom, «Interactive Simulation of the Activation Sequence: replacing Effect by Cause», *Computers in Cardiology*, №38, p. 657–660, 2011.
- [7] D. Geselowitz, «On the theory of the electrocardiogram», *Proc IEEE*, №77/66, p. 857–876, 1989.
- [8] D. Geselowitz, «Description of cardiac sources in anisotropic cardiac muscle. Application of bidomain model», *Electrocardiol*, №25S, p. 65–67, 1992.

Відомості про авторів

Сиропятов Ілля Олегович – інженер-електронік, ДУ «Інститут ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України»

Будник Микола Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Чайковський Ілля Анатолійович – кандидат медичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України.

И. О. Сыропятов^{1,2}, Н. Н. Будник^{1,3}, И. А. Чайковский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТПД НА ЕКГ СИГНАЛЫ В СТАНДАРТНЫХ ОТВЕДЕНИЯХ

¹Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Киев

²ГУ «Институт ядерной медицины и лучевой диагностики НАМН Украины»

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, Киев

I. O. Syropiatov^{1,2}, M. M. Budnyk^{1,3}, I. A. Chaikovskyy¹

STUDYING EFFECT OF TPA PAREMETERS TO ECG SIGNALS AT STANDARD LEADS

¹Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

²SI “Institute of Nuclear Medicine and Diagnostic Radiology of NAMS of Ukraine”

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 53.088.3;53.088.7

О. Ю. Олійник¹, Ю. К. Тараненко²СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО ВІБРОМОНІТОРИНГУ
СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З
МАШИНИМ НАВЧАННЯМ КЛАСИФІКАТОРУ¹Приватне підприємство «Лікопак», Дніпро² Коледж радіоелектроніки, Дніпро

Анотація. Вібромоніторинг технологічного обладнання відрізняється наявністю нестационарних складних вібросигналів, які характеризуються наявністю тимчасових залежностей амплітуди, частоти, фази. У класичному машинному навчанні вже отримані дані зазвичай випадковим чином ділять на навчальний і тестовий набори. На основі навчального набору даних отримують класифікатор, а за допомогою тестового перевіряють точність цього отриманої моделі класифікатора даних. Розроблений програмний комплекс вирішує проблему ідентифікації діагностичних вібросигналів методом підбору часових рядів тестового сигналу з мінімальною близькістю на основі вейвлет-коефіцієнтів. Відбір в тестовий набір здійснюється в процесі контролю за мінімальним значенням коефіцієнта автокогерентності, який близький до нуля. Таким чином, класифікатор даних працює безперервно, збагачуючи математичну модель розпізнаванням з'являються дефектів обладнання, що залежать від великого числа випадкових чинників-умов монтажу кваліфікації обслуговуючого персоналу і т.п. Принципово новий підхід до організації ідентифікації вібрації полягає в тому, що ідентифікуються не сигнали вібромоніторингу записані за певний період часу, а ідентифікація відбувається в реальному режимі часу. Це робить контроль за станом технологічного обладнання оперативним. Розроблений алгоритм аналізу дозволяє реалізувати систему безперервного вібромоніторингу технологічного обладнання, підвищити точність ідентифікації діагностичних вібросигналів за рахунок використання комплексного підходу до аналізу близькості тестового сигналу.

Ключові слова: машинне навчання, вейвлет-аналіз, вібромоніторинг, коефіцієнт автокогерентності.

Анотация. Вибромониторинг технологического оборудования отличается наличием нестационарных сложных вибросигналов, в которые характеризуются наличием временных зависимостей амплитуды, частоты, фазы. В классическом машинном обучении уже полученные данные обычно случайным образом делят на обучающий и тестовый набор. На основе обучающего набора данных получают классификатор, а с помощью тестового проверяют точность этого полученной модели классификатора данных. Разработанный программный комплекс решает проблему идентификации диагностических вибросигналов методом подбора временных рядов тестового сигнала с минимальной близостью на основе вейвлет коэффициентов. Отбор в тестовый набор осуществляется в процессе контроля по минимальному значению коэффициента автокогерентности, который близок к нулю. Таким образом, классификатор данных работает непрерывно, обогащая математическую модель распознаванием появляющихся дефектов оборудования, зависящих от большого числа случайных факторов- условий монтажа квалификации обслуживающего персонала и т.п. Принципиально новый подход к организации идентификации вибросигнала заключается в том, что идентифицируются не сигналы вибромониторинга записанные за определенный период времени, а идентификация происходит в реальном режиме времени. Это делает контроль за состоянием технологического оборудования оперативным. Разработанный алгоритм анализа позволяет реализовать систему непрерывного вибромониторинга технологического оборудования, повысить точность идентификации диагностических вибросигналов за счет использования комплексного подхода к анализу близости тестового сигнала.

Ключевые слова: машинное обучение, вейвлет анализ, вибромониторинг, коэффициент автокогерентности.

Abstract. Vibration monitoring of technological equipment is characterized by the presence of unsteady complex vibration signals, which are characterized by the presence of time dependences of the amplitude, frequency, phase. In classical machine learning, data already obtained is usually randomly divided into training and test sets. Based on the training data set, a classifier is obtained, and with the help of a test one, the accuracy of this obtained data classifier model is checked. The developed software package solves the problem of identifying diagnostic vibration signals by selecting the time series of the test signal with minimal proximity based on wavelet coefficients. Selection in the test set is carried out in the control process at the minimum value of the coefficient of autocorrelation, which is close to zero. Thus, the data classifier works continuously, enriching the mathematical model with recognition of emerging equipment defects, depending on a large number of random factors, installation conditions for the qualifications of staff, etc. A fundamentally new approach to organizing the identification of a vibration signal is that it is not the vibration monitoring signals recorded over a certain period of time that are identified, but the identification takes place in real time. This makes monitoring the state of technological equipment operational. The developed analysis algorithm makes it possible to implement a system of continuous vibration monitoring of technological equipment, to increase the accuracy of identification of diagnostic vibration signals through the use of an integrated approach to the analysis of the proximity of a test signal.

Keywords: machine learning, wavelet analysis, vibration monitoring, auto-coherence coefficient.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-18-26>.

Вступ

Одним з актуальних методичних і інструментальних засобів оцінки технічного стану технологічного обладнання є вібромоніторинг, який останнім часом отримав широке практичне застосування [1]. Стрімкий розвиток обчислювальної техніки дозволяє створювати діагностичні комплекси, що забезпечують ефективний контроль поточного технічного стану складних систем і технологічного обладнання [2]. Різноманітність розроблених програмних комплексів надзвичайно велике. Це пов'язано в першу чергу з різноманітністю самих об'єктів діагностики і моніторингу. У другу чергу пояснюється ши-

роким спектром використовуваних моделей, алгоритмів діагностики та способів визначення дефектів [3-5].

Для ідентифікації параметрів сигналів діагностичні алгоритми використовують нелінійну цифрову фільтрацію, а коефіцієнти нелінійних фільтрів визначають з використанням різних видів перетворень [6]. Однак найбільш істотним недоліком всіх існуючих програмних рішень систем вібромоніторингу є те, що аналіз вібродіагностичних сигналів виконується в стаціонарних умовах, шляхом порівняння отриманого вібросигналу з набором тестових. В цьому випадку точність і ефективність ідентифікації сигналу визначається об'ємом тестових сигналів порівняння і точністю методу оцінки близькості аналізованого вібросигналу.

Актуальність

Вібромоніторинг використовує широкий спектр методів аналізу частотних характеристик об'єктів діагностування: методи спектрального і дискримінантного аналізу, методи часових рядів, методи допускового контролю і застосування нейронних мереж [7].

Останнім часом великої популярності набуває відомий метод вейвлет-аналізу [8]. Метод вже добре себе зарекомендував при обробці стаціонарних сигналів для яких характерна залежність амплітуди сигналу від часу [9]. У цьому випадку алгоритм обробки даних зводиться до розрахунку вейвлет-коефіцієнт з подальшим підбором коефіцієнту деталізації.

Вібромоніторинг технологічного обладнання відрізняється наявністю нестаціонарних складних вібросигналів, які характеризуються наявністю тимчасових залежностей амплітуди, частоти, фази. І тому описані вище підходи і алгоритми фільтрації не можуть бути застосовані до поставленої задачі.

У роботах авторів [10] для функціональної діагностики об'єктів розглянуто використання кратномасштабного аналізу, заснованого на вейвлет-перетворенні, який є додатком спектрального аналізу. Використовуваний безперервний вейвлет-аналіз, вимагає значних обчислювальних ресурсів і складної організації самого обчислювального процесу.

Найбільш важкими завданнями при вібромоніторингу технологічного обладнання є розробка апаратних засобів вимірювальних систем для отримання вібросигналів з промислових об'єктів, розробка моделі діагностики та ідентифікація аналізованого сигналу з самонавчанням. Перша із зазначених завдань була успішно вирішена в ряді попередніх наших робіт [11-12], рішенням інших завдань присвячена дана робота.

Мета

Метою роботи є розробка програмного комплексу з безперервною обробкою даних при вібромоніторингу з використанням різних критеріїв оцінки близькості (значення коефіцієнтів авторегресійної моделі, значення ентропії (Шенон), статистичні характеристики (дисперсія, стандартне відхилення, середнє значення, середньоквадратичне значення; квадрат середнього значення квадратів амплітуди, середнє значення похідної, швидкість перетину нуля, середня швидкість перетину і т.д) тестового сигналу.

Задачі

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Для створеної структури системи безперервного вібромоніторингу стану технологічного обладнання розробити математичну модель ідентифікації вібросигналів в реальному часі на основі вейвлет-аналізу.
2. Виконати програмну реалізацію моделі засобами Python з розробкою інтерфейса програмного комплексу та продемонструвати результати роботи програмного комплексу для бази даних тестових сигналів.

Розв'язання задач

Алгоритм процесу безперервного вібромоніторингу наведено на рис. 1. Вібросигнали з технологічного устаткування отримані з урахуванням навантажувальних режимів роботи обладнання. Діагностування стану технологічного обладнання проводиться безперервно.

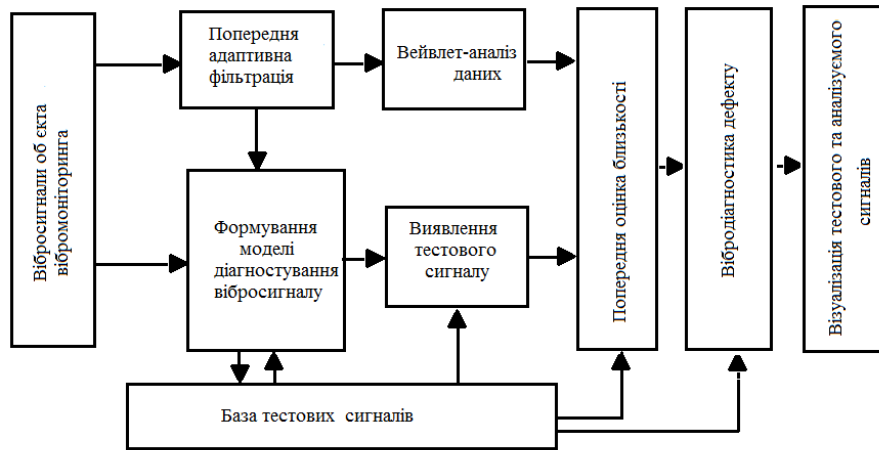


Рисунок 1 – Структурна схема роботи системи безперервного вібромоніторингу стіни технологічного обладнання

У якості програмного середовища для реалізації алгоритму розрахунку був обраний Python, наявність бібліотеки PyWavelets для вейвлет-перетворень з реалізованим дискретним вейвлет-перетворенням дозволять істотно спростити вейвлет аналіз [13]. У відповідності з розробленим алгоритмом для зручності роботи був розроблений інтерфейс програмного комплексу, зовнішній вигляд якого наведено рис. 2. Для аналізованого сигналу з урахуванням обраного вейвлет-коефіцієнту формується графічне представлення графіків як вихідного сигналу, так і його похідної.

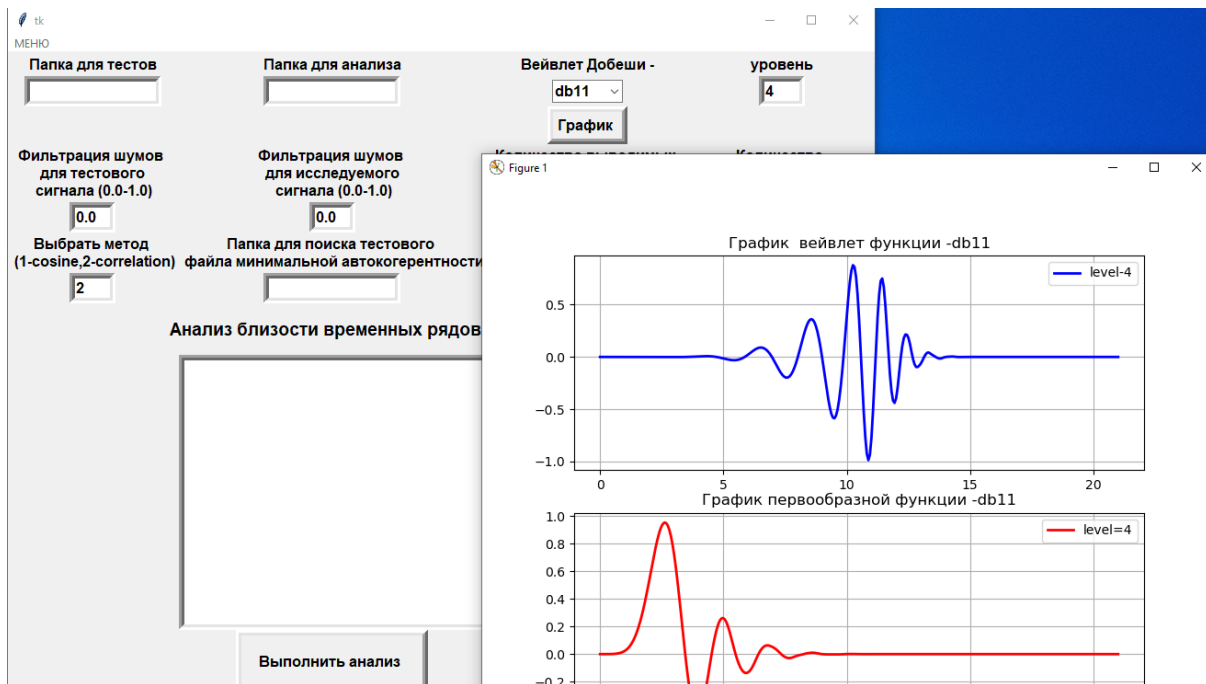


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд інтерфейсу програмного комплексу

Попередня адаптивна фільтрація здійснюється на стадії збору даних [11]. Далі відбувається формування діагностичної моделі.

У класичному машинному навчанні вже отримані дані зазвичай випадковим чином ділять на навчальний і тестовий набори. На основі навчального набору даних отримують класифікатор, а за допомогою тестового перевіряють точність цього отриманої моделі класифікатора даних. У даній програмі відбір в тестовий набір здійснюється в процесі контролю за мінімальним значенням коефіцієнта автокорреляції, який близький до нуля. Таким чином, класифікатор даних працює безперервно, збагачуючи математичну модель розпізнаванням з'являються дефектів обладнання, що залежать від великого числа випадкових чинників-умов монтажу кваліфікації обслуговуючого персоналу і т.п.

Вибір сигналу для обробки здійснюється з папки, де зберігаються дані вібромоніторингу. Інформація записується в реальному режимі часу. Вибір тестового сигналу здійснюється в кожний конкретний момент часу з урахуванням поточного значення вібросигналу.

Принципово новий підхід до організації ідентифікації вібросигналів полягає в тому, що ідентифікуються не сигнали вібромоніторингу записані за певний період часу, а ідентифікація відбувається в реальному режимі часу. Це робить контроль за станом технологічного обладнання оперативним.

В основі роботи програмного комплексу покладена математична модель безперервного вейвлет-аналізу сигналу на заданому часовому інтервалі з перетворенням часового ряду в послідовність вейвлет-коефіцієнтів з використанням материнського вейвлета $\varphi((t-b)/a)$ [9]:

$$W_s = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

W_s – масштабно-часовий спектр сигналк $I(t)$ функції двох аргументів: a - являє собою часовий масштаб (період осциляцій), b - зміщення сигналу по осі часу. Оскільки існуючі підходи з використанням згладжуючого оператора неможливо застосувати через втрату інформації про аномалію, тому для оцінки близькості застосуємо вирази для визначення потужностей вейвлет спектрів двох сигналів $I(t)$ та $dI(t)/dt$:

$$B_c = \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \right)^2 \quad (1)$$

$$B_{cv} = \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dI(t)}{dt} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \right)^2 \quad (2)$$

Відстань між рядами $i \dots m$ -1 коефіцієнтів B_{ci} , B_{cvi} потужностей вейвлет-спектрів сигналів $I(t)$ та $dI(t)/dt$ на основі коефіцієнта кореляції визначається зі співвідношення:

$$\text{cor}(B_c, B_{cv}) = 1 - \frac{\sum_i^{m-1} (B_{ci} - \overline{B_c}) \cdot (B_{cvi} - \overline{B_{cv}})}{\sqrt{\sum_i^{m-1} (B_{ci} - \overline{B_c})^2} \cdot \sqrt{\sum_i^{m-1} (B_{cvi} - \overline{B_{cv}})^2}} \quad (3)$$

Альтернативним варіантом так само нормованим в межах від нуля до одиниці є відстань між рядами $i \dots m$ -1 коефіцієнтів B_{ci} , B_{cvi} потужностей вейвлет спектрів на основі косинуса яке визначається зі співвідношення:

$$\text{cs}(B_c, B_{cv}) = \frac{\left| \sum_i^{m-1} (B_{ci} \cdot B_{cvi}) \right|}{\sqrt{\sum_i^{m-1} (B_{ci})^2} \cdot \sqrt{\sum_i^{m-1} (B_{cvi})^2}} \quad (4)$$

Для практичного застосування наведеної математичної моделі (1 ÷ 4) розглянемо особливості її реалізації засобами вільно поширюваного програмного забезпечення Python. Особливістю вейвлет перетворень (1), (2) є те, що вейвлет коефіцієнти представлені у вигляді списку списків, в які можуть входити і комплексні члени. Тому для порівняння потужностей спектрів відповідно до (3) потрібно спочатку перетворити кожен з двох наборів в загальний список, використовуючи модуль `flatten()` з бібліотеки NumPy працює за наступною схемою [13]:

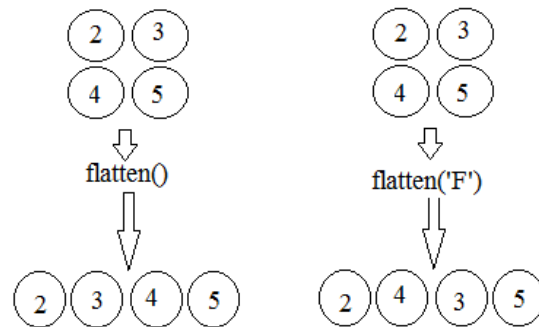


Рисунок 3 – Схема перетворення вейвлет-коефіцієнтів

В отриманих одновимірних масивах вейвлет коефіцієнтів `coeff.flatten ()` потрібно врахувати комплексні члени і обчислити модуль комплексних членів `abs (coeff.flatten ())`, `abs (coeffs.flatten ())`.

Чисельне диференціювання віброцигалів доцільно провести засобами бібліотеки `pandas` застосувавши метод `pd.Series (data) .diff ()` однак при цьому в часі ряду Продиференціювали віброцигал чисельних значень стане на одиницю менше, ніж у вихідному. Замістити початкове бракує чисельне значення слід процедурою `datas = list (df.fillna (0))` [14].

Для визначення коефіцієнта автокогерентності для одного ряду по співвідношенням (3), (4) будемо використовувати процедури `scipy.spatial.distance.correlation` [4] і `scipy.spatial.distance.cosine` [15]. Отримані за співвідношеннями (3), (4) значення відстані при оцінці стаціонарності вібрації будемо називати коефіцієнтами автокогерентності, вибираючи більш чутливу до стаціонарності оцінку відстані.

Перехід до одновимірних масивів основного і продиференційованого сигналів відкриває можливість прямої візуалізації вейвлет-спектрів потужності сигналів з використанням модуля `scaleogram` [15]. Модуль за рахунок вибору масштабу вейвлета, самого вейвлета і логарифмічною шкали часу дозволяє без додаткової математичної обробки сигналу візуалізувати найтонші особливості зміни його частоти, що розширює можливості вібромоніторинга в цілому

Концептуально новизна розробленої моделі полягає у використанні відомих формул для визначення близькості [9] у яких у якості змінних застосовані потужності вейвлет-спектрів, що розраховані за спеціальною методикою з вейвлет-коефіцієнтів дискретного розкладання у відповідності до рис.3.

В результаті розрахунку програмний комплекс (рис. 4) надає аналіз для близькості часових рядів для кожного тестового сигналу з бази з урахуванням обраного типу вейлет-перетворення, критерію близькості, коефіцієнтів фільтрації аналізованого і тестового сигналу (рис. 5). Мінімальний критерій близькості (розрахунок критеріїв близькості детально розглянуто в попередніх публікаціях) відповідає тестовому сигналу.

```
def return_all(path_data,path_test):
    txt_11.delete(1.0, END)
    start_time = time.clock()
    #print(os.path.exists(path_data))
    wavelets=pywt.wavelist('db')#список вейвлетов Добеши
    #print(os.path.exists(path_test))
    st="Файл для тестирования:%s"%path_test+"\n"
    txt_11.insert(END,st)
    e=int(txt_9.get(1.0, END))#выбор метода для построения графика:MSe
    st="Для построения графика выбран метод: MS%s"%e+"\n"
    txt_11.insert(END,st)
    wavelet=co_3.get()#выбор вейвлета
    st="Вейвлет:%s"%wavelet+"\n"
    txt_11.insert(END,st)
    m_0=float(txt_5.get(1.0, END))#уровень фильтрации шумов для тестового сигнала
    m_n=float(txt_6.get(1.0, END))#уровень фильтрации шумов для исследуемых сигналов
    n=int(txt_7.get(1.0, END))#количество выводимых значений близости сигналов для одной меры
    c= int(txt_8.get(1.0, END))#количество значащих цифр в показателях близости
```

Рисунок 4 – Підпрограма розрахунку параметрів вейвлет-аналізу

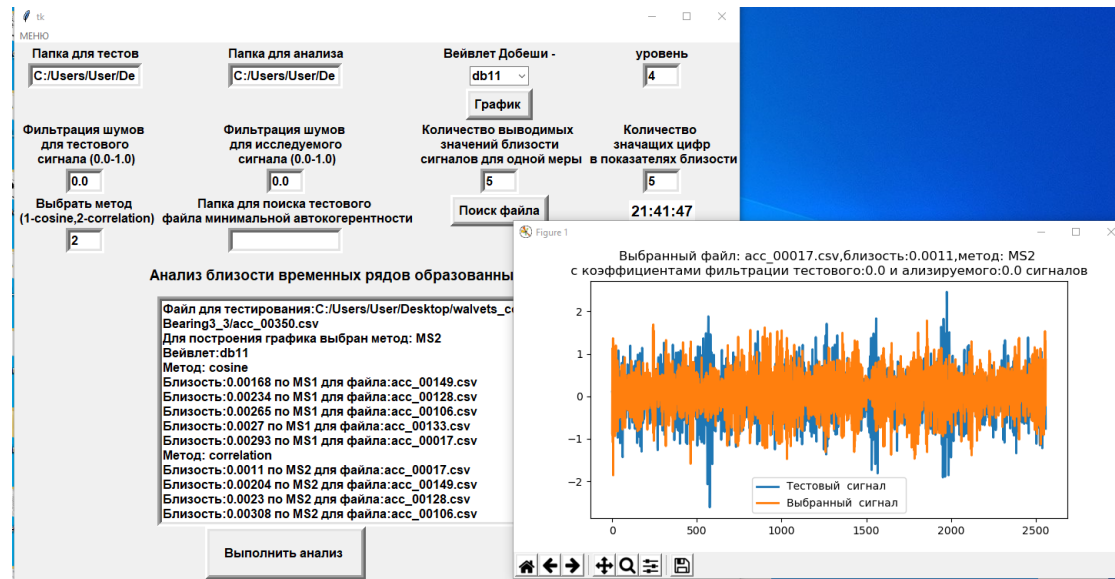


Рисунок 5 – Результати роботи програмного комплексу для бази даних тестових сигналів за методом оцінки близькості тестового сигналу

У якості об'єкту вібромоніторингу виступав підшипниковий вузол редуктора екструдера [16]. Механічна вібрація підшипникового вузла змінювалася в межах 1 – 100 кГц і контролювалася за допомогою портативного засобу контролю VALTECH VP-3470-Ex [17].

Лістинг програми містить додатковий блок математичної обробки сигналів, який реалізується деконструванням сигналу на його частотні піддіапазони, з кожного піддіапазону генеруються області, які можуть бути використані в якості вхідних даних для порівняння близькості рядів (рис. 6).

```
def calculate_entropy(list_values):
    counter_values = Counter(list_values).most_common()#возвращает встречающиеся элементов, в порядке убывания встречаемости
    probabilities = [elem[1]/len(list_values) for elem in counter_values]
    entropy=scipy.stats.entropy(probabilities)#Рассчитать энтропию распределения для значений вероятности
    return entropy

def calculate_statistics(list_values):#Критерии близости
    n5 = nanpercentile(list_values, 5)
    n25 = nanpercentile(list_values, 25)
    n75 = nanpercentile(list_values, 75)
    n95 = nanpercentile(list_values, 95)
    median = nanpercentile(list_values, 50)#Медiana
    mean = nanmean(list_values)#Стандартное отклонение
    std = nanstd(list_values)#Дисперсия
    var = nanvar(list_values)#Среднестатистическая характеристика
    rms = nanmean(sqrt(array(list_values)**2))
    return [n5, n25, n75, n95, median, mean, std, var, rms]

def calculate_crossings(list_values):#Скорость пересечения 0
    zero_crossing_indices = nonzero(diff(array(list_values) > 0))[0]
    no_zero_crossings = len(zero_crossing_indices)
    mean_crossing_indices = nonzero(diff(np.array(list_values) > nanmean(list_values)))[0]
    no_mean_crossings = len(mean_crossing_indices)
    return [no_zero_crossings, no_mean_crossings]

def get_features(list_values):#Скорость пересечения 0
    entropy = calculate_entropy(list_values)
    crossings = calculate_crossings(list_values)
    statistics = calculate_statistics(list_values)
    return [entropy] + crossings + statistics
```

Рисунок 6 – Підпрограма математичної обробки сигналів

В якості критеріїв близькості можуть бути використані функції, які генеруються з набору значень для кожного з піддіапазонів: значення коефіцієнтів авторегресійної моделі, значення ентропії (Шенон), статистичні характеристики (дисперсія, стандартне відхилення, середнє значення, середньоквадратичне значення; квадрат середнього значення квадратів амплітуди, середнє значення похідної, швидкість перетину нуля, середня швидкість перетину і т.д.). При значенні коефіцієнта автокорреляції рівного нулю,

система діагностує дефект. Реалізована функція таймінгу дозволяє ідентифікувати час виникнення дефекту.

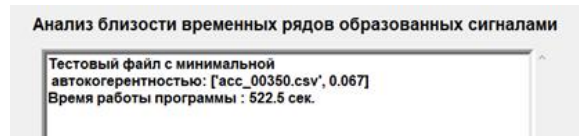


Рисунок 7- Визначення тестового сигналу з мінімальним значенням автокогерентності

Структура по перетворенню інформації в системі безперервної вібромоніторингу виглядає у відповідності до рис. 8

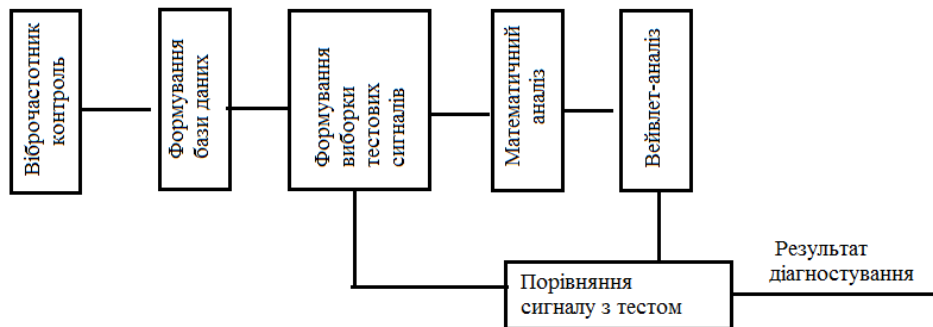


Рисунок 8 – Схема перетворення інформації в програмному комплексі

Вібросигнал з віброчастотного датчика, встановленого на технологічному обладнанні, в цифровому вигляді зберігається в базі даних на ПК. Після чого формується вибірка віброчастотних сигналів для аналізу. Для сигналу з використанням заходів близькості формується вибірка близьких тестових сигналів. При мінімальному значенні коефіцієнта автокогерентності визначається тестовий сигнал. Класифікатор даних працює безперервно, роблячи математичну модель розпізнавання дефектів самонавчальною. Далі аналізований сигнал піддається математичному та вейвлет-аналізу з використанням коефіцієнтів Добеши. Шляхом порівняння аналізованого і тестового сигналу ідентифікується дефект.

У наступних публікаціях в реальному масштабі часу буде досліджена можливість навчання класифікатора матриці навчального набору даних (X_{train}, Y_{train}) , оцінки його роботи $.score(X_{train}, Y_{train})$ і перевірки його точність на тестовому наборі (X_{test}, Y_{test}) . Крім того, дуже важливим є питання ідентифікації стану об'єкту в умовах резонансу. Особливо коли об'єкт вібромоніторингу містить декілька елементів обертання і в результаті вібромоніторингу утворюється складний нестационарний віброчастотний сигнал. Вирішенню зазначених питань будуть присвячені наші наступні дослідження.

Висновки

Програмний комплекс вирішує проблему ідентифікації діагностичних віброчастотних сигналів методом підбору часових рядів тестового сигналу з мінімальною близькістю на основі вейвлет-коефіцієнтів Добеши. Програма підготовки даних для побудови класифікатора машинного навчання дозволяє визначити найбільш близький тестовий сигнал з урахуванням найбільш чутливого до-коефіцієнта автокогерентності в реальному режимі часу.

Розроблений алгоритм аналізу дозволяє реалізувати систему безперервного вібромоніторингу технологічного обладнання, виявляти дефекти та ідентифікувати діагностичні віброчастотні сигнали за рахунок використання комплексного підходу до аналізу близькості тестового сигналу на основі оцінки спектрів потужностей віброчастотного сигналу та його похідної. Використано діапазон кореляційної близькості в межах від -1 до 1.

Вперше алгоритм аналізу близькості дозволяє для обраного вейвлет-коефіцієнтів Добеши, коефіцієнтів деталізації при фільтрації тестового і досліджуваного сигналу з застосуванням різних методів оцінки близькості сигналу здійснити аналіз тестових сигналів з бази даних і шляхом пошуку мінімального критерію близькості та провести ідентифікацію вібрації в реальному режимі часу.

Список літератури

- [1] Н. Н. Ишин, С. А. Гаврилов, «Методология вибромониторинга расходования ресурсов редукторов мотор-колес большегрузных самосвалов», *Вестник Нац. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы механического привода*, т. 28, с. 64-75. 2011.

- [2] М. В. Ромкин, «Программный комплекс для адаптивной фильтрации сигналов», *Современные информационные технологии*, № 19, с. 82-86, 2014.
- [3] N. Daneshjo et al., «Specification of the Application of Vibrodiagnostics in Assessing the State of the Industrial Robot», *Advances in Science and Technology Research Journal*, t. 13, 2019.
- [4] J. Dybała, «Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifier: A pattern recognition approach», *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 38, № 1, pp. 5-22, 2013.
- [5] A. A. Puchalski, «Technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 56, pp. 173-180, 2015.
- [6] Ю. Г. Табаков, «Разработка программного комплекса для обработки НЧ сигналов», *Молодой ученый*, №20, с. 228-231, 2014.
- [7] Б. А. Чичков, «Способ вибрационного мониторинга роторных машин», *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, т. 21, № 1, 2018.
- [8] R. Harang, G. Bonnet, L. R. Petzold, «WAVOS: a MATLAB toolkit for wavelet analysis and visualization of oscillatory systems», *BMC research notes*, t. 5, № 1, p. 163, 2012.
- [9] Е. В. Бурнаев, «Применение вейвлет-преобразования для анализа экономических временных рядов», в *Сб. научн. трудов летней школы по экономико-математическому моделированию ЭКОМОД*, т. 2006, с. 95, 2006.
- [10] П. Ф. Щапов, Р. П. Мигушенко, «Синтез двумерных диагностических параметров при ковариационном анализе трехмерных вейвлет-преобразований вибросигналов», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 69-75, 2013.
- [11] О. Oliynyk, Y. Taranenko, D. Losikhin, A. Shvachka, «Investigation of the Kalman filter in the noise field with an excellent Gaussian distribution», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol.4/4, № 94, pp. 36-42, 2018.
- [12] Y. K. Taranenko, O. Y. Oliynyk, «Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator», *Measurement Techniques*, vol. 61, № 7, pp. 41-46, 2018.
- [13] NumPy Array manipulation: ndarray.flatten() function. [Online]. Available: <https://www.w3resource.com/numpy/manipulation/ndarray-flatten.php>. Accessed on: January 22, 2020.
- [14] Scipy.spatial.distance.correlation. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy0.14.0/reference/generated/scipy.spatial.distance.correlation.html>. Accessed on: January 22, 2020.
- [15] Scipy.spatial.distance.cosine. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.distance.cosine.html>. Accessed on: January 22, 2020.
- [16] Екструдер двошнековий. Технічний паспорт. ПАКС01.00.000 ПС. Харків, Україна: ТОВ «Науково-виробничий підприємство «ПАКС», 2015, 53 с.
- [17] Засоби вібродіагностики. VALTECH 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://vibropoint.ru/sredstva-vibrodiagnostiki>. Дата звернення: 04.30.2018.
- Стаття надійшла: 06.05.2020.

References

- [1] N. N. Ishin, S. A. Gavrilov, «Metodologiya vibromonitoringa rashodovaniya resursov reduk-torov motor-koles bolshegruznyih samosvalov», *Vestnik Nats. tehn. un-ta «HPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyip.: Problemy mehanicheskogo privoda*, t. 28, s. 64-75, 2011.
- [2] М. В. Ромкин, «Программный комплекс для адаптивной фильтрации сигналов», *Современные информационные технологии*, № 19, с. 82-86, 2014.
- [3] N. Daneshjo et al., «Specification of the Application of Vibrodiagnostics in Assessing the State of the Industrial Robot», *Advances in Science and Technology Research Journal*, t. 13, 2019.
- [4] J. Dybała, «Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifier: A pattern recognition approach», *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 38, № 1, pp. 5-22, 2013.
- [5] A. A. Puchalski, «Technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 56, pp. 173-180, 2015.
- [6] YU. G. Tabakov, «Razrabotka programmnoho kompleksa dlya obrabotki NCH signalov» *Molodoy uchenyy*, №20, s. 228-231, 2014.
- [7] B. A. Chichkov, «Sposob vibratsionnogo monitoringa rotornykh mashin», *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, t. 21, № 1, 2018.
- [8] R. Harang, G. Bonnet, L. R. Petzold, «WAVOS: a MATLAB toolkit for wavelet analysis and visualization of oscillatory systems», *BMC research notes*, t. 5, № 1, p. 163, 2012.
- [9] Ye.V. Burnayev, «Primeneniye veyvlet-preobrazovaniya dlya analiza ekonomicheskikh vremennykh ryadov», в *Sb. nauchn. trudov letney shkoly po ekonomiko-matematicheskomu modelirovaniyu EKOMOD*, t. 2006, s. 95, 2006.

- [10] P. F. Shchapov, R. P. Myhushchenko, «Syntez dvumernykh dyagnostycheskykh parametrov pry kovaryatsyonnom analyze trekhmernykh veyvlet-preobrazovanyy vybrosyhnalov», *Informatsiyi tekhnolohiyi ta komp'yuterna inzheneriya*, № 3, s. 69-75, 2013.
- [11] O. Oliynyk, Y. Taranenko, D. Losikhin, A. Shvachka, «Investigation of the Kalman filter in the noise field with an excellent Gaussian distribution», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol.4/4, № 94, pp. 36–42, 2018.
- [12] Y. K. Taranenko, O. Y. Oliynyk, «Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator», *Measurement Techniques*, vol. 61, № 7, pp. 41–46, 2018.
- [13] NumPy Array manipulation: ndarray.flatten() function. [Online]. Available: <https://www.w3resource.com/numpy/manipulation/ndarray-flatten.php>. Accessed on: January 22, 2020.
- [14] Scipy.spatial.distance.correlation. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy0.14.0/reference/generated/scipy.spatial.distance.correlation.html>. Accessed on: January 22, 2020.
- [15] Scipy.spatial.distance.cosine. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.distance.cosine.html>. Accessed on: January 22, 2020.
- [16] Ekstruder dvoshnekovyy. Tekhnichnyy pasport. PAKS01.00.000 PS. Kharkiv, Ukrayina: TOV «Naukovo-vyrobnychyu pidpryyemstvo «PAKS», 2015, 53 s.
- [17] Zasobi vIbroDagnostiki. BALTECH 2017. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <http://vibropoint.ru/sredstva-vibrodiagnostiki>. Data zvernennya: 04.30.2018.

Відомості про авторів

Олійник Ольга Юрїївна – кандидат технічних наук, доцент, викладач, Приватне підприємство «Лікопак».

Тараненко Юрїй Карлович – доктор технічних наук, професор, Коледж радіоелектроніки.

О. Ю. Олейник¹, Ю. К. Тараненко²

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С МАШИНЫМ ОБУЧЕНИЕМ КЛАССИФИКАТОРА

¹Частное предприятие «Ликопак», Днепр

²Колледж радиоэлектроники, Днепр

O. Yu. Oleinik¹, Yu. K. Taranenko²

SYSTEM OF CONTINUOUS VIBROMONITORING OF THE STATE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH MACHINE LEARNING OF THE CLASSIFIER

¹Private Enterprise «Likopak», Dnipro

²College of Radio Electronics, Dnipro

УДК 004.65:379.8

А. О. Азарова, А. А. Шиян, Л. О. Нікіфорова

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХИЩЕНОГО КОНСОЛІДОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ АНАЛІЗУ ДІЯЛЬНОСТІ МОРСЬКИХ ПОРТІВ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Домінантною проблемою формування ефективних засад управління різними технічними, бізнесовими, соціальними, політичними структурами в Україні є створення безпечного та ефективного механізму реєстрації, оброблення, накопичення інформації, можливостей критеріального її пошуку. У сучасному світі з великою кількістю різноманітних бізнес-утворень та їх баз даних в будь-якій галузі діяльності людини постає проблема їх поєднання та створення єдиного інформаційного простору. Зокрема, в інфраструктурі морських портів спостерігається неупорядкованість потужної інформаційної бази даних, які є необхідними для управління такими об'єктами. Разом із тим, глибоке розуміння принципів та механізмів управління судноплавством уможливило суттєве зростання його прибутків, а, отже, потребує на створення відповідного підходу до розвитку аналітичного механізму оброблення інформації у даній сфері з урахуванням широкого кола чинників впливу та забезпечення можливості створення звітів за різними критеріями пошуку. Отже, автори пропонують для розв'язку таких задач розробити відповідний захищений консолідований інформаційний ресурс, що забезпечує якісний аналіз діяльності об'єктів морської інфраструктури в Україні. Метою статті є оптимізація процесів оброблення інформаційних потоків у роботі морських портів України шляхом розроблення та впровадження відповідного консолідованого інформаційного ресурсу, що уможливило продуктивні та захищені: реєстрацію, зберігання та створення звітної інформації. Основними завданнями статті є: аналіз проблем якісного інформаційного забезпечення функціонування системи управління морськими портами України; створення системи управління базами даних, що дотримуються стандартів захисту інформації; реалізація захищеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу діяльності морських портів України. Методи, використані у статті: для проектування бази даних у статті застосовується метод «сутність-зв'язок»; метод реляційних відношень використано для створення бази даних ER-моделі консолідованого інформаційного ресурсу; метод нормалізації застосовується для перетворення відношень БД на послідовні нормальні форми, тобто для оптимізації відношень у створеній БД; для створення таблиць бази даних застосовано систему управління базами даних PostgreSQL, що уможливило проектування UML діаграми класів та відношень. Результатами статті є: спроектований захищений консолідований інформаційний ресурс аналізу діяльності морських портів України, використання якого дозволяє оптимізувати роботу морських портів, швидше та якісніше приймати управлінські рішення та відповідно збільшити прибутковість такої галузі.

Ключові слова: консолідований інформаційний ресурс, морські порти, база даних.

Анотация. Доминантной проблемой формирования эффективных принципов управления различными техническими, бизнесовыми, социальными, политическими структурами в Украине является создание безопасного и эффективного механизма регистрации, обработки, накопления информации, а также возможностей критерияльного ее поиска. В современном мире с большим количеством разнообразных бизнес-образований и их баз данных в любой области деятельности человека возникает проблема их сочетания и создания единого информационного пространства. В частности, в инфраструктуре морских портов наблюдается неупорядоченность мощной информационной базы данных, необходимых для управления такими объектами. Вместе с тем, глубокое понимание принципов и механизмов управления судоходством позволяет достичь существенного роста его доходов, а, следовательно, требует создания соответствующего подхода к развитию аналитического механизма обработки информации в данной сфере с учетом широкого круга влияющих факторов и обеспечения возможности создания отчетов по разным критериям поиска. Таким образом, авторы предлагают для решения таких задач разработать соответствующий защищенный консолидированный информационный ресурс, позволяющий качественный анализ деятельности объектов морской инфраструктуры в Украине. Целью статьи является оптимизация процессов обработки информационных потоков в работе морских портов Украины путем разработки и внедрения соответствующего консолидированного информационного ресурса, способного реализовать продуктивные и защищенные процессы регистрации, хранения и создания отчетной информации. Основными задачами статьи являются: анализ проблем качественного информационного обеспечения функционирования системы управления морскими портами Украины; создание системы управления базами данных в соответствии со стандартами защиты информации; реализация защищенного консолидированного информационного ресурса для анализа деятельности морских портов Украины. Методы, использованные в статье: для проектирования базы данных в статье применяется метод «сущность-связь»; метод реляционных отношений использован для создания базы данных ER-модели консолидированного информационного ресурса; метод нормализации применяется для преобразования отношений БД в последовательные нормальные формы, то есть для оптимизации отношений в созданной БД; для создания таблиц базы данных применена система управления базами данных PostgreSQL, позволяющая проектировать UML диаграммы классов и отношений. Результатами статьи являются: спроектированный защищенный консолидированный информационный ресурс анализа деятельности морских портов Украины, использование которого позволяет оптимизировать работу морских портов, быстрее и качественнее принимать управленческие решения и соответственно увеличить прибыльность такой отрасли.

Ключевые слова: консолидированный информационный ресурс, морские порты, база данных.

Abstract. The dominant problem in the formation of effective principles for managing various technical, business, social, political structures in Ukraine is the creation of a safe and effective mechanism for recording, processing, accumulating information, as well as its criteria-based search capabilities. In the modern world with a large number of diverse business entities and their databases in any field of human activity, the problem arises of combining them and creating a single information space. In particular, in the infrastructure of seaports, there is a disorder in the powerful information database necessary for the management of such facilities. At the same time, a deep understanding of the principles and mechanisms of shipping management allows us to achieve a significant increase in its income, and therefore requires the creation of an appropriate approach to the development of an analytical mechanism for processing information in this area, taking into account a wide range of factors of influence and the possibility of creating reports on different search criteria. Thus, the authors propose to solve such problems to develop an appropriate secure consolidated information resource, which will allow a qualitative analysis of the activities of marine infrastructure in Ukraine. The purpose of the article is to optimize the processes of processing information flows in the work of the seaports of Ukraine by developing and implementing an appropriate consolidated information resource, which allows you to get productive and secure: registration, storage and creation of reporting information. The main objectives of the article are: analysis of the problems of high-quality information support for the functioning of the management system of seaports of Ukraine; creation of a database

management system; adhere to information protection standards; implementation of a secure consolidated information resource for the analysis of the activity of seaports of Ukraine. Methods used in the article: for designing a database, the article uses the "entity-relationship" method; relational relations method was used to create a database of ER-model of a consolidated information resource; the normalization method is used to convert database relationships to sequential normal forms, that is, to optimize relationships in the created database; for the creation of database tables, the PostgreSQL database management system is used, which makes designing UML class diagrams and relations. The results of the article are: the consolidated information resource for analyzing the activities of the seaports of Ukraine is designed to be protected, its use allows optimizing the operation of seaports, making management decisions faster and better, and accordingly increasing the profitability of such an industry.

Key words: consolidation of information resource, marine ports, database.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-27-36>.

Вступ

На сьогоднішній день одним із перспективних напрямків розвитку економіки України слугують вантажно-транспортні морські перевезення. Морський порт як транспортний вузол забезпечує взаємодію усіх інших видів транспортної інфраструктури, а також ефективність проходження транспортних потоків через територію держави й дозволяє реалізовувати її транзитний потенціал. У даний час портова галузь відіграє ключову роль для зростання економіки України. Наразі в Україні існує портовий комплекс, який налічує 13 морських портів, здатних переробити до 230 млн. т вантажів на рік, тоді, як ще у 2013 р. Україна володіла 18 морськими портами [1].

Складність пошуку шляхів ефективного управління портом полягає в його особливому статусі для країни не лише як ланки глобального транспортного ланцюга, але й у великій кількості слабо структурованої інформації, яко постійно оновлюється і зберігається за допомогою різних, не пов'язаних один з одним, інформаційних ресурсів. Враховуючи таку специфіку, практиці управління морськими портами необхідні новітні підходи до оброблення інформації, які є основою для створення сучасних моделей й алгоритмів оптимізації бізнес-процесів у порту. Але новітні підходи до оброблення інформації, що використовуються під час управління різними об'єктами, викликають потреби створення умов для безпечного їх функціонування, зокрема, особливої актуальності набувають проблеми протидії інформаційним війнам та захист кіберпростору електронного впорядкування інформаційних ресурсів. Разом із тим, сучасні методи ведення бізнесу вимагають якнайширшого впровадження для прийняття ефективних управлінських рішень новітніх захищених інформаційних технологій, що базуються на принципах консолідації інформації.

Актуальність

Швидкоплинні умови розвитку морської сфери, необхідність врахування численних зовнішніх та внутрішніх чинників впливу, потреби здійснення ретельного та конструктивного аналізу діяльності морських портів України вимагають створення відповідних засобів, спроможних здійснити огляд та ретельне обґрунтування управлінської інформації.

У діяльності морських портів спостерігається відсутність та неупорядкованість певних даних, які є необхідними. Для того, щоб краще розуміти принципи судноплавства та збільшити його прибутки необхідно чітко виокремлювати та враховувати усі чинники, які уможливають розвиток даної сфери.

Як підкреслюється в Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 р., від ефективності функціонування морських портів, рівня їх технологічного та технічного оснащення, відповідності системи управління та розвитку інфраструктури сучасним міжнародним вимогам залежить конкурентоспроможність вітчизняного транспортного комплексу на світовому ринку [2]. Але робота порту знаходиться під впливом великої кількості слабо керованих та некерованих чинників [1, 3], а також великих масивів даних постійно оновлюваної інформації, яку необхідно агрегувати в єдиному інформаційному просторі, саме тому для прийняття правильних обґрунтованих управлінських рішень в умовах неповної інформації та дії різноманітних чинників необхідна розробка особливого ресурсу, орієнтованого на специфіку діяльності морських портів України.

Питання розвитку портів, необхідність підвищення результативності їх роботи висвітлювалося в багатьох наукових працях, де автори звертали увагу на динамічність, стохастичність порту як складної системи [1, 3], вивчали питання застосування сучасних методів стратегічного управління в ринкових умовах їх функціонування [1, 3-5] та аспекти державно-правової сфери щодо управління портами України [3, 6]. Разом із тим, застосування інформаційних технологій, які б дозволили спростити, оптимізувати та здешивити процес оброблення інформації на тлі врахування високої динамічності такого процесу і різноякісного характеру інформації, яка циркулює у галузі морського управління, не достатньо досліджено в науковому доробку. Крім того, сучасні інформаційні технології набувають особливої практичної цінності в умовах посилення інтеграційних процесів в Україні та всеосяжної світової диджиталізації.

Існують різні інформаційні технології, засновані на різних базах даних та базах знань, що здатні уможливити автоматизацію діяльності морського бізнесу, серед яких слід зазначити такі ресурси, як datarower, бази даних адміністрації морських портів України, статистичні ресурси Укрінфо тощо. Разом із тим, вони не позбавлені таких недоліків: неповнота даних, їх неупорядкованість, відсутність структу-

рованої інформації щодо портів, іноземних партнерів, людського, організаційного, споживчого капіталів морської інфраструктури України тощо. Одним із найбільш продуктивних шляхів усунення таких недоліків засобами управління інформаційними ресурсами є розроблення відповідного захищеного консолідованого інформаційного ресурсу. Він уможливує достатню захищеність даних, їх упорядкованість та повноту, а також високу продуктивність та реплікацію даних. Консолідований інформаційний ресурс аналізу діяльності морських портів України дозволить оцінити ситуацію на ринку вантажно морських перевезень, а також покращити її за рахунок застосування ефективних управлінських рішень на основі представлених результатів.

Мета

Отже, метою статті є оптимізація (за критерієм мінімізації часових та вартісних витрат) процесів оброблення інформаційних потоків у роботі морських портів України шляхом побудови та реалізації відповідного консолідованого інформаційного ресурсу, що уможливує продуктивні та захищені: реєстрацію, зберігання та створення звітної інформації. Такий підхід дозволяє поглиблене вивчення діяльності морських портів України та покращення їх функціонування, оскільки є інструментом для аналізу даних та прийняття раціональних аналітичних, управлінських рішень для розвитку даної галузі.

Задачі

1. Аналіз проблем якісного інформаційного забезпечення функціонування системи управління морськими портами України; реалізація захищеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу діяльності морських портів України.

2. Створення системи управління базами даних, що дотримуються стандартів захисту інформації.

3. Реалізація захищеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу діяльності морських портів України.

Розв'язання задач

Для розроблення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу було обрано систему управління базами даних (СУБД) PostgreSQL, оскільки вона є зручною безкоштовною реляційною СУБД для створення інформаційної системи. До переваг PostgreSQL належать: простота у використанні, універсальність, висока швидкість виконання запитів, можливість безкоштовного використання та ефективна система безпеки [7].

Консолідація даних – це багатоетапна складна процедура і найважливіша складова аналітичного процесу, що забезпечує високий рівень аналітичних рішень. Аналітична діяльність щодо консолідованої інформації – це процедури та процеси інтелектуальної діяльності, які генерують нову інформацію, дозволяють виявити нові проблеми чи їх аспекти, запропонувати нетрадиційні способи їх вирішення. Необхідним є врахування ризиків порушення захисту інформації, постійний систематичний аналіз проблемних ситуацій із метою виявлення тенденцій, які потребують негайної реакції керівництва та прийняття рішень [8-9].

Морський транспортний комплекс є багатofункціональною структурою, що задовольняє потреби економіки, сприяє розвитку міжнародної торгівлі та реалізує зобов'язання України як морської держави відповідно [10].

До основних етапів створення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу належать:

- 1) проектування ER-моделі консолідованого інформаційного ресурсу (КІР);
- 2) побудова бази даних (БД);
- 3) нормалізація БД;
- 4) розроблення інтерфейсу КІР;
- 5) захист інформації у БД створеного КІР;
- 6) застосування створеного консолідованого інформаційного ресурсу для аналізу діяльності морських портів.

Розглянемо кожен етап окремо.

Етап 1. Проектування ER-моделі консолідованого інформаційного ресурсу. Для створення бази даних необхідно враховувати всі особливості обраної галузі. Для того, щоб правильно побудувати базу даних, потрібно спроектувати для неї ER-моделі за принципом «сутність-зв'язок». Модель «сутність – зв'язок» являє собою набір концепцій, які використовуються для опису логічної структури бази даних.

Базис понять семантичного моделювання загалом містить:

- визначення реалізованого об'єкта;
- визначення об'єкта-типу;
- визначення зв'язку між об'єктами;
- визначення властивості об'єкта;
- визначення ідентифікує властивості об'єкта.

Для моделі «сутність – зв'язок» базовими є поняття:

- сутність;

- зв'язок;
- атрибут.

Модель «сутність – зв'язок» заснована на діаграмній техніці. Для представлення різних аспектів структури даних (об'єктів, властивостей об'єктів, зв'язків між об'єктами, властивостей зв'язків та ін.) використовуються графічні засоби. Будь-який фрагмент предметної області може бути представлено як безліч сутностей, між якими існує деяка множина зв'язків.

Сутність – це клас однотипних об'єктів, інформація про які повинна бути врахована в моделі. Кожна сутність повинна мати найменування, виражене іменником в однині.

Атрибут сутності – це іменована характеристика, що є деякою властивістю сутності. Найменування атрибута повинно бути виражено іменником в однині (можливо характеризувати й прикметниками).

Ключ сутності – це ненадлишковий набір атрибутів, значення яких у сукупності є унікальними для кожного екземпляра сутності. Ненадмірність полягає в тому, що видалення будь-якого атрибута з ключа порушує його унікальність.

Зв'язок – це деяка асоціація між двома сутностями. Одна сутність може бути пов'язана з іншою сутністю або сама із собою. Зв'язки дозволяють за одною сутністю знаходити інші, пов'язані з нею [11-13].

Отже, автори статті пропонують таку ER-модель консолідованого інформаційного ресурсу, що розглянуто на рис. 1. У результаті проектування ER-моделі отримано ряд сутностей: Порт, Корабель, Вантаж, Перевізник, Лінійний агент, Маршрут, Збір, Склад, Диспетчер, Покупець, Замовлення та Власник вантажу, що поєднуються між собою обов'язковими та не обов'язковими відношеннями, типу один до одного, один до багатьох та багато до одного. У процесі проектування кожна з визначених сутностей отримує ряд атрибутів.

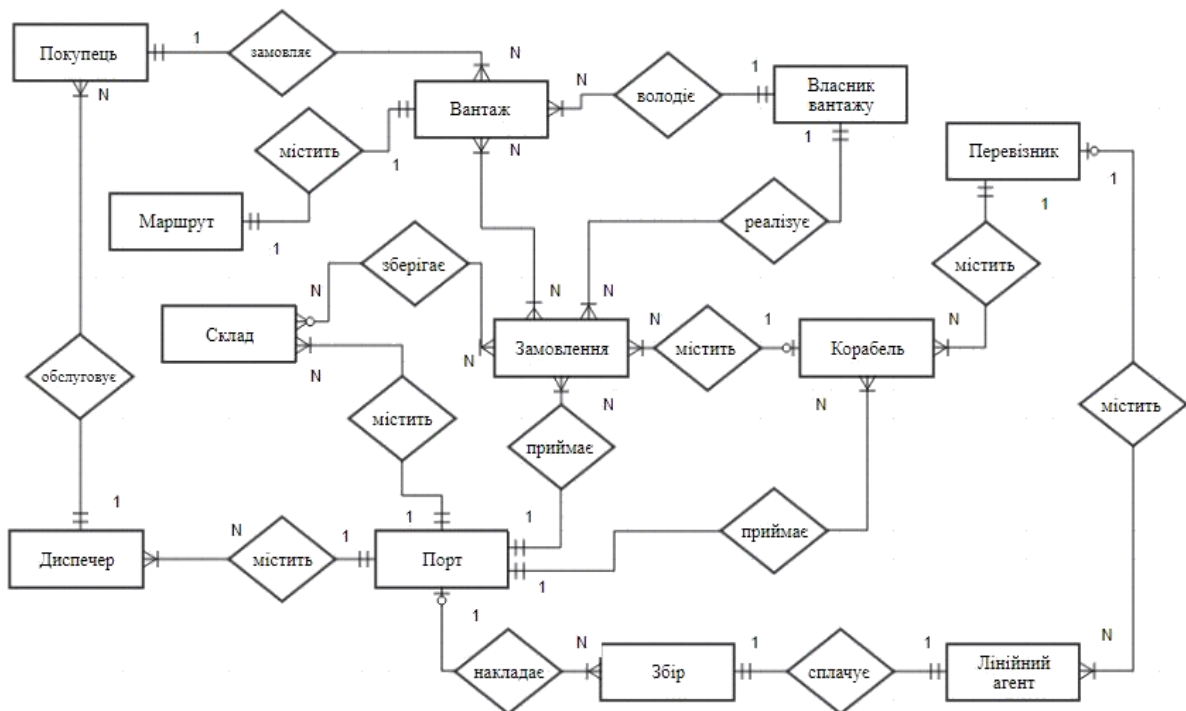


Рисунок 1 – ER – модель консолідованого інформаційного ресурсу

Сутності Порт відповідають такі атрибути: Код Порту, Назва порту, Кількість терміналів, Типи терміналів, Кількість причалів, Глибина причалів, Кількість складів.

Сутності Корабель відповідають такі атрибути: Код Корабля, Назва корабля, Тоннажність, Клас корабля, Регістраційний номер.

Сутності Вантаж відповідають такі атрибути: Код Вантажа, Код Маршруту, Код Покупця, Вага, Регістраційний номер, Цінність, Вид вантажу.

Сутності Перевізник відповідають такі атрибути: Код Перевізника, Назва перевізника, Розташування, Кількість кораблів, Типи кораблів.

Сутності Лінійний агент відповідають такі атрибути: Код Агента, Назва агента, Розташування агента, Код Перевізника.

Сутності Збір відповідають такі атрибути: Код Збору, Код порту, Код причалу, Сума, Код вантажу, Дата.

Сутності Маршрут відповідають такі атрибути: Код Маршруту, Місце відправлення, Місце прибуття, Дата відправлення, Дата прибуття.

Сутності Склад відповідають такі атрибути: Код Складу, Код порту, Код Вантажу, Номер складу.

Сутності Диспетчер відповідають такі атрибути: Код Диспетчера, Код порту, Номер диспетчера.

Сутності Покупець відповідають такі атрибути: Код Покупця, Код Замовлення, Код Вантажу, Розташування власника, Контакти власника, Назва покупця.

Сутності Замовлення відповідають такі атрибути: Код Замовлення, Код Вантажу, Код Корабля, Код Покупця, Номер замовлення.

Сутності Власник вантажу відповідають такі атрибути: Код Власника, Код Замовлення, Код Вантажу, Розташування власника, Контакти власника, Назва власника.

Кожен атрибут сутності, який починається зі слова Код і містить у собі назву сутності, є ключовим атрибутом даної сутності.

Етап 2. Побудова бази даних. На основі отриманих вище всіх сутностей та їх атрибутів, а також усіх зв'язків між сутностями ER-моделі, приступимо до проектування таблиць бази даних консолідованого інформаційного ресурсу, де атрибути слугуватимуть таблицями бази даних. Після створення таблиць їх потрібно заповнити даними. Даніми для цих таблиць будуть атрибути сутностей кожної відповідної таблиці. Наприклад, у нас є сутність Порт, яка містить атрибути: Назва порту, Кількість терміналів, Типи терміналів, Кількість причалів, Глибина причалів, Кількість складів, Код Складу. Відповідно до цього таблиця «Порт» повинна містити такі ж поля з відповідними значеннями та типами даних, як вказано на рис. 2. Аналогічно побудуємо усі інші таблиці.

ID [PK] integer	Name name	Terminals_count integer	Peers_count integer	Peers_dephts integer	Warehouses_count integer	accepts name
1	Білгород - Дністровський	4	8	6	1	Контейнери, нафта/газ
2	Бердянськ	6	12	9	5	Нафта/газ, зерно
3	Ізмаїл	3	6	7	4	Нафта/газ
4	Маріуполь	1	2	8	3	Контейнери, зерно, нафта/газ
5	Миколаїв	18	36	10	21	Контейнери, нафта/газ
6	Одеса	17	18	14	19	Нафта/газ, зерно
7	Ольвія	1	1	5	2	Нафта/газ, зерно
8	"Південний"	15	15	19	9	Контейнери, зерно, нафта/газ
9	Рені	11	11	7	1	Контейнери, нафта/газ

Рисунок 2 – Вигляд таблиці Порт

Наступним кроком в реалізації бази даних аналізу діяльності морських портів України є встановлення зв'язків між таблицями даних відповідно до їх первинних та вторинних ключів за допомогою UML діаграми класів, як вказано на рис. 3.

Етап 3. Нормалізація БД. Нормалізація відношень – це покроковий процес поділу початкових відношень БД на простіші. Кроки цього процесу перетворюють схему відношення БД на послідовні нормальні форми. Кожна наступна форма володіє кращими властивостями ніж попередня [14]. У результаті проведення нормалізації отримаємо такі відношення:

- R4(< Код Порту> Назва порту, Кількість терміналів, Типи терміналів, Кількість причалів, Глибина причалів, Кількість складів, Код Складу);
- R5 (< Код Збору> Сума, Дата);
- R6 (< Код Корабля> Назва корабля, Тоннажність, Клас корабля, Реєстраційний номер);
- R7 (< Код Вантажу> Вага, Цінність, Вид вантажу);
- R8 (< Код Перевізника> Назва перевізника, Розташування, Кількість кораблів, Типи кораблів);
- R9 (< Код Агента> Назва агента, Розташування агента);
- R10 (< Код Маршруту> Місце відправлення, Місце прибуття, Місце відправлення, Дата відправлення, Дата прибуття);
- R6 (< Код Корабля> Назва корабля, Тоннажність, Клас корабля, Реєстраційний номер);
- R7 (< Код Вантажу> Вага, Цінність, Вид вантажу);
- R8 (< Код Перевізника> Назва перевізника, Розташування, Кількість кораблів, Типи кораблів);
- R9 (< Код Агента> Назва агента, Розташування агента);

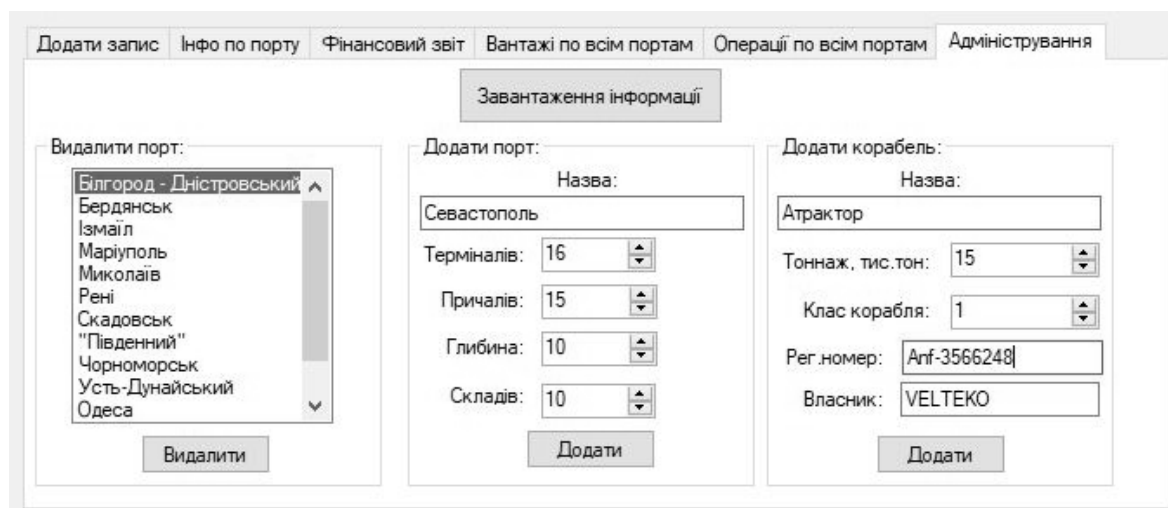


Рисунок 5 – Вікно адміністрування програми

Кожне з вікон, які представлено на рисунках вище, розроблено з урахуванням усіх основних процесів, які відбуваються на території порту та використовуються для внесення нової інформації в консолідований інформаційний ресурс. Також представлені вище вікна використовуються для редагування вже існуючої інформації та видалення даних, які є не актуальними. Усі дані додаються у режимі реального часу та записуються у відповідні таблиці консолідованого інформаційного ресурсу аналізу діяльності морських портів України.

Етап 5. Захист інформації у БД створеного КІР. Базу даних спроектовано за допомогою такої СУБД як PostgreSQL, яка є надійною та швидкодіючою. Серед основних переваг даної СУБД можна виділити: повну відповідність найновішим протоколам захисту, надійні механізми реплікації даних, величезна база методів автентифікації клієнтських додатків, починаючи з метода GSSAPI та закінчуючи методом BSD. Також СУБД PostgreSQL дозволяє створювати нові типи даних та використовувати кілька мов програмування, що в сукупності з перерахованими системами автентифікації дозволяє побудувати стійку та надійну систему захисту [15]. GSSAPI є протоколом галузевого стандарту для безпечної авторизації, певним в RFC 2743. PostgreSQL підтримує GSSAPI з Kerberos автентифікації відповідно до RFC 1964.

У процесі автентифікації задіяно такі основні компоненти:

- Клієнт, який запитує доступ до служби або намагається здійснити автентифікацію.
- Сервер, на якому працюють служби, доступ до якого потрібно клієнту.
- Комп'ютер, до якого має довіру клієнт (В даному випадку мова йде про контролер домена, на якому виконується служба Key Distribution Center – KDC).
- KDC є службою, яка працює на фізично захищеному сервері. Вона веде базу облікових даних щодо всіх учасників безпеки (security principal) своєї області. Разом з інформацією про всіх security principal у базі даних KDC зберігається криптографічний ключ, відомий тільки цьому об'єкту і службі KDC. Зазначений ключ, який називають довготривалим, використовується для зв'язку користувача системи безпеки із центром розподілу ключів [16].

Етап 6. Застосування створеного КІР для аналізу діяльності морських портів. Розглянемо роботу створеного КІР щодо надання ним звітів за певними запитамі. Звіти будуть створюватися на базі кількох таблиць або запитів. Основною задачею звітів є наочне зображення зібраної статистичної інформації в доступному графічному вигляді або у текстовому представленні основної інформації (рис. 6). Це робиться для того, щоб працівники чи керівництво, на основі представлених даних, могли формувати свої звіти більш швидко та детально.

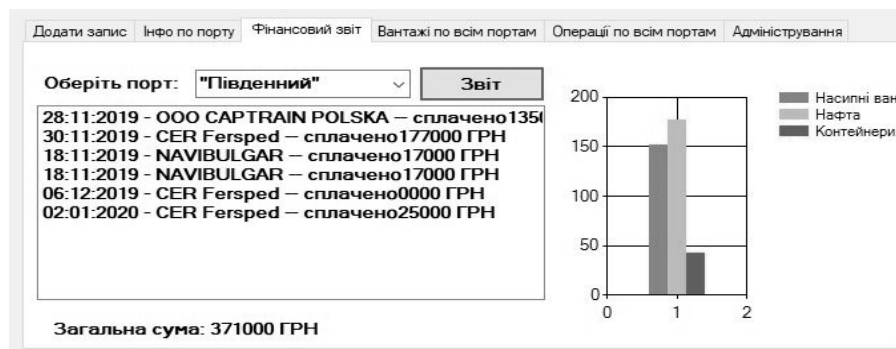


Рисунок 6 – Приклад сформованого фінансового звіту

Висновки

У статті розроблено захищений консолідований інформаційний ресурс для створення ефективної системи управління морськими портами України. Основною перевагою консолідованого інформаційного ресурсу перед іншими системами є те, що він містить у собі всю необхідну та об'єктивну інформацію, що дозволяє швидко та якісно вирішувати поставлені перед управлінцями морських портів України задачі.

Отже, основним науковим результатом дослідження є удосконалення процесів оброблення інформації у сфері морських портів в Україні на основі створення відповідного консолідованого інформаційного ресурсу, що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє оптимізувати таку процедуру (за критерієм мінімізації часових та вартісних витрат), а також уможливорює продуктивні та захищені: реєстрацію, зберігання та створення звітної інформації.

Перспективність застосування створеного консолідованого ресурсу у роботі морських портів є безперечною, оскільки дозволить збільшити прибутки, удосконалити систему прийняття управлінських рішень та оптимізувати роботу порту.

Список літератури

- [1] А. В. Кравченко, М. В. Макаренко, «Напрямки вдосконалення управління портами України на основі методів кореляційно-регресійного аналізу», *Актуальні проблеми економіки*, № 3 (189), с. 325-330, 2017.
- [2] Про схвалення Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 11.07.2013 № 548-р. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua>. Дата звернення: 02.06.2020.
- [3] І. М. Ненно, «Стратегія управління морськими торговельними портами: горизонт, структура, інструменти», *Ринкова економіка: сучасна теорія і практика управління*, № 2, том 14, с. 68-78, 2015.
- [4] В. В. Мандра, «Морський торговельний порт як об'єкт управління», *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка і менеджмент*, № 27(1), с. 68-70, 2017.
- [5] А. О. Панчук, «Сучасні форми управління морськими портами та проблеми адміністрування морської галузі в Україні», *LEX PORTUS*, № 1 (15), с. 50-67, 2019.
- [6] Л. В. Валуєв Удосконалення державного управління морськими портами України. *Порівняльно-аналітичне право*, № 5, с. 213-215, 2014.
- [7] PostgreSQL. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.postgresql.org>. Дата звернення: 02.06.2020.
- [8] А. О. Азарова, А. А. Шиян, С. П. Мурза, А. В. Кудлик, Т. С. Костюк, «Розроблення захищеного консолідованого інформаційного ресурсу аналізу ринку надання послуг медичними лабораторіями в Україні», *Вісник ХНУ. Технічні науки*, № 6 (279), с. 105-109, 2019.
- [9] A. Azarova, A. Shiyan, Y. Mironova, L. Shturma, «The development of secured consolidated information resource of activity analysis of the poultry industry in Ukraine», *Technology audit and production reserves*, № 6/2 (50), pp. 14–18, 2019.
- [10] Міністерство інфраструктури України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua>. Дата звернення: 02.06.2020.
- [11] В. Ю. Кара-Ушанов, *Модель «Сущность-связь»*. Екатеринбург, 2017, 64 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13604/1/Kara-Ushanov.pdf>. Дата звернення: 02.06.2020.

- [12] А. Ю. Пушников, *Введение в системы управления базами данных*. Уфа, Россия: Изд-е Башкирского ун-та, 2019, 138 с.
- [13] В.Артемов, «Что такое Business Intelligence», *Открытые системы*, № 4, 2003. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.osp.ru/os/2003/04/182900>. Дата звернення: 02.06.2020.
- [14] Мови програмування. Нормалізація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http:// life-prog.ru](http://life-prog.ru). Дата звернення: 02.06.2020.
- [15] A. Silberschatz, H. F. Korth, S. Sudarshan, *Database system concepts*. New York, USA: McGraw-Hill, 2011, 1349.
- [16] В. М. Богущ, О. А. Довидьков, В. Г. Кривуца, *Теоретичні основи захищених інформаційних технологій*. К., Україна: ДУІКТ, 2010, 454 с.

Стаття надійшла: 03.06.2020.

References

- [1] A. V. Kravchenko, M. V. Makarenko, «Napryamky vdoskonalennya upravlinnya portamy Ukrainy na osnovi metodiv korelyatsiyno-rehresiyonoho analizu», *Aktualni problemy ekonomiky*, № 3 (189), s. 325-330, 2017.
- [2] Pro skhvalennya Stratehii rozvytku morskyykh portiv Ukrainy na period do 2038 roku: Rozporядzhennya Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.07.2013 № 548-r. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <http://zakon.rada.gov.ua>. Data zvernennya: 2.06.2020.
- [3] I. M. Nyenno, «Stratehiya upravlinnya morskymy torhivelnymy portamy: horyzont, struktura, instrumenty», *Rynkova ekonomika: suchasna teoriya i praktyka upravlinnya*, № 2, tom 14, s. 68-78, 2015.
- [4] V. V. Mandra, «Morskyy torhovelnyy port yak obyekt upravlinnya», *Naukovyy visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Seriya: Ekonomika i menedzhment*, № 27(1), s. 68-70, 2017.
- [5] A. O. Panchuk, «Suchasni formy upravlinnya morskymy portamy ta problemy administruvannya morskoyi haluzi v Ukraini», *LEX PORTUS*, № 1 (15), s. 50-67, 2019.
- [6] L. V. Valuyev, «Udoskonalennya derzhavnoho upravlinnya morskymy portamy Ukrainy», *Porivnyalno-analitychne pravo*, № 5, s. 213-215, 2014.
- [7] PostgreSQL. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <https://www.postgresql.org>. Data zvernennya: 2.06.2020.
- [8] A. O. Azarova, A. A. Shiyan, S. P. Murza, A. V. Kudlyk, T. S. Kostyuk, «Rozroblennya zakhyschenoho konsolidovanoho informatsiyonoho resursu analizu rynku nadannya posluh medychynymy laboratoriyamy v Ukraini», *Visnyk KHNU. Tekhnichni nauky*, № 6 (279), s. 105-109, 2019.
- [9] A. Azarova, A. Shiyan, Y. Mironova, L. Shturma, «The development of secured consolidated information resource of activity analysis of the poultry industry in Ukraine», *Technology audit and production reserves*, № 6/2 (50), pp. 14–18, 2019.
- [10] Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <https://mtu.gov.ua>. Data zvernennya: 02.06.2020.
- [11] V. YU. Kara-Ushanov, *Model «Sushchnost-svyaz»*. Ekaterynburh, 2017, 64 s. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13604/1/Kara-Ushanov.pdf>. Data zvernennya: 02.06.2020.
- [12] A. YU. Pushnykov, *Vvedenye v systemy upravleniya bazamy dannyakh*. Ufa, Rossiya: Yzd-e Bashkyskoho un-ta, 2019, 138 s.
- [13] V. Artemev, «Chto takoe Business Intelligence», *Otkrytye systemy*, № 4, 2003. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <https://www.osp.ru/os/2003/04/182900>. Data zvernennya 02.06.2020.
- [14] Movy prohramuвання. Normalizatsiya. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: [http:// life-prog.ru](http://life-prog.ru). Data zvernennya: 02.06.2020.
- [15] A. Silberschatz, H. F. Korth, S. Sudarshan, *Database system concepts*. New York, USA: McGraw-Hill, 2011, 1349.
- [16] V. M. Bohush, O. A. Dovydkov, V. H. Kryvutsa, *Teoretychni osnovy zakhyschenykh informatsiynykh tekhnolohiy*. К., Ukrayina: DUIKT, 2010, 454 s.

Відомості про авторів

Азарова Анжеліка Олексіївна – кандидат технічних наук, професор, заст. декана Факультету менеджменту та інформаційної безпеки з наукової роботи та міжнародного співробітництва Вінницького національного технічного університету.

Шиян Анатолій Антонович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри менеджменту та безпеки інформаційних систем Вінницького національного технічного університету.

Нікіфорова Лілія Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки підприємства та виробничого менеджменту Вінницького національного технічного університету.

А. А. Азарова, А. А. Шиян, Л. А. Никифорова

**РАЗРАБОТКА ЗАЩИЩЕННОГО
КОНСОЛИДИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО
РЕСУРСА АНАЛИЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МОРСКИХ
ПОРТОВ УКРАИНЫ**

Винницкий национальный технический университет, Винница

A. O. Azarova, A. A. Shyian, L. A. Nikiforova

**DEVELOPMENT OF THE SECURE CONSOLIDATED
INFORMATION RESOURCE FOR ANALYSIS OF THE
ACTIVITIES OF SEA PORTS OF UKRAINE**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.317

О. М. Васілевський

КОНЦЕПЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ІНДУСТРІЇ 4.0

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Використання інтелектуальних сенсорів, мережевих технологій, інтернет речей, машинного навчання в Індустрії 4.0 набуває широкого розповсюдження під час проектування та реконструкції технологічних процесів на виробництвах. При цьому виникають нові проблеми, які пов'язані з необхідністю перегляду основних принципів метрологічного забезпечення виробництва, таких як калібрування, оцінювання непевності вимірювань, забезпечення простежуваності, опрацювання великих масивів даних для відтворення і порівняння результатів вимірювань фізичних величин у дистанційному режимі. Традиційні способи калібрування засобів вимірювальної техніки при запровадженні Індустрії 4.0 стають економічно не вигідними під час використання відносно недорогих інтелектуальних сенсорів, а використання складних мережевих технологій разом з машинним навчанням ускладнюють методи попередньої обробки вимірюваних величин. У зв'язку з цим пропонуються нові підходи для вирішення проблеми дистанційного калібрування засобів вимірювань, що використовуються в Індустрії 4.0.

Ключові слова: метрологія 4.0, концепція калібрування, непевність вимірювань, простежуваність, Індустрія 4.0, інтелектуальні датчики.

Аннотация. Использование интеллектуальных сенсоров, сетевых технологий, интернет вещей, машинного обучения в Индустрии 4.0 носит массовое явление при проектировании и реконструкции технологических процессов на производствах. При этом возникают новые проблемы, связанные с необходимостью пересмотра основных принципов метрологического обеспечения производства, таких как калибровка, оценка неопределенности измерений, обеспечение прослеживаемости, обработки больших массивов данных для воспроизведения и сравнения результатов измерений физических величин в дистанционном режиме. Традиционные способы калибровки средств измерительной техники при внедрении Индустрии 4.0 становятся экономически невыгодными при использовании относительно недорогих интеллектуальных датчиков, а использование сложных сетевых технологий вместе с машинным обучением приводят к утруднению методов предварительной обработки измеренных величин. В связи с этим предлагаются новые подходы для решения проблемы дистанционной калибровки средств измерений, используемых в Индустрии 4.0.

Ключевые слова: метрология 4.0, концепция калибровки, неопределенность измерений, прослеживаемость, Индустрия 4.0, интеллектуальные датчики.

Abstract. The use of intelligent sensors, network technologies, the Internet of things, machine learning in Industry 4.0 is a mass phenomenon in the design and reconstruction of technological processes in industries. This raises new problems associated with the need to revise the basic principles of metrological support of production, such as calibration, estimation of measurement uncertainty, ensuring traceability, processing large amounts of data to reproduce and compare the results of measurements of physical quantities in remote mode. The traditional methods of calibrating measuring instruments with the introduction of Industry 4.0 become economically disadvantageous with the use of relatively inexpensive intelligent sensors, and the use of sophisticated network technologies along with machine learning lead to the harder methods of preliminary processing of measured values. In this regard, new approaches are proposed to solve the problem of remote calibration of measuring instruments used in Industry 4.0.

Key words: metrology 4.0, calibration concept, measurement uncertainty, traceability, Industry 4.0, smart sensors.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-37-44>.

Вступ

Простежувані калібрування, гармонізоване трактування непевності вимірювань та застосування міжнародних та національних (галузевих) стандартів є основними складовими метрологічної інфраструктури, що дає змогу глобалізувати виробництво та міжнародну торгівлю. Цифровізація технічних засобів та наука про дані швидко змінюють майже всі аспекти концепції калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ): наприклад, сенсори стають інтелектуальними, а великі мережі сенсорів та вимірювальних систем використовуються разом з методами машинного навчання для прийняття автоматизованих рішень та контролю виробничих процесів. Поєднання цих та інших технологічних елементів формує майбутню концепцію метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0, парадигму, яка швидко поширюється та розвивається у всьому світі.

Ключовим завданням у такому поєднанні методів машинного навчання, інтелектуальних сенсорів, вимірювальних систем та інших технологічних елементів – є достовірність даних, алгоритмів та процесів [1 – 7]. Мова іде про якість даних, яка напряму залежить від наявності концепції непевності вимірювань для підтримки метрологічної інфраструктури [4]. Щоб охопити весь інформаційний потік, така інфраструктура повинна, серед іншого, включати простежуваність калібрування інтелектуальних сенсорів з урахуванням залежних від часу ефектів, метрологічну обробку складних сенсорних мереж та оцінку непевності для агрегування даних та способів прийняття рішень.

Актуальність

Результати цифрової трансформації в метрології та Індустрії 4.0 чітко відображені в розвитку технології смарт-сенсорів (Smart sensor – інтелектуальних сенсорів) [5, 8]. Застосування метрологічних принципів для сенсорних мереж в Індустрії 4.0 призводить до декількох актуальних проблем, пов'язаних

із забезпеченням дистанційного калібрування та простежуваності. Наприклад, впровадження метрології в Індустрію 4.0 означає, що можливості калібрування повинні бути розширені для сенсорів з цифровим вихідним сигналом. Це вимагає нових концепцій щодо генерації часових позначок для сигналів, що надходять від сенсорів. В першу чергу це особливо важливо для динамічного (частотно залежного) калібрування. Причина полягає в тому, що надійне калібрування зміни фази в сигналі, що надходить від сенсора є важливим елементом для залежних від часу вимірюваних величин [9-21]. У типових для Індустрії 4.0 додатках, сенсори забезпечують цифрові, залежні від часу вихідні сигнали та мають внутрішні можливості обробки сигналів. Це, в свою чергу ускладнює калібрування фази сигналу, оскільки внутрішнє вимірювання часу сенсора не керується системою калібрування, що вимагає нових концепцій для калібрування таких сенсорів. Тому актуальним є завдання подальшого розвитку концепції метрологічного забезпечення при збереженні оцінених непевностей вимірювань.

Мета

Мета роботи полягає в розробці концепції дистанційного калібрування вимірювальних каналів та інтелектуальних сенсорів, а також забезпеченні простежуваності результатів вимірювань, отриманих за допомогою сенсорних мереж в Індустрії 4.0.

1. Концепція калібрування та простежуваності в Індустрії 4.0

Одним з варіантів реалізації онлайн калібрування є додаткове використання сигналу GPS для отримання точного значення часу. При підключенні зовнішнього сигналу часу вихідні значення сенсора можна оцифрувати абсолютними, простежуваними значеннями часу. Завдяки доступним таким чином вимірним значенням величин, отриманих від сенсора з простежуваними значеннями часу, сенсор можна динамічно калібрувати з використанням традиційних підходів [20-30], включаючи його фазову характеристику. При використанні сигналу GPS (чи навігаційної системи Galileo), MEMS сенсорів та спеціальної плати мікроконтролера «Smart-Up-Unit», яка може вмістити один або декілька сенсорів MEMS і має можливості підключення до зовнішніх простежуваних таймерів для забезпечення попереднього опрацювання результатів вимірювань в реальному часу, з'являється можливість дистанційного (онлайн) калібрування (рис. 1).

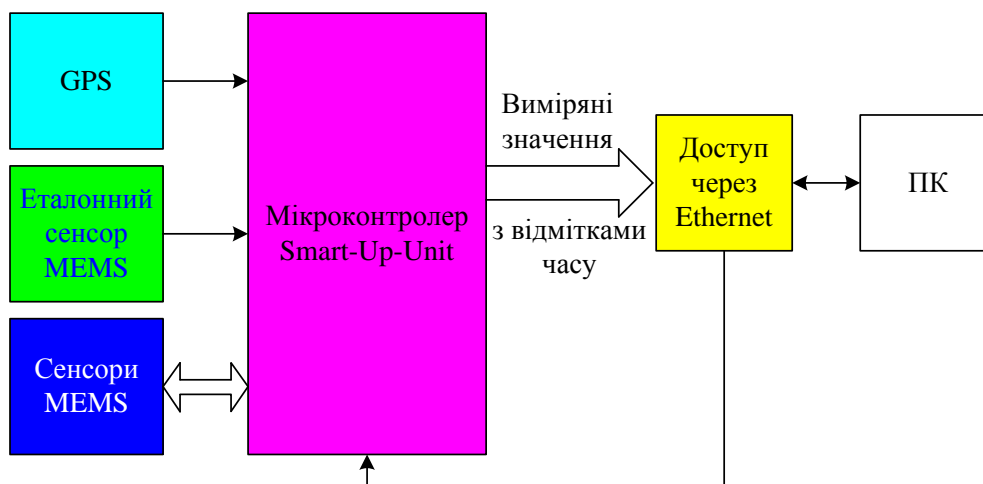


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема інтелектуального засобу вимірювання, що дає змогу реалізувати процедуру калібрування в дистанційному (онлайн) режимі

Відкалібрований таким чином сенсор можна під'єднувати до веб-сервісів, що спрощує інтеграцію в Індустрію 4.0 та до Інтернет речей. Окрім простежуваних відміток часу сигналів сенсорів на платі мікроконтролера можна реалізовувати способи опрацювання результатів досліджень, які зможуть забезпечити оцінку непевності вимірювання для кожного поточного вимірюваного значення. Таким чином, основні принципи опрацювання вимірних значень можуть бути інтегровані безпосередньо на розширеному сенсорі з платою мікроконтролера або реалізовані на персональному комп'ютері (ПК), що знаходиться недалеко від сенсора. Паралельно з цим математичні методи аналізу результатів вимірювань повинні бути представленими (поданими) таким чином, щоб їх можна було застосувати в режимі онлайн під час реалізації процедури вимірювань (при збиранні даних). З цією метою використовувані методи опрацювання даних та сигналів повинні бути доповнені способами оцінювання непевностей вимірю-

вань. Важливим для практичного використання є модульна структура реалізації, щоб її можна було гнучко застосувати до багатьох галузей використання.

Крім розширення можливостей обладнання для калібрування, необхідно розробити підходи до аналізу методів попереднього опрацювання сигналів, інтегрованих у сенсор. Як правило, ці методи не будуть відомі калібрувальній лабораторії. Формально знання методів опрацювання сигналів, що використовуються в сенсорі, не є необхідним для виконання калібрування. На практиці, врахування методів опрацювання сигналів під час калібрування можуть призвести до сильних нелінійних ефектів. Наприклад, алгоритм уникнення стрибків сигналу сенсора шляхом згладжування може призвести до нелінійної поведінки сенсора при ударному калібруванні. Таким чином, раніше лінійно-реагуючий сенсор стає нелінійним вимірювальним перетворювачем через використовуване програмне забезпечення, і результат калібрування може більше не відображати реальну поведінку вимірювального перетворювача на практиці. Як результат, методика калібрування має бути переглянута. Однак для цього спочатку потрібно буде провести глибокі фундаментальні дослідження та встановлення затверджених типів методів попереднього опрацювання сигналів. Необхідно переконатися, що методи та алгоритми, інтегровані у засіб вимірювання, не можуть призвести до неправильного оцінювання метрологічної справності та точності в результаті калібрування. Просте розкриття алгоритмів, ймовірно, недостатньо для цієї мети, оскільки складність відповідних процедур швидко зростає. Зокрема, якщо методи машинного навчання мають бути інтегровані у засоби вимірювання, звичайний аналіз алгоритму, не дасть надійних тверджень щодо оцінки непевності результату калібрування. Однак без правильного калібрування з оціненою непевністю, результат вимірювання не буде простежуватися до одиниць SI. В якості альтернативи, можуть бути розроблені цільові підходи, які реалізують визнані методи оцінювання результатів вимірювань, включаючи оцінку непевності вимірювань безпосередньо біля сенсора. Це дасть змогу створювати інтелектуальні засоби вимірювання (ЗВ), що мають простежуваність величин до одиниць SI, досягнуту калібруванням, з інтелектуальним попереднім опрацюванням результатів у ЗВ. Це означає, наприклад, що результати калібрування також реалізуються безпосередньо у ЗВ у вигляді способів компенсації динамічних ефектів сенсора. Результатом такого поєднання може стати принцип "розумної простежуваності". Таким чином, виробники можуть задовільнити бажання клієнтів у інтелектуальних сенсорах, і в той же час застосування способів опрацювання результатів вимірювань, визнаних у метрології, може бути спрощене. При цьому можна використовувати новітні розробки, наприклад, такі як сертифікат цифрового калібрування (DCC) [31].

Ще однією задачею при застосуванні принципів метрології в Індустрії 4.0 є необхідність реалізації економічно ефективного простежуваного калібрування сенсорів MEMS для приписування надійних значень непевностей вимірювань на виході сенсорів. Сенсори MEMS дуже економічні і можуть бути легко інтегровані в існуючі вимірювальні системи у великих кількостях. Принцип "великий, але поганий (big but bad)" спрямований на використання багатьох вимірювальних приладів для компенсації поганих (незадовільних) метрологічних характеристик окремих сенсорів. Зазвичай це ґрунтується на припущенні, що завдяки вмілому використанню інтелектуальних способів оцінювання, шаблони (модель) результатів вимірювань можуть використовуватися так само, як результати вимірювань від окремих еталонних сенсорів. Однак реальна перевірка такої пропозиції, а також встановлення співставлень вимірювань на інших об'єктах можливі лише з урахуванням непевностей вимірювань та простежуваності до одиниць SI. При цьому існуючі методи калібрування зазвичай занадто складні і дорогі для сенсорів MEMS. Тому одним із підходів є впровадження методів пакетного калібрування, де кілька сенсорів калібруються одночасно для економії часу та грошей. Такі процедури вже регулярно використовуються під час кінцевої перевірки працездатності сенсорів MEMS та при їх автоматизованому тестуванні. Для цього використовуються калібровані еталонні сенсори, які встановлюються на об'єкті. Тоді сенсори, які потрібно контролювати можуть бути відкалібровані безпосередньо на об'єкті на основі запропонованої вище концепції використання спеціалізованого мікроконтролера із сенсорами MEMS та сигналу GPS (див. рис. 1). Таким чином, за допомогою математично-статистичних методів усі змонтовані сенсори MEMS можуть бути відкалібровані одночасно. Така процедура називається калібруванням в один дотик.

Індустрія 4.0 також характеризується широким використанням цифрових сенсорів і їх мереж, які забезпечують потік даних для цілей автоматичного моніторингу, прогнозування і контролю. В даному контексті часто згадуються ключові слова: «профілактичне обслуговування» або «моніторинг стану». Використання таких методів для профілактичного обслуговування не є новим і вже давно практикується в різних підходах. Однак в Індустрії 4.0 такі концепції швидко розвиваються, поєднуючи більш складні математично-статистичні методи або використовуючи великі розподілені сенсорні мережі [8].

Методи оцінювання результатів вимірювань і представлення непевностей вимірювань, які застосовуються сьогодні в стандарті [32], були розроблені в той час, коли розвиток Індустрії 4.0 ще не був очікуваним. Керівництво по вираженню непевності у вимірюваннях (GUM) [33] і його доповнення - Додаток 1 [34] і Додаток 2 [35], можуть застосовуватись до сенсорних мереж і технології інтелектуальних засобів вимірювань. Однак не вистачає практичних прикладів і інструкцій щодо їх застосування саме для

сенсорних мереж. Тому потрібно розширювати існуючі методи для опрацювання непевностей вимірювань в сенсорних мережах, наприклад, для вирішення проблем мережевого зв'язку, з огляду на конкретні вимоги, такі як специфічні властивості окремих сенсорів і аналіз даних в режимі реального часу для прийняття рішень. З цією метою методи оцінювання окремих сенсорів об'єднуються в мережі для агрегованих або розподілених вимірювань. Використовуючи надлишкову інформацію в мережі, можна застосовувати нові концепції, такі як спільне онлайн калібрування сенсорів і екстраполяція інформації щодо результатів калібрування від одних сенсорів до інших аналогічних сенсорів. Але не всі ці аспекти зазвичай можуть виникати в конкретній сенсорній мережі одночасно. Проте, разом методи утворюють комплексний набір інструментів для опрацювання непевностей вимірювань в сенсорних мережах. Це означає, що на практиці має бути забезпечено ефективне використання комбінації окремих методів (підходів) в залежності від їх застосування. Тому необхідно об'єднувати усі можливі методи опрацювання в математичні структури. Математична структура - це більше, ніж просто набір математичних методів та програмного забезпечення, вона забезпечує послідовний підхід до вирішення проблем, що відносяться до конкретних об'єктів актуальних для промислових сенсорних мереж або наукової галузі.

Гнучке використання розроблених підходів (методів) на практиці дуже корисно для ефективного їх застосування. Тому для Індустрії 4.0 необхідно розробляти так звану багатоагентну систему, в якій кожен сенсор представлений програмним модулем, що називається «Сенсорним агентом» [36]. Такий модуль містить всю необхідну інформацію про сенсор, а також його конкретні способи опрацювання і властивості для оцінювання результатів вимірювань (рис. 2). Наприклад, відкалібрований п'єзоелектричний сенсор може бути представлений сенсорним агентом (програмним модулем), який містить повні калібрувальні дані, а також методи розрахунку вимірюваного значення (в даному випадку віброприскорення) і пов'язаної з ним непевності в будь-який момент часу. Цей розрахунок може також включати більш складні методи, такі як фільтрація або деконволюції [23].

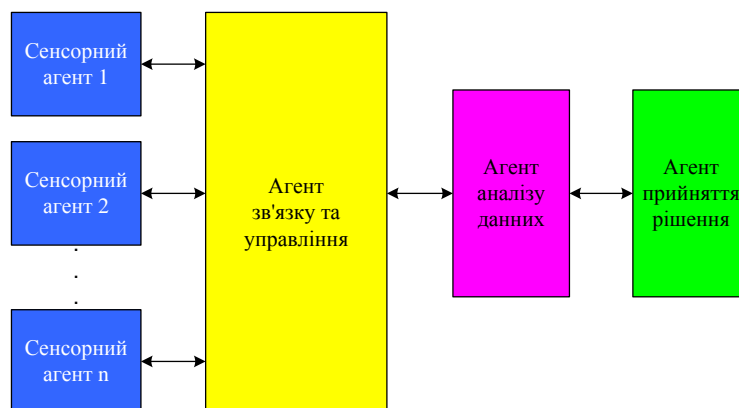


Рисунок 2 – Структура мультиагентної системи оцінювання результатів вимірювань, що відображає головну ідею Індустрії 4.0

Передача даних від сенсора здійснюється так званим «Агентом зв'язку та управління» (рис. 2). Цей агент передає дані від сенсорних агентів та забезпечує інтерфейс між сенсорною мережею (представленою сукупністю «Сенсорних агентів»). «Агент аналізу даних» вміщує вищезгадані методи опрацювання, що використовують інформацію отриману від «Агента зв'язку та управління». Крім того, «Агент аналізу даних» може використовуватися для класифікації, розпізнавання образів або інших завдань на основі агрегованих даних. І на кінець, «Агент прийняття рішення» повідомляє висновок, який автоматично формується на основі результатів аналізу даних (рис. 2). Така гнучка структура для оцінювання результатів вимірювань відображає основну ідею метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0 для гнучких і в значній мірі автономних сенсорних мереж. Такий тип реалізації концепції метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0 також дозволяє переналаштувати топологію мережі під час її роботи.

Висновки

Виробництво майбутнього відповідно до концепції Індустрії 4.0 багато в чому базується на мережевій сенсорній технології та інтелектуальних методах оцінювання. Тому концепції, процедури та стандарти для метрології в гетерогенних сенсорних мережах необхідні для відповідної метрологічної інфраструктури. Необхідно враховувати весь життєвий цикл даних - від вимірювального приладу до прийняття рішення, заснованого на цих даних.

Простежуване калібрування інтелектуальних засобів вимірювання є основою для кожного точного вимірювання, саме тому результати вимірювань будуть надійними і їх можна буде порівнювати та відт-

ворювати. Розвиток основних метрологічних досліджень в останні десятиліття загалом зосереджувався на підвищенні точності вимірювань, нових вимірюваних величинах та нових принципах вимірювання. Однак, при більшій інтеграції цифрових технологій у засоби вимірювання, швидко зростаючому використанні сенсорних мереж та тенденції до інтегрованої попередньої обробки в так званих "інтелектуальних сенсорах" необхідні абсолютно нові підходи до розробки методик (процедур) калібрування. Наприклад, недорогі сенсори MEMS доступні в надзвичайно великих кількостях і роблять традиційні підходи до калібрування економічно не вигідними; цифрові вихідні сигнали більше не дозволяють розділяти сенсор і попередню обробку для калібрування; вбудовані системи значно ускладнюють методи попереднього опрацювання результатів вимірювань. У зв'язку з цим, на найближче десятиліття відкриваються абсолютно нові галузі досліджень і розробок в метрології. Сенсорна мережа - це не лише просторово розподілена система, а загалом мережа з декількох сенсорних елементів. Наприклад, це може бути єдиний інтелектуальний сенсор, який визначає параметри навколишнього середовища за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Синтез інформації з декількох джерел не є рідкістю та існують відповідні процедури їх опрацювання. При цьому розгляд непевності вимірювання зазвичай не відповідає принципам метрології [33], але переслідує такі стратегії, як надійний контроль чи оцінка, як, наприклад, у [6, 28, 29, 37]. Поєднання таких розробок з принципами GUM та його методологією вимагає фундаментальних досліджень орієнтованих на застосування додатків керівництва GUM [34, 35], але для цього потрібні гнучкі програмні рішення. Це означає зміну парадигми для більшості метрологічних науково-дослідних інститутів.

Список літератури

- [1] W. Bauer, B. Dworschak, H. Zaiser, «Weiterbildung und Kompetenzentwicklung für die Industrie 4.0», *Handbuch Industrie 4.0*, Bd.1, pp. 125-138, 2017.
- [2] О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко, *Актуальні проблеми метрологічного забезпечення: [навчальний посібник]*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010, 214 с.
- [3] D. Spath, B. Dworschak, H. Zaiser, D. Kremer, «Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0», *Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*, pp. 113-124, 2015.
- [4] О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, С. Т. Володарський, *Непевність результатів вимірювань, контролю та випробувань: [підручник]*. Херсон, Україна: «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020, 352 с.
- [5] H. Minssen, «Industrie 4.0», *Fortsetzung folgt*. Springer VS, Wiesbaden, pp. 117-135, 2017.
- [6] В. О. Поджаренко, В. М. Дідич, О. М. Васілевський, «Оцінка вірогідності автоматизованого контролю складових елементів гумусу в ґрунті», *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Автоматика, вимірювання та керування»*, № 639, с. 51-54, 2009.
- [7] B. Dworschak, H. Zaiser, «Kompetenzentwicklung in und für die Industrie 4.0 - ein Konzept», *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, 44, pp. 261-278, 2017.
- [8] A. Schütze, N. Helwig, «Sensorik und Messtechnik für die Industrie 4.0», *Technisches Messen*, № 84 (5), pp. 310-319, 2017.
- [9] V. Wilkens, C. Koch, «Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference», *JASA*, 115 (6), pp. 2892-12, 2004.
- [10] O. Vasilevskyi, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prysyzhnyuk, W. Wójcik, D. Baitussupov, «A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices», *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 2018, 108082E.
- [11] L. Windelband, «Work requirements and qualifications in maintenance 4.0», *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 89-102, 2017.
- [12] O. M. Vasilevskyi, P. I. Kulakov, K. V. Ovchynnykov, V. M. Didych, «Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 8, Article Number 25, 2017.
- [13] A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns, C. Elster, «Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation», *Meas. Sc. Technol.*, 17 (7), 1888, 2006.
- [14] C. Elster, A. Link, «Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system», *Metrologia*, 45 (4), pp. 464-473, 2008.
- [15] O. M. Vasilevskyi, V. M. Didych, «The method of expressing the uncertainty of dynamic measurements», *Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph*. Riga, Latvia: Izdevniecība «Baltija Publishing», 2020, pp. 63-83.
- [16] P. Hale, A. Dienstfrey, J. Wang, D. Williams, A. Lewandowski, D. Keenan, T. Clement, «Traceable Waveform Calibration With a Covariance-Based Uncertainty Analysis», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58(10), pp. 3554-3568, 2009.
- [17] O. M. Vasilevskyi, P. I. Kulakov, I. A. Dudatiev, V. M. Didych, A. Kotyra, B. Suleimenov, A. Assembay, A. Kozbekova, «Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical

- motors mechanical parameters», *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 2017, 104456C.
- [18] P. Ittermann, J. Niehaus, «Industrie 4.0 und wandel von Industriearbeit–revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 33-60, 2018.
- [19] O. M. Vasilevskyi, «Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy», *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, pp. 52–56, 2012.
- [20] V. O. Podzharenko, O. M. Vasilevskyi, «Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement», *Proceedings of Donetsk National Technical University*, 88, pp. 138–144, 2005.
- [21] M. Kobusch, S. Eichstädt, «A case study in model-based dynamic calibration of small strain gauge force transducers», *АСТА ІМЕКО*, vol. 6(1), pp. 3-12, 2017.
- [22] O. M. Васілевський, «Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (7), с. 147-151, 2006.
- [23] A. Link, C. Elster, «Uncertainty evaluation for IIR (infinite impulse response) filtering using a state-space approach», *Meas. Sci. Technol.*, 20 (5), pp. 055104-6, 2009.
- [24] O. M. Васілевський, «Методика визначення міжповірного інтервалу засобів вимірювання на основі концепції невизначеності», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 81-88, 2014.
- [25] L. Windelband, B. Dworschak, «Arbeit und Kompetenzen in der Industrie 4.0. Anwendungsszenarien Instandhaltung und Leichtbaurobotik», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 61-80, 2018.
- [26] O. M. Васілевський, «Оцінка невизначеності вихідних сигналів засобів вимірювальної техніки в динамічних режимах роботи», *Системи обробки інформації*, № 4 (85), с. 81-84, 2010.
- [27] S. Eichstädt, V. Wilkens, «GUM2DFT - a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain», *Meas. Sci. Technol.*, 27(5), 055001, 2016.
- [28] O. M. Васілевський, «Нормування показників метрологічної надійності», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 9-13, 2011.
- [29] O. M. Васілевський, П. І. Кулаков, *Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 176 с.
- [30] П. М. Сопрунок, А. Н. Василевский, Ю. А. Чабанюк, «Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей», *Системи обробки інформації*, №7 (56), с. 72-75, 2006.
- [31] S. Hackel, F. Härtig, J. Hornig, T. Wiedenhöfer, «The Digital Calibration Certificate», *PTB – Mitteilungen*, 127 (4), pp. 75-81, 2017.
- [32] Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995): ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. – ISO, Switzerland, 2008, 120 p.
- [33] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008. – Sevres : JCGM, 2008, 120 p.
- [34] Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101:2008. – Sevres: JCGM, 2008, 82 p.
- [35] Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Extension to any number of output quantities : JCGM 102:2011. – Sevres: JCGM, 2011, 72 p.
- [36] B. Young, A. Brintrup, «Multi Agent System for Machine Learning Under Uncertainty in Cyber Physical Manufacturing System», in *Proc. of 9th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Spain, 2019, pp. 236-239.
- [37] Y. Xia, J. Han, «Robust Kalman filtering for systems under norm bounded uncertainties in all system matrices and error covariance constraints», *J. System Sci. and Complexity*, 18 (4), pp. 439-444, 2005.
- Стаття надійшла: 19.06.2020.

References

- [1] W. Bauer, B. Dworschak, H. Zaiser, «Weiterbildung und Kompetenzentwicklung für die Industrie 4.0», *Handbuch Industrie 4.0*, Bd.1, pp. 125-138, 2017.
- [2] O. M. Vasilevskyi, V. O. Podzharenko, *Aktualni problemy metrolohichnoho zabezpechennia: [navchalnyi posibnyk]*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2010, 214 s.
- [3] D. Spath, B. Dworschak, H. Zaiser, D. Kremer, «Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0», *Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*, pp. 113-124, 2015.
- [4] O. M. Vasilevskyi, V. Yu. Kucheruk, Ye. T. Volodarskyi, *Nepevnist rezultativ vymiriuvan, kontroliu ta vyprobuvan: [pidruchnyk]*. Kherson, Ukraina: «OLDI-PLIUS», 2020, 352 s.

- [5] H. Minssen, «Industrie 4.0», *Fortsetzung folgt*. Springer VS, Wiesbaden, pp. 117-135, 2017.
- [6] V. O. Podzharenko, V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy, «Otsinka virohidnosti avtomatyzovanoho kontroliu skladovykh elementiv humusu v grunti», *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Seriya: «Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia», № 639, s. 51-54, 2009.
- [7] B. Dworschak, H. Zaiser, «Kompetenzentwicklung in und für die Industrie 4.0 – ein Konzept», *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, 44, pp. 261-278, 2017.
- [8] A. Schütze, N. Helwig, «Sensorik und Messtechnik für die Industrie 4.0», *Technisches Messen*, № 84 (5), pp. 310-319, 2017.
- [9] V. Wilkens, C. Koch, «Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference», *JASA*, 115 (6), pp. 2892-12, 2004.
- [10] O. Vasilevskiy, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prisyazhnyuk, W. Wójcik, D. Baitussupov, «A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices», *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 2018, 108082E.
- [11] L. Windelband, «Work requirements and qualifications in maintenance 4.0», *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 89-102, 2017.
- [12] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, K. V. Ovchynnykov, V. M. Didych, «Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 8, Article Number 25, 2017.
- [13] A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns, C. Elster, «Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation», *Meas. Sc. Technol.*, 17 (7), 1888, 2006.
- [14] C. Elster, A. Link, «Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system», *Metrologia*, 45 (4), pp. 464-473, 2008.
- [15] O. M. Vasilevskiy, V. M. Didych, «The method of expressing the uncertainty of dynamic measurements», *Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph*. Riga, Latvia: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2020, pp. 63-83.
- [16] P. Hale, A. Dienstfrey, J. Wang, D. Williams, A. Lewandowski, D. Keenan, T. Clement, «Traceable Waveform Calibration With a Covariance-Based Uncertainty Analysis», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58(10), pp. 3554-3568, 2009.
- [17] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, I. A. Dudatiev, V. M. Didych, A. Kotyra, B. Suleimenov, A. Assembay, A. Kozbekova, «Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical motors mechanical parameters», *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 2017, 104456C.
- [18] P. Ittermann, J. Niehaus, «Industrie 4.0 und wandel von Industriearbeit – revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 33-60, 2018.
- [19] O. M. Vasilevskiy, «Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy», *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, pp. 52-56, 2012.
- [20] V. O. Podzharenko, O. M. Vasilevskiy, «Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement», *Proceedings of Donetsk National Technical University*, 88, pp. 138-144, 2005.
- [21] M. Kobusch, S. Eichstädt, «A case study in model-based dynamic calibration of small strain gauge force transducers», *ACTA IMEKO*, vol. 6(1), pp. 3-12, 2017.
- [22] O. M. Vasilevskiy, «Alhorytm otsiniuvannia nevyznachenosti u vymiriuvanniakh pry vykonanni metrolohichnykh robot», *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, № 3 (7), s. 147-151, 2006.
- [23] A. Link, C. Elster, «Uncertainty evaluation for IIR (infinite impulse response) filtering using a state-space approach», *Meas. Sci. Technol.*, 20 (5), pp. 055104-6, 2009.
- [24] O. M. Vasilevskiy, «Metodyka vyznachennia mizhpovirochnoho intervalu zasobiv vymiriuvannia na osnovi kontseptsii nevyznachenosti», *Tekhnichna elektrodynamika*, № 6, s. 81-88, 2014.
- [25] L. Windelband, B. Dworschak, «Arbeit und Kompetenzen in der Industrie 4.0. Anwendungsszenarien Instandhaltung und Leichtbaurobotik», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 61-80, 2018.
- [26] O. M. Vasilevskiy, «Otsinka nevyznachenosti vykhidnykh syhnaliv zasobiv vymiriuvanoi tekhniki v dynamichnykh rezhymakh roboty», *Systemy obrobky informatsii*, № 4 (85), s. 81-84, 2010.
- [27] S. Eichstädt, V. Wilkens, «GUM2DFT - a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain», *Meas. Sci. Technol.*, 27(5), 055001, 2016.
- [28] O. M. Vasilevskiy, «Normuvannia pokaznykiv metrolohichnoi nadiinosti», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, № 4, s. 9-13, 2011.
- [29] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, *Elementy teorii pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia ta synkhronizatsii kutovykh shvydkostei rotoriv vzaïmozv'iazanykh elektromotoriv: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2011, 176 s.

- [30] P. M. Sopruniuk, A. N. Vasylevskyi, Yu. A. Chabaniuk, «Neopredelennost rezultatov yzmereniya pry kontrole asynkhronnosti vrashcheniya elektromekhanicheskikh preobrazovatelei», *Systemy obrobky informatsii*, №7 (56), s. 72-75, 2006.
- [31] S. Hackel, F. Härtig, J. Hornig, T. Wiedenhöfer, «The Digital Calibration Certificate», *PTB – Mitteilungen*, 127 (4), pp. 75-81, 2017.
- [32] Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995): ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. – ISO, Switzerland, 2008, 120 p.
- [33] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008. – Sevres : JCGM, 2008, 120 p.
- [34] Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101:2008. – Sevres: JCGM, 2008, 82 p.
- [35] Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Extension to any number of output quantities : JCGM 102:2011. – Sevres: JCGM, 2011, 72 p.
- [36] B. Young, A. Brintrup, «Multi Agent System for Machine Learning Under Uncertainty in Cyber Physical Manufacturing System», in *Proc. of 9th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Spain, 2019, pp. 236-239.
- [37] Y. Xia, J. Han, «Robust Kalman filtering for systems under norm bounded uncertainties in all system matrices and error covariance constraints», *J. System Sci. and Complexity*, 18 (4), pp. 439-444, 2005.

Відомості про авторів

Васілевський Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, Перший проректор з науково-педагогічної роботи з організації навчального процесу та його науково-методичного забезпечення Вінницького національного технічного університету.

А. Н. Василевский

**КОНЦЕПЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В
ИНДУСТРИИ 4.0**

Винницкий национальный технический университет, Винница

О. М. Vasilevskyi

**THE CONCEPT OF METROLOGICAL EQUIPMENT IN
INDUSTRY 4.0**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsya

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ І КОМПОНЕНТИ

УДК 681.325.5

О. Д. Азаров, О. І. Черняк

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ АЦП ПОРОЗРЯДНО-СЛІДКУВАЛЬНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті подано інформаційні і структурні аспекти, покладені в основу організації аналого-цифрового перетворювача, що працює у режимах як слідкувального, так і порозрядного врівноваження. При організації багатоканального слідкувального врівноваження під час перемикавання каналів можуть відбуватись значні перепади вхідного сигналу. Тому у таких випадках для пришвидшення виходу АЦП на слідкувальний режим авторами пропонується тимчасово переводити його у режим порозрядного аналого-цифрового перетворення. Для пришвидшення перетворення у слідкувальному режимі використовується запропонований авторами швидкодіючий реверсивний лічильник у системі числення з ваговою надлишковістю. АЦП також працює у цій системі числення. Наведено часову діаграму режимів роботи багатоканального порозрядно-слідкувального АЦП у СЧВН. Описано структурну організацію даного перетворювача. Розроблено і наведено блок-схему вироблення блоком-керування керуючих сигналів для роботи запропонованого АЦП. Використання запропонованого авторами рішення дозволить розширити сферу застосування слідкувальних АЦП.

Ключові слова: багатоканальне аналого-цифрове перетворення, слідкувальне аналого-цифрове перетворення, системи числення з ваговою надлишковістю, швидкодіючий лічильник.

Аннотация. В статье представлены информационные и структурные аспекты, положенные в основу организации аналого-цифрового преобразователя, работающего в режимах как следящего, так и поразрядного уравнивания. При организации многоканального следящего уравнивания во время переключения каналов могут происходить значительные перепады входного сигнала. Поэтому в таких случаях для ускорения выхода АЦП на следящий режим предлагается временно переводить его в режим поразрядного аналого-цифрового преобразования. Для ускорения преобразования в следящем режиме используется предложенный авторами быстродействующий реверсивный счетчик в системе числения с весовой избыточностью. АЦП также работает в этой системе числения. Приведена временная диаграмма режимов работы многоканального поразрядно-следящего АЦП в СЧВН. Описана структурная организация данного преобразователя. Разработана и приведена блок-схема выработки блоком-управления управляющих сигналов для работы предложенного АЦП. Использование предложенного авторами решения позволит расширить сферу применения следящих АЦП.

Ключевые слова: многоканальное аналого-цифровое преобразование, следящее аналого-цифровое преобразование, системы числения с весовой избыточностью, быстродействующий счетчик.

Abstract. The article presents the informational and structural aspects underlying the organization of an analog-to-digital converter operating in both tracking and bitwise balancing modes. When organizing multi-channel tracking balancing during channel switching, significant differences in the input signal can occur. Therefore, in such cases, in order to accelerate the ADC output to the tracking mode, it is proposed by the authors to temporarily transfer it to the bitwise analog-to-digital conversion mode. To speed up the conversion in the tracking mode, the authors use the high-speed reverse counter in the number system with weight redundancy proposed by the authors. The time diagram of the operation modes of a multi-channel bitwise-tracking ADC in the SCHVN is given. The structural organization of this converter is described. A block diagram of the development of the control unit for the control signals for the operation of the proposed ADC is developed and presented. Using the solution proposed by the authors will expand the scope of the tracking ADCs.

Key words: multichannel analog-to-digital conversion, tracking analog-to-digital conversion, number systems with weight redundancy, high-speed counter.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-45-51>.

Вступ

АЦП використовуються в інформаційно-вимірювальних системах та системах обробки аналогових і цифрових сигналів. Найбільш розповсюдженими є АЦП порозрядного кодування, які традиційно побудовані на основі відомої двійкової системи числення [1]. Підвищення продуктивності таких АЦП потребує вирішення проблеми динамічних похибок [2]. Як один з відомих підходів до їх компенсації, запропоновано ряд рішень на основі системи числення з ваговою надлишковістю [1-5]. Важливою складовою даних похибок є динамічна похибка другого роду, що виникає за рахунок зміни аналогового сигналу під час його перетворення. Суть її полягає у тому, що для точного АЦ перетворення необхідно, щоб за час отримання одного відліку аналоговий сигнал змінювався на значення менше ніж вага молодшого розряду. Вводячи вагову надлишковість, можна ефективно компенсувати динамічну похибку другого роду порозрядного АЦП [6]. Це дозволяє істотно (на порядок) підвищити його швидкодію у порівнянні з АЦП на основі двійкової системи числення, а також значно прискорити врівноваження наростаючого чи спадаючого лінійного або експоненціального вхідного сигналу. Проте, в даному випадку все одно для отримання одного цифрового значення у n-розрядному АЦП послідовного типу потрібно n тактів врівноваження, протягом яких аналоговий сигнал не повинен суттєво змінюватись. Це накладає обмеження на частотний діапазон аналогового сигналу.

Слідкувальні АЦП використовуються при слідкувальному кодуванні аналогового сигналу, який має

незначні зміни протягом одного такту врівноваження [1]. Організація слідкувального врівноваження при аналого-цифровому перетворенні можлива лише для тих аналогових сигналів для яких виконується співвідношення

$$|A(t + \Delta t) - A(t)| < U_{\text{оп}} \cdot w^{-(n-2)}, \quad (1)$$

де $A(t)$ – значення аналогового сигналу на вході АЦП у момент часу t ;

Δt – час, витрачений на АЦ-перетворення;

n – розрядність АЦП;

w – основа системи числення;

$U_{\text{оп}}$ – опорна напруга, значення якої дорівнює величині старшого розряду $U_{\text{оп}} = w^{n-1}$.

При виконанні даного співвідношення після перетворення аналогового сигналу $A(t + \Delta t)$ на виході АЦП утворюється код $K(t + \Delta t)$, значення якого можна обчислити через значення коду $K(t)$ відповідно до виразу

$$K(t + \Delta t) = \begin{cases} K(t) \text{ при } |A(t + \Delta t) - A(t)| < U_{\text{оп}} \cdot w^{-(n-1)}; \\ K(t) + 1 \text{ при } A(t + \Delta t) - A(t) \geq U_{\text{оп}} \cdot w^{-(n-1)}; \\ K(t) - 1 \text{ при } A(t + \Delta t) - A(t) \leq -U_{\text{оп}} \cdot w^{-(n-1)}. \end{cases}$$

Це дозволяє отримувати новий код шляхом віднімання або додавання одиниці до попереднього коду. Такий спосіб перетворення реалізовано в АЦП слідкувального типу, в яких замість регістра послідовного наближення використовується лічильник.

Перевагою даних АЦП є значно більш висока швидкодія перетворення через те, що замість n тактів врівноваження, що потребує порозрядний АЦП, тут достатньо лише одного такту додавання або віднімання одиниці у лічильнику. Оскільки зміна вхідного аналогового сигналу протягом часу Δt є незначною, то швидкість його врівноваження в слідкувальному АЦП буде вищою, ніж швидкість лічильника, яка обмежується часом розповсюдження перенесення у ньому. Тому для підвищення швидкодії такого АЦП доцільно використовувати швидкодіючі лічильники. Зменшення часу перенесення у лічильнику АЦП дозволяє зменшити час перетворення Δt , протягом якого повинно виконуватись обмеження на швидкість зміни аналогового сигналу (1). Це, у свою чергу, приводить до збільшення діапазону сигналів, для яких можливе слідкувальне АЦ-перетворення. Існує багато прикладень слідкувального АЦ-перетворення в одноканальних АЦП для тих сигналів, швидкість зміни яких є не дуже високою і відповідає співвідношенню (1).

Актуальність

При багатоканальному АЦ-перетворенні відбувається послідовне або вибіркоче перемикання каналів, вхідні аналогові сигнали яких, у загальному випадку, не корельовані між собою. Позначимо вхідний аналоговий сигнал i -го каналу у момент часу t через $A_i(t)$. Тоді при перемиканні АЦП на наступний канал співвідношення (1), що дозволяє використовувати слідкувальне врівноваження, матиме вид

$$A_{i+1}(t+\Delta t) - A_i(t) < U_{\text{оп}} \cdot w^{-(n-2)}.$$

Очевидно, що у загальному випадку таке співвідношення не виконується. Отже, при багатоканальному АЦ-перетворенні не можна використовувати відомі АЦП слідкувального типу.

У попередніх публікаціях авторів описані теоретичні положення побудови та численні практичні реалізації високоефективних порозрядних АЦП у системах числення з ваговою надлишковістю (СЧВН) [2-7]. Крім того, авторами запропоновано принципи, методи і структурну реалізацію виконання арифметичних операцій у даних системах числення [8-16]. На основі запропонованого підходу розроблено методи швидкої лічби у СЧВН та створено ряд швидкодіючих лічильників у цих системах числення, що можуть використовуватись в АЦП слідкувального типу [17-18]. Це створює передумови для організації комбінованого порозрядно-слідкувального АЦ-перетворення у СЧВН при проектуванні багатоканальних АЦП. Як приклад, структурна організація багатоканального порозрядно-слідкувального АЦП може бути запропонована у системі числення на основі 1-послідовності Фібоначчі.

Мета

Метою даної розробки є підвищення швидкості перетворення багатоканального слідкувального АЦП у СЧВН за рахунок організації переходу до режиму порозрядного перетворення при перемиканні каналів.

Задачі

1. Розробити метод багатоканального порозрядно-слідкувального АЦ-перетворення і розглянути його особливості.
2. Розробити структурну організацію запропонованого АЦП.
3. Розробити алгоритм роботи блока керування для забезпечення перемикання між режимами порозрядного і слідкувального врівноваження.

Розв'язання задач

Запропонований авторами метод багатоканального порозрядно-слідкувального АЦ-перетворення базується на використанні систем числення з ваговою надлишковістю як при перетворенні аналогових, так і при обробці цифрових сигналів. Суть запропонованого методу полягає у тому, що у процесі АЦ-перетворення при перемиканні каналів встановлюється режим порозрядного врівноваження, а у процесі перетворення одного вибраного каналу виконується слідкувальний режим з використанням швидкодіючого лічильника. В залежності від встановленого режиму формується вихідний код $K_{вих}$. У режимі порозрядного врівноваження $K_{вих}=K_p$. У режимі слідкувального врівноваження $K_{вих}=K_l$, як показано на рис. 1.

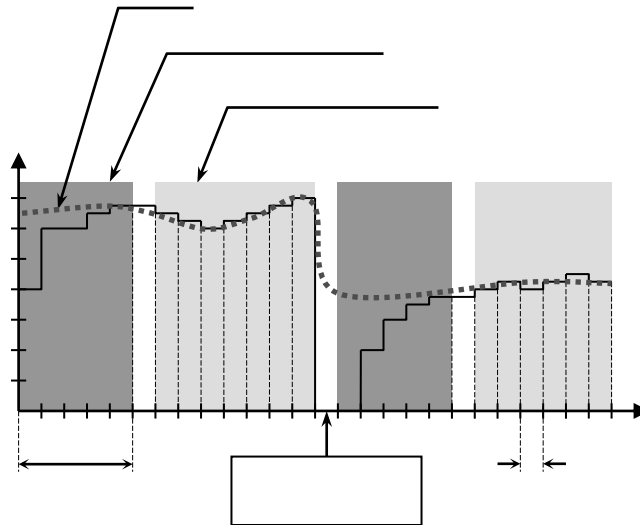


Рисунок 1 – Графік 5-розрядного порозрядно-слідкувального АЦ-перетворення при перемиканні каналів

При переході у слідкувальний режим код регістра послідовного наближення переписується у реверсивний лічильник. Схема структурної організації запропонованого АЦП зображена на рис. 2.

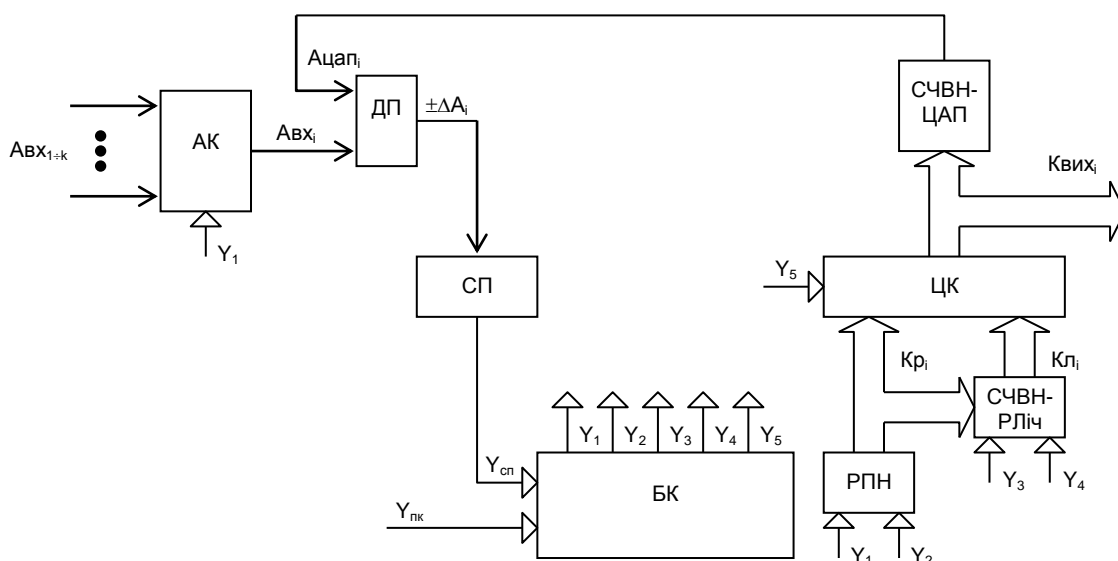


Рисунок 2 – Схема структурної організації багатоканального порозрядно-слідкувального АЦП у СЧВН

Схема містить аналоговий комутатор АК, цифроаналоговий перетворювач у системі числення з ваговою надлишковістю СЧВН-ЦАП, диференційний підсилювач ДП, аналогову схему порівняння СП, блок керування БК, реєстр послідовного наближення РПН, реверсивний лічильник у системі числення з ваговою надлишковістю СЧВН-РЛіч та цифровий комутатор ЦК. Аналоговий комутатор перемикає канали і встановлює на виході аналоговий сигнал Авх. Цифро-аналоговий перетворювач перетворює СЧВН-код з виходу цифрового комутатора у аналоговий сигнал Ацап. Диференційний підсилювач порівнює аналогові сигнали Авх і Ацап і встановлює на виході аналоговий сигнал $\pm\Delta A$. Схема порівняння перетворює цей сигнал у цифровий керуючий сигнал $Y_{сп}$. Блок керування отримує керуючі сигнали $Y_{пк}$ та $Y_{сп}$ і виробляє керуючі сигнали Y_1 - Y_5 . Реєстр послідовного наближення формує СЧВН-код K_p амплітуди аналогового сигналу у режимі порозрядного наближення. Реверсивний лічильник формує СЧВН-код K_l амплітуди аналогового сигналу у слідкувальному режимі. Цифровий комутатор перемикає на свій вихід K_p або K_l і формує вихідний код $K_{вих}$, який подається на вхід СЧВН-ЦАП.

Блок-схема роботи блоку керування представлена на рис. 3.

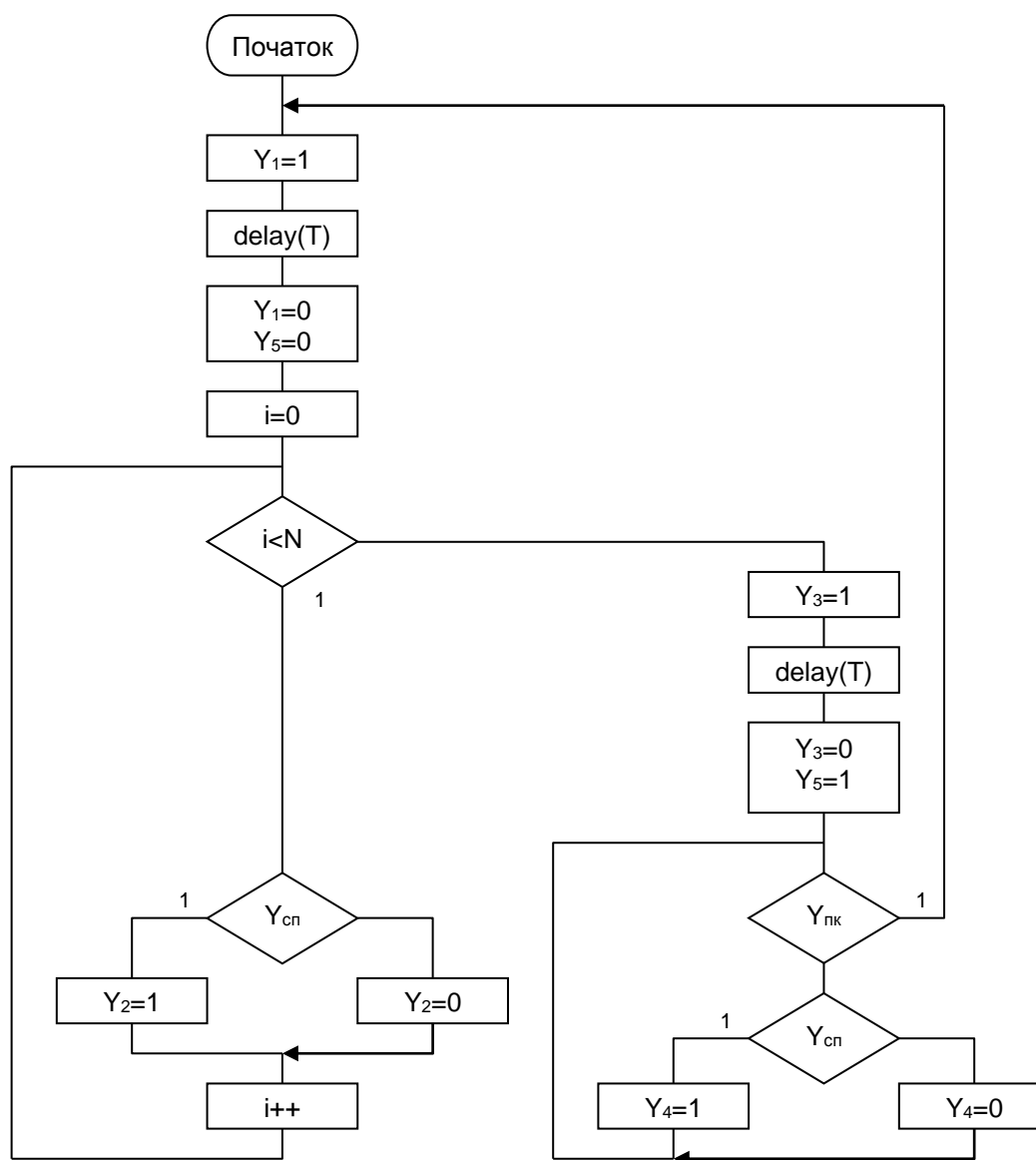


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму генерації керуючих сигналів у БК

Запропонований АЦП Працює таким чином. Для перемикання на заданий канал у блок керування надходить керуючий сигнал $Y_{пк}$. Блок керування генерує керуючі сигнали за алгоритмом, представленим на рисунку 3. Спочатку він генерує короткочасний сигнал Y_1 , який перемикає аналоговий комутатор і занулює реєстр послідовного наближення. Потім генерується керуючий сигнал Y_5 , який переводить цифровий комутатор у режим комутації на вихід коду K_p . Реєстр послідовного наближення, починаючи зі старших розрядів, встановлює їх в 0 або в 1 в залежності від керуючого сигналу Y_2 , який формує блок

керування і який, у свою чергу, залежить від керуючого сигналу $Y_{сп}$. Сигнал $Y_{сп}$ генерує схема порівняння в залежності від аналогового сигналу $\pm\Delta A$ за виразом:

$$Y_{сп} = \begin{cases} 1 \text{ при } \pm \Delta A > 0; \\ 0 \text{ при } \pm \Delta A < 0. \end{cases}$$

Сигнал $\pm\Delta A$ формується на виході диференційний підсилювача за виразом

$$\pm\Delta A_i = A_{вхi} - A_{цапi}.$$

Особливістю даного сигналу є те, що він може мати лише значення $\pm\Delta A > 0$ або $\pm\Delta A < 0$.

Далі під час кодування сигналу одного каналу АЦП переходить у режим слідкувального перетворення. Для цього блок керування тимчасово встановлює керуючий сигнал Y_3 в одиничне значення, що призводить до переписування коду з регістра послідовного наближення у реверсивний лічильник. Крім того, блок керування встановлює керуючий сигнал Y_5 в одиничне значення. Цей сигнал перемикає цифровий комутатор у режим комутації коду з виходу реверсивного лічильника на вхід СЧВН-ЦАП і на вихід самого АЦП, тобто у цьому режимі $K_{вих} = K_{л}$. У разі перемикавання каналів знову відбувається перехід у режим порозрядного врівноваження.

Таким чином, за рахунок наявності порозрядного врівноваження запропонований АЦП набагато швидше буде виходити на режим слідкувального врівноваження. Якщо для виходу на цей режим з використанням лише лічильника потрібно буде приблизно wn тактів (де w – середнє значення співвідношення між вагами сусідніх розрядів СЧВН-системи числення, а n – розрядність АЦП), то введення порозрядного врівноваження дозволяє робити це за n тактів. Крім того, застосування порозрядного АЦП у СЧВН з компенсацією динамічної похибки другого роду дозволить ще на порядок підвищити його швидкодію. Разом з тим, використання швидкодіючого лічильника на основі СЧВН дозволить підвищити швидкість слідкувального врівноваження приблизно в n разів у порівнянні з класичною двійковою системою числення.

Висновки

У статті запропоновано метод побудови багатоканального аналого-цифрового перетворювача у СЧВН, що під час перемикавання каналів тимчасово переходить у режим порозрядного врівноваження, а далі працює у слідкувальному режимі. Для підвищення швидкості перетворення у слідкувальному режимі запропоновано використовувати розроблений авторами швидкодіючий реверсивний СЧВН-лічильник. Надана схема структурної організації запропонованого АЦП та його частин. Розроблено алгоритм роботи блока керування. Представлено блок-схему даного алгоритму. Описано роботу багатоканального порозрядно-слідкувального АЦП в обох режимах перетворення. Використання запропонованого АЦП дозволить розширити діапазон перетворюваних сигналів за рахунок підвищення швидкодії лічильника та значно скоротити час виходу на слідкувальний режим при перемиканні каналів.

Список літератури

- [1] У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем.* М., Россия: ДМК Пресс, 2007, 942 с.
- [2] В. В. Островерхов, *Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей.* Л.: «Энергия», 1975, 176 с.
- [3] О. Д. Азаров, *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2004, 260 с.
- [4] О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю: монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2010, 186 с.
- [5] Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров, *Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2005, 167 с.
- [6] О. Д. Азаров, М. Ю. Шабатура, О. Г. Муращенко, «Динамічні похибки II роду в АЦП прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю», *Наукові праці ВНТУ*, №3, 10 с. 2010.
- [7] О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю: монографія.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010, 232 с.
- [8] А. Д. Азаров, А. И. Черняк, «Полнофункциональная побитовая обработка результатов аналого-цифрового преобразования», у *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: Третя міжнародна наук.-практ. конф.* Вінниця, 2011, с. 208-209.

- [9] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, П. О. Черняк, «Системи числення з адитивними та мультиплікативними співвідношеннями між вагами розрядів», *Вісник ВПІ*, №1, с. 58-64, 2001.
- [10] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Аналіз витрат обладнання пристроїв побітової арифметики у системі числення золоті 1-пропорції», *Проблеми інформатизації та управління*, Київ : НАУ, № 2(38), с. 5-9, 2012.
- [11] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Обмеження адитивних співвідношень при порозрядній потоковій обробці в АМ-системах числення», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Вип. 3(31), с. 67-71, 2014.
- [12] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, О. Г. Муращенко, «Порозрядне додавання в АМ-системах числення на основі адитивних перетворень», *Проблеми інформатизації та управління*, Вип. 1(45), с. 14-21, 2014.
- [13] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Визначення довжини перенесення при додаванні в системах числення з адитивними та мультиплікативними співвідношеннями між вагами розрядів», *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*, Випуск 74, с. 401-407, 2004.
- [14] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Розрядність пристроїв порозрядного додавання в АМ-системах числення», *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 4, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/233>.
- [15] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Структурна організація побітового додавання і віднімання кодів золоті 1-пропорції з урахуванням знаків», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3(22), с. 13-16, 2011.
- [16] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Структурна організація побітового множення і ділення кодів золоті пропорції», *Проблеми інформатизації та управління*, Вип. 3(21), с. 5-13, 2007.
- [17] Olexiy D. Azarov, Sergii V. Pavlov, Olexandr I. Chernyak, Igor D. Ivasyuk, Waldemar Wójcik, and Aigul Syzdykpayeva, «Principles of fast count in modified Fibonacci numerical system», *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018, 1080829 (1 October 2018). doi.org/10.1117/12.2501565.
- [18] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Метод побудови швидкодіючих фібоначчієвих лічильників», *Проблеми інформатизації та управління*, №2(46), с. 5-8, 2014.
- Стаття надійшла: 10.06.2020.

References

- [1] У. Титсе, К. Шенк, *Poluprovodnikovaya shemotekhnika. 12-e izd. Tom II: Per. s nem. M.*, Rossija: DMK Press, 2007, 942 s.
- [2] V. V. Ostroverkhov, *Dinamicheskiye pogreshnosti analogo-tsifrovyykh preobrazovateley*. L.: «Energiya», 1975, 176 s.
- [3] О. Д. Азаров, *Osnovi teoriy analogo-tsifrovogo peretvoreniya na osnove nadliskovikh pozitsivnykh sistem chislennya: monografiya*. Vinnitsya, Ukraina: UNÍVERSUM, 2004, 260 s.
- [4] О. Д. Азаров, *Analogo-tsifrovogo porozryadne peretvoreniye na osnove sistem chislennosti iz vago-voyu nadliskovisty: monografiya*. Vinnitsya, Ukraina: UNÍVERSUM, 2010, 186 s.
- [5] L. V. Krupel'nits'kiy, О. Д. Азаров, *Analogo-tsifrovogo pristroi sistem, samokoriguyut'sya, dlya vimiryuvan' i obroblyannya nizkochastotnykh signalov: monografiya*. Vinnitsya, Ukraina: UNÍVERSUM, 2005. 167 s.
- [6] О. Д. Азаров, М. Ю. Шабатура, О. Г. Мурашченко, «Dinamichni pokhibki II rodu v ATSP priskorenogo porozryadnogo nablizhennya s vago-voyu nadliskovisty», *Naukovі pratsі VNTU*, №3, 10s., 2010.
- [7] О. Д. Азаров, *Analogo-tsifrovogo porozryadne peretvoreniye na osnove sistem chislennosti vago-voyu nadliskovisty: monografiya*. Vinnitsya, Ukraina: VNTU, 2010. 232 s.
- [8] А. Д. Азаров, А. І. Черняк, «Polnofunktsional'naya pobitovaya obrabotka rezul'tatov analogo-tsifrovogo preobrazovaniya», u *Metodi ta zasobi koduvannya, zakhistu © ushchil'nennya informatsii: Tretya mizhnarodna nauk.-prakt. konf.* Vinnitsya, 2011, s. 208-209.
- [9] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, П. О. Черняк, «Sistemi chislennost' s aditivnymi i mul'tiplikativnymi spivvidnoshenniyami mizh vagami roz-ryadiv», *Visnik VPI*, №1, s. 58-64, 2001.
- [10] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Analiz vitrat obladnannya pristroiv pobitovoy arifmetiki u sistemі chislennost' zolota 1-proporsii», *Problemi informatizatsii i upravlinnya*, Київ: NAU, № 2 (38), s. 5-9, 2012.
- [11] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Obmezheniya aditivnykh spivvidnoshen' pri porozryadnii potokovii obrobtsi v AM-sisteme chislennya», *Informatsiyni tekhnologii ta komp'yuterna inzhene-riya*, Vip. 3 (31), s. 67-71, 2014.

- [12] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, O. G. Murashchenko, «Porozryadne dodavannya v AM-sisteme chislennya na osnovi aditivnykh peretvo-ren'», *Problemi informatizatsiï i upravlinnya*, Vip. 1 (45), s. 14-21, 2014.
- [13] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, «Viznachennya dovhiniyennya perenesennykh v systemy nomerov s adi-tivnimi i mul'tiplikativnymi spivvidnoshennymi mezhdz vagami rozryadiv», *Naukoví pratsí Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Obchislyval'naya tekhnika i avtomatizatsiya*, Vipusk 74, s. 401-407, 2004.
- [14] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, «Rozryadnist' pristroiv porozryadnogo dodavannya v AM-sisteme», *Naukoví pratsí Vinnits'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu*, № 4, 2010. [Yelektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/233>.
- [15] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, «Strukturna organizatsiya pobitovogo dodavaniya i otbory kodov zolota 1-proporsii s urakhuvannyam znakov», *Informatsiyni tekhnologii ta komp'yuterna inzheneriya*, № 3 (22), s. 13-16, 2011.
- [16] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, «Strukturna organizatsiya pobitovogo mnozhennya i dilennya kodiv zolotoi proporsii», *Problemi informatizatsiï i upravlinnya*, Vip. 3 (21), s. 5-13, 2007.
- [17] Olexiy D. Azarov, Sergii V. Pavlov, Olexandr I. Chernyak, Igor D. Ivasyuk, Waldemar Wójcik, and Aigul Syzdykpayeva, "Principles of fast count in modified Fibonacci numerical system", *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018, 1080829 (1 October 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501565>.
- [18] O. D. Azarov, O. Í. Chernyak, «Metod pobudovi shvidkodyuchikh fibonachchiêvikh lichil'nikiv», *Problemi informatizatsiï i upravlinnya*, №2 (46), s. 5-8, 2014.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

Черняк Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

А. Д. Азаров, А. И. Черняк

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АЦП ПОРОЗРЯДНО-СЛЕДЯЩЕГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ С ВЕСОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Винницкий национальный технический университет, Винница

O. D. Azarov, O. I. Chernyak

MULTICHANEL TRACKING AND BITWISE BALANCING ADC WITH WEIGHT REDUNDANCY

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 004.658 + 652.3

М. Т. Фісун, М. Л. Дворецький, С. В. Дворецька

**ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ
БАЗИ ДАНИХ ВУЗЛА У КОРПОРАТИВНИХ
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Чорноморський національний університет ім. П. Могили, Миколаїв

Анотація. Обґрунтовано актуальність роботи, яка визначається тенденцією переходу від локальних до розподілених баз даних та недоліками використання "універсальних" облікових систем. Аргументовано важливість питання правильного розподілення даних між вузлами розподілених та територіально розосереджених комп'ютерних систем.

При постановці задачі та визначенні мети дослідження увага звертається на необхідність визначення та побудови математичної моделі критеріїв оптимальності структури віддаленого вузла розподіленої БД. Враховується статистика користувацької активності, що представляється у вигляді багатовимірної моделі даних та для кожного елементу вимірів визначається маркер представленості даних на віддаленому вузлі. Виконавши відповідні операції консолідації для рівня атрибутів кортежів відношення, відповідно до запропонованої функції агрегації, отримується значення маркера представленості кожного з них.

На наступному етапі сформульовано критерії ефективності моделі: незалежність від центрального вузла БД, розмір локальної БД та показник рівня необхідності синхронізації даних. Побудовано математичні залежності між їх значеннями та значенням граничного рівня представленості для даних віддаленого вузла. Це дає змогу, розв'язавши задачу багатокритеріального аналізу, визначити рівень представленості даних, для якого значення критеріїв ефективності відповідатимуть координатам найоптимальнішої точки простору рішень.

Ключові слова: система керування розподіленими БД, багатокритеріальна оптимізація, реляційна модель даних, SQL-запит.

Анотация. Во вступительной части обоснована актуальность работы, которая определяется тенденцией перехода от локальных к распределенным базам данных и недостатками использования "универсальных" учетных систем. Аргументировано важность вопроса правильного распределения данных между узлами распределенных и территориально рассредоточенных КС.

При постановке задачи и определении цели исследования внимание обращается на необходимость определения и построения математической модели критериев оптимальности структуры удаленного узла распределенной БД. Учитывается статистика пользовательской активности, которая представляется в виде многомерной модели данных и для каждого элемента измерений определяется маркер представленности данных на удаленном узле. Выполнив операции консолидации для уровня атрибутов кортежа отношения, согласно предложенной автором функции агрегации, получается значение уровня необходимости представления каждого из них.

На следующем этапе сформулированы критерии эффективности модели (независимость от центрального узла БД, размер локальной БД, и показатель уровня необходимости синхронизации данных) и построены математические зависимости между их значениями и значением предельного уровня представленности для данных удаленного узла. Это позволяет, решив задачу многокритеріального анализа, определить уровень представленности данных, для которого значения критериев эффективности будут отвечать координатам оптимальной точки пространства решений.

Ключевые слова: распределенная СУБД, многокритеріальная оптимізація, реляційна модель даних, SQL-запрос.

Abstract. The introductory part of the research justifies the relevance of the work. Because of the tendency to move from local to distributed databases, and the disadvantages of using "universal" accounting systems many companies use the set of special solutions instead. According to this, it is very important to distribute data of corporate database between its nodes correctly. The key factor that affects the reliability and availability of the database is the link localization. If the database is distributed optimally, the data hosted in this node is called exclusively by its user.

The research aims to determine and build a mathematical model of the optimality criteria for the structure of a remote node of the distributed database. The statistics of user SQL-queries activity is taken into account. Statistics results is presented in the form of a multidimensional data model. In this model each dimension element is marked with a marker of data presentation on the remote node. Next, the statistics data is consolidated according to the aggregation function proposed by the author. As a result, the necessity level value of data cell representing is obtained.

At the next stage, criteria the model effectiveness are formulated (independence from the central node of the database, the size of the local database, and an indicator of the level of need for data synchronization). Then mathematical dependencies between criteria values and the value of data representation level on the remote node are built. This allows, having solved multicriteria analysis problem, to determine the level of data representation for which the values of the criteria will correspond to the coordinates of the optimal point in the solution space.

Keywords: distributed database management system, multi-criteria optimization, relational data model, SQL-query.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-52-60>.

Вступ

У розвитку сучасних інформаційних систем вже давно намітилася тенденція переходу від локальних до створення розподілених баз даних (РБД). На ринку програмних засобів існує чимало систем керування базами даних (СКБД), що дають змогу розміщувати, підтримувати та обробляти дані на різних вузлах комп'ютерних інформаційних систем (КІС). В подальшому такі СКБД будемо називати розподіленими і позначати СКРБД. Основною задачею СКРБД є забезпечення управління доступом до даних багатьох користувачів і забезпечення цілісності та узгодженості даних в умовах використання мережі користувацьких пристроїв [1]. Так, у межах одного підприємства або компанії існує необхідність автоматизації різних типів обліку [2, 3]. У якості прикладу можна навести: складський облік, бухгалтерський облік, облік кадрів, розробка інформаційних порталів, системи відеоспостереження,

М. Т. Фісун, М. Л. Дворецький, С. В. Дворецька, 2020

контроль прав доступу до даних та ін. Спроба автоматизації всіх видів обліку привело до виникнення так званих «універсальних» або «комплексних» облікових систем [3], що створюють єдине облікове середовище організації та забезпечують доступ до всіх необхідних даних моніторингу, контролю, аналізу й оцінки ефективності роботи організації, а також для підтримки прийняття управлінських рішень. Даний підхід має цілий ряд недоліків [2,4], позбавитись яких дозволяє використання окремих спеціалізованих рішень [3,5]. Але такий шлях веде до появи різних СКБД, що потребують їх синхронізації [6]. Задачею систем керування розподіленими БД є забезпечення управління доступом до даних багатьох користувачів, цілісності й узгодженості даних в умовах використання комп'ютерної мережі (КМ). Тобто, поруч з основною функцією СКБД: уведення, зберігання, пошук, обробка, сумісне користування даними та централізоване керування – специфічною важливою функцією є забезпечення спільної роботи багатьох користувачів з розподіленою інформацією [7,8].

Актуальність

Ключовим фактором, що впливає на надійність і доступність до бази даних, є так звана локалізація посилань [5]. Якщо база даних розподілена так, що дані, які розміщені в якомусь вузлі, викликаються винятково його користувачем, то це свідчить про високий рівень локалізації посилань. Якщо подібне розподілення даних здійснити неможливо і для виконання запитів користувача потрібно звертатись, переважно, за інформацією і до інших вузлів, то це свідчить про невисокий рівень локалізації посилань.

Комбінована стратегія розподілу даних є найбільш виправданою із точки зору можливості поєднання переваг стратегій з/без дублювання. Але при її використанні, окрім задачі синхронізації дубльованої інформації, актуальною постає задача проектування структури БД з точки зору приналежності даних до того чи іншого вузла мережі. Крім того, продуктивність системи напряду буде залежати від прийняття рішення щодо необхідності часткового або повного дублювання даних. Деякі відношення реляційної БД можуть бути продубльовано повністю, а деякі – після застосування операцій проекції та вибірки. Тобто, для оптимізованого представлення даних на віддаленому вузлі необхідно використати процедури вертикальної та горизонтальної фрагментації даних.

Отже, досить важливим є питання раціонального розподілення даних між вузлами розподілених та територіально розосереджених КІС. Тому задача оптимізації структури БД територіально віддаленого вузла у корпоративних інформаційних системах представляється актуальною.

Мета

Для ефективного розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації структури БД віддаленого вузла розподіленої та територіально розосередженої КІС необхідно, передусім, побудувати математичну модель оптимізації, що є *метою* даної статті. При цьому дослідження стосується тільки БД, побудованих на реляційній моделі даних.

Реляційна модель даних основана на простому й у той же час потужному математичному апараті, що спирається, головним чином, на теорію множин і математичну логіку [9,10]. При побудові математичної моделі розподіленої БД, а також формалізації роботи розподіленої транзакції, механізмів синхронного та асинхронного оновлення даних [11], extractingtransformationloading (ETL) процесів вважається за доцільне використання базових понять теорії множин.

Розроблювана модель має враховувати статистику користувацької активності звернення до локальних та віддалених даних, на основі якої, використовуючи фільтрацію за обраними для аналізу вимірами, можуть бути отримані відповідні зрізи або підмножини даних [12]. Для елементів вимірів уведемо характеристику «маркер предстваленості даних», що визначає ступінь їх необхідності на вузлі розподіленої корпоративної інформаційної системи (РКІС). Від агрегованого значення даного маркеру РКІС на відповідній віддаленому вузлу підмножині БД будуть залежати значення критеріїв ефективності моделі, серед яких незалежність від центрального вузла БД, розмір локальної БД та показник рівня необхідності синхронізації даних [13]. Отже, метою дослідження є математичне представлення залежності значень вищенаведених критеріїв оптимальності від значення маркеру предстваленості даних.

Розв'язання задач

Серед загальновідомих операцій реляційної алгебри [9], зважаючи на горизонтальну та вертикальну фрагментацію даних на вузлі РКІС, тут розглядаються операції «проекція» і «вибірка». Нехай tup – кортеж відношення R , $\text{tup}[P]$ – частина цього кортежу, що містить тільки значення атрибутів, які входять до підмножини P схеми відношення R_{schema} ($P \subseteq R_{\text{schema}}$). Тоді проекцією R на P будуть відношення, що складаються з кортежів усіх значень з множини P , що існують у відношенні R , тобто $R[P] = \{\text{tup}[P] \mid \text{tup} \in R_{\text{data}}\}$. Схема результуючого набору рядків може бути визначена наступною множиною атрибутів: $R[P]_{\text{schema}} = \{A_1, \dots, A_m\}$, де $A_i \in R_{\text{schema}}$.

Вибірка виконує відображення кортежів, результатом якого є відношення, що містить підмножину всіх унікальних кортежів відношення R , для яких виконується певна логічна умова: $R[S] = \{\text{tup} \mid \text{tup} \in R_{\text{data}} \wedge F(\text{tup}, S) = \text{істина}\}$, де S – деяка логічна умова, а $F(\text{tup}, S)$ – функція, що відображає її

виконання для відповідного кортежу. Схема результуючого набору рядків буде збігатись зі схемою базового відношення, тобто $R[S]_{schema} = R_{schema}$.

У межах SQL – запиту на вибірку даних може приймати участь деяка множина відношень, кожне з яких є результатом послідовного виконання операцій вибірки та проекції до базового відношення (таблиці БД). $R'' = R'[P]$, де $R' = R[S]$, тобто

$$R'' = \{tup[P] \mid tup[P] \in R'[P]_{data} \wedge F(tup, S) = \text{істина}\} \quad (1)$$

Розглядаючи множину запитів до БД, результуюча підмножина R''_{union} базового відношення R може бути визначена як об'єднання підмножин R' всіх запитів, що надійшли до БД з віддаленого вузла

$$R''_{union} = \bigcup_{i=1}^n R'_i, \text{ або}$$

$$R''_{union} = \{tup[P_{union}] \mid tup[P_{union}] \in R'[P_{union}]_{data} \wedge F(tup, S_{union}) = \text{істина}\}, \text{ де}$$

$$tup[P_{union}] = \bigcup_{i=1}^n tup[P_i], \text{ а } S_{union} = \bigcup_{i=1}^n S_i$$

Враховуючи, що деякі дані, необхідні на вузлі РБД, для запобігання необхідності подальшої реплікації, можуть бути представлені лише на центральному вузлі БД та приймати участь у роботі за рахунок використання розподілених запитів, результуюче відношення R''_{remote} буде лише підмножиною R''_{union} . Зважаючи на той факт, що для представлення даних на віддаленому вузлі територіально розосередженої КІС необхідно використати елементи як вертикальної, так і горизонтальної фрагментації даних (як проекцію, так і вибірку), підмножина базового відношення R , що буде описувати відношення віддаленого вузла, може бути представлена наступним чином:

$$R''_{remote} = \{A \mid A \in R_{schema}, R_{primary} \subset R''_{remote}, A \in R_{primary} \vee F_a(Node, A) = \text{істина}\} \quad (2)$$

Для прийняття рішення про представленість певного атрибуту відношення на тому чи іншому вузлі використовуємо функцію $F_a(Node, A)$. Зауважимо, що множина атрибутів первинного ключа відношення у будь-якому випадку має бути представлена на віддаленому вузлі.

Множина кортежів, у свою чергу, визначатиметься за формулою:

$$R''_{remote} = \{tup \mid tup \in R_{data}, tup_{primary} \in R''_{remote-dep} \vee F_{tup}(Node, tup) = \text{істина}\} \quad (3)$$

Як бачимо, кортеж має бути представлений у випадку входження його первинного ключа до множини даних відношень, залежних від поточного. В іншому випадку необхідність наявності даних вирішується за допомогою оціночної функції $F_{tup}(Node, tup)$.

Модель представлення користувачьких запитів має підтримувати можливість їх подальшої класифікації згідно приналежності до того чи іншого автоматизованого робочого місця, географічного розташування, ролі користувача та інших критеріїв, що можливо додати до моделі під час її використання згідно з особливостями тієї чи іншої предметної області. Тобто, користувачький запит визначається, як

$$Q = \langle APM, \text{Користувач}, \text{Застосунок}, R_{set}, Q_{set}^{inner} \rangle, \quad (4)$$

де $APM = \langle \text{Тип}, \text{Розташування} \rangle$ – автоматизоване робоче місце, що характеризується типом та розташуванням; $\text{Користувач} = \langle \text{Роль}, \text{Ім'я} \rangle$ – користувач корпоративної ІС із ім'ям та роллю; $R_{set} = \{ R'' \mid \{tup[P] \mid tup[P] \in R'[P]_{data} \wedge F(tup, S) = \text{істина}\} \}$ – множина результуючих відношень, отриманих із базових відношень (таблиць) БД відповідними запитамі; Q_{set}^{inner} – множина вкладених запитів основного запиту Q . Зауважимо, що тип та розташування APM , ролі користувачів та додаткові властивості задаються за допомогою відповідних класифікаторів.

При плануванні структури БД віддаленого вузла територіально розосередженої КІС та, відповідно, розрахунку значень функцій $F_a(Node, A)$ та $F_{tup}(Node, tup)$, що визначають необхідність представлення даних локально, прийматиме участь декілька факторів – доступність та швидкість отримання даних, незалежність від центрального вузла БД, розмір БД, ступінь достовірності даних, необхідність у подальшій синхронізації.

На першому кроці моделювання розпочинається з представлення у віддаленому вузлі повної копії БД центрального вузла. При цьому доступність та незалежність від центрального вузла БД має максимальний рівень, швидкість отримання даних у порівнянні із центральним вузлом, як правило, нижча за рахунок менш потужних обчислювальних ресурсів, але може бути збільшена за рахунок виконання операцій вибірки та проекції до відношень та зменшення кількості та обсягів блокувань даних. Розмір БД є великим, а отже даний критерій є неоптимальним. Також всі дані потребують синхронізації з центральним вузлом, що є досить ресурсоємкою операцією.

Другий крок полягає у виключенні з віддаленого вузла всіх надлишкових даних. Для розв'язання даної задачі на базі реляційної моделі даних обліку користувацьких запитів (4) створено багатовимірну модель [14], де у якості базового набору вимірів запропоновано:

$$D = \langle \text{ДатаЧас, ТипАРМ, РозташуванняАРМ, Роль, Застосунок, R, A, tup} \rangle \quad (5)$$

Множина мір складається з пари значень «Кількість» та «Час Виконання»

$$M = \langle \text{Кількість, Час Виконання} \rangle \quad (6)$$

Домени вимірів «Тип АРМ», «Роль Користувача» та «Застосунок» визначаються за допомогою відповідних класифікаторів. При виконанні аналізу щодо представленості даних для елементів вимірів вводиться характеристика маркеру представленості даних, що відображає рівень необхідності представлення даних на вузлі РКІС. Для кожного елемента значення маркеру приймається одне із множини лінгвістичних значень {«необхідно», «бажано», «не потрібно»}, що визначає ступінь необхідності представлення даних того чи іншого типу АРМ, ролі користувача або застосунку. Для виміру «Розташування АРМ» маркування виконується автоматично значенням «необхідно» для відповідного віддаленого вузла, та «не потрібно» для всіх інших.

При визначенні значення маркеру представленості для рядку таблиці фактів [14] використано функцію максимуму, що відображає принцип поглинання. Визначення значення маркеру при виконанні консолідації рядків таблиці фактів по значеннях $\langle R, A, tup \rangle$, тобто для комірки таблиці, може бути виконано декількома шляхами. Так, за песимістичними сценарієм використовується функція агрегації «максимум» (у нашому випадку максимальне значення має маркер «необхідно», а відповідно мінімальне «не потрібно»). Даний підхід резервує дані, якщо вони необхідні хоча б в одному місці. За оптимістичним сценарієм, навпаки, дані маркуються як «непотрібно», якщо вони є такими хоча б по одному з вимірів. Зрозуміло, що перший сценарій гарантовано забезпечує віддалений вузол необхідними даними, але веде до потенційної збитковості даних та розширює область даних, що потребуватимуть подальшої синхронізації. Другий у свою чергу веде до мінімізації даних на віддаленому вузлі, але збільшує потребу у розподілених запитах, що у свою чергу веде до зменшення рівня доступності та швидкості отримання даних, а також рівня незалежності від центрального вузла БД.

Застосування методу ковзаючого середнього частково вирішує це питання, але залишається невирішеним питання питомої ваги впливу маркеру кожного з вимірів. Крім того, слід врахувати, що для деяких підмножин вимірів має спрацьовувати саме песимістичний сценарій (дані потрібні, не зважаючи ні на що), а для деяких оптимістичний (дані не мають дублюватися в жодному разі). При чому, перший, як правило, поглинатиме останній.

Отже, маємо модель, у якій кожен атрибут виміру має значення, маркер та ваговий коефіцієнт $A_{dim} = \{Val, Mrk, vol\}$, де $Mrk = \{\text{«обов'язково»}, \text{«необхідно»}, \text{«бажано»}, \text{«не потрібно»}, \text{«заборонено»}\}$, а vol – ваговий коефіцієнт (ігнорується для значень маркера «обов'язково» та «заборонено»).

Виконавши переведення нечислової лінгвістичної змінної маркерів у числове значення («обов'язково» – «2», «необхідно» – «1», «бажано» – «0», «не потрібно» – «-1», «заборонено» – «-2»), визначимо для них функцію агрегації:

$$Aggregate_{i=1}^n Mrk_i = \begin{cases} 2, & \text{якщо } \exists Mrk_i = 2 \\ -2, & \text{якщо } \exists Mrk_i = -2 \wedge \nexists Mrk_i = 2 \\ \sum_{i=1}^n (Mrk_i * \frac{Vol_i}{\sum_{i=1}^n Vol_i}) & \end{cases} \quad (7)$$

При прийнятті рішення щодо представленості даних на віддаленому вузлі виконуємо консолідацію рядків таблиці фактів за множиною $\langle R, A, tup \rangle$ та розраховуємо значення маркеру для кожного її елемента за формулою (7), після чого приймаємо рішення про представленість за наступним критерієм.

$$Предст(Node, R, A, tup) = (Aggregate(R, A, tup)_{i=1}^n Mrk_i > coef_{предст}^{node}), \quad (8)$$

де $coef_{предст}^{node}$ – пороговий коефіцієнт представленості даних у певному вузлі Node, область значень якого $[-1, 1]$.

При встановленні коефіцієнту представленості даних (8) значення одиниці ($coef_{предст}^{node} = 1$) розміщуємо всі дані, необхідні для роботи віддаленого вузла РБД у локальній базі даних. Звідси, як і у випадку повного дублювання даних, маємо той же максимальний рівень доступності даних. Також, у порівнянні із повним дублюванням, не змінюється рівень достовірності та незалежності від центрального

вузла БД. Але швидкість отримання даних збільшується за рахунок зменшення їх обсягу (передусім на операціях вибірки). Також маємо менший розмір БД та зменшення обсягів даних, що потенційно можуть потребувати подальшої синхронізації.

Третій крок полягає у повній відмові від локальної БД та розміщенні всіх даних та центральному вузлі (або, в окремих випадках, в інших вузлах) РКІС. У цьому випадку маємо максимізацію рівня оптимальності за показниками щодо необхідності подальшої синхронізації даних, оскільки дублювання даних відсутнє. Рівень достовірності також є максимальним, і розмір локальної БД має мінімальне значення (локальна БД відсутня). Але, у той же час, максимально знижується доступність даних та швидкість їх отримання, а робота КІС є максимально залежною від доступності центрального вузла.

Відмітимо, що на третьому кроці значення частини показників у порівнянні із другим кроком було покращено, але у той же час значення іншої частини показників погіршилося. Логічно припустити, що оптимальних значень показники якості структури вузла РКІС набувають на проміжку між 2-м та 3-м кроками. Для можливості виконання аналізу та знаходження оптимального розподілу даних між віддаленим та центральним вузлами необхідно, передусім, формалізувати перераховані вище показники якості структури БД.

Показники незалежності від центрального вузла БД, та, відповідно, доступності і швидкості їх отримання на пряму залежать від представленості даних користувацьких запитів на вузлі РКІС. Використавши модель запиту користувача (4) та результуючого відношення віддаленого вузла (1, 2), можемо визначити функцію доступності даних запиту:

$$F_{\text{доступність}}(\text{Node}, Q) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \forall R'' \in R_{\text{schema}}^{\text{remote}}, R'' \in R_{\text{schema}}^{\text{remote}} \wedge \\ \quad \forall Q^{\text{inner}} F_{\text{доступність}}(Q^{\text{inner}}) = 1 \\ 0, \text{ якщо } \exists R'' \notin R_{\text{schema}}^{\text{remote}}, R'' \in R_{\text{schema}}^{\text{remote}} \vee \\ \quad \exists Q^{\text{inner}} F_{\text{доступність}}(Q^{\text{inner}}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Загальне значення рівня доступності даних та незалежності від центрального вузла БД визначається, як середнє значення рівня доступності (9) деякої підмножини користувацьких запитів.

$$F_{\text{доступність}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{\text{доступність}}(Q_n)}{n}, \text{ де } Q_n \in Q_{\text{node}} \quad (10)$$

Множина користувацьких запитів Q_{node} є підмножиною всіх користувацьких запитів Q_{all} ($Q_{\text{node}} \subset Q_{\text{all}}$), для кожного елемента якої функція приналежності до віддаленого вузла дорівнює одиниці.

$$Q_{\text{node}} = \{Q \mid F_{\text{приналежності}}(\text{Node}, Q) = 1\},$$

де

$$F_{\text{приналежності}}(\text{Node}, Q) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } (\exists R'' \in R_{\text{set}}'' \\ \rightarrow \text{Aggregate}(R'')_{i=1}^n \text{Mrk}_i > -1) \vee \\ \quad (\exists Q^{\text{inner}} \in Q_{\text{set}}^{\text{inner}} \\ \rightarrow F_{\text{приналежності}}(\text{Node}, Q^{\text{inner}}) = 1) \\ 0, \text{ якщо } (\forall R'' \in R_{\text{set}}'' \\ \rightarrow \text{Aggregate}(R'')_{i=1}^n \text{Mrk}_i \leq -1) \wedge \\ \quad (\forall Q^{\text{inner}} \in Q_{\text{set}}^{\text{inner}} \\ \rightarrow F_{\text{приналежності}}(\text{Node}, Q^{\text{inner}}) = 0) \end{cases}$$

Слід зазначити, що до складу елемента Q множини Q_{all} окрім (4) також має бути включений порядковий номер. Дана операція виконується зважаючи на те, що деякі запити надходять від користувачів більше одного разу, і можуть бути згорнуті до одного рядку. Але у нашому випадку, дана особливість має бути врахована, та вага такого запиту при розрахунку загального значення критерію доступності даних віддаленого вузла територіально розосередженої КІС має бути збільшена у порівнянні з іншими запитами відповідно до кількості надходжень, що і досягається за рахунок їх дублювання у множині Q_{all} .

Наступним розглянемо критерій розміру локальної БД. Даний критерій впливає як на продуктивність запитів до локальної БД, так і на потужність обчислювальних ресурсів, необхідних для виконання операцій адміністрування БД та КІС (резервне копіювання, забезпечення відмовостійкості та ін.). База даних під управлінням реляційної СКБД (у тому числі розподіленої) представлена на дисковому просторі у вигляді файлу або групи файлів [7,8]. У той же час будь-яка сучасна реляційна СКБД має у своєму розпорядженні механізми отримання інформації про те, скільки місця на диску займає кожне окреме відношення. В рамках виконання роботи експериментальним шляхом виявлено, що у переважній більшості випадків сумарне значення розміру відношень співпадає або майже співпадає із сумарним значенням розміру файлів БД,

$$\sum_{i=1}^n SizeR_i^{DBMS} - \sum_{j=1}^m SizeFile_j = \Delta, \text{ де } \frac{\Delta}{\sum_{i=1}^n SizeR_i^{DBMS}} \leq 0.005 \quad (11)$$

Звідки можна зробити висновок про можливість їх використання при розрахунку значення критерію розміру локальної БД віддаленого вузла територіально розосередженої КІС.

Але інформація про розмір R не дає можливості визначити розмір R", що є результатом послідовності операцій вибірки та проєкції, і входить до множини R^{remote}. З іншого боку, кожна СКБД надає інформацію про обсяг дискового простору, необхідного для збереження значення атрибуту, визначеного на певному домені [7,8]. Розмір кортежу може бути визначено, як

$$SizeR = SizeR_0^{DBMS} + p \times \sum_{i=1}^n Size(Type_i), \quad (12)$$

де $A_i \in D_i \in Type_i$, p – кардинальне число або потужність відношення, а $SizeR_0^{DBMS}$ – розмір i-го відношення за відсутності даних.

Однак, отримані за допомогою (12) значення не можуть бути використані в розрахунках у чистому вигляді, оскільки $SizeR$ практично ніколи не збігається з $SizeR^{dbms}$, а в деяких випадках відрізняється у декілька разів. Це може бути пов'язано як із наявністю додаткових структур даних (індексів), пов'язаних із відношенням, так і з особливостями побудови кластерних індексів, використання фактору заповнення та інших властивостей представлення даних на диску тих чи інших СКБД.

Одночасне використання (11) та (12) дає можливість подолати вищезазначені суперечності. Так, на першому кроці для кожного відношення визначаємо поправочний коефіцієнт:

$$Koeff_{SizeR} = \frac{SizeR_i^{DBMS} - SizeR_0^{DBMS}}{p \times \sum_{i=1}^n Size(Type_i)}$$

Далі, при визначенні розміру відношення R" (що є підмножиною R) використовуємо наступну формулу

$$SizeR'' = Koeff_{SizeR} \times p' \times \sum_{i=1}^{n'} Size(Type_i), \quad (13)$$

де p – кардинальне число R", n' – кількість елементів множини R^{remote}_{schema} (кількість атрибутів), і кожен атрибут $A_i \in D_i \in Type_i$.

Сума розмірів (13) всіх підмножин R" дасть нам розмір БД віддаленого вузла. Але для кожного окремого випадку предметної області даний розмір буде приймати різні значення, а отже його абсолютне значення не має цінності. Тому було прийнято рішення остаточне значення критерію розміру локальної БД представити у вигляді відношення до загального розміру БД центрального вузла КІС.

$$F_{size} = \sum_{i=1}^n \frac{SizeR''_i}{SizeR_i^{DBMS}} \quad (14)$$

Останнім із зазначених вище критеріїв, є необхідність у подальшій синхронізації. Спочатку визначимо підмножину даних віддаленого вузла, для якої виконуються операції зміни даних. Для цього визначимо модель SQL-запиту модифікації даних відношення $Q^{modif} = \langle \text{Виміри}, R^{modif}, \text{type} \rangle$, де R^{modif} – підмножина на відношенні R, що зазнає змін внаслідок виконання операцій модифікації даних, $\text{type} = \{\text{insert}, \text{update}, \text{delete}\}$ – тип операції. R^{modif} визначаємо, як

$$R^{modif} = \{ \text{tup}[P^{modif}] \mid \text{tup}[P^{modif}] \in R[P^{modif}]_{data} \wedge F(\text{tup}, S) = \text{істина} \}, \quad (15)$$

де S – деяка логічна умова, F(tup, S) – функція, що відображає її виконання для відповідного кортежу, а R^{modif} – множина атрибутів, що зазнає модифікації.

Розглядаючи множину запитів до БД, результуюча підмножина R''_{node}^{modif} базового відношення R може бути визначена, як об'єднання підмножин R'' всіх запитів (15), що надійшли до БД з віддаленого вузла $R''_{node}^{modif} = \cup_{i=1}^n R_i''$, або

$$R''_{node}^{modif} = \{tup[P_{node}^{modif}] | tup[P_{node}^{modif}] \in R[P_{node}^{modif}]_{data} \wedge F(tup, S_{node}) = \text{істина}\}. \quad (16)$$

Аналогічним чином визначаємо множину R''_{main}^{modif} R''_{main}^{modif} , що зазнаватиме модифікацій на центральному вузлі або інших вузлах із подальшою синхронізацією із центральним. Перетин множин R''_{node}^{modif} та R''_{main}^{modif} буде визначати підмножину базового відношення, на якій можуть виникати конфлікти зміни та значення атрибутів якої потребують застосування більш ресурсоємних алгоритмів синхронізації [6, 11, 13].

$$R'''_{node}^{modif} = R''_{node}^{modif} \cap R''_{main}^{modif}. \quad (17)$$

Грунтуючись на (16, 17) додаємо до багатовимірної моделі (5, 6) вимір $\text{SyncroFlg} = \{\text{true}, \text{false}\}$, що визначатиметься на кортежі $\langle R, A, tup \rangle$. Далі, на підставі агрегатного значення маркеру представленості $\text{Aggregate}_{i=1}^n \text{Mrk}_i$ та коефіцієнту представленості $\text{coef}_{предст}^{node}$ виконуємо фільтрацію багатовимірної моделі згідно рішення про представленість (8) та $\text{SyncroFlg} = \text{true}$, згортаємо за $\langle R, A, tup \rangle$ та підраховуємо кількість запитів. Співвідношення отриманого значення до загальної кількості запитів згідно з (8) і буде показником рівня необхідності синхронізації даних

$$F_{synchro} = \frac{p_{node}^{modif}}{p_{node}}, \quad (18)$$

де p_{node}^{modif} – кардинальність відношення, що включає запити віддаленого вузла (згідно рішенням про представленість), до яких входять значення атрибутів кортежів (комірки), що також входять до множини R''_{node}^{modif} , а p_{node} – кардинальність всіх запитів, атрибути та кортежі яких представлені у віддаленому вузлі.

Висновки

На основі реляційної моделі даних та елементів теорії множин формалізовано поняття зрізу даних множини відношень БД. Із використанням визначення операцій вибірки та зрізу, а також, враховуючи ієрархічну структуру користувачьких запитів, побудовано модель, що описує їх структуру. Дана модель, окрім відображення їх ієрархічної структури та підмножин даних і їх схем, включає аналітичні характеристики щодо типу автоматизованого робочого місця, типу(ролі) користувача, розташування та додаткових аналітичних вимірів [15]. Запропонована модель користувачького запиту, що включає ієрархічний набір результуючих відношень, кожне з яких, у свою чергу, є підмножиною базового відношення схеми БД, дозволяє проаналізувати деяку їх послідовність. Результати даного аналізу дозволяють виділити для кожного базового відношення деяку підмножину (відношення віддаленого вузла), що складатиметься із елементів, які входять до набору результуючих відношень послідовності SQL-запитів.

Введено поняття маркеру представленості даних для елементів аналітичних вимірів, на основі значення якого за допомогою запропонованої функції агрегації розраховується рівень маркеру представленості для кожного атрибуту та кортежу відношення. Для визначення оптимального значення рівня маркеру представленості введено декілька критеріїв оптимальності та побудовано математичні моделі для кожного з них, що дозволяють розрахувати їх значення в залежності від граничного рівня маркеру представленості даних на вузлі територіально розосередженої КІС.

В результаті отримано багатокритеріальну задачу, що має бути розв'язана для визначення оптимального рівня представленості даних. Слід відмітити, що критерії оптимальності, моделі яких були визначені, є незалежними та монотонними і визначаються на множині дійсних чисел в інтервалі $[0;1]$. Отримання оптимальних множин за Паретто та Слейтором [16] можуть дати результати лише на першому етапі моделювання, але при розрахунку оптимального рівня маркеру представленості виявляються малоєфективними через зниження рівня одних критеріїв оптимальності при одночасному підвищенні інших. Простір можливих рішень визначається на множині дійсних чисел, а отже множина рішень містить велику кількість альтернатив. Перспективою розвитку та наступним етапом даного дослідження є розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації на основі запропонованої та наведеної вище математичної моделі.

Список літератури

- [1] M. Tamer Özsu, Patrick Valduriez, *Principles of Distributed Database Systems 3rd ed.* Springer, 2011, 845 p.
 - [2] М. Л. Дворецький, С. Ю. Боровльова, С. В. Дворецька, «Web-застосунок складського обліку в неавтоматизованих торгових точках», *Наукові праці: науково-методичний журнал. Комп'ютерні технології*, Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, 2019.
 - [3] 1С:Предприятие 8. Управление торговым предприятием для Украины. [Електроний ресурс]. Режим доступу: URL: http://rarus.com.ua/torgovyy-i-skladskoy-uchet/1S_Predpriyatie_8_Upravlenie_torgovym_predpriatiem_dlya_Ukrainy/.
 - [4] Наталья Козлюк, Светлана Угримова, *Складской учет на предприятиях торговли*. Ростов-на-Дону, Россия: Феникс, 2005, 285 с.
 - [5] Джеффри Д. Ульман, Дженнифер Уидом, Гектор Гарсия-Молина, *Системы баз данных. Полный курс*. Вильямс, 2004, 1088 с.
 - [6] Автоматическая синхронизация распределенных баз данных в разделенном режиме. [Електроний ресурс]. Режим доступу: http://stimul.kiev.ua/materialy.htm?a=avtomaticheskaya_sinkhronizatsiya_raspredeleennykh_baz_dannykh_v_razdelennom_rezh.
 - [7] Максим Кузнецов, Игорь Симдянов, *MySQL 5*. СПб, Россия: БХВ-Петербург, 2010, 342 с.
 - [8] Д. Петкович, *Microsoft SQL Server 2008. Руководство для начинающих. Пер.с англ.* СПб, Россия: БХВ-Петербург, 2009, 752 с.
 - [9] С. В. Малахов, *Основы проектирования баз данных: Навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів*. О., Україна: Наука і техніка, 2006, 156 с.
 - [10] В. В. Пасічник, В. А. Резніченко, *Організація баз даних та знань*. Київ, Україна: Видавнича група BHV, 2006, 384 с.
 - [11] Использование синхронных и асинхронных операций базы данных. [Електроний ресурс]. Режим доступу: URL: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/dev/WS5b3cc_c516d4fbf351e63e3d118666ade46-7d39.html
 - [12] М. Л. Дворецький, С. В. Дворецька, Є. О. Давиденко, «Інформаційна технологія визначення корисних даних при оптимізації структури та мінімізації обсягів вузла розподіленої БД», *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 4/2019, с. 26-35, 2019.
 - [13] Mykhailo Dvoretzkyi, Svitlana Dvoretzka, Yuriy Nezdoliy, Svitlana Borovlova, «Data Utility Assessment while Optimizing the Structure and Minimizing the Volume of a Distributed Database Node», in *Proceedings of the 1st International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICTES 2019)*, Mykolaiv, November 14-15, 2019, p. 128-137.
 - [14] А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод, *Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining*. Питербург, Россия: БХВ-Петербург, 2004, 336 с.
 - [15] М. Л. Дворецький, Є.О.Давиденко, С. Ю. Боровльова, «Проектування структури розподіленої БД на базі парсингу SQL-запитів», *Наукові праці: Науково-методичний журнал. Комп'ютерні технології*, с. 26-35, 2017.
 - [16] І. І. Коваленко, Є. О. Давиденко, «Парето-оптимальний вибір при формуванні портфеля замовлень ІТ-проектів», *Наукові праці: науково-методичний журнал. Комп'ютерні технології*, т. 173, вип. 161, с. 44-48, 2011.
- Стаття надійшла: 22.06.2020.

References

- [1] M. Tamer Özsu, Patrick Valduriez, *Principles of Distributed Database Systems 3rd ed.* Springer, 2011, 845 p.
- [2] М. Л. Dvoretzkyi, S. Yu. Borovlova, S. V. Dvoretzka, «Web-zastosunok skladskoho obliku v neavtomatyzovanykh torhovykh tochkach», *Naukovi pratsi: naukovo-metodychnyi zhurnal. Kompiuterni tekhnologii*, Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. P. Mohyly, 2019.
- [3] 1S:Predpriyatie 8. Upravlenie trgovym predpriatiem dlja Ukrainy. [Elektronij resurs]. Rezhim dostupu: URL: http://rarus.com.ua/torgovyy-i-skladskoy-uchet/1S_Predpriyatie_8_Upravlenie_torgovym_predpriatiem_dlya_Ukrainy/.
- [4] Natal'ja Kozljuk, Svetlana Ugrimova, *Skladskoj uchet na predpriyatijah trgovli*. Rostov-na-Donu, Rossiya: Feniks, 2005, 285 s.
- [5] Dzhheffri D. Ul'man, Dzhennifer Uidom, Gektor Garsia-Molina, *Sistemy baz dannyh. Polnyj kurs*. Vil'jams, 2004, 1088 s.
- [6] Avtomaticheskaja sinkhronizacija raspredeleennyh baz dannyh v razdelenom rezhime. [Elektronij resurs]. Rezhim dostupu: http://stimul.kiev.ua/materialy.htm?a=avtomaticheskaya_sinkhronizatsiya_raspredeleennykh_baz_dannykh_v_razdelennom_rezh.
- [7] Maksim Kuznecov, Igor' Simdjanov, *MySQL 5*. SPb, Rossiya: BHV-Peterburg, 2010, 342 s.

- [8] D. Petkovich, Microsoft SQL Server 2008. *Rukovodstvo dlja nachinajushhih*. Per.s angl. Spb, Rossija: BHV-Piterburg, 2009, 752 s.
- [9] Іє. V. Malakhov, *Osnovy proektuvannia baz danykh: Navch. posib. dlia stud. vyshchyykh navch. zakladiv*. O., Ukraina: Nauka i tekhnika, 2006, 156 s.
- [10] V. V. Pasichnyk, V. A. Reznichenko, *Orhanizatsiia baz danykh ta znan*. Kyiv, Ukraina: Vydavnycha hrupa BHV, 2006, 384 s.
- [11] Ispol'zovanie sinhronnyh i asinhronnyh operacij bazy danyh. [Elektronij resurs]. Rezhim dostupu: URL: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/dev/WS5b3cc_c516d4fbf351e63e3d118666ade46-7d39.html.
- [12] M. L. Dvoret'skyi, S. V. Dvoret'ska, Ye. O. Davydenko, «Informatsiina tekhnolohiia vyznachennia korysnykh danykh pry optymizatsii struktury ta minimizatsii obsiahiv vuzla rozpodilenoj BD», *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 4/2019, s. 26-35, 2019.
- [13] Mykhailo Dvoret'skyi, Svitlana Dvoret'ska, Yuriy Nezdolij, Svitlana Borovlova, «Data Utility Assessment while Optimizing the Structure and Minimizing the Volume of a Distributed Database Node», in *Proceedings of the 1st International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICTES 2019)*, Mykolaiv, November 14-15, 2019, p. 128-137.
- [14] A. A. Barsegjan, M. S. Kuprijanov, V. V. Stepanenko, I. I. Holod, *Metody i modeli analiza danyh: OLAP i Data Mining*. Piterburg, Rossija: BHV-Peterburg, 2004, 336 s.
- [15] M. L. Dvoret'skyi, Ye.O.Davydenko, S. Yu. Borovlova, «Proektuvannia struktury rozpodilenoj BD na bazi parsynhu SQL-zapytiv», *Naukovi pratsi: Naukovo-metodychnyi zhurnal. Kompiuterni tekhnolohii*, s. 26-35, 2017.
- [16] I. I. Kovalenko, Ye. O. Davydenko, «Pareto-optymalni vybir pry formuvanni portfelia zamovlen IT-proektiv», *Naukovi pratsi: naukovo-metodychnyi zhurnal. Kompiuterni tekhnolohii*, t. 173, vyp. 161, s. 44-48, 2011.

Відомості про авторів

Фісун Микола Тихонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету ім. П. Могили.

Дворецкий Михайло Леонідович – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету ім. П. Могили.

Дворецка Світлана Володимирівна – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету ім. П. Могили.

Н. Т.Фисун, М. Л. Дворецкий, С. В. Дворецкая

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ УЗЛА В КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Черноморский национальный университет им. П. Могила, Николаев

M. Fisun, M. Dvoret'skyi, S. Dvoret'skaya

BUILDING A MODEL TO OPTIMIZE THE DATABASE STRUCTURE OF THE NODE IN CORPORATE INFORMATION SYSTEMS

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv