

Міжнародний науковий журнал

**ВИМІРЮВАЛЬНА ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
В ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСАХ**

2020, № 1

**International scientific-technical
journal**

**MEASURING AND COMPUTING
DEVICES IN TECHNOLOGICAL
PROCESSES**

2020, Issue 1

**Хмельницький 2020
Khmelnytskyi 2020**

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Затверджений як фахове видання (перереєстрація), група «Б»
Наказ МОН 28.12.2019 №1643

Засновано в травні 1997 р.

Виходить 2 рази на рік

Хмельницький, 2020, № 1 (65)

Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. — Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського <http://nbuv.gov.ua/j-tit/vott>

Журнал включено до наукометричних баз:

РИНЦ http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37653
Index <http://jml2012.indexcopernicus.com/p24781565,3.html>
Copernicus h-індекс 49,97
Google Scholar http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk - індекс 9

Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського <http://nbuv.gov.ua/j-tit/vott>

Головний редактор **Мартинюк В. В.**, д. т. н., професор, завідувач кафедри телекомунікацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій Хмельницького національного університету

Заступник головного редактора **Бойко Ю. М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету

Відповідальний секретар **Кравчик Ю. В.**, к. е. н., старший викладач кафедри економіки, менеджменту та адміністрування Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Бармак О. В., д.т.н., **Бедратюк Л. П.**, д.фіз.-мат.н., **Бубулис Алгимантас**, д.т.н. (Литва), **Васілевський О. М.**, д.т.н., **Говорущенко Т. О.**, д.т.н., **Калачинський Томаш**, PhD (Польща), **Косенков В. Д.**, к.т.н., **Коробко Є. В.**, д.т.н. (Білорусь), **Кулаков П. І.**, д.т.н., **Кухарчук В. В.**, д.т.н., **Кучерук В. Ю.**, д.т.н., **Лампасі Алессандро**, PhD, (Італія), **Лукасевіч Марцін**, PhD, (Польща), **Мрозинський Адам**, PhD, (Польща), **Мусяль Януш**, PhD, (Польща), **Ортігейра Мануель Дуарте**, PhD, (Португалія), **Походило Є. В.**, д.т.н., **Психалінос Костас**, PhD, (Греція), **Ройзман В. П.**, д.т.н., **Савенко О. С.**, к.т.н., **Семенко А. І.**, д.т.н., **Сорокати Р. В.**, д.т.н., **Сурду М. М.**, д.т.н., **Шарпан О. Б.**, д.т.н.

Технічний редактор Кравчик Ю. В., к. е. н.

**Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 10 від 28.05.2020**

Адреса редакції: Україна, 29016,
м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
Хмельницький національний університет
редакція журналу "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"

☎ 067-347-74-57

e-mail: mscientificjournal@gmail.com

web: <http://journals.khnu.km.ua/index.php/MeasComp>

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 23279-13119ПР від 24 травня 2018 року (перереєстрація)

© Хмельницький національний університет, 2020
© Редакція журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 2020

ЗМІСТ

МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

YANENKO O., TKACHUK A., TKACHUK R. AUTOMATED TESTING SYSTEM FOR IMPLANTS TO REGULATE INTRAOCULAR PRESSURE	5
ПОЛОВИНКО І. І., КАШУБА А. І. КОЛІРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОСМОЗНІМКІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВІДБИТОГОТА РОЗСІЯНОГО СВІТЛА	11
МАЩЕНКО В. А. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПОЛІМЕРНОГО АУКСЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРЬОХ ТИПІВ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ	16
ЛАТЕНКО В. І., МИРОНОВ Р. Д., ОРНАТСЬКИЙ І. А., ЛОГВИНЕНКО Д. М. АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ОПОРОМ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОДАТЧИКА	23
КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В. ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛЮВАННІ	28
КАРПОВА Л. В., ГОРОШКО А. В., ПИРОЖОК В. В. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ КЕРАМІЧНИХ РЕЗИСТОРІВ З ПОЛІМОДАЛЬНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ РОЗПОДІЛУ	34
КОРЕЦЬКА Л. О., ФОРКУН І. В., МЕДЗАТИЙ Д. М. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПАПЕРУ	41

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

MARTYNYUK V. V., FORKUN Y. V., FORKUN I. V., NOVAK T. O. ARCHITECTURE OF SOLAR PANEL INTELLIGENT MONITORING SYSTEM BY MEANS OF INDUSTRIAL CONTROLLER	46
БЕДРАТЮК Л. П., БЕДРАТЮК Г. І. АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З ДОПОМОГОЮ МОМЕНТНИХ ІНВАНІАНТІВ	51
ГРЕСЬ О. В., РОЗОРИНОВ Г. М., ПІЛЬКЕВИЧ Ю. Г., КОСТЯК М. Ю., ПАРХУЦЬ Л. Т. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОТОКОВОГО ШИФРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ	60

ПЯТИН І. С., БОЙКО Ю. М. МЕТОДИКА ПОЛЯРНОГО КОДУВАННЯ В 5G МОБІЛЬНИХ ЗАСОБАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ	67
БАРМАК О. В., КАЛИТА О. Д., МАНЗЮК Е. А. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІЧНИХ ПРОЯВІВ ЕМОЦІЙ	77
ПРЕЙЗНЕР Є. Е., ЯШИНА О. М. МЕТОДИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СФЕРІ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я	84
ОНИСЬКО А. І., СЕМЕНИШИНА І. В., КРУПСЬКИЙ Я. В. ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ В УПРАВЛІННІ ПРОЕКТАМИ	88
СТЕЦЮК М. В., ГОРОШКО А. В., САВЕНКО Б. О. МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ТА ВІДМОВСТІЙКОСТІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ РУЙНУЮЧОГО ВПЛИВУ ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	97
КАШТАЛЬЯН А. С., САВЕНКО Б. О., БЕЛЬФЕР Р. Е. МОДЕЛІ ПРИМАНОК В КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ З ВРАХУВАННЯМ ТИПІВ ЗЛОВМИСНИХ АТАК	104
МАРТИНЮК В. В., РАДЕЛЬЧУК Г. І., КАШТАЛЬЯН А. С., ВЕРЖБИЦЬКИЙ Я. В. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК У ДИЗЕЛЬНЕ ПАЛИВО	111
ТУРОВСЬКИЙ О. Л. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ В ХОДІ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ	116
ЯНОВИЦЬКИЙ О. К., БАЙДИЧ Л. Е., ФОРКУН І. В. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ВОДНЮ	123
ФЕДУЛА М. В., КЛЮЦЬ Ю. П., ФОРКУН Ю. В. ПРОЕКТУВАННЯ СЕНСОРНИХ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ	127
ЛУЖАНСЬКИЙ В. І., КАШТАЛЬЯН А. С., КЛЮЦЬ Ю. П. КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОНОГО МОДУЛЯ КАСЕТНОГО ТИПУ З МІКРОСХЕМАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ	131

МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

UDC 614.88: 621.3

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-1

¹OLEKSIY YANENKO ²ANDRIY TKACHUK ²ROMAN TKACHUK

¹National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute»,

²Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, Ukraine

AUTOMATED TESTING SYSTEM FOR IMPLANTS TO REGULATE INTRAOCULAR PRESSURE

Purpose of work. The implantation of drainage devices in glaucoma is usually performed after previous unsuccessful treatments and is the patient's last chance to save his vision. The article describes the device that allows automating the process of preoperative check-up of implants of different types used for intraocular fluid withdrawal in case of glaucoma. This device will help to increase the success of the operation and help to preserve the vision of the patients with glaucoma due to the pre-test of the implants for serviceability and parameters of intraocular fluid withdrawal.

Methodology. For the realization of the goal, the authors developed a functional scheme of the automated system for measuring and controlling the parameters of the intraocular pressure regulation implants based on the microsystem technology elements.

The results. Depending on the material and hardness of the implant, there are three possible cases in which the implant opens earlier and there is a risk of hypotension to the patient's eye, later there is a risk of hypertension and the implant works in the normal pressure zone. The authors provide testing graphs of three implants of varying levels of hardness, as well as a graph of the reproducibility of the characteristics of the non-faulty implant.

Scientific innovation. The method of testing implant parameters by way of hardware overpressure creation with the possibility of automated control parameters of preoperative testing the implants is proposed.

Practical significance. The developed automated system for preoperative testing of implants, which provides:

- simplification of the scheme with the simultaneous possibility of automating the process of preoperative testing of implants of different types;
- allows getting an increase of sensitivity, measurement accuracy, and objectivity of implant parameters determination;
- determination of their suitability for use in the medical-surgical practice by the parameters of fluid withdrawal, exactly opening pressure, closing pressure and reproducibility of the characteristics during the repeated operation, which will contribute to the efficiency of the performed operations;
- reducing the time of implant check, which is limited by 2-3 minutes, and the possibility to save information about the parameters both in electronic (computer) and paper form.

Key words: glaucoma, intraocular pressure, implant, pressure measurements, testing, process automation, microsystems engineering.

¹ОЛЕКСІЙ ЯНЕНКО ²АНДРІЙ ТКАЧУК ²РОМАН ТКАЧУК

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ТЕСТУВАННЯ ІМПЛАНТАТІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

Імплантація дренажних пристроїв при глаукомі зазвичай проводиться після попередніх невдалих процедур і є останнім шансом пацієнта врятувати зір. У статті описано пристрій, що дозволяє автоматизувати процес передопераційної перевірки імплантів різного типу, що використовуються для відведення внутрішньоочної рідини у разі глаукоми. Цей пристрій допоможе підвищити успіх операції та допоможе зберегти зір пацієнтів з глаукомою завдяки попередньому тестуванню імплантів на справність та параметри виведення внутрішньоочної рідини.

Для реалізації поставленої мети автори розробили функціональну схему автоматизованої системи вимірювання та контролю параметрів імплантів регуляції внутрішньоочного тиску на основі елементів мікросистемної технології.

Залежно від матеріалу та твердості імплантата, можливі три випадки, коли імплантат відкривається раніше і існує ризик гіпотонії в оці пацієнта, пізніше існує ризик гіпертонії, і імплантат працює в зоні нормального тиску. Автори наводять графіки тестування трьох імплантів різного рівня твердості, а також графік відтворюваності характеристик несправного імплантату.

Запропоновано метод тестування параметрів імплантів шляхом апаратного створення надлишкового тиску з можливістю автоматизованого контролю параметрів передопераційного тестування імплантів.

Розроблена автоматизована система для передопераційного тестування імплантів, яка забезпечує:

- спрощення схеми з одночасною можливістю автоматизації процесу передопераційного тестування імплантів різних типів;
- отримання підвищення чутливості, точності вимірювання та об'єктивності визначення параметрів імплантату;

– визначення їх придатності для використання в лікувально-хірургічній практиці за параметрами відбору рідини, точно тиску відкриття, тиску закриття та відтворюваності характеристик під час повторної операції, що сприятиме ефективності виконуваних операцій;

– скорочення часу перевірки імплантату, який обмежений 2–3 хвилинами, та можливість збереження інформації про параметри як в електронному (комп'ютерному), так і в паперовому вигляді.

Ключові слова: глаукома, внутрішньоочний тиск, імплантат, вимірювання тиску, тестування, автоматизація процесів, інженерія мікросистем.

Introduction. Glaucoma is one of the most severe diseases in ophthalmology and often leads to loss of vision and is the second most frequently occurring disease [1]. The main cause of glaucoma is uncontrolled changes in the passage of intraocular fluid through the trabecular network; in the case of pathology, this leads to an increase in intraocular pressure (IOP) and eye nerve damage. During this disease, an important means of preserving the patient's vision is to control IOPs to take timely IOP normalization measures. Such control can be performed on an outpatient basis (one-time) or using an implanted microchip, e.g., 1.2–2.4 mm in size with regular IOP information transmission at 914 MHz or 2.2 GHz [2,3]. However, it should be noted that the use of the microchip is currently in the process of experimental research approbation and is not widespread.

The last, most effective method of IOP normalization is the implantation of drainage devices (valves), which is usually performed after previous unsuccessful treatments and is the patient's last chance to save his vision. Installation of the valve is carried out in the process of a complex surgical operation.

Molteno (Molteno Ophthalmic Ltd, New Zealand), Baerveldt (Advanced Medical Optics, USA), Ahmed (New World Medical Inc, USA), and Krupin (Hood Laboratories, USA) valves are used as implants [4]. Timely actuation of the valve and pressure reduction ensures the storage of the optic nerve in working condition.

However, some parameters of the implants may have considerable variation, it is also important to maintain their stability overtime during the usage of the product [5]. The normal range of intraocular pressure at which no pathological lesions occur and to which the implant should react is within the range of 9–21 mm Hg, but it can fluctuate, even up to 60 mm Hg. [6].

Therefore, testing existing implants before surgery is an actual task for ophthalmologists and implant designers. Evaluation of implant parameters before implantation is one of the components of successful surgical intervention and preservation of the patient's vision [7]. The testing procedure consists of measuring the pressure parameters at which the intraocular fluid is output by the implant before insertion into the human eye. It improves the selection and helps to identify deviations in the parameters of the intraocular fluid output in the implant and make predictions about its further performance when used.

Literature review. Modern methods and tools for implant operability testing provide for hardware creation of overpressure of physiological solution and its passing through the controlled valve with the use of analog or digital control device, which can significantly differ in structural construction, accuracy and resolution of pressure parameters determination. Equally, important are not only metrological parameters but also the simplicity and availability of such equipment for a preoperative check before implantation.

Currently, there are several well-known methods of testing implants for workability and measuring equipment built on their principles. Currently, there are several well-known methods of testing implants for workability and measuring equipment built on their principles.

Thus, for example, in [8] is considered testing of implants without a pressure sensor, instead of it an operator manually lifts a reservoir with a saline solution to a given programmed height. The disadvantages of this technical solution include the inaccuracy and subjectivity of the reference when setting the pressure, as well as the lack of automation.

In work [9] the device of preoperative testing has in its composition a tank with a physiological salt solution, 3-inlet splitter, analog manometer, cannula 30G (external diameter 0.3112 mm and internal diameter 0.159mm), connecting tubes, and the tank with a physiological salt solution is connected to the input of 3 inputs of the splitter, the first output of which is connected to the manometer, and the second output is connected through the cannula with the valve input. By raising or lowering the physiological salt solution tank, the ground gravity increases the pressure in the system to pass the solution through the AGV valve and fixes the pressure values of its actuation. The disadvantages of this device are the significant inaccuracy and subjectivity of the pressure reading and the assessment of the valve functionality for implantation.

The paper [10] describes two methods of preoperative testing of drainage valves, presented in the form of two protocols.

One of them realizes the influence of a change of world gravitation, and in the other overpressure is created by the engine connected to the tank with saline which exit through a connecting tube and 3-inlet splitter is connected to a pressure balancing tube, the manometer, and AGV. Insufficient sensitivity and complexity of registration of the moment of operation of the valve which depends on the professionalism of the operator, and accordingly some subjectivity in definition of implants parameters, reduces the efficiency of the definition of their suitability for use should be attributed to lacks of the considered device.

A more complicated verification system is described in [11], the excess pressure in it is created by a reservoir with saline solution in the form of an infusion pump. The created pressure is controlled by an analog manometer and at the inlet of the AGV valve - by a digital sensor. Besides, the system is also equipped with a high-speed digital camera with a microscope, used to record the flow of solution through the implant.

The disadvantage of the described device and method of verification is the significant cost and complexity due to the use of infusion pump, video camera, and microscope, which are necessary to record the time and parameters of the valve actuation, as well as the focus on the detection of fluid passage only with the implant type AGV, which limits their mass use.

Shortcomings of previous devices have been corrected in the device [12]. The system is based on a microcontroller, a stepper motor with a worm gear, a tank with saline, a microelectromechanical pressure gauge, a liquid detector, and an ADC connected accordingly.

The system provides a significant increase in the sensitivity and accuracy of implant parameters determination. At the same time, the weak point of this technical solution is the use of mechanical elements, such as a stepper motor with worm gear and a piston in a reservoir with saline. The presence of these elements limits the use of such a system more in stationary conditions at implant manufacturing enterprises or specialized ophthalmological treatment centers. However, the development of ophthalmological care and the availability of many centers requires the creation of highly accurate but affordable devices for preoperative verification and testing of such implants in clinics and outpatient clinics. Also, the testing process should be more natural and closer to the physiological processes of intraocular pressure changes.

Purpose. Based on the above-mentioned device the authors set a task to develop a simple and reliable measurement scheme. Preserving the sensitivity, accuracy, and objectivity of implant parameters determination as well as their effectiveness by determining their suitability for use in medical-surgical practice.

Methods. Fig.1 shows the authors' proposed functional scheme of the implant testing system for the regulation of intraocular pressure.

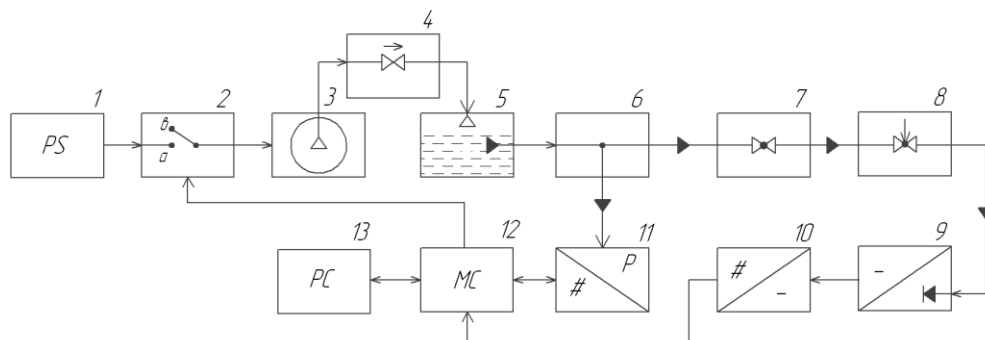


Fig. 1. Functional scheme of the implant testing system for the regulation of intraocular pressure

The system includes a power supply unit (accumulator) 1, electronic key 2, miniature compressor 3 is connected through the passage valve 4 with a reservoir with saline solution 5, 3-input splitter 6, with an electro-mechanical pressure gauge 11 with a shut-off valve of saline solution 7, and a canula with the implant 8. To the output of the implant is connected liquid detector 9 and ADC 10, which is connected to the microcontroller input 12. The first output is connected to computer input 13, and the second output is connected to electronic key control input 2.

The implant testing device for intraocular pressure regulation works as follows. First, the implant is connected to the cannula, which is connected to the stopping tap of the saline solution supply 7. The computer 13 switches on the implant testing mode, microcontroller 12 switches on the compressor 3 via the electronic key 2 to increase the pressure in the reservoir 5, due to the throughput valve 4 the air cannot return to the compressor from the reservoir. The pressure in the connection system gradually increases and is constantly monitored by a microelectromechanical pressure sensor 11, the level of pressure is constantly read by microcontroller 12 and recorded in the computer memory as a pressure graph. The system pressure rises from zero to the trigger value of the implant being tested.

When the implant is activated, the liquid appears on the implant outlet, which falls on the liquid detector 9, the opening pressure level of the implant is fixed. The signal of the detector 9 is converted into digital form via ADC 10 and is sent to the microcontroller 11, which stops the compressor 3 turning off the power supply due to its electronic key 2. The value of opening pressure from microcontroller 11 is fixed on the computer.

When the valve is opened, the pressure in the system gradually decreases, the dynamics of pressure change is constantly monitored by the microelectromechanical pressure gauge 11 and input into the computer 13. When the valve is closed, the pressure is set to a constant level, the value of closing pressure from the electromechanical pressure gauge 6 is transmitted to microcontroller 11 and input into the computer 13. With the use of the computer

program is drawn up a graph of the change of pressure of this instance of the valve and determined the working range of pressure in which the valve can operate:

$$P_3 = P_2 - P_1, \quad (1)$$

where P_1, P_2 – is the value of the opening and closing pressure of the valve.

Also, the system provides the ability to check the reproducibility of the received valve parameters, for which after the first step information is taken, multiple test cycles are activated, the average value of the dynamic range is determined, for example, for $n_{(3)}$ measurements:

$$\Sigma P_n = (P_{n1} + P_{n2} + P_{n3}) / n, \quad (2)$$

Where P_{n1}, P_{n2}, P_{n3} – pressure variation ranges for repeated 3-times measurements as well as the scattering percentage of each measurement.

The obtained values are compared with the standard ones (9–21 mm Hg), the results are summed up according to the implant conformity or non-conformity with the established norms and the testing protocol is filled in.

Fig. 2 shows the testing algorithm, which contains the steps for starting and working on the implant checking system.

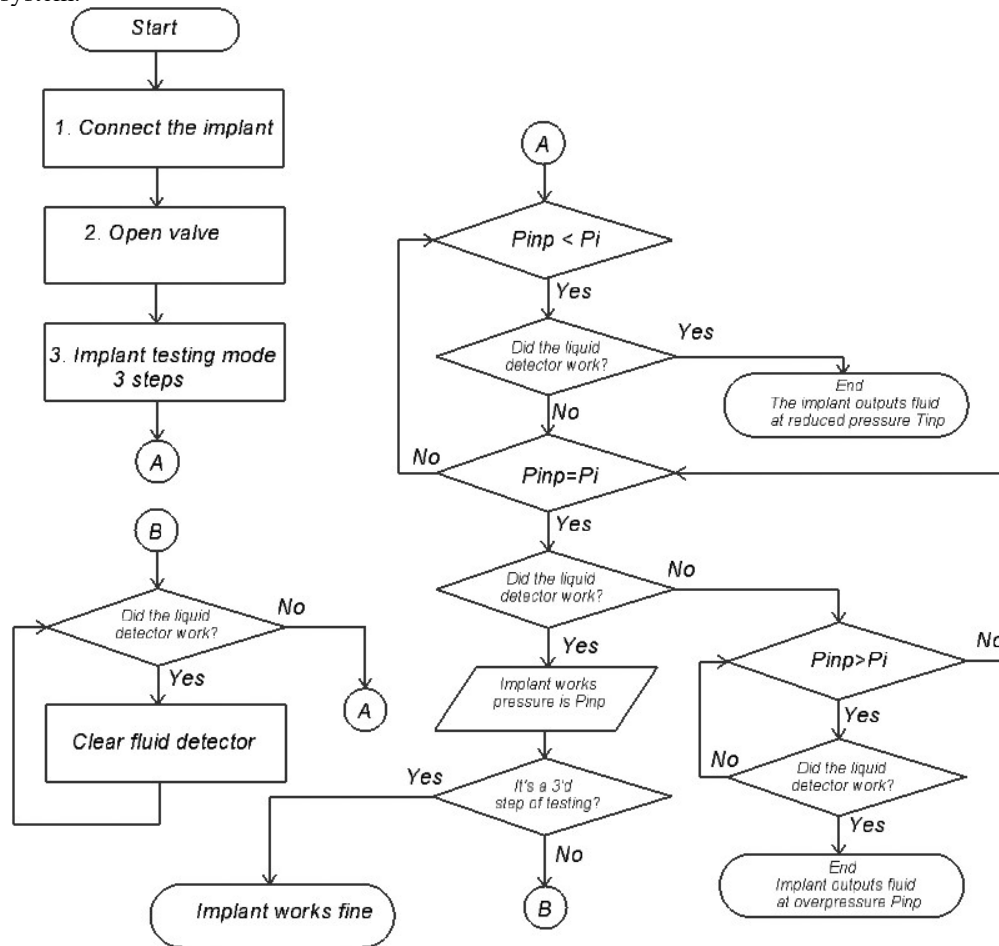


Fig. 2. Algorithm of the implant testing system for the regulation of intraocular pressure

In the first step, the operator will connect the cannula with the implant to the crane. In the second stage, the operator will open the tap. The third step starts testing the implant for which the microcontroller controls the electronic key with a compressor and increases the fluid pressure that comes to the implant inlet, feedback is provided by a microelectromechanical pressure sensor that continuously records the pressure level at 50 Hz and transmits data to the microcontroller, the second feedback is provided by the fluid detector, registers the passage of fluid through the implant.

The pressure in the above system constantly increases until the implant starts to withdraw the fluid, which is recorded by the fluid sensor. At the moment the fluid passes through the implant, the system determines the pressure level at which the implant starts to remove the test fluid, after the operation of the fluid detector, the system registers the pressure of the opening of the implant and stops the fluid supply point (1a, 1b, 1c) in Figure 2.

Open valves smoothly reduce the pressure level in the system until it is completely closed (points 2a, 2b, 2c). In the process of testing the valves depending on the quality of these products, different levels of hardness and the like etc.

Results. During the testing process, the parameters and conditions that are important for further ensuring the quality of the implants are checked and there are three options for the obtained result. Fig. 3 shows the graphs of checking the pressure parameters for three implants of different hardness levels, marked by the symbols a, b, and c.

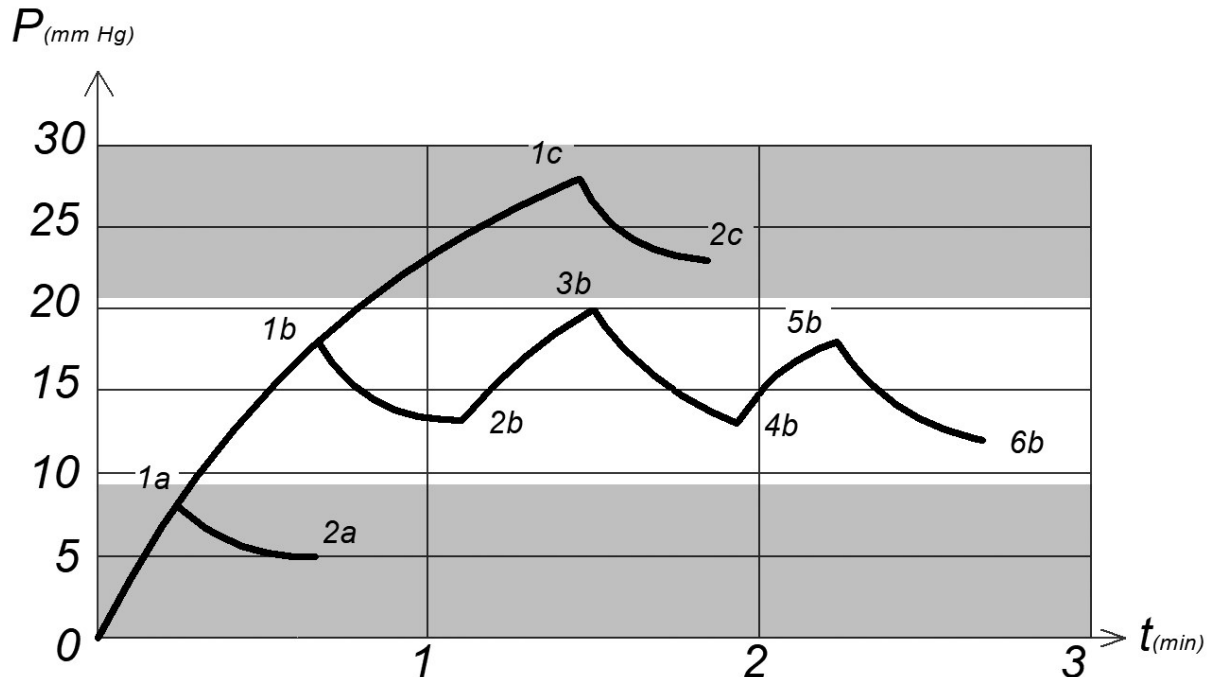


Fig. 3. Test pressure diagram of implants of different valve hardness:
 a, c – defective implants, b – functional implant

Fig. 3 Test pressure diagram of implants of different valve hardness. a, c – defective implants, b – functional implant. First implant a (Fig. 3) has a reduced level of hardness and is characterized by pressure changes from 8 mm Hg. (valve opening point 1a) to 5 mm Hg. (Closing point 2a). The testing cycle of such an implant lasts within 30–40 seconds. Activation of the liquid detector at this stage is a sign of the implant failure with the risk of hypotension for the patient's eyes and such a valve is not suitable for use.

The second implant, marked with the symbol b, has a higher hardness and therefore opens at a higher pressure level, also increases the test time to 65 seconds. The change of the pressure parameters of the second implant (Fig. 3) of the points 1b and 2b is within the normal range of 18–13 mm Hg. Activation of the fluid sensor indicates that the implant works within the normalized intraocular pressure range of 9–21 mm Hg. After determining the implant, which meets the normative requirements, the reproducibility of parameters is checked by the method of multiple repeated pressure increase. For this purpose, the operator removes the fluid from the indicator plate of the fluid detector and switches on the system of pressure increase again up to the moment of the fluid detector actuation, fixes the moment of the implant reopening in the point 3b. The signal from the detector stops the compressor, after which the open valve pressure is reduced and stabilized at point 4b. This step is then repeated (points 5b and 6b). In the case of repeatability, the valve is recognized as a quality valve due to triple testing and used for surgical treatment of a patient with glaucoma.

The third implant c (Fig. 3) is characterized by high hardness (stiffness) and change of actuation pressure within the range of 28–23 mm Hg at the points 1c and 2c, which exceeds the normal range of intraocular pressure. Activation of the liquid detector at this pressure indicates a complete malfunction of the implant. The use of such an implant indicates the risk of hypertension in the patient's eye. Реалізація автоматизованої системи для проведення тестування наявних імплантатів перед операційним хірургічним втручанням проведена з використання наступних елементів мікросистемної техніки.

Microcompressor WHALEB-100 with 1.5 V supply voltage was used to create the required pressure variation range from 0 to 30–40 mm Hg. To provide automated modes of system operation, the STM32F103RET6

chip was used as a microcontroller. An important element of the system is a pressure sensor – it is one of the functional units, which provides the possibility of automation of the verification process and the corresponding accuracy of implant testing. The ST Microelectronics LPS33HW microelectromechanical pressure sensor satisfies these requirements. The sensor has an integrated filter, a pressure reading frequency from 1 to 75 Hz, the microcontroller reads the data from the sensor via the SPI interface, and provides communication with a computer. The accuracy of the pressure measurement is 0.075 mmHg or 0.25 % at the maximum pressure in the LPS33HW. WAVGAT MH RD resistive liquid detector with 4 cm × 5 cm sensor part size, with ADC based on LM393 comparator, 5V supply voltage, and comparator response speed of 1.3 μs was used as a liquid detector. The conversion characteristic for the analog output of such a detector is a discrete function of the presence of liquid on the sensor plate of the detector w and looks:

$$\begin{cases} y = 0, & \text{at } w = 0 \\ y = 1, & \text{at } w \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

As follows from (3) on the digital output 0 or 1 is formed, in the absence or presence of liquid on the sensor, the required response sensitivity is adjusted by changing the resistance of the potentiometer.

Conclusions. The proposed system provides:

1. Simplification of the scheme with the possibility to automate the process of preoperative verification of implants of different types.
2. Allows getting higher sensitivity, measurement accuracy, and objectivity of implant parameters determination.
- 3 Determining their suitability for use in medical-surgical practice by the parameters of fluid withdrawal, namely opening pressure, closing pressure, and reproducibility of the characteristics at repeated operation, which will contribute to the efficiency of the performed operations
4. Shortened implant testing time, which is limited to 2-3 minutes, and the ability to save and store parameter information, both electronically and in paper form.

The system developed by the authors is a promising one and can be used not only for checking known types of valves but also for testing implanted radio-frequency chips [2,3], which are currently only undergoing experimental testing.

Reference

1. Kingman, Sharon. Glaucoma is second leading cause of blindness globally. Bulletin of the World Health Organization, 82 (11), 887 - 888.
2. A. Agarwal, A. Shaper, D. Rodger, M. Humayun, Y. Tai and A. Emami, "A wireless, low-drift, implantable intraocular pressure sensor with parylene-on-oil encapsulation," 2018 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), San Diego, CA, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/CICC.2018.8357049
3. H. Bhamra, J. Tsai, Y. Huang, Q. Yuan, J. V. Shah and P. Irazoqui, "A Subcubic Millimeter Wireless Implantable Intraocular Pressure Monitor Microsystem," in IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 11, no. 6, pp. 1204-1215, Dec. 2017. doi: 10.1109/TBCAS.2017.2755596
4. Glaucoma Surgery: Treatment and Techniques / Luigi Caretti, Lucio Buratto and others USA: Springer International Publishing, 2018. – 133 p.
5. Ткачук А. Недоліки дренажних пристроїв для виведення внутрішньоочної рідини при глаукомі / Ткачук Р. А., Ткачук А. А., // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій“ присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 р. – Т. : ФОП Паляниці В. А., 2019. — С. 146–148. — (Біомедична Інженерія).
6. The Glaucoma Book / Paul N. Schacknow, John R. Samples – USA: Springer, 2010. – 1043 p.
7. Francis, B. (1998). Characteristics of glaucoma drainage implants during dynamic and steady-state flow conditions. Ophthalmology, 105(9), 1708–1714. doi: 10.1016/S0161-6420(98)99042-X
8. Patent US № 05656026, A61 1/00, 12.08. 1997 “Method of in vitro testing one-way pressure gradient limiting valved glaucoma drainage implants”
9. Cheng, J., Beltran-Agullo, L., Buys, Y. M., Moss, E. B., Gonzalez, J., & Trope, G. E. (2016). Flow Test to Predict Early Hypotony and Hypertensive Phase After Ahmed Glaucoma Valve (AGV) Surgical Implantation. Journal of Glaucoma, 25(6), 493–496. doi:10.1097/jg.0000000000000318
10. Porter, J. M., Krawczyk, C. H., & Carey, R. F. (1997). In Vitro Flow Testing of Glaucoma Drainage Devices. Ophthalmology, 104(10), 1701–1707. doi:10.1016/s0161-6420(97)30077-3
11. Choudhari, N. S., Badakere, S. V., Richhariya, A., Chittajallu, S. N. S. H., Senthil, S., & Garudadri, C. S. (2018). Is Ahmed Glaucoma Valve Consistent in Performance? Translational Vision Science & Technology, 7(3), 19. doi:10.1167/tvst.7.3.19
12. Andriy Tkachuk "Automated implant testing system for intraocular pressure adjustment," / Andriy Tkachuk, Roman Tkachuk, Oleksiy Yanenko and Konstantin Shevchenko, 2020 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2020.

Надійшла / Paper received: 19.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 004.932.2

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-2

ПОЛОВИНКО І. І.¹, КАШУБА А. І.²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка

²Національний університет «Львівська політехніка»

КОЛІРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОСМОЗНІМКІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВІДБИТОГО ТА РОЗСІЯНОГО СВІТЛА

Представлена робота присвячена проблемі обробки космознімків, що є однією з найбільш актуальних галузей data science в області добування корисної інформації з великого масиву. На даний час існує ряд потужних комп'ютерних програм для обробки космознімків, які, однак, не завжди враховують всі особливості зображень, а також, як правило, їх використання є досить трудомістким. У роботі використана RGB модель, у якій кожен колір представляється червоними, зеленими і синіми первинними компонентами. Реалізована програма для обробки зображень мовою C#, завдяки якій можна ефективно змінювати зображення з метою покращення його сприйняття зором. Об'єктом дослідження, для колірної обробки, було використано космознімки річки Серет. У видимій області спектру виділено рівномірні тематичні зони, які відповідають за наявність води, рослинності та ґрунту. Рівномірність вибраної ділянки підтверджена колірною та гістограмою обробкою. Подібна картина, але меншої інтенсивності, спостерігається при реєстрації випромінювання, яке походить від фрагменту річки, що покритий зеленими насадженнями. При цьому синя складова практично непомітна, хоча на гістограмі її інтенсивність порівняльна з іншими складовими. Отриманий результат пояснюється релієвським розсіянням на молекулах води розташованих у поверхневих шарах. Дане явище можна пояснити вищою інтенсивністю (майже у п'ять разів) синього світла в порівнянні з червоним.

Ключові слова: космознімки, колірні моделі, гістограми, відбивання та розсіяння світла

POLOVYNKO I. I.¹, KASHUBA A. I.²

¹Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

²Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

INFLUENCE OF THE OF REFLECTION AND SCATTERING LIGHT ON COLOR CONVERSIONS OF THE SATELLITE IMAGERY

With the development of computer technology there are new opportunities for better image processing. Moreover, this applies not only to the visible range of electromagnetic radiation but also to the infrared, ultraviolet, X-ray and microwave range. However, the most effective remains the registration in the visible range (430-790 nm). This is primarily due to the structure of the human eye, which can distinguish up to $1.6 \cdot 10^7$ different color shades. It should also be noted that the qualitative processing of optical images is a prerequisite for machine vision.

The paper deals with the problem of processing satellite images, which is one of the most relevant fields of data science in the field of extracting useful information from a large array. There are a number of powerful computer programs for processing satellite images. However, don't always take into account all the features of images, and their use is quite laborious, as a rule. The RGB model is used in which each color is represented by red, green and blue primary components. In this work was released the computer program (on programming language of C#) which can be used to effectively modify images to improve their visual perception. As an example, a satellite image of the Seret River was used for RGB processing. The uniform thematic zones responsible for the presence of water, vegetation and soil were detection in visible region of the spectrum. The uniformity of the selected area is confirmed by color and histogram processing. A similar situation are realized when the radiation is emitted, which originates from a fragment of a river covered with green space, but the less intensity. In this case, the blue component is almost invisible. Although on the histogram its intensity is comparable to other components. The result is explained by the Rayleigh scattering on the surface molecules of water. The intensity of blue light is characterized by an intensity almost five times higher than red.

Keywords: satellite imagery, color models, histograms, reflection and scattering light

Вступ. Постановка задачі. Обробка космознімків є одним з найбільш актуальних галузей data science в області отримання корисної інформації з великого масиву даних [1–4]. З цієї метою широко використовуються технології машинного навчання. Ринок космічних знімків високого роздільного змінюється дуже швидко. Однак, сама наявність таких знімків ще не значить, що є можливість їх успішної обробки. Космічні знімки високої роздільної здатності володіють рядом особливостей пов'язаних з їх природою: складна геометрія знімальної камери, вузька смуга огляду і як наслідок малий розмір кадру, складність отримання стереозображення.

Традиційно колірна обробка космознімків відбувається шляхом спектральної оптичної фільтрації, яка базується на оптичному принципі взаємності. Цей принцип передбачає, що при проходженні променів через оптичну систему вони залишаються взаємними, тобто при зміні руху променів на зворотній, їх взаємне розміщення не змінюється [5]. Це також стосується розкладу випромінювання на спектральні складові. Разом з тим слід відмітити, що принцип взаємності не завжди має місце і тому до його використання треба підходити з обережністю. Так, у випадку хвильового поширення світла у тонких плівках, вхід та вихід випромінювання не є симетричним [6]. Робота сенсорів також залежить від

різноманітних факторів, наприклад: в процесі отримання зображення за допомогою ПЗЗ (прилад із зарядовим зв'язком) матриці виникають шуми. Причому основними факторами, що впливають на величину шумів є рівень освітленості та температура. В процесі передачі зображення, воно може також спотворюватись завадами, що виникають в каналах зв'язку.

На даний час, існує ряд потужних комп'ютерних програм для обробки космознімків [2–3]. Сюди відноситься пакет ERDAS IMAGINE який містить у своєму інструментарії як моделі вбудованих камер що описують поширені камери, так і моделі якими можна описувати панорамні камери, PHOTOVOD та ін. Однак ці програми не завжди враховують всі особливості зображень, а також, як правило їх використання є досить трудомістке. Тому, їх застосування для тих випадків коли необхідно виділити лише деяку певну особливість космознімків, є малоефективним.

Попередні роботи. У представленій роботі запропоновано метод обробки космознімків, який базується на колірній обробці зображень з наступним зняттям гістограми. У роботі використана RGB модель [7], у якій кожен колір представляється червоним, зеленим і синім первинними основними кольорами (компонентами).

При обробці космознімків у видимій області спектру виділяються тематичні зони, які пов'язані із колірним аналізом [7]. Так, синій колір на зображенні відповідає за наявність води, зелений – за рослинність, та червоний - за наявність ґрунту (див. таблицю 1).

Таблиця 1

Тематичні спектральні зони [7]

Канали зображення	Спектральні канали знімку	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R(682nm)	Червоний			Червоний
G(532nm)	Зелений		Зелений	
B(465nm)	Синій	Синій		

Метою роботи є дослідження ефективності використання RGB моделі [7] для аналізу космознімків та реалізація даної методики на одній із мов програмування.

Основна частина. Експериментальні дослідження. У представленій роботі була реалізована програма для обробки зображень мовою C#. Дана програма дозволяє змінювати зображення для покращення їх вигляду та сприйняття зором. Основна функція програми полягає у можливості виділення із зображення одного з основних кольорів: червоного, синього або зеленого. Крім того, використовуються такі ефекти, як зміна яскравості, контрасту, перевід зображення в негатив та у градації сірого. Як приклад, для колірної обробки використано русло річки Серет (рис. 1, 2). На рис. 1 (а) показано фрагмент річки, на якому приблизно рівномірно проявляються області води, зеленої рослинності та ділянки ґрунту.

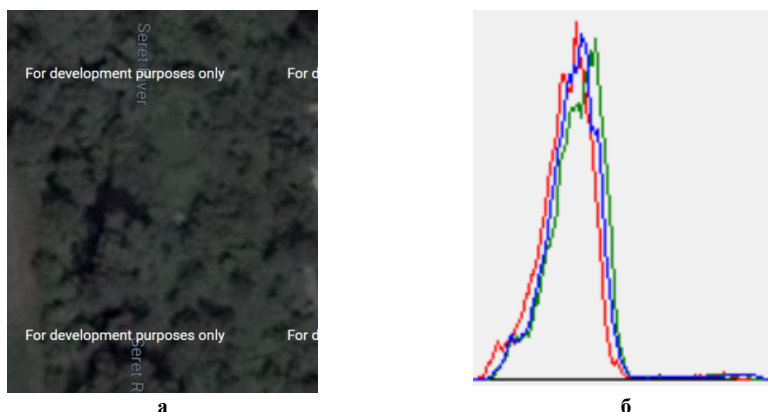


Рис. 1. Фрагмент річки Серет (а) та її гістограма (б)

На рис. 1 (б) показано гістограму обраної ділянки річки (рис. 1(а)). Вказана гістограма представляє залежність кількості пікселів від величини зареєстрованої ними інтенсивності падаючого випромінювання. Області води, рослинного покриття та ґрунту позначені синім, зеленим та червоним кольором відповідно. Інтенсивність сигналу, що поступає від тематичних зон є приблизно однакова (див. рис. 1 (б)).

Подібна картина, але меншої інтенсивності, спостерігається при реєстрації випромінювання, яке походить від фрагменту річки, що покритий зеленими насадженнями (див. рис. 3, 4). Як видно з рис. 3(б), всі ділянки спектру приблизно однаково представлені на гістограмі. Однак, якщо подивитись на спектральні складові то бачимо, що зелена та червона складові проявляється досить чітко, тоді як синя складова практично непомітна.

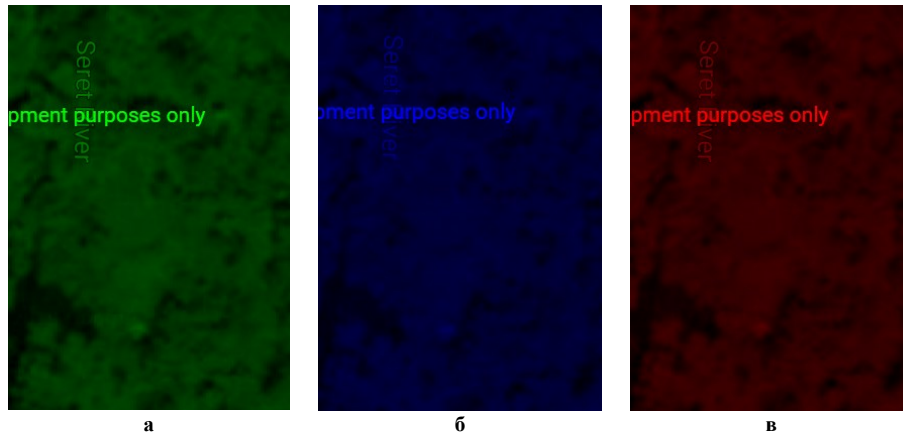


Рис. 2. Зображення рис. 1(а) у зеленій (а), синій (б) та червоній (в) спектральних областях

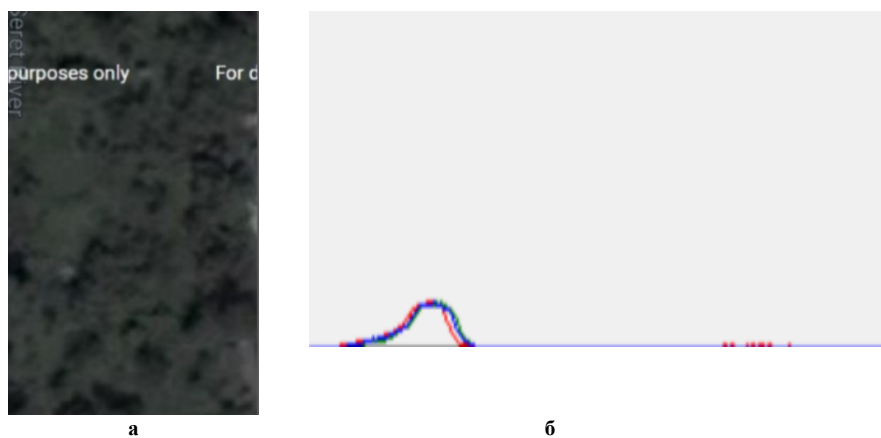


Рис. 3. Ділянка річки покрита зеленню (а) та її гістограма (б)

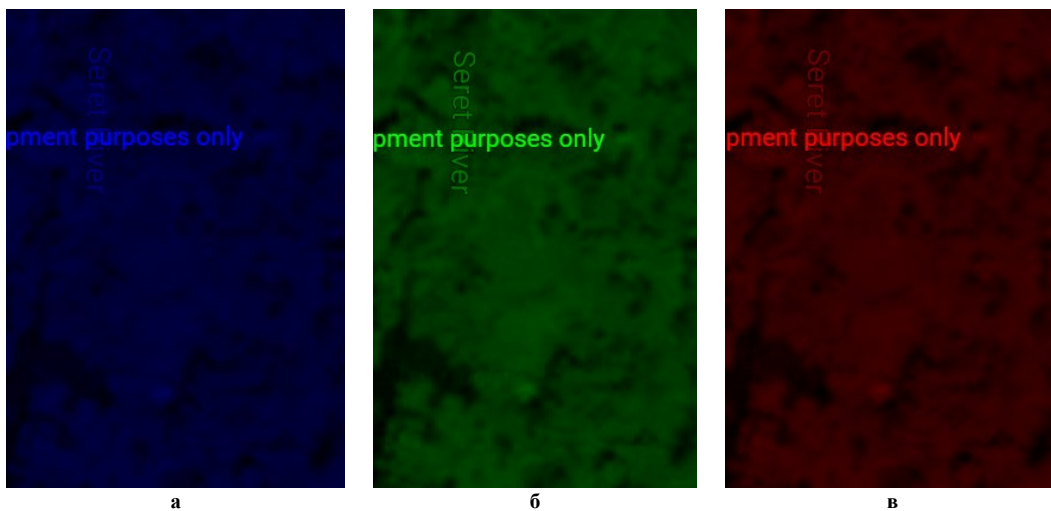


Рис. 4. Зображення рис. 3(а) у синій (а), зеленій (б) та червоній (в) спектральних областях

Щоби пояснити отриманий результат, необхідно врахувати, що у нашому випадку зображення формується за допомогою двох ефектів – відбивання та розсіяння. Для опису ефектів пов'язаних з відбиванням будемо вважати, що зображення описується двомірною функцією $f(x,y)$. Причому, значення функції f у точці (x,y) є додатною скалярною величиною, фізичний зміст якої визначається джерелом зображення. Якщо зображення генерується в результаті певного фізичного процесу, то значення інтенсивності пропорційне енергії випромінювання цього джерела, а отже функція $f(x,y)$ має бути скінченною. Тобто:

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (1)$$

В цьому випадку функція $f(x, y)$ характеризується двома компонентами: величиною світлового потоку, що падає на досліджувану поверхню і відносною частиною світлового потоку, відбитого від об'єкту. Ці величини, відповідно, називаються освітленістю та коефіцієнтом відбивання і позначаються як $i(x, y)$ і $r(x, y)$. Добуток цих функцій дає функцію, що описує зображення:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (2)$$

де

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (3)$$

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (4)$$

У випадку кольорових зображень функцію $f(x, y)$ можна розглядати як таку, що складається з трьох складових кольорів кожний з яких описується у рівнях сірого для кожної точки зображення. При цьому:

$$l = f(x_0, y_0) \quad (5)$$

Із співвідношень (2)–(4) випливає:

$$L_{\min} \leq l \leq L_{\max} \quad (6)$$

Інший ефект, який виникає при попаданні світла на об'єкт, це розсіювання на сферичних частинках, розміри яких є малими у порівнянні з довжиною хвилі падаючого світла. Стретт Д.В. (лорд Релей) показав, що для падаючого світла з інтенсивністю i_0 , інтенсивність розсіяного світла i визначається за формулою:

$$i = i_0 \frac{9\pi^2 \varepsilon_0^2 N V^2}{2\lambda^4 D^2} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (7)$$

де N – число частинок в об'ємі, які зазнають розсіювання, V та ε – об'єм та діелектрична проникливість частинки, ε_0 – діелектрична проникливість середовища в якому розміщені частинки [8–9], θ – кут розсіювання, D – віддаль від об'єму, що розсіюється до точки спостереження.

Як видно із представленої формули, інтенсивність розсіяного світла i обернено пропорційна четвертій ступені довжини хвилі, що знаходиться у відповідності з експериментальними дослідженнями.

Формула (7) також містить множник $\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right)^2$, який характеризує ступінь оптичної неоднорідності.

Зокрема, якщо $\varepsilon = \varepsilon_0$ то оптична неоднорідність зникає [9], а разом з нею і розсіювання.

Виходячи із наведених міркувань, отримані результати можна пояснити наступним чином: якщо спостерігаються сцени відносно великих розмірів із рівномірно розподіленими тематичними зонами, то в отриманому зображенні інтенсивність спектральних складових є приблизно однакою. При цьому інтенсивність зображення описується формулою (2), а гістограма відображає приблизно рівномірний розподіл.

У випадку зображення представленого на рис. 3(а), де синя складова закрита зеленою поверхнею, слід було очікувати значне зменшення відбивання у синій області. Це підтверджується спектральними складовими, представленими на рис. 4, де синьої складової практично не помітно. Разом з тим, на гістограмі інтенсивність синьої складової є порівняно незначною із зеленою та червоною. Отриманий результат пояснюється тим, що для синьої складової суттєву роль починає відігравати ефект розсіювання, що описується формулою (7). Розсіювання відбувається на молекулах води, що знаходяться у приповерхневому шарі у вигляді пари. Розміри молекул води (~0,3 нм) є суттєво меншими за довжину хвилі світлового випромінювання у видимій області (450 – 700 нм) спектру. Для навколишнього середовища $\varepsilon_0 = 1$, а для води $\varepsilon = 81$, тому множник $\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right)^2$ у формулі (7) суттєво не вплине на величину розсіювання.

Таким чином, основний вплив буде здійснювати частина виразу (7):

$$i' = \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4} \quad (8)$$

Таблиця 2

Відносна інтенсивність світла розсіяного малими частинками для основних кольорів

λ , нм	$i' / i'_{\text{черв}}$
682-червоний	1
532-зелений	3,7
465-синій	4,6

В таблиці 2 представлено розрахунки величини i' для зеленого та синього кольорів по відношенню до червоного. Як видно з цієї таблиці, інтенсивність розсіяння світла синього кольору значно більша ніж для червоного та зеленого. Це пояснює появу на гістограмі синьої складової з інтенсивністю співмірною із зеленою та червоною складовими.

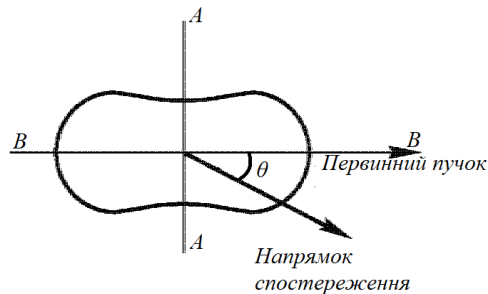


Рис. 5. Індикатриса розсіяння світла частинками, розміри яких є малими у порівнянні з розмірами довжини хвилі

Вираз (8) також пояснює той факт, чому фільтрація за допомогою синього фільтра приводить практично до зникнення самого зображення. Очевидно, що на зображенні спостерігається відбите світло, в той час, як на нього накладається розсіяне. Як видно з рис. 5, де зображена індикатриса розсіяння, світло розсіюється практично рівномірно під різними кутами. При цьому виникає синій фон, який пізніше проявляється на гістограмі у вигляді пікселів різної інтенсивності.

Висновки. Розглянуто метод RGB дослідження та аналізу космознімків природних поверхонь. Об'єктом дослідження було обрано космознімки річки Серет. На мові програмування C# розроблено програму для аналізу зображень із використанням заявленого методу.

В результаті досліджень було отримано експериментальні гістограми. Їхній аналіз проводився на основі ефектів відбивання та розсіяння світла. У випадку розгляду об'єктів відносно великих розмірів із рівномірно розподіленими тематичними зонами інтенсивність спектральних складових є приблизно однакова, а гістограма відображає приблизно рівномірний розподіл. Встановлено, що інтенсивність розсіяння світла синього кольору значно більша ніж для червоного та зеленого. Отриманий результат пояснюється тим, що для синьої складової суттєву роль починає відігравати ефект розсіяння.

Розглянутий метод RGB може бути використаний для виявлення води покритої зеленими насадженнями, що є актуальним завданням сьогодення під час моніторингу навколишнього середовища.

Література

1. Sanchez J. Space image processing / J. Sanchez, M.P. Canton. — CRC Press. — 1998. — 440.
2. Наумов С.В. Особенности обработки космических снимков высокого разрешения / С.В. Наумов // ГИС и ДДЗ. — 2001. — № 2. — с. 17.
3. Сергеев В.В. Анализ и обработка изображений получаемых при наблюдении Земли из космоса / В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. — 2006. — № 29. — С. 43-57.
4. Polovynko, I., Kashuba, A. (2019). Method of space image improvement by using spatial optical mask and frequency filters, Electronics and information technologies, 12, 55–63. DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.12.6>
5. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003. — 848.
6. Integrated optics / Editors: Tamir, T. (Ed.). — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975. — p. 318. ISBN 978-3-662-43208-2. DOI: 10.1007/978-3-662-43208-2
7. Gonzales R. Digital image processing (2th) / R. Gonzales, R. Woods. — Prentice Hall. — 2017. — 802.
8. Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Petrus R.Yu., Semkiv I.V., Ukrainets N.A. (2020). Simulation the spectral dependence of the transmittance for semiconductor thin films, Physics and chemistry of solid state, Vol.21. — №1. — P. 57-60.
9. Petrus R.Yu., Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Semkiv I.V., Zmiiivska E.O., Lys R.M. (2019). Optical Properties of Materials for Solar Energy Based on Cadmium Chalcogenides Thin Films, Physics and chemistry of solid state, Vol.20. — №4. — P. 367-371.

Reference

1. Sanchez J. Space image processing / J. Sanchez, M.P. Canton. — CRC Press. — 1998. — 440.
2. Naumov S.V. Osobennosti obrabotki kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya / S.V. Naumov // GIS i DDZ. — 2001. — № 2. — s. 17.
3. Sergeev V.V. Analiz i obrabotka izobrazheniy poluchaemykh pri nablyudenii Zemli iz kosmosa / V.V. Sergeev // Kompyuternaya optika. — 2006. — № 29. — S. 43-57.
4. Polovynko, I., Kashuba, A. (2019). Method of space image improvement by using spatial optical mask and frequency filters, Electronics and information technologies, 12, 55–63. DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.12.6>
5. Landsberg G.S. Optika / G.S. Landsberg. — M.: FIZMATLIT. 2003. — 848.
6. Integrated optics / Editors: Tamir, T. (Ed.). — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975. — p. 318. ISBN 978-3-662-43208-2. DOI: 10.1007/978-3-662-43208-2
7. Gonzales R. Digital image processing (2th) / R. Gonzales, R. Woods. — Prentice Hall. — 2017. — 802.
8. Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Petrus R.Yu., Semkiv I.V., Ukrainets N.A. (2020). Simulation the spectral dependence of the transmittance for semiconductor thin films, Physics and chemistry of solid state, Vol.21. — №1. — P. 57-60.
9. Petrus R.Yu., Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Semkiv I.V., Zmiiivska E.O., Lys R.M. (2019). Optical Properties of Materials for Solar Energy Based on Cadmium Chalcogenides Thin Films, Physics and chemistry of solid state, Vol.20. — №4. — P. 367-371.

Надійшла / Paper received: 22.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 624.012.45:620.179.16
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-3

МАЩЕНКО В. А.
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПОЛІМЕРНОГО АУКСЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРЬОХ ТИПІВ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

У статті розглянуто три випадки визначення комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні у ньому поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних хвиль.

На основі співвідношень теорії пружності і експериментальних значень швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль і коефіцієнтів їх поглинання проведені розрахунки дійсної та уявної частини коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану. Експериментальні значення швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль і коефіцієнтів їх затухання були визначені за допомогою імпульсного імерсійного ультразвукового методу.

Отримано розв'язок рівняння Релея при поширенні у ауксетик поперечної та поверхневої акустичних хвиль. Використання рівняння Релея та модельних підходів до процесів поглинання акустичних хвиль дозволило отримати співвідношення та характеристичні рівняння для розрахунку складових комплексного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні у ньому, відповідно, поверхневої та поперечної хвиль і поверхневої та поздовжньої хвиль. Запропоновано конструкцію експериментального стенду для збудження та прийому поверхневих хвиль Релея у полімерному ауксетикі з коефіцієнтом Пуассона близьким до мінус одиниці. Розроблено методику вимірювань для визначення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея і коефіцієнту її поглинання та перевірки адекватності отриманих експериментальних даних.

Аналіз отриманих значень дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану вказує на адекватність запропонованих модельних представлень і хорошу відтворюваність результатів при розрахунках на основі парних експериментів.

Ключові слова: поздовжня, поперечна та поверхнева акустичні хвилі, швидкість поширення хвилі, рівняння Релея, коефіцієнт поглинання хвилі.

MASHCHENKO V.
Odessa state academy technical regulations and quality

METHOD DETERMINATION OF THE DYNAMIC POISSON'S RATION OF POLYMER AUXETIC USING THREE TYPES OF ACOUSTIC WAVES

The article considers three cases of determining the complex dynamic Poisson's ratio of a polymeric auxetic with the propagation of longitudinal, transverse and surface acoustic waves.

Based on the relations between the theory of elasticity and experimental values of the propagation velocities of longitudinal and transverse waves and their absorption coefficients, calculations of the real and imaginary part of the Poisson's ratio for thermoplastic polyurethane are performed. The experimental values of the propagation velocities of longitudinal and transverse waves and their attenuation coefficients were determined using the pulsed immersion ultrasonic method.

The solution of the Rayleigh equation for the propagation in auxetic transverse and surface acoustic waves into auxetics is obtained. The use of Rayleigh equations and model approaches to acoustic wave absorption processes allowed to obtain relations and characteristic equations for calculating the components of the complex Poisson's ratio of polymeric auxetic with the propagation of surface and transverse waves and surface and longitudinal waves, respectively.

The design of an experimental stand for excitation and reception of Rayleigh surface waves in a polymer auxetic with a Poisson's ratio close to minus one is proposed. A measurement technique has been developed to determine the propagation velocity of the Rayleigh surface wave and its absorption coefficient and to verify the adequacy of the obtained experimental data.

The analysis of the obtained values of the real and imaginary parts of the complex Poisson's ratio for thermoplastic polyurethane indicates the adequacy of the proposed model representations and good reproducibility of the results in calculations based on pair wise experiments.

Keywords: longitudinal, transverse and surface acoustic waves, wave propagation velocity, Rayleigh equation, wave absorption coefficient.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток техніки тісно пов'язаний з широким застосуванням в'язкопружних полімерних матеріалів із необхідними механічними характеристиками. В'язкопружність передбачає наявність комплексних динамічних модулів пружності: модуля Юнга (E^*), модуля зсуву (μ^*), а вимірювання величин E^* , μ^* пов'язані із динамічними навантаженнями зразків полімерних матеріалів.

До числа найбільш цікавих і перспективних конструкційних матеріалів з точки зору їх поведінки у динамічних силових полях відносяться полімери та композиційні матеріали на їх основі із від'ємним значенням коефіцієнта Пуассона – полімерні «ауксетики» [1–2].

Крім динамічних модулів пружності, однією із основних характеристик таких матеріалів є комплексний коефіцієнт Пуассона ($\nu^* = \nu' - i\nu''$) [3]. Значення дійсної та уявної частин величини ν^* рідко декларуються виробником конструкційних полімерних матеріалів, тому проблема його прямого вимірювання або визначення на основі інших параметрів фактично є досить актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга для різних типів ауксетиків обчислювалися переважно за допомогою аналітичних методів [4–6] або експериментальних вимірювань на стиск та розтяг [7–10]. Дисипації енергії під час деформацій визначалися при динамічних навантаженнях зразів [5, 7–10] або балістичних випробуваннях [11].

Запропоновані аналітичні та експериментальні методи не в повній мірі дають можливість визначити складові комплексного коефіцієнта Пуассона та механічні характеристики ауксетиків. В такому випадку достовірність експериментальних значень відповідних величин може бути підтверджена за допомогою хвильових експериментів, що відповідають часу динамічного навантаження порядку декількох мікросекунд – часу проходження ультразвукової (УЗ) хвилі через зразок ауксетика.

Формулювання мети дослідження. З використання модельних підходів до процесів поширення та поглинання поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних ультразвукових хвиль показати можливість визначення дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика на основі співвідношень теорії пружності та рівняння Релея при відомих експериментальних значеннях швидкостей їх поширення та коефіцієнтів поглинання.

Виклад основного матеріалу. Найбільш інформативними параметрами, які дозволяють визначати механічні характеристики в'язкопружного матеріалу є швидкості поширення акустичних УЗ-коливань різного типу. Використання методів збудження та прийому трьох типів хвиль: поздовжньої (I), поперечної (t) та поверхневої акустичної хвилі (ПАХ) Релея (R) і вимірювання швидкостей їх поширення (v_I , v_t , v_R) в ауксетиках дозволяє визначати дійсну та уявну частини величини v^* .

Поздовжня та поперечна хвилі. При відомих значеннях v_I та v_t дійсну частину коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика обчислюють за таким співвідношенням [12]:

$$v' = \frac{2 - \left(\frac{v_I}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_I}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (1)$$

Для визначення v'' скористаємося співвідношенням теорії пружності, яке пов'язує величини E^* , μ^* і коефіцієнт Пуассона v^* [13],

$$v^* = \frac{E^*}{2\mu^*} - 1 \quad (2)$$

та співвідношеннями для визначення уявних частин модуля Юнга (E'') і модуля зсуву (μ'') на при іммерсійних УЗ-вимірюваннях [14]:

$$E'' = \rho v_I^2 \frac{\frac{2\alpha_I v_I}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_I^2 v_I^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (3)$$

$$\mu'' = \rho v_t^2 \frac{\frac{2\alpha_t v_t}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу; ω – циклічна частота ультразвукової хвилі; α_I і α_t – коефіцієнти поглинання поздовжньої і поперечної УЗ-хвиль.

З врахуванням (3) та (4) співвідношення (2) для v'' запишеться таким чином:

$$v'' = \frac{v_I^3 \alpha_I (\omega^2 + \alpha_t^2 v_t^2)^2}{2 v_t^3 \alpha_t (\omega^2 + \alpha_I^2 v_I^2)^2} - 1. \quad (5)$$

Поперечна та поверхнева хвилі. Рівнянням, що пов'язує швидкості поширення трьох типів хвиль (поздовжньої, поперечної та поверхневої) є рівняння Релея [15]:

$$\left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^2 = 4 \left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Рівняння (6) можна представити у поліномному вигляді [16]:

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0, \quad (7)$$

де $\eta = \frac{v_R}{v_t} = \frac{k_t}{k_R}$; $\xi = \frac{v_t}{v_l} = \frac{k_l}{k_t}$; k_l ; k_t ; k_R – хвильові числа відповідно поздовжньої, поперечної та релєївської хвилі.

В діапазоні від'ємних значень v рівняння (7) для відношення швидкості ПАХ Релея до швидкості поперечних хвиль має наступний розв'язок:

$$\frac{v_R}{v_t} = \frac{4}{3} \left(\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3} \cos \left(\frac{1}{3} \left(\arccos \left(\frac{45\xi^2 - 17}{2\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3}} \right) + 2\pi \right) \right) + 2 \right), \quad (8)$$

примочу $\xi^2 = \frac{2v - 1}{2v - 2}$.

Розглянемо пружне ауксетик-середовище з втратами, де хвильові числа є комплексними величинами:

$$k_l^* = k_l' + ik_l''; \quad k_t^* = k_t' + ik_t''; \quad k_R^* = k_R' + ik_R''. \quad (9)$$

Нехай затухання поздовжніх і поперечних хвиль мале ($k_l' \gg k_l'', k_t' \gg k_t''$) і однакове в усіх точках ауксетик-середовища. В такому випадку комплексні хвильові числа k_l^* , k_t^* , k_R^* представимо у вигляді:

$$k_l^* = k_l'(1 + i\alpha); \quad k_t^* = k_t'(1 + i\beta); \quad k_R^* = k_R'(1 + i\gamma), \quad (10)$$

де $\alpha = \frac{k_l''}{k_l'}$; $\beta = \frac{k_t''}{k_t'}$; $\gamma = \frac{k_R''}{k_R'}$ – малі дійсні поправки, що чисельно рівні коефіцієнтам поглинання α_l , α_t

та ПАХ Релея (α_R) на довжині відповідної хвилі (λ_l ; λ_t ; λ_R):

$$\alpha = \alpha_l \lambda_l; \quad \beta = \alpha_t \lambda_t; \quad \gamma = \alpha_R \lambda_R. \quad (11)$$

Для визначення v' , v'' повернемося до характеристичного рівняння (7), яке при комплексних k_l^* , k_t^* , k_R^* має такий вигляд:

$$\eta'^6 \frac{(1 + i\beta)^6}{(1 + i\gamma)^6} - 8\eta'^4 \frac{(1 + i\beta)^4}{(1 + i\gamma)^4} + 8\eta'^2 \frac{(1 + i\beta)^2}{(1 + i\gamma)^2} \left(3 - 2|\xi^*|^2 \right) - 16 \left(1 - |\xi^*|^2 \right) = 0, \quad (12)$$

де $\eta^* = \eta' + i\eta''$; $|\eta^*|^2 = \frac{|k_t^*|^2}{|k_R^*|^2}$; $\xi^* = \xi' + i\xi''$; $|\xi^*|^2 = \frac{|k_l^*|^2}{|k_t^*|^2}$.

Прирівнюючи до нуля дійсну і уявну частини рівняння та нехтуючи членами порядку α^2 , β^2 , γ^2 і вище отримаємо наступні розв'язки для ξ' , ξ'' комплексного параметра ξ^* :

$$\xi'^2 = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 24\eta'^2 - 16}{16(\eta'^2 - 1)}; \quad (13)$$

$$\xi''^2 = \frac{3\eta'^6\beta - 8\eta'^4(2\beta + \gamma) + 24\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}{16\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}. \quad (14)$$

Враховуючи, що

$$\xi'^2 = \frac{2v' - 1}{2v' - 2} \quad (15)$$

співвідношення (13) для визначення v' переписується таким чином:

$$v' = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 16\eta'^2 - 8}{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 8\eta'^2}, \quad (16)$$

Значення уявної частини комплексного v^* будемо визначати при відомих v' , ξ'^2 та ξ''^2 із рівняння:

$$\xi'^2 + \xi''^2 = \frac{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 1}{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 2}. \quad (17)$$

Поздовжня та поверхнева хвилі. Розглянемо нову комплексну змінну ζ^* ($\zeta^* = \zeta' + i\zeta''$), яка рівна

$|\zeta^*|^2 = \frac{|k_l^*|^2}{|k_R^*|^2}$. Характеристичне рівняння (7) в такому випадку буде мати такий вигляд:

$$\frac{\zeta'^6}{(|\xi^*|^2)^3} \frac{(1+i\alpha)^6}{(1+i\gamma)^6} - 8 \frac{\zeta'^4}{(|\xi^*|^2)^2} \frac{(1+i\alpha)^4}{(1+i\gamma)^4} + 8 \frac{\zeta'^2}{|\xi^*|^2} \frac{(1+i\alpha)^2}{(1+i\gamma)^2} (3-2|\xi^*|^2) - 16(1-|\xi^*|^2) = 0, \quad (18)$$

Для знаходження дійсної та уявної частини комплексного коефіцієнта Пуассона v^* потрібно, в такому випадку, чисельно розв'язувати наступні рівняння відносно ξ'^2 та ξ''^2 при відомому значенні ζ'^2 :

$$16(\xi'^2)^4 - 16(\zeta'^2 + 1)(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(\xi'^2) + \zeta'^6 = 0; \quad (19)$$

$$48\gamma(\xi'^2)^4 - 16\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^3 - 48\gamma(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(2\alpha + \gamma)(\xi'^2) + 3\alpha\zeta'^6 = 0. \quad (20)$$

Величини v' та v'' знаходимо із співвідношень (15) і (17).

Результати та обговорення. Вимірювання швидкостей поширення v_l , v_t та коефіцієнтів їх поглинання α_l , α_t проводили для термопластичного поліуретану (ТПУ), синтезованого на основі 4,4-дифенілметандіізоціанату, 1,4-бутандіола і поліокситетрамітиленгліколю з ММ = 1500 за методикою роботи [2] при частоті ультразвуку $\omega = 1,884$ МГц. Результати вимірювань v_l , v_t та значення v' , v'' представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні значення швидкостей поширення поздовжньої, поперечної, релєвської хвиль та коефіцієнтів їх згасання і значення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона визначенні трьома способами

Параметр	Значення
v_l , м/с	1635
v_t , м/с	1415
α_l , Нп/м	36
α_t , Нп/м	197
v' (за співвідношенням (1))	- 0,99
v'' (за співвідношенням (5))	- 0,85
α	0,196
β	0,929
v_R , м/с	980
α_R , Нп/м	301
γ	0,983
v' (за співвідношенням (16))	- 0,98
v'' (розв'язок рівняння (17) із врахуванням (14))	- 1,82
v' (із співвідношення (15) з врахуванням (19))	- 0,97
v'' (із співвідношенням (16) з врахуванням (20))	- 1,60

Збудження та прийом ПАХ Релея проводили за допомогою гребінчастої структури, що створює на поверхні твердого тіла періодичну сукупність нормальних збурень з просторовим періодом λ_R [16]. Схема експериментального стану та експериментальний стенд із УЗ-перетворювачами МА-300А1 фірми Murata представлені на рис. 1, 2. Значення λ_R обчислювали за співвідношенням:

$$\lambda_R = \frac{2\pi v_R}{\omega}. \quad (21)$$

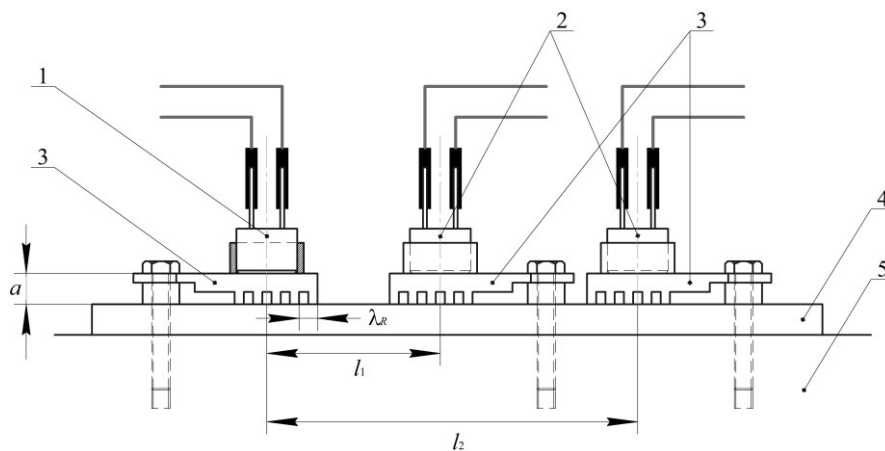


Рис. 1. Схема експериментального стану для збудження та прийому ПАХ:
 1 – УЗ-перетворювач (випромінювач) МА-300А1; 2 – УЗ-перетворювач (приймач) МА-300А1;
 3 – гребінчаста структура; 4 – зразок матеріалу; 5 – поглинаюча підкладка

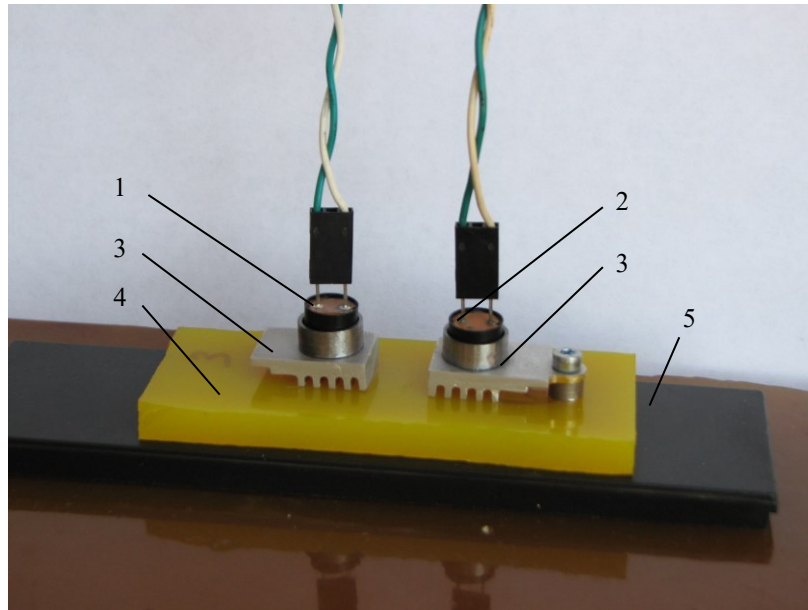


Рис. 2. Експериментальний стенд:
 1 – УЗ-перетворювач (випромінювач) МА-300А1; 2 – УЗ-перетворювач (приймач) МА-300А1;
 3 – гребінчаста структура; 4 – зразок матеріалу; 5 – поглинаюча підкладка

Для швидкості ПАХ Релея $v_R = 976$ м/с, визначеної із співвідношення (8) при $v \cong -1$, довжина хвилі рівна $\lambda_R \cong 3,3$ мм.

Експериментальне значення v_R будемо визначати за виміряним часом (τ) проходження релеївської хвилі по поверхні зразка і розраховувати за таким співвідношенням:

$$v_R = \frac{v_l l}{v_l \tau - 2a}, \quad (22)$$

де l – між центрами УЗ-перетворювачів, v_l – швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі гребінчастої структури; a – висота гребінчастої структури.

Для оцінки похибки та перевірки адекватності отриманих значень v_R вимірювали час ($\tau_{(standard)}$) проходження імпульсу релеївської хвилі по поверхні еталонного матеріалу для якого значення $v_{R(standard)}$ відомо. При однаковій відстані між УЗ-перетворювачами для обох матеріалів значення v_R визначаємо за таким співвідношенням:

$$v_R = \frac{v_{R(standard)} l}{v_{R(standard)} (\tau - \tau_{(standard)}) + l}. \quad (23)$$

В якості еталону використовували плавлений кварц $v_{R(standard)} = 3400$ м/с [17].

Коефіцієнт поглинання α_R релеївських хвиль в матеріалі визначаємо за таким співвідношенням:

$$\alpha_R = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (24)$$

де A_1 – амплітуда сигналу на УЗ-перетворювачі, що знаходиться на відстані l_1 ; A_2 – амплітуда сигналу на УЗ-перетворювачі, що знаходиться на відстані l_2 .

Вимірювання τ та A_1 , A_2 УЗ-сигналу при прийомі ПАХ Релея проводили за допомогою розробленого електронного блоку із аналогово-цифровим інтерфейсом на базі операційних підсилювачів та швидкодіючих компараторів, роботою яких керує однокристальний мікроконтролер Atmega48 [18]. Імпульс збудження ПАХ на УЗ-перетворювачі (передавачі) та сигнал від УЗ-перетворювача (приймача) контролювали за допомогою цифрового осцилографа (див. рис. 3).

Експериментальні значення v_R і α_R представлені в таблиці 1. Абсолютна похибка визначення швидкості ПАХ Релея не перевищує 4 м/с, а для коефіцієнта поглинання – 2 Нп/м.

Аналіз отриманих результатів для дійсної частини комплексного v^* показує, що для трьох випадків вимірювань відхилення v' її середнього значення рівне 0,1, що складає 1 %. Для величини v'' комплексного коефіцієнта Пуассона середнє значення рівне – 1,42. Величини абсолютних відхилень для трьох експериментальних значень v'' , визначених на основі парних експериментів ($l, t; t, R; l, R$), відповідно дорівнюють: 0,57; 0,40; 0,18.

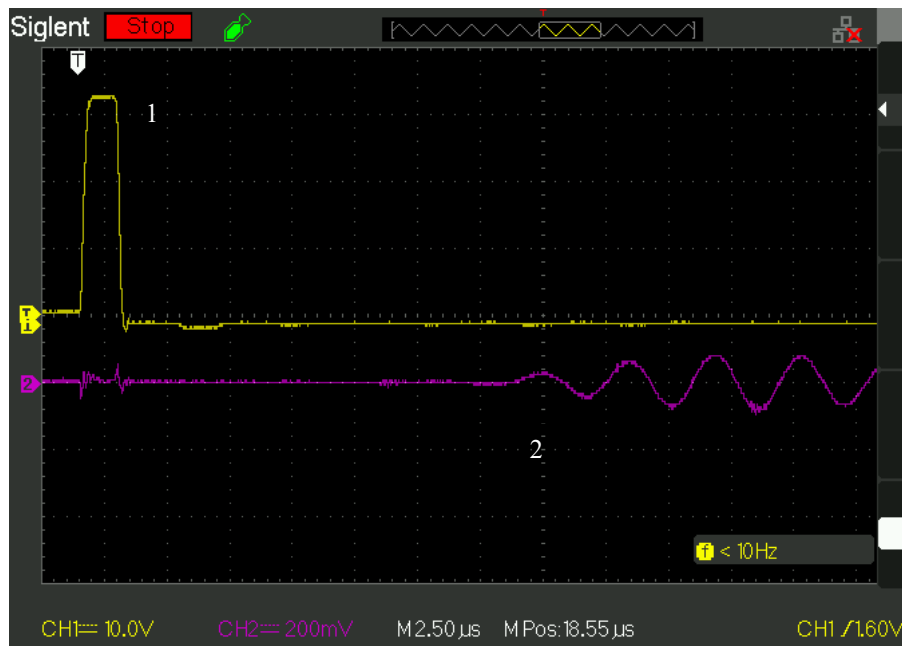


Рис. 3. Осцилограми імпульсу збудження ПАХ 1 на УЗ-перетворювачі (передавачі) та прийнятого сигналу ПАХ 2 на УЗ-перетворювачі (приймачі) експериментального стенду

Висновки. Використання співвідношень теорії пружності і рівняння Релея при відомих швидкостях поширення поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних хвиль і коефіцієнтів їх поглинання дає можливість проводити розрахунки дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного акустета.

Запропонована експериментальна методика визначення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея та коефіцієнта її поглинання у полімерному акусетикі. Отримані значення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану вказують на адекватність запропонованих модельних представлень для процесів поширення та поглинання акустичних хвиль трьох типів і хорошу відтворюваність результатів при розрахунках на основі парних експериментів.

Експериментальний стенд при незначних конструктивних змінах може бути використаний при вимірюваннях для полімерних акусетиків із більшим значенням дійсної частини коефіцієнта Пуассона та в'язкопружних полімерних матеріалів із додатнім значенням її величини.

Література

1. Конёк Д. А. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор) / Д. А. Конёк, К. В. Войцеховски, Ю. М. Плещачевский, С. В. Шилько // *Механика композитных материалов и конструкций* (Москва). – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 35–69.
2. Визначення динамічних модулів пружності полімерних акусетиків за допомогою імпульсних іммерсійних вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль / В. А. Машенко, В. П. Квасніков, М. А. Бордюк, Т. М. Шевчук // *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. – 2019. – № 1(14). – С. 5–11.
3. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // *Applied Acoustics*. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
4. Novak N. Auxetic Cellular Materials – a Review / N. Novak, M. Vesenjak, Z. Ren // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2016. – V. 62. – N. 9. – P. 485–493.
5. Elasticity of anti-tetrachiral anisotropic lattices / Y. J. Chen, F. Scarpa, Y. J. Liu, J. S. Leng // *International Journal of Solids and Structures*. – 2013. – Vol. 50. – No. 6. – P. 996–1004.
6. A Numerical study of auxetic composite panels under blast loadings / G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, P. V. S. Lee // *Composite Structures*. – 2016. – V. 135. – P. 339–352.
7. Dynamic tests for energy absorption by selected auxetic fabrics / P. Szurgott, M. Klasztorny, T. Niezgodna, D. Miedzinska, R. Gieleta // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2017. – V. 12. – Is. 4. – P. 7–14.
8. Negative through-the-thickness Poisson's ratio of elastic-viscoplastic angle-ply carbon fiber-reinforced plastic laminates: homogenization analysis / T. Matsuda, K. Goto, N. Kubota, N. Ohno // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – V. 63. – P. 152–169.
9. Static and modal analysis of low porosity thin metallic auxetic structures using speckle interferometry and digital image correlation / L. Francesconi, M. Taylor, K. Bertoldi, A. Baldi // *Experimental Mechanics*. – 2018. – V. 58. – Is. 2. – P. 283–300.
10. Jiang L. Finite Element Modeling of Multilayer Orthogonal Auxetic Composites under Low-Velocity Impact / L. Jiang, H. Hu // *Materials*. – 2017. – V. 10. – N. 8. – 908.
11. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores / S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2015. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2013/589216>.
12. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1985. – 245 с.
13. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2018. – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.

14. Машченко В. А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом / В. А. Машченко // Міжвузівський збірник наукових праць „Наукові нотатки”. – 2019. – Вип. 65. – С. 165–169.
15. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезона, Р. Терстона. Т. VI. – Москва: Мир, 1973. – 432 с.
16. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
17. Кулаков М. А. Особенности измерения поверхностных акустических волн акустическим микроскопом / М. А. Кулаков, А. И. Морозов // Акустический журнал. – 1985. – Т. 31. – № 6. – С. 817–820.
18. Машченко В.А. Аналогово-цифровий інтерфейс для вимірювання амплітуди та часу проходження ультразвукового сигналу / В. А. Машченко // Міжнародний науково-технічний журнал „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – 2019. – № 2 (64). – С. 34–39.

References

1. Koniok D. A. Materials with negative Poisson's ratio. (The review) / D. A. Koniok, K. V. Voitsekhovskiy, Yu. M. Pleskachevsky, S. V. Shilko // Journal on Composite Mechanics and Design (Moscow). – 2004. – V. 10. – N. 1. – P. 35–69.
2. Determination of dynamic modules of elastic of polymer auxetics with the help of pulse immersion measurements of propagation velocities of ultrasonic wave / V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov, M. A. Bordyuk, T. M. Shevchuk // Collection of scientific works OSATRO. – 2019. – № 1 (14). – P. 5–11.
3. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // Applied Acoustics. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
4. Novak N. Auxetic Cellular Materials – a Review / N. Novak, M. Vesenjajk, Z. Ren // Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – V. 62. – N. 9. – P. 485–493.
5. Elasticity of anti-tetrachiral anisotropic lattices / Y. J. Chen, F. Scarpa, Y. J. Liu, J. S. Leng // International Journal of Solids and Structures. – 2013. – Vol. 50. – No. 6. – P. 996–1004.
6. A Numerical study of auxetic composite panels under blast loadings / G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, P. V. S. Lee // Composite Structures. – 2016. – V. 135. – P. 339–352.
7. Dynamic tests for energy absorption by selected auxetic fabrics / P. Szurgott, M. Klasztorny, T. Niezgoda, D. Miedzinska, R. Gieleta // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2017. – V. 12. – Is. 4. – P. 7–14.
8. Negative through-the-thickness Poisson's ratio of elastic-viscoplastic angle-ply carbon fiber-reinforced plastic laminates: homogenization analysis / T. Matsuda, K. Goto, N. Kubota, N. Ohno // International Journal of Plasticity. – 2014. – V. 63. – P. 152–169.
9. Static and modal analysis of low porosity thin metallic auxetic structures using speckle interferometry and digital image correlation / L. Francesconi, M. Taylor, K. Bertoldi, A. Baldi // Experimental Mechanics. – 2018. – V. 58. – Is. 2. – P. 283–300.
10. Jiang L. Finite Element Modeling of Multilayer Orthogonal Auxetic Composites under Low-Velocity Impact / L. Jiang, H. Hu // Materials. – 2017. – V. 10. – N. 8. – 908.
11. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores / S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2013/589216>.
12. Landau L. D. Theory of Elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshitz. – Moscow: Nauka, 1985. – 245 p.
13. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.
14. Mashchenko V. A. Determination of elasticity modules of constructional and heterogeneous materials by ultrasonic method / V. A. Mashchenko // Interuniversity collection of scientific works “Scientific notes”. – 2019. – V. 65. – P. 165–169.
15. Physical acoustics / Edited by W. Meson, R. Thurston. Vol. VI. – Moscow: Mir, 1973. – 432 p.
16. Viktorov I. A. Sound surface waves in solids / I. A. Viktorov. – Moscow: Nauka, 1981. – 288 p.
17. Kulakov M. A. Peculiarities of measuring surface acoustic waves with an acoustic microscope / M. A. Kulakov, A. I. Morozov // Acoustic journal. – 1985. – V. 31. – N. 6. – P. 817–820.
18. Mashchenko V. A. Analog-digital interface for measurement of the amplitude and time of transition of the ultrasonic signal / V. A. Mashchenko // International Scientific-technical journal “Measuring and computing devices in technological processes”. – 2019. – Iss. 2. (64). – P. 34–39.

Надійшла / Paper received: 07.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК (004.021+004.4):536.531
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-4

ЛАТЕНКО В. І., МИРОНОВ Р. Д., ОРНАТСЬКИЙ І. А.
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України
ЛОГВИНЕНКО Д. М.
ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ОПОРОМ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОДАТЧИКА

Розроблено алгоритм ітераційного розв'язання у числовому вигляді рівняння Календара -Ван Дусена четвертого ступеня, що описує залежність електричного опору резистивного термодатчика Pt100 від температури в діапазоні мінусових температур. Наводиться лістинг програми на платформі VBA для Excel, яка реалізує розроблений алгоритм розрахунку. Працездатність програми підтверджується результатами розрахунків. Досліджуються питання точності розрахунків, яку забезпечує програма, та необхідної для цього кількості ітерацій.

Ключові слова: алгоритм, програма, розв'язання рівняння, ітерація, датчик температури, похибка, точність, опір, розрахунок, числовий, діапазон.

LATENKO V., MYRONOV R., ORNATSKY I.
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SSI of Ukraine and NAS of Ukraine
LOGVYNENKO D.
SE "UKRMETRTESTSTANDART"

ALGORITHM AND PROGRAM FOR CALCULATING THE TEMPERATURE BY RESISTANCE OF THE RESISTIVE TEMPERATURE DETECTOR

It would not be an exaggeration to say that high-tech platinum resistance thermocouples such as Pt100 completely solve the problem of an electronic sensitive element for measuring temperatures in the widest range. The high linearity of the characteristics of Pt100 sensors allows to measure the temperature in small areas of the range with quite satisfactory accuracy without any means of linearization. Thus, Pt100 sensors are used in medical thermometers or temperature meters for heated rooms. However, in many applications of Pt100 sensors, the task of taking into account the nonlinearity of the characteristic to achieve the maximum possible accuracy of temperature measurement in a wide range, which can provide sensors.

An algorithm for iterative solution in numerical form of the Calendar-Van Dusen equation of the fourth degree is developed, which describes the dependence of the electrical resistance of the resistive temperature sensor Pt100 on the temperature in the range of minus temperatures. The program on the VBA for Excel platform, which implements the developed calculation algorithm, is listed. The efficiency of the program is confirmed by the results of calculations. The issues of accuracy of calculations provided by the program and the required number of iterations are investigated.

Keywords: algorithm, program, equation solution, iteration, temperature sensor, error, accuracy, resistance, calculation, numerical, range.

Вступ. Не буде перебільшенням твердження, що високотехнологічні платинові термоперетворювачі опору на зразок Pt100 повністю вирішують проблему електронного чутливого елементу для вимірювання температур у найширшому діапазоні [1]. Висока лінійність характеристики датчиків Pt100 дозволяє вимірювати температуру на невеликих ділянках діапазону з цілком задовільною точністю без будь-яких засобів лінеаризації. Таким чином датчики Pt100 використовуються у медичних термометрах або вимірювачах температури опалювальних приміщень.

Проте, у багатьох сферах застосування датчиків Pt100 залишається актуальною задача врахування нелінійності характеристики для досягнення максимально можливої точності вимірювання температури у широкому діапазоні, яку здатні забезпечити датчики.

Аналіз стану досліджень. Більшість публікацій по темі врахування нелінійності датчиків Pt100 присвячені аналоговим схемам вимірювальних перетворювачів [2,3], критичному аналізу яких варто присвятити окрему статтю.

У публікаціях про цифрові вимірювальні перетворювачі розглядаються здебільшого технічні засоби максимально точного вимірювання опору датчика. Щодо врахування нелінійності датчика, то у публікаціях просто наводиться формула Календара -Ван Дусена залежності опору датчика Pt100 від температури, а саме:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ) \cdot t^3), \quad (1)$$

де t – температура, $^\circ\text{C}$; $R_0 = 100$ Ом; $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$; $B = -5,775 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$; $C = 0$ для $t \geq 0$ та $C = 4,183 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$ для $t < 0$. Значення параметрів наведені для датчиків з номінальним відношенням опорів $W_{100} = 1,3850$ [4].

За плюсових температур формула перетворюється на квадратне рівняння, розв'язання якого відносно температури докладно розглянуто у [5]. За мінусових температур формула Календара -Ван Дусена являє собою поліном 4-го ступеня, який не має аналітичного розв'язання у загальному вигляді. Алгоритми розв'язання рівняння у числовому вигляді практично не досліджувалися.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка алгоритму розрахунку температури за електричним опором термоперетворювача Pt100 з високою точністю у повному діапазоні температур, включно з мінусовими температурами.

Виклад основного матеріалу. Для побудови ітераційного алгоритму розрахунку температури за опором датчика Pt100 трансформуємо формулу Календара -Ван Дусена до вигляду рівняння:

$$t = (R - R_0 \cdot (1 + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ) \cdot t^3)) / (A \cdot R_0). \quad (2)$$

Введемо нові позначення для членів рівняння (2) та знаків операцій - такі, які прийнятні для Макросу у програмному середовищі Excel. Змінну t (температура) розділимо на дві окремі змінні - для лівої та правої сторони рівняння. За нових позначень рівняння набуває вигляду:

$$F = (R - R_0 \cdot (1 + B \cdot TP2^2 + C \cdot (TP2 - 100) \cdot TP2^3)) / (A \cdot R_0), \quad (3)$$

де F – температура, як функція; R_0 – змінене R_0 ; $TP2$ – позначення температури t для правої сторони рівняння.

Для не мінусових температур (нульової або плюсових), коли коефіцієнт $C = 0$, рівняння (3) спрощується до вигляду:

$$F = (R/R_0 - 1 - B \cdot TP2^2) / A. \quad (4)$$

Похибка відхилення від рівності температур у рівнянні (4) можна визначити, як:

$$\Delta t_{EQU} = |F - TP2|, \quad (5)$$

Хоча похибка відхилення від рівності не еквівалентна до похибки визначення температури, її можна застосовувати для наближеної оцінки точності розрахунку. Якщо значення похибки (5) відхилення від рівності не перевищуватиме деяке наперед задане максимальне допустиме значення Δt_{EM} , тоді значення змінної F приймається за значення температури датчика

$$t \approx F; \quad (6)$$

а похибка розрахунку температури становитиме

$$\Delta t = F - t. \quad (7)$$

Ітераційний алгоритм наближеного розв'язання рівняння (2) наведено у вигляді схеми на рис.1.

У блоці 1 значення констант (A , B , C , R_0) та значення опору датчика R зчитуються з відповідних комірок Excel. У цьому ж блоці задаються початкові значення температури $TP2$ та функції температури F , причому для правильного виконання алгоритму різниця між значеннями має бути великою за абсолютною величиною. При цьому, значення F є початковим значенням температури, а початкове значення $TP2$ є несуттєвим для алгоритму, тому вибираються значення: $F = 1$, $TP2 = 0$. Змінна J штучно введена до алгоритму для підрахунку кількості ітерацій, початкове значення - 0.

Блок 2 містить порівняння величини похибки (5) відхилення від рівності з максимальним допустимим значенням Δt_{EM} : у нашому прикладі – це значення 0,001. Під час першої перевірки умова не виконується через відповідний вибір початкових значень змінних F та $TP2$.

У блоці 3 змінній $TP2$ присвоюється попереднє значення F , тому початкове значення $TP2$ було несуттєвим для розрахунків. У блоці 4 виконання алгоритму розділяється на окремі гілки для мінусових та плюсових температур. Перевірка виконується, виходячи із значення опору датчика R , яке є меншим за R_0 за мінусових температур. У блоках 5 або 6 розраховується нове значення F за формулами для мінусових або не мінусових температур відповідно. Змінна кількості ітерацій J збільшується на 1 у кожному випадку.

Наступна ітерація починається з оцінки похибки (5) відхилення від рівності у блоці 2. Робота алгоритму припиняється, коли похибка стає меншою за максимальне допустиме значення. Останнє значення змінної F приймається за значення температури датчика t .

У таблиці 1 наведено лістинг програми на платформі VBA для Excel, в якій реалізується ітераційний алгоритм розрахунку температури за формулою Календара -Ван Дусена. Нумерація рядків у таблиці додана штучно для зручності посилань, порожні рядки також пронумеровані. Коментарі у програмі написані російською мовою, як у оригіналі програми.

У загальній частині програми під назвою Макрос 1 (1...5 рядки) пропущені визначення параметрів та значення опору R , які отримуються з комірок Excel: ці операції є несуттєвими для розгляду ітераційного алгоритму. У рядку 3 температурі T присвоюється значення, яке розраховується у підпрограмі F . У лапках перелічуються параметри та змінні, значеннями яких програма Макрос 1 обмінюється з підпрограмою F .

У рядках 7...24 повністю, без скорочень, наводиться підпрограма F . Типи змінних визначаються у рядках 7 та 9. Початкові значення змінних задаються у 10–12 рядках, що відповідає блоку 1 алгоритму на рис. 1.

Конструкція While...Wend у рядках 13...24 забезпечує виконання циклів ітерації з перевіркою умови припинення розрахунків, як у блоці 2 алгоритму: у рядку 13 перевіряється, чи не менше значення похибки (5) відхилення від рівності за максимальне допустиме значення (0.001).

Присвоєння змінній TP2 значення функції F відбувається у рядку 14 відповідно до блоку 3. Умова розділення підпрограми на гілки розрахунку мінусових та не мінусових температур перевіряється у рядку 15 за значенням опору датчика R відповідно блоку 4 алгоритму. Розрахунок значення функції F виконується у рядках 16–17 або 19–20 за відповідними формулами (3) або (4) для мінусових або не мінусових температур, як у блоках 5 або 6 алгоритму. У рядках 16 або 19 значення номера ітерації збільшується на 1, як у блоках 5 або 6 алгоритму.

Результати розрахунків, які виконуються ітераційною програмою для двох значень максимальної допустимої похибки Δt_{EM} та діапазону температур t від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, наведені у таблиці 2. У стовпчику 2 таблиці наводяться значення опору датчика Pt100, розраховані за формулою Календара-Ван Дусена (1).

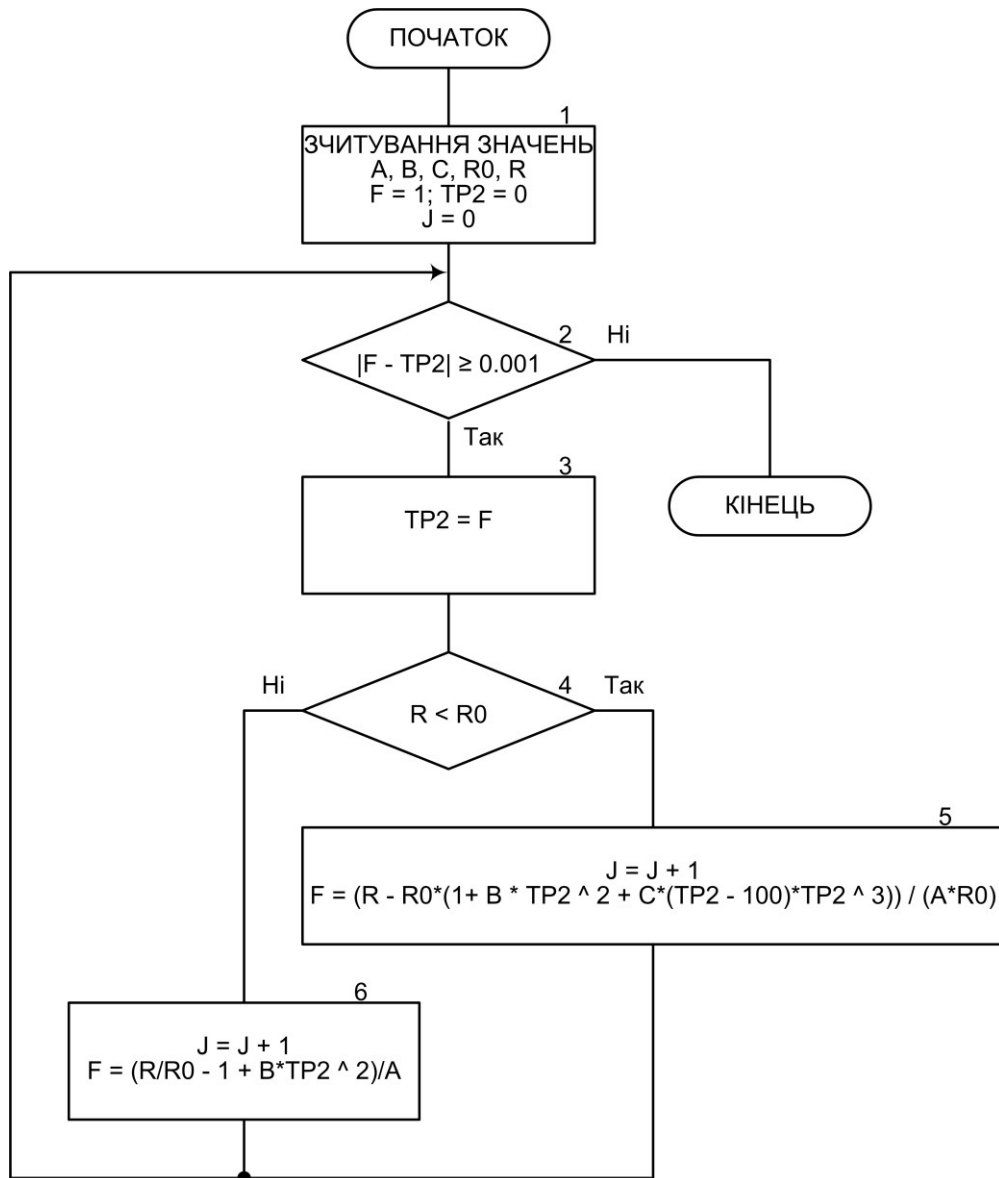


Рис. 1. Схема ітераційного алгоритму розрахунку температури датчика Pt100

У стовпчиках 3–5 таблиці 2 наведено результат ітераційного розрахунку температури (t_M), значення похибки за температурою Δt та кількість ітерацій J при максимальному допустимому значенні похибки відхилення від рівності $\Delta t_{EM} = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. У стовпчиках 6–8 наведені значення тих самих величин при $\Delta t_{EM} = 0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

З аналізу даних у таблиці 2 для мінусових температур впливають такі висновки.

У разі припинення ітерацій за похибки відхилення від рівності меншій за $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, похибка розрахунку температури датчика Pt100 виявляється меншою за це значення в повному діапазоні температур (від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$). За мінусових температур для отримання результату потрібно не більше 6 ітерацій.

Залишкова похибка розрахунку є детермінованою функцією аргументу, значення якої хаотично розподілені на інтервалі:

$$-\Delta t_{EQU} < \Delta t < \Delta t_{EQU} \quad (8)$$

Деякі значення залишкової похибки наближаються до максимально допустимого значення розрахунку, що за високої чутливості вимірювального перетворювача може призводити до стрибків результатів вимірювання на величину молодшого розряду ($\pm 0,01$ °C). Уникнути таких стрибків можна шляхом зменшення значення допустимої похибки розрахунку.

Таблиця 1

Програма ітераційного розрахунку температури датчика Pt100

1	Sub Макрос1()
2	
3	T = TP2(R, A, B, C, R0, J)
4	
5	End Sub
6	
7	Public Function TP2(R As Double, A As Single, B As Single, C As Single, R0 As Double, J As Single) As Double
8	
9	Dim F As Double
10	J = 0 'начальное значение
11	TP2 = 0 'начальное значение
12	F = 1 'начальное значение
13	While Abs(F - TP2) >= 0.001
14	TP2 = F
15	If R < R0 Then
16	J = J + 1
17	F = (R - R0 * (1 + B * TP2 ^ 2 + C * (TP2 - 100) * TP2 ^ 3)) / (A * R0) 'от -40 до 0 градусов
18	Else
19	J = J + 1
20	F = (R / R0 - B * TP2 ^ 2 - 1) / A 'от 0 до 100 градусов
21	End If
22	Wend
23	
24	End Function

Таблиця 2

Результати ітераційного розрахунку температури датчика Pt100

t	Rt	$\Delta t_{EM} = 0.01$			$\Delta t_{EM} = 0.0001$		
		t _M	Δt	J	t _M	Δt	J
-200	18.5201	-200.0011	-0.0011	6	-200.0000	0.0000	8
-150	39.7232	-149.9988	0.0012	5	-150.0001	-0.0001	6
-100	60.2558	-100.0024	-0.0024	4	-99.9999	0.0001	5
-50	80.3063	-49.9937	0.0063	3	-50.0000	0.0000	5
0	100.0000	0.0001	0.0001	2	0.0000	0.0000	3
100	138.5055	99.9987	-0.0013	4	100.0000	0.0000	5
200	175.8560	199.9988	-0.0012	5	199.9999	-0.0001	6
300	212.0515	299.9910	-0.0090	5	299.9999	-0.0001	7
400	247.0920	399.9956	-0.0044	6	400.0000	0.0000	8
500	280.9775	499.9975	-0.0025	7	500.0000	0.0000	9
600	313.7080	599.9912	-0.0088	7	600.0000	0.0000	10
700	345.2835	699.9947	-0.0053	8	700.0000	0.0000	11
800	375.7040	799.9964	-0.0036	9	800.0000	0.0000	12

У разі зменшення допустимої похибки рівняння до 0,0001 °C максимальна кількість ітерацій зростає несуттєво: від 6 до 8. Але похибка розрахунку температури для деяких значень перевищує допустиму похибку рівняння, наприклад, для температур -100 °C та -150 °C. Це перевищення можна пояснити тільки недостатньою розрядністю операційної системи для виконання операцій з такою надлишковою точністю.

До незначних недоліків ітераційного алгоритму можна віднести також різну кількість ітерацій для різних значень температури, що вимагає резервування машинного часу на максимальну кількість ітерацій. Це може обмежити швидкодію мікропроцесорних вимірювачів температури з обмеженими операційними ресурсами.

Наведені висновки розповсюджуються і на діапазон не мінусових температур, тільки для отримання такої ж точності розрахунків на краю діапазону потрібна більша кількість ітерацій. Це легко пояснюється значно більшим діапазоном плюсових температур, ніж мінусових.

Для не мінусових температур ітераційний алгоритм був застосований заради спрощення алгоритму та уніфікації операцій. За необхідності зменшення часу виконання розрахунків для не мінусових температур можна застосувати пряме розв'язання квадратного рівняння, на яке перетворюється формула Календара - Ван Дусена [5]:

$$t = \frac{-A + A \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{B}{A^2} \cdot \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}}{2 \cdot B} \quad (9)$$

Програмна реалізація цієї функції не є проблемою для середовища VBA або для мікропроцесорної техніки, тому не потребує додаткового дослідження.

Висновки. Запропонований ітераційний алгоритм дозволяє розраховувати температуру датчика Pt100 за значенням електричного опору у повному діапазоні температур датчика – від мінусових до плюсових. Критерієм достатнього наближення до точного рішення рівняння Календара-Ван Дусена виступає саме значення температури, що дозволило звести розрахунки до розрахунку одного ступеневого поліному за одну ітерацію.

Програма, що реалізує алгоритм на платформі VBA для Excel, забезпечує розрахунок температури з прецизійною точністю до 0,0001 °C з кількістю ітерацій за температур від мінус 200 °C до 0 °C – не більше 8, від 0 °C до 800 °C – не більше 12. У програмі використовуються прості математичні операції, які можуть виконуватися з великою точністю: 4 арифметичних операції та зведення в ступені.

Працездатність програми підтверджується наведеними результатами розрахунків.

За не мінусових температур можна застосувати прямий розрахунок температури без ітерацій., що не потребує дослідження.

Література

1. Новые платиновые датчики температуры / Маргелов А. // Новости электроники – 2007. №1. –С. 17 - 18.
2. The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic / R.Radetic, M.Pavlov-Kagadejev, N.Milivojevic // Serbian journal of electrical engineering - 2015.- Vol. 12, № 3. - P.345-357. ISSN 2217-7183
3. Терморезистивний перетворювач з аналоговою лінеаризацією / О.В. Бойко, О.П. Чабан, Р.О. Матвій, В.Р. Куць // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2013. - №1. – С.57-62. ISSN 2219-9365
4. ДСТУ 2858:2015. Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробування. (Чинний від 2017-07-01) Вид. офіц. Київ. - 2015. - 16 с.
5. Метрологічні питання застосування термометрів опору для метеорологічних спостережень / В.І. Латенко // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – №1. – С.242 – 248. ISBN 5-7763-8361-7.

References

1. Novyye platinovyye datchiki temperature / Margelov A. // Novosti elektroniki – 2007. №1. – 17-18 p.
2. The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic / R.Radetic, M.Pavlov-Kagadejev, N.Milivojevic // Serbian journal of electrical engineering - 2015. - Vol. 12, № 3. - 345-357 p. ISSN 2217-7183
3. Termorezistyvnyy peretvoryuvach z analohovoyu linearyzatsiyeyu / O.V. Boyko, O.P. Chaban, R.O. Matviyiv, V.R. Kuts' // Measuring and computing in technological processes. – 2013. - №1. – 57-62 p. ISSN 2219-9365
4. DSTU 2858:2015. Thermo-converters of resistance. General technical requirements and test methods. (Valid from 2017-07-01). Kyiv. - 2015. - 16 p.
5. Metrological issues of application resistance thermometers for meteorological observations / V.I. Latenko // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. – 2014. – №1. –242 – 248 p. ISBN 5-7763-8361-7

Надійшла / Paper received: 19.01.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 620.172.21:621.396.6.019.5
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-5

КОВТУН І. І., БОЙКО Ю. М., БАТОВСЬКИЙ В. В.
Хмельницький національний університет

ДІАГНОСТУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛУВАННІ

Стаття присвячена розробці методу діагностування міцності компандованих конструкцій електронної техніки при термоциклуванні. Об'єктом дослідження представлено керамічні конденсатори полімеризовані компаундом. Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення між керамікою та компаундом під впливом термоударів з'єднання кераміки і компаунду зазнає термічних напружень, що при несприятливому поєднанні цих коефіцієнтів та механічних характеристик обох матеріалів може спричинити розтріскування компаунду або кераміки та руйнування всієї конструкції. В рамках представленого дослідження було визначено температурні межі роботи датчиків акустичного емісії, проведено відбір хвилеводу акустичної емісії, що дозволило розширити межі температурного діапазону вимірювань, створена вакуумна установка, яка перешкоджала утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі, здійснено розділення сигналів акустичної емісії, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції та запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів в умовах термоциклування від + 60 °C до -50 °C.

Ключові слова: керамічний компаундований конденсатор, акустична емісія, термоциклування, неруйнівна діагностика.

KOVTUN I., BOIKO J., BATOVSKY V.
Khmelnitskyi National University

STRENGTH DIAGNOSTICS OF COMPOUNDED STRUCTURES IN ELECTRONICS UNDER THERMAL IMPACTS

The assembly of ceramic compounded capacitor, such as K 15-5, represents a ceramic disc polymerized by compound. Due to difference in linear expansion coefficients between ceramics and compound when subjected to thermal impacts ceramic-compound joint undergoes a thermal stresses, which under unfavorable combination of these coefficients and mechanical characteristics of both materials may cause cracking of compound or ceramics and destruction of the joint structure. The following tasks were accomplished in the current research. Thermal limits have been specified for operation of acoustic emission sensors made as an assembly of different materials, such as steel, ceramics, plastics, which are also capable of emitting acoustic emission signals during thermal cycling. The waveguide is selected and used for transmitting acoustic emission signals from the object in the thermal chamber to the acoustic emission sensor outside the thermal chamber, what expanded the temperature range by increasing positive temperatures up to + 90 deg C and negative temperatures down to -60 deg C. To eliminate hindrances associated with formation and cracking of ice during transition from positive temperatures to negative and reverse, the vacuum chamber was created. The frequency separation of acoustic emission is accomplished for ceramic and compound parts of capacitor. The frequency bands are: 650-1000 kHz for ceramic component K-15 using sensor P113 (0.5-1.0 MHz); 130-300 kHz for compound component using sensor P113 (0.2-0.5 MHz). The method has been designed for non-destructive strength diagnostics of non-detachable assemblies of ceramics and compound, such as capacitors K-15-5, subjected to thermal impacts in the temperature range from +60 to -50 deg C. Manifestation of the Kaiser effect after first two thermal impacts indicates of compliance with acceptable strength condition of tested assembly, appearance of acoustic emission on N-th thermal cycle detects beginning of destructive process and indicates that such assembly will be destroyed in 5-10 cycles.

Keywords: ceramic compounded capacitor, acoustic emission, thermal impact, non-destructive diagnostics.

Вступ. Конденсатори типу К 15-5 представляють собою керамічний диск полімеризований компаундом (рис. 1). Через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення кераміки і компаунда при зміні температури в з'єднанні кераміка-компаунд виникають температурні напруження, які при особливо несприятливих поєднаннях цих коефіцієнтів і механічних характеристик обох матеріалів можуть призвести до розтріскування компаунда або кераміки і руйнування всієї конструкції.

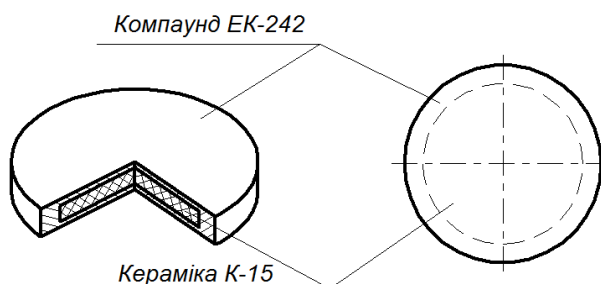


Рис. 1. Конструкція керамічного компаундованого конденсатора К 15-5

З попередніх робіт інших авторів [1–3] встановлено, що руйнування кераміки в конструкції К 15-5 при термоциклюванні відбувається від її розтягування в напрямку поздовжніх осей дисків і по ділянкам, нахиленим до торців дисків під кутом 45° , через стиск в радіальних напрямках від дії компаунда. Візуальним оглядом конденсаторів, які зруйнувалися при термоударі, було встановлено, що розтріскування кераміки відбувається в шарах, що прилягають до компаунду, з розташуванням тріщин в площинах, паралельних торцевим або нахиленим до них під кутом 45° . На рис. 2 наведені фотографії розтріскування конденсаторів.



Рис. 2. Рельєф поверхні руйнування конденсатора

Також було виявлено [4, 5], що значення напружень і деформацій в кераміці і компаунді значно залежать від розкиду фізико-механічних характеристик α , μ , E , як кераміки, так і компаунда. Так наприклад, можливий розкид коефіцієнтів лінійного розширення для кераміки і компаунда α_1 і α_2 може перебувати в межах від -30% до $+50\%$. Що призводить до розкиду розрахункових значень напружень більш ніж на 300% . Наявність цих та багатьох інших важко прогнозованих факторів ускладнює розрахунок міцнісного стану з'єднання.

У даній ситуації для забезпечення міцності як окремих особливо відповідальних деталей, так і партій виробів, слід було вдатися до створення методики неруйнівного контролю міцності нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів кераміки і компаунда на основі методу акустичної емісії (АЕ), який відображаючи фізико-механічні властивості матеріалів, дозволяє стежити за станом їх мікроструктури і фіксувати її порушення ще на ранніх етапах розвитку [6, 7].

Відомі роботи [8, 9] з акустико-емісійного дослідження складових керамічних конденсаторів під впливом механічних навантажень, таких як розтяг і згин. В результаті цих робіт були отримані методики неруйнівного контролю та діагностування міцності матеріалів складових керамічних конденсаторів.

Однак, як було зазначено вище, поломки самих конденсаторів відбуваються в основному не від механічних, а від термічних навантажень, особливо при перепадах температур. Тому в даній роботі вирішувалося завдання діагностування міцності готових виробів в експлуатаційних умовах, тобто при термоциклюванні від $+60^\circ\text{C}$ до -50°C .

При розробці методики неруйнівного діагностування і контролю міцності натурних конденсаторів в зазначених експлуатаційних умовах довелося знайти відповіді на наступні питання.

1. Які температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні?

2. Як позбутися сигналів АЕ, що випромінюються утворенням на конденсаторі і датчику льоду при переході від додатних температур до від'ємних і навпаки?

3. Як розділити сигнали АЕ, що випромінюються керамічною основою конденсатора, від сигналів, що випромінюються компаундною оболонкою, як при нормальних, так і при від'ємних температурах?

Забезпечення працездатності датчика акустичної емісії АЕ П113 при термоциклюванні. До проведення випробувань компаундованих керамічних конденсаторів при термоциклюванні необхідно було перевірити роботу датчиків акустичної емісії в умовах низьких від'ємних і високих додатних температур, при яких вони самі можуть стати джерелами сигналів АЕ, бо містять у своїй конструкції деталі з різномірних матеріалів: металу, пластмаси, кераміки, компаунда, з відмінними значеннями коефіцієнтів лінійного розширення.

З цією метою датчик П113, підключений до комп'ютерного вимірювального комплексу акустичної емісії [10], поміщався у термокамеру Файтрон 3526/51. Джерелом сигналів АЕ служив імітатор сигналів АЕ СМА-04. Випробування показали, що датчик П113 працездатний в інтервалі температур від $+50^\circ\text{C}$ до -50°C графік залежності чутливості датчика від температури показаний на рис. 3.

Однак при температурах від $+50^\circ\text{C}$ до $+85^\circ\text{C}$ на показання датчика впливали перешкоди, пов'язані з різницею в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів складових частин самого датчика рис. 4.

При переході до від'ємних температур через це ж, а також і через обмерзання в районі $+5^\circ\text{C}$ також виникали помилкові сигнали АЕ. Щоб не піддавати датчики дії несприятливих для них температур, було вирішено випробувати передачу сигналів АЕ через хвилеводи.

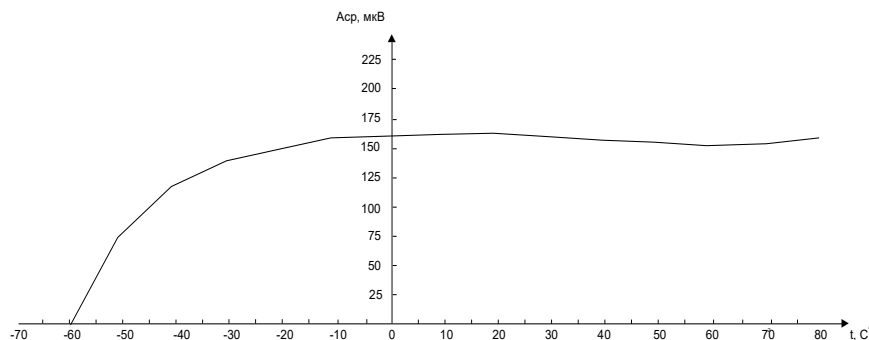


Рис. 3. Залежність чутливості датчика П113 від температури

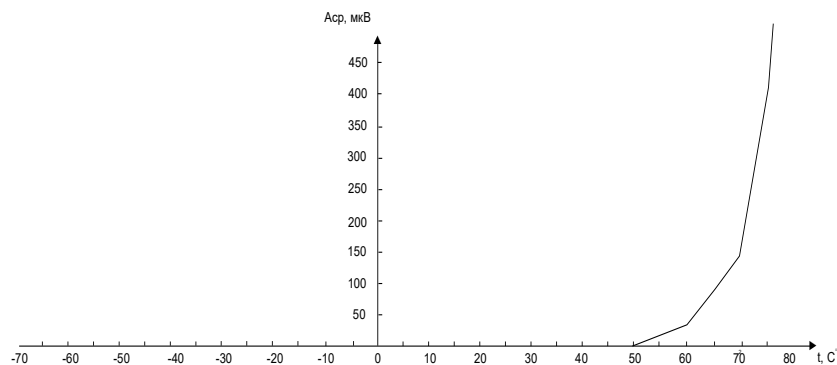


Рис. 4. Залежність появи сигналів АЕ датчика від температури

Перевірка можливості використання хвильоводів. Випробуванню піддавалися такі хвильоводи: кварцові, свинцеві, титанові, бронзові і залізні. З цих хвильоводів найбільш ефективним виявився сталевий розміром 500×25×30 мм (табл. 1).

Таблиця 1.

Визначення коефіцієнтів загасання для хвильоводів з різних матеріалів на проходження сигналів АЕ при частотах 0,02–2,0 МГц і вхідному сигналі випромінювача 300 мВ

Тип хвильоводу	Розмір хвильоводу	Сигнал на виході, мВ	Коефіцієнт затухання, К
Кварц	$l = 500, d = 10$	126	0,42
Свинець	$l = 500, d = 10$	30	0,1
Титан	$l = 500, d = 10$	129	0,43
Бронза	$l = 500, d = 10$	90	0,3
Сталь	$l = 500, d = 10$	210	0,7
Сталь	$l = 500, b = 30, h = 25$	240	0,8

Експеримент проводився в нормальних умовах за допомогою генератора ГЗ-112/1 використаного для збудження перетворювача-датчика П113 (1). Другий перетворювач П113 (2) виконував роль приймача сигналів АЕ. Перетворювачі кріпилися до торців хвильоводу через контактний шар-клей ВК-1.

Контроль радіоімпульсів, які подавалися з генератора здійснювався: за напругою – мікровольтметром, по частоті – частотоміром, за формою сигналу – осцилографом (канал 1). Вихідні сигнали перевірялися: за рівнем – мікровольтметром, за формою – осцилографом (канал 2).

Використання осцилографа дозволяло порівнювати форму сигналів на вході і виході, зміщення фаз, коефіцієнт загасання, що вносяться хвильоводами і контактними шарами.

Параметри хвильоводу підбиралися таким чином, щоб в ньому виникали тільки поздовжні хвилі. Коефіцієнт проходження K визначався відношенням показань мікровольтметра на виході та вході системи.

Випробування показали, що при переході від додатних температур до від'ємних і назад все ж виникають перешкоди за рахунок обмерзання хвильоводу і контактних шарів. Для усунення обмерзання проводилися випробування при зануренні хвильоводу з перетворювачем в ванну зі спиртом. Однак цей метод виявився неефективним, тому що спирт розчиняє контактний шар, через що втрачається акустична зв'язок.

Проте застосування хвильоводів дозволяє розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до + 90 °С і від'ємних до –60 °С, якщо не враховувати АЕ при утворенні льоду.

Допоміжні пристосування підвищення достовірності проведених випробувань. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскуванням льоду при переході від додатних температур до від'ємних і назад, було вирішено поставити експеримент в вакуумі. Для цього була виготовлена невелика

вакуумна установка, всередині якої розміщувався випробуваний об'єкт із закріпленими на ньому датчиком АЕ і датчиком температури. Ця установка поміщалася в термокамеру Файтрон. Вакуумний насос забезпечував підтримку рівня розрідження в камері (740 мм рт.ст.), при якому був відсутній лід.

Термоциклювання здійснювалося при температурах від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і назад, по термодатчику, установленому всередині вакуумної камери. При цих умовах не з'являлося обмерзання і датчик нормально працював у всьому діапазоні температур від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На жаль, цей метод вимагав багато часу на проведення термоциклювання, тому що перехід від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумній камері відбувався протягом 180–190 хв. Звичайно, при бажанні цей процес можна було б прискорити, вводючи в вакуумну камеру нагрівальну і охолоджуючу системи, однак це вимагало б подолання нових труднощів.

Визначення робочої смуги частот сигналів АЕ при руйнуванні зразків кераміки і компаунда. При проведенні цього експерименту зразки кераміки К-15 і компаунда ЕК-242 встановлювалися консольно в спеціальному тестовому пристосуванні (рис. 5).

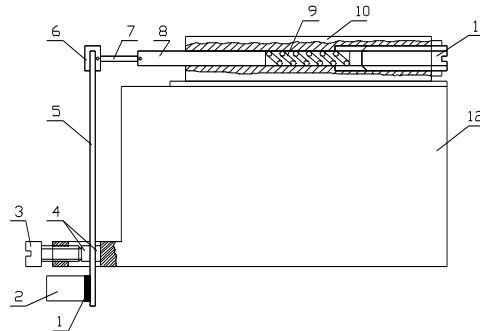


Рис. 5. Пристрій для навантаження зразків кераміки К-15 і компаунда ЕК-242:

1 – акустичний шар, 2 – датчик акустичної емісії П113, 3 – гвинт, 4 – фторопластова прокладка, 5 – випробуваний зразок, 6 – фторопластова петля, 7 – тяга, 8 – сердечник, 9 – пружина, 10 – електромагніт, 11 – регулювальний гвинт, 12 – основа

На один кінець випробувального зразка через акустичне мастило кріпилися датчики АЕ з різними смугами пропускання сигналів АЕ. Інший кінець зразка кріпився до сердечника електромагніту, який втягувався через пружину. Датчик П113 підключався через попередній підсилювач до комп'ютерного вимірювального комплексу АЕ. Зібрана система, що складається з навантажувального пристосування, із закріпленим в ньому зразком кераміки або компаунда і датчиком АЕ П113 містилася в вакуумну камеру, в якій створювалося розрідження, рівне 740 мм.рт.ст. Апаратура запису сигналів АЕ налаштовувалася таким чином, щоб пропускати лише сигнали, що лежать в заданій смузі частот. Потім дистанційно через трансформатор на електромагніт подавалася напруга і сердечник втягувався. Це призводило до деформації і руйнування випробуваного зразка, а апаратура при цьому реєструвала сигнали АЕ. Таким випробуванням на руйнування в вакуумі при кімнатній температурі піддавалися по 30 зразків кераміки і компаунда при різних смугах пропускання частот вимірювального комплексу АЕ. Проведені випробування показали, що для дослідження керамічної складової краще використовувати датчик П113 (0,5–1,0) і смугу робочих частот комплексу АЕ – 650–1000 кГц, а для дослідження компаундної складової – датчик П113 (0,2–0,5) з смугою робочих частот комплексу АЕ – 130–300 кГц.

Аналогічні результати були отримані при випробуваннях у відємних температурах. При охолодженні зразків, починаючи з температури $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ з'являлися сигнали акустичної емісії, що доходять до суми подій, що дорівнює 200 одиницям для керамічних зразків, і 120 – для компаундних. Ці сигнали при сталій температурі зникали через 5–6 с. Навантаження і руйнування зразків проводилося до досягнення температури $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ після припинення сигналів акустичної емісії, викликаних впливом відємних температур.

Надалі виявилось можливим замість двох датчиків АЕ використовувати один – широкосмуговий П113 (0,2–2,0 МГц), сигнали якого передавалися на два прилади АФ-15, один з яких налаштовувався на смугу частот 650–1000 кГц і контролював керамічну частину конденсатора, а другий – на пропускання смуги частот 150–300 кГц і контролював компаундну частину.

Акустична емісія конденсаторів К15-5 при їх термоциклюванні. Запис корисних сигналів акустичної емісії здійснювався при термоциклюванні натурних конденсаторів К15-5. Ці конденсатори мають номінальну постійну напругу 50 кВ, номінальну ємність 470 пФ, допустиму реактивну потужність 10 Вт, масу 80 г.

Перші 10 конденсаторів піддалися термоциклюванню у вакуумній камері при температурах $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ із застосуванням хвилеводу, датчика П113 (0,2–2,0 МГц) і двох акустико-емісійних приладів АФ-15 у складі вимірювального комплексу АЕ.

Цей експеримент показав, що для всіх конденсаторів в області додатних температур сигнали АЕ відсутні і з'являються лише при температурі $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче. Це дало підставу подальші випробування

проводити в діапазоні від кімнатних температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ без застосування вакуумної камери і хвилеводів, а виникаючі сигнали АЕ від обмерзання датчика і конденсатора при температурі близько $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ просто не враховувати і не реєструвати, що значно спростило експеримент і скоротило час на його проведення. У подальших експериментах з'єднаний кабелем датчик АЕ через попередній підсилювач підключався до двох приладів акустичної емісії, один з яких був налаштований на прийом сигналів АЕ лише компаундної частини, а інший – керамічної частини конденсатора. Обидва прилади синхронізувалися за часом.

Термоударам в термокамері піддавалися 30 штук конденсаторів К15-5. Середні значення параметрів АЕ (суми подій, максимальні амплітуди) при перших трьох термоударах представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 6.

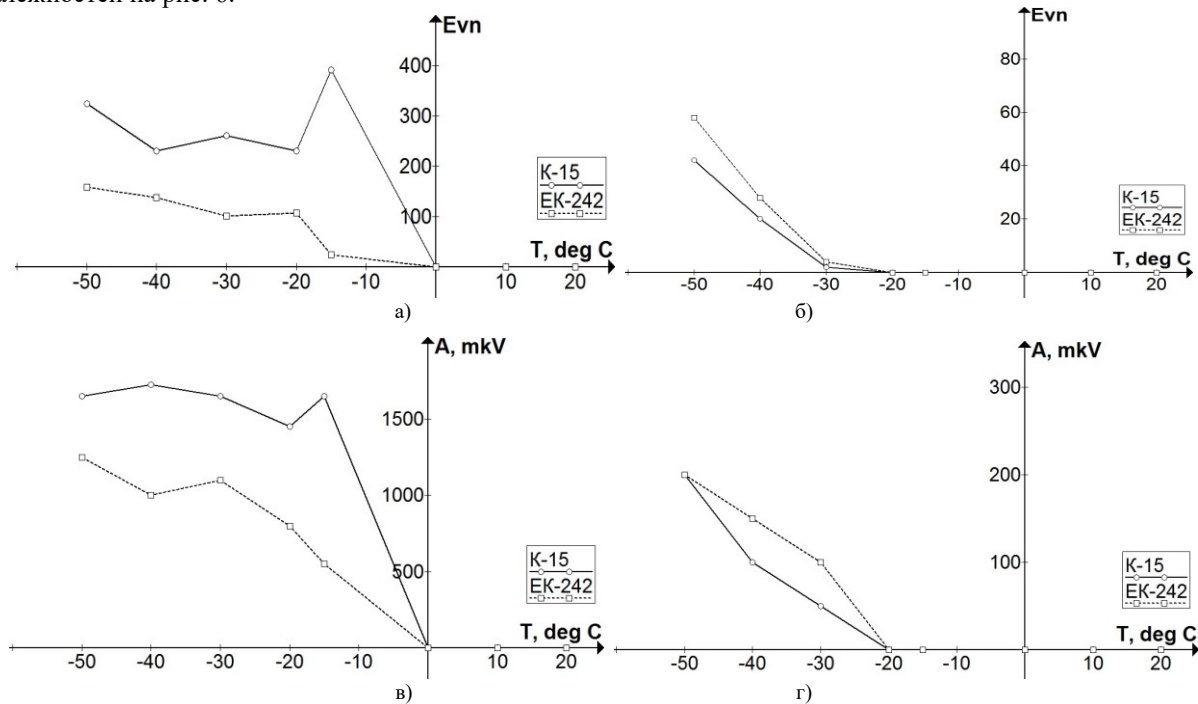


Рис. 6. Параметри акустичної емісії виміряні протягом двох температурних циклів:
загальна кількість подій для циклу 1 (а) та 2 (б); максимальна амплітуда для циклу 1 (в) та 2 (г)

Аналіз матеріалів, що містяться на графіках, показує, що сигнали АЕ набагато сильніше проявляються в керамічній частині конденсатора, ніж в компаундній, вони відсутні у всьому діапазоні додатних температур і починають з'являтися приблизно з температури $-12 \dots -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи максимуму при найбільшому значенні від'ємної температури $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Слід зазначити, що після витримки протягом 10–15 с при заданій температурі сигнали припинялися у всіх 30 конденсаторів. При зміні температури від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кімнатної сигнали АЕ не з'являлися. При другому термоударі сигнали АЕ не спостерігалися приблизно до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при більш низьких температурах їх прояв був в 5–10 разів слабшим, ніж при першому термоударі. Це свідчить про прояв ефекту Кайзера, а значить, про малість хибних сигналів і про міцність випробовуваних конденсаторів [11–15].

Висновки. Встановлено температурні межі працездатності датчиків АЕ, які складаються із сталевих, керамічних, пластмасових деталей, також здатних випромінювати сигнали АЕ при термоциклюванні. Датчик П113 працездатний в діапазоні від $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведено відбір хвилеводу, який служить для передачі сигналів АЕ від досліджуваного об'єкта в термокамері до датчика П113 поза термокамерою, що дозволило розширити межі температурного діапазону за рахунок збільшення додатних температур до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і від'ємних до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для усунення перешкод, пов'язаних з утворенням і розтріскування льоду при переході від додатних температур до від'ємних, була створена вакуумна установка. Розрядження, рівне 740 мм рт.ст., що створюється в установці, перешкоджало утворенню льоду на тестовому зразку і хвилеводі.

Здійснено розділення сигналів АЕ, що випромінюються компаундною і керамічною складовими конструкції конденсатора К 15-5, по частоті. Робоча смуга частот сигналів АЕ відповідає: для кераміки К-15 – 650–1000 кГц; для компаунда ЕК-242 – 130–300 кГц.

Запропоновано спосіб неруйнівного діагностування і контролю міцності та попередження небезпечних станів нероз'ємних з'єднань різних композиційних матеріалів на прикладі конструкції компаундованих керамічних конденсаторів К15-5, які працюють в умовах термоциклювання від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показником міцного стану конструкції є прояв ефекту Кайзера після перших двох термоциклів, поява АЕ на n -му термоциклі є попередженням катастрофічного руйнування конструкції через 5–10 циклів.

Література

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G. Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. Koripella, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGUSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

References

1. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.
2. H. Ardebili, J. Zhang and M. G. Pecht. Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition). United States, USA: William Andrew, Elsevier Inc., 2019, 508 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811978-5.00007-9>
3. E. J. R. Phua, M. Liu, B. Cho, Q. Liu, S. Amini, X. Hu, and C. LipGan. (2018, Mar.). Novel high temperature polymeric encapsulation material for extreme environment electronics packaging. *Materials & Design*, Vol. 141, pp.202-209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.029>.
4. Koripella, Chowdary Ramesh. Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1991, 14.4: 718-724.
5. Young, Amanda Lynn, et al. "Mechanical vs. electrical failure mechanisms in high voltage, high energy density multilayer ceramic capacitors." *Journal of materials science* 42.14 (2007): 5613-5619.
6. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22 № 6 (2016). – P. 494–489.
7. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanski E. S. *Strength of materials* – 2nd edition. – Kiev: – 2004, 655 P.
8. Cozzolino, Michael; Ewell, Gary. A fracture mechanics approach to structural reliability of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1980, 3.2: 250-257.
9. Kahn, S.; Checkaneck, R. Acoustic emission testing of multilayer ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6.4: 517-526.
10. V.P. Roizman, I.I. Kovtun Software and hardware complex of acoustic emission // Measurement and computation technique in technological processes. - Khmelnytsky: KhNU, 1997. - Vol. 1. - P. 25-29.
11. Kovtun I. Development of methods for acoustic emission non-destructive strength diagnostics of components and units / I.I. Kovtun, V.P. Royzman // Scientific collection of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Ser.: Military and technical sciences. – Khmelnytsky: NASBGUSU, 2015. – Vol. 3 (65). - P. 311–327.
12. Kovtun, I. I., Boiko, J. M., Petrashchuk, S. A. (2019), Reliability Improvement of Printed Circuit Boards by Designing Methods for Solder Joint Technical Diagnostics with Application of Acoustic Emission Method, *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, Vol. 79, pp. 60-70.
13. Shannon R., Zucaro G., Tallent J., Collins V., Carswell J. (2019), A system for detecting failed electronics using acoustics, *Instrumentation & Measurement Magazine IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 32-37.
14. I. Kovtun, S. Petrashchuk and J. Boiko, "Thermal Stress in Encapsulated Electronic Packages," 2019 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2019, pp. 1-6.
15. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 514-517.

Надійшла / Paper received: 23.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 519.25
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-6

КАРПОВА Л. В., ГОРОШКО А. В., ПИРОЖОК В. В.
Хмельницький національний університет

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ КЕРАМІЧНИХ РЕЗИСТОРІВ З ПОЛІМОДАЛЬНОЮ ЩІЛЬНОСТЮ РОЗПОДІЛУ

У статті представлені результати досліджень щодо підвищення міцності герметичних мікромодулів, направлених на виявлення причин розкиду значень характеристик міцності керамічних резисторів, виготовлених різними виробниками. Для статистичної обробки результатів вимірювань міцнісних характеристик резисторів запропоновано метод обробки полімодальних сумішей щільності розподілу ймовірностей.

Ключові слова: статистична обробка, щільність розподілу, суміш розподілів, закон Гаусса.

KARPOVA L., GOROSHKO A. V., PYROZHOK V. V.
Khmelnitskyi National University

STATISTICAL PROCESSING OF MEASUREMENT RESULTS STRENGTH CHARACTERISTICS OF CERAMIC RESISTORS WITH POLYMODAL PROBABILITY DISTRIBUTION

Much of the electronic equipment (REA) is operated in conditions of changes in atmospheric pressure, temperature, humidity, vibration and other destabilizing factors. The elements of such REA are subjected to static and dynamic mechanical load. According to various data, about 40% of such radio elements fail due to mechanical failure. In contrast to the field of mechanical engineering, in instrument making for some structures of CEA elements there are no strength standards and in general insufficient attention is paid to ensuring the strength of structures. One of the reasons for this state of affairs is the use of new materials with insufficiently studied physical and mechanical characteristics in the production of CEA. Due to objective and subjective reasons, the parameters measured on a real object, which characterize the quality of the electronic system, strength characteristics of materials of CEA elements, properties of materials, etc., usually have a scatter of values, ie can acquire arbitrary values in some numerical intervals. . Studies show that the variance of the values of such characteristics can be hundreds of percent, which often does not allow to provide a given strength of the structures of the elements of CEA [2-6].

One of the urgent tasks on the way to solving the problem of increasing the reliability of REA is the development and improvement of experimental methods for testing REA, in particular methods of statistical processing of measurement results. Having data on the implementation of these random variables, you can accurately estimate their true values, such as the method of confidence intervals.

The article presents the results of studies on increasing the strength of sealed micromodules aimed at identifying the causes of the spread in the strength characteristics of ceramic resistors manufactured by various manufacturers. For statistical processing of the results of measuring the strength characteristics of resistors, a method for processing polymodal mixtures of the probability distribution is proposed. The method consists in representing the mixture in the form of a superposition of Gaussian laws, followed by the decomposition of the mixture. Proposed effective methods of decomposition. The method was applied to determine the strength characteristics of resistors manufactured by three different factories. It has been substantiated that the features of production significantly affect the spread of values in the characteristics. The method has been tested and shown to be satisfactory. The developed method of statistical processing is more versatile than the existing parametric methods. In the case when empirical data formed under the influence of several dominant reasons are subject to assessment, and it is impossible to identify these reasons and divide the sample into corresponding subsamples, the method is more accurate than the existing ones.

Keywords: statistical processing, distribution density, mixture of distributions, Gauss's law

Постановка проблеми. Значна частина радіоелектронної апаратури (РЕА) експлуатується в умовах зміни атмосферного тиску, температури, вологості, вібраційного навантаження та інших дестабілізуючих факторів. Елементи такої РЕА піддаються статичному і динамічному механічному навантаженню. За різними даними близько 40 % таких радіоелементів виходять з ладу з причини механічних поломок [1]. На відміну від галузі машинобудування, у приладобудуванні для деяких конструкцій елементів РЕА відсутні норми міцності та загалом приділяється недостатня увага до забезпечення міцності конструкцій. Однією з причин такого стану речей є застосування у виробництві РЕА нових матеріалів з недостатньо вивченими фізико-механічними характеристиками. Через об'єктивні і суб'єктивні причини виміряні на реальному об'єкті параметри, які характеризують якість роботи радіоелектронної системи, міцнісні характеристики матеріалів елементів РЕА, властивості матеріалів тощо, як правило, мають розкид значень, тобто можуть набувати довільних значень у деяких числових інтервалах. Дослідження показують, що розкид значень таких характеристик може складати сотні відсотків, що часто і не дає можливість забезпечити задану міцність конструкцій елементів РЕА [2–6].

Однією з актуальних задач на шляху вирішення проблеми підвищення надійності РЕА є розробка і удосконалення експериментальних методів випробувань РЕА, зокрема методів статистичної обробки

результатів вимірювань. Маючи дані про реалізацію цих випадкових величин, можна з певною точністю оцінити їх істинні значення, наприклад методом довірчих інтервалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Через об'єктивні і суб'єктивні причини виміряні на реальному об'єкті параметри, які характеризують якість роботи радіоелектронної системи, міцнісні характеристики матеріалів елементів РЕА, властивості матеріалів тощо, як правило, мають розкид значень, тобто можуть набувати довільних значень у деяких числових інтервалах [7–9]. Це дає можливість приймати їх за випадкові величини, підпорядковані деяким законам розподілу. Маючи дані про реалізацію цих випадкових величин, можна з певною точністю оцінити їх істинні значення, наприклад методом довірчих інтервалів.

Крім призначення допустимих параметрів з заданою достовірністю, проблему дослідження законів розподілу доводиться вирішувати при ідентифікації електромагнітних сигналів [10], розробці нормативної документації, контролі якості продукції РЕА, що випускається [11], прогнозуванні ресурсу РЕА і в низці інших задач забезпечення надійності РЕА, де значення контрольованих величин визначають, випробовуючи дослідні зразки з наступною обробкою експериментальних матеріалів методами математичної статистики [12].

Застосування багатьма дослідниками параметричних статистичних гіпотез (нормального, логарифмічно нормального, експоненціального закону, закону Вейбулла, Гамма-розподілу тощо) виправдане їх достатньою вивченістю та можливістю отримання спроможних, незміщених і відносно високоефективних оцінок параметрів [7–9]. Однак вказані вище типові закони розподілу не мають необхідного різноманіття форм, тому їх застосування не дає необхідної загальності подання випадкових величин при дослідженні реальних систем РЕА. Якщо апроксимація на основі типових розподілів не дає бажаної точності статистичних оцінок, у нагоді може стати непараметричний підхід, описаний, наприклад, у роботах [12, 13]. Одним із недоліків непараметричних критеріїв є низька статистична потужність у порівнянні зі стандартними параметричними критеріями. Ріст статистичної потужності можливий лише з ростом об'єму вибірки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Серед всіх задач статистичної оцінки параметрів можна виокремити клас задач, в якому оцінці підлягають емпіричні дані, сформовані під дією декількох домінуючих причин, причому виявити ці причини і розділити вибірку на відповідні до них підвибірки не видається можливим. Зокрема, такі задачі часто виникають на виробництві при статистичній оцінці параметрів деякої вибірки деталей, які потрапили на підприємство із різних партій. Щільність розподілу (ЩР) ймовірностей досліджуваних параметрів може бути полімодальною.

Під час проведення досліджень, спрямованих на підвищення міцнісної надійності і недопущення відмов мікромодулів (рис. 1) через механічних пошкоджень резисторів встановлено, що кількість відмов залежить від значень опорів застосовуваних резисторів, заводу-виготовлювача і стану обладнання, на якому виробляли і здійснювали підготовку резисторів (рис. 2) до монтажу. Гістограми розподілу зусиль, що руйнують кераміку резисторів, мали як одновершинний, так і багатовершинний характер. Для статистичної обробки отриманих даних необхідно мати надійний і ефективний метод обробки даних з полімодальними законами розподілу. Авторами проведені дослідження з застосування такого методу для експериментального визначення міцності кераміки резисторів.

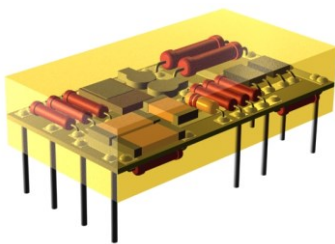


Рис. 1. Резистори, конденсатори та інші електрорадіоеlementи у мікромодулі до і після герметизації

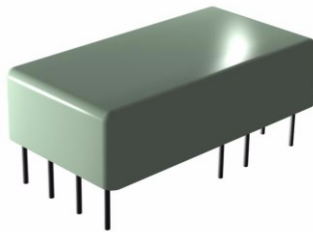


Рис. 2. Резистори С2–23–0,062

Результати досліджень. Математично полімодальні закони розподілу, які називають сумішами функцій розподілу, можна описати наступним чином [14]. Нехай у розподілі значень руйнівальної сили резисторів кількість умов виготовлення (технологічних ліній, заводів), які формують домінуючі причини появи підвибірок, дорівнює k , ймовірність того, резистор виготовлений у i -й умові дорівнює ρ_i ($i = \overline{1, k}$;

$\sum_{i=1}^k \rho_i = 1$), значення сили є випадковою величиною з ЩР $f_i(x, \mu_i, \sigma_i)$, $x \in \mathbf{R}$, де μ_i і σ_i – математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення i -ї підвибірки. Маємо випадкову величину X ; про умови

досліді, в результаті якого вона набуває певне значення, можна утворити k взаємовиключних гіпотез: $H_1, H_2, \dots, H_k$. Імовірності гіпотез відомі: $P(H_i) = \rho_i \quad \forall i = \overline{1, k}, \sum_{i=1}^k \rho_i = 1$.

Якщо має місце гіпотеза H_i , функція розподілу X дорівнює $F_i(x)$. Знайдемо повну («усереднену») функцію розподілу $F(x)$ випадкової величини X з врахуванням випадковості її закону розподілу.

За визначенням $F(x) = P\{X < x\}$. Знайдемо цю імовірність за формулою повної імовірності з гіпотезами $H_1, H_2, \dots, H_k$

$$F(x) = \sum_{i=1}^k P(H_i) F_i(x) = \sum_{i=1}^k \rho_i F_i(x), \quad x \in \mathbf{R},$$

де функції розподілу $F_i(x)$ – компоненти суміші; ρ_i – ваги відповідних компонент.

Дискретній суміші розподілів $F(x)$ відповідає дискретна ЩР

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \rho_i f_i(x, \mu_i, \sigma_i), \quad x \in \mathbf{R}. \quad (1)$$

При побудові статистичних моделей розподілу найважливішим етапом є декомпозиція (розщеплення) сумішей, оскільки структура отриманих при вибіркових спостереженнях даних, як правило, невідома. Це задача визначення кількості k , ваги ρ_i і вектора параметрів μ_i, σ_i кожної із підвбірок (партій, що змішуються) в загальній вибірці (змішаному розподілі) (1).

Суть запропонованого автором імовірнісного методу обробки експериментальних даних, що підпорядковані полімодальним законам розподілу, полягає у наступному:

- деякий параметр об'єкта розглядається як випадкова величина X ;
- кожна вибірка реалізацій може бути представлена у вигляді об'єднання k підвбірок;
- кожна підвбірка є вибіркою x_i із генеральної сукупності реалізацій випадкової величини з ЩР

f_i з вектором параметрів θ_i (компонент суміші), $i = \overline{1, k}, 2 \leq k < \infty$.

Якщо імовірність того, що X набуває значення, яке належить x_i , дорівнює ρ_i , то для наступної обробки статистичних даних пропонується представляти і обробляти емпіричну ЩР у вигляді суперпозиції k функцій з ЩР f_i , в якій f_i – унімодальні, у вигляді

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \rho_i f_i(x, \theta_i), \quad 2 \leq k < \infty, \quad x \in \mathbf{R}, \quad (2)$$

де ρ_i – апіорна імовірність (ваговий коефіцієнт) i -ї компоненти суміші. В загальному випадку умова приналежності $\forall i, f_i(X, \theta_i)$ до однієї параметричної сім'ї не ставиться.

Розглянемо окремий випадок, для якого гістограму вдається апроксимувати лінійною комбінацією Гаусових функцій ЩР з ваговими коефіцієнтами ρ_i виду

$$f(x, \mu_i, \sigma_i, \rho_i) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^k \rho_i \exp \left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right], \quad i = \overline{1, k}, \quad 2 \leq k < \infty. \quad (3)$$

Нехай у результаті експерименту одержана вибірка значень $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Для подальшої обробки результатів експерименту, перш за все, необхідно визначити невідомі параметри, застосувавши, наприклад, інтерполяцію на деякій точковій множині. Невідомі параметри необхідно шукати з умови збігу значень функції (3) у деяких точках (наприклад вершинах і западинах) зі значеннями апроксимувальної функції. Графік вказаної функції огинає плавною кривою побудовану гістограму. Ясно, що для однозначного визначення $3k$ невідомих параметрів кількість точок в множині повинна бути не менше, ніж

$3k - 1$ (оскільки коефіцієнти ρ_i завжди пов'язані рівнянням $\sum_{i=1}^k \rho_i = 1$). Таким чином, для знаходження невідомих μ_i, σ_i і ρ_i необхідно скласти і розв'язати систему рівнянь виду:

$$\begin{cases} F(x)_j = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, \mu_i, \sigma_i, \rho_i) dx = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^k \rho_i \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] dx, \\ \sum_{i=1}^k \rho_i = 1, \quad j = 1, 2, \dots, 3k - 1. \end{cases}, \quad (4)$$

де μ_i, σ_i, ρ_i – сталі невідомі параметри розподілу i -ї підвбірки і її ваговий коефіцієнт.

Очевидно, що розв'язок системи (4) після підстановки у функцію (3) буде тим точніше наближати реальність, чим менші ділянки розбиття при побудові гістограми, тобто чим точнішою є гістограма і огинаюча її плавна крива.

Пошук описаних параметрів можна здійснити і методом найменших квадратів [14], записавши функцію (3) і прирівнявши до нуля її частинні похідні по кожному з параметрів, де $g(x_j)$ – значення огинальної функції у вибраних точках, $n = 1, 2, \dots, n \geq 3k - 1$.

$$V = \sum_{j=1}^n \left[g(x_j) - (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^k \sigma_i^{-1} \rho_i \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \right]^2.$$

При розв'язанні аналогічної задачі можна використовувати і метод моментів, але оскільки підрахунок емпіричних моментів високих порядків призводить до значних похибок, то такий спосіб пропонується застосовувати для попередніх оцінок шуканих величин. Уточнення цих оцінок слід здійснювати, максимізуючи функцію максимальної вірогідності [14]:

$$W = \prod_{j=1}^n \sum_{i=1}^k (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_i^{-1} \rho_i \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right],$$

прирівнюючи до нуля її частинні похідні по шуканих параметрах.

Як правило, замість пошуку максимуму функції $W(\rho, \sigma, x)$ простіше шукати максимум її логарифму:

$$\ln W = \sum_{j=1}^n \ln \left(\sum_{i=1}^k (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_i^{-1} \rho_i \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \right). \quad (5)$$

Запропонований метод декомпозиції сумішей імовірнісних розподілів можна застосовувати як окремо, так і разом із відомими методами, що підвищує точність і вірогідність знайдених оцінок.

Запропонований авторами метод декомпозиції сумішей базується на апроксимації функції ЩР ймовірностей функцією типу (3.11) за допомогою МНК або інтерполяції на деякій точковій множині. В той же час відомо, що емпіричні дані вибірки $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ можуть бути представлені лише варіаційним рядом, гістограмою або вибірковою (емпіричною) функцією розподілу ймовірностей:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{\{x_j \leq x\}}, \quad (6)$$

де $1_{\{A\}}$ – індикатор події A .

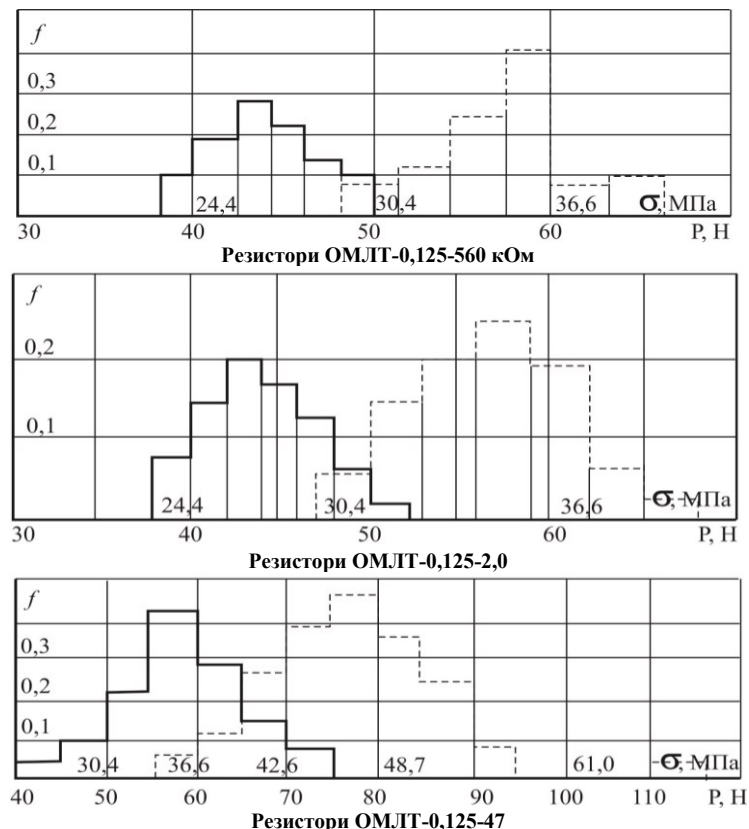


Рис. 3. Гістограми зусиль, що руйнують кераміку резисторів (виготовлені на Полтавському і Одеському заводах)

Для порівняння міцності кераміки резисторів, виготовлених на Полтавському і Одеському заводах, випробуванню на розтяг і згин піддавались по 100 резисторів, випадково вибраних з партій з однаковими номіналами, що найчастіше застосовуються у мікромодулях (56 Ом, 560 кОм, 2 МОм). Випробування проводили за методикою, описаною вище. Приклади гістограм зусиль, що руйнують кераміку резисторів, наведені на рис. 3. По осі абсцис відкладені величини зусиль, виміряні при випробуваннях, а по осі ординат - частота появи величин руйнівальних зусиль в i -му інтервалі значень цих зусиль.

Аналіз наведених гістограм показує, що вибірки значень підпорядковуються нормальним законам розподілу. Зведені характеристики вибірок наведені в таблиці 1. З надійністю $P=0,99$ критичним значенням коефіцієнта Ст'юдента для числа ступенів свободи $n = 198$ є $T^* = 2,6$. Аналіз матеріалів, що містяться в таблиці 1, показує, що резистори всіх порівнюваних номінальних опорів, виготовлені на Одеському заводі, істотно міцніше аналогічних резисторів, виготовлених на Полтавському заводі.

Таблиця 1.

Порівняння міцності кераміки резисторів, виготовлених на різних заводах

Завод	Опір і тип резистора												Вид випробування
	ОМЛТ-0,125-47±5 %				ОМЛТ-0,125-560кОм±5 %				ОМЛТ-0,125-2,0кОм±5 %				
	Характеристики вибірок												
	$\bar{x} \cdot 10^{-1}$, Н	$\sigma \cdot 10^{-2}$, Н²	T	T*	$\bar{x} \cdot 10^{-1}$, Н	$\sigma \cdot 10^{-2}$, Н²	T	T*	$\bar{x} \cdot 10^{-1}$, Н	$\sigma \cdot 10^{-2}$, Н²	T	T*	
1	7,1	2,94	12,22	2,60	5,8	0,13	26,0	26,0	5,8	0,27	21,67	2,60	Згин
2	4,9	0,33			4,5	0,09			4,5	0,12			
1	8,1	1,47	14,29		6,6	0,12	24,0	24,0	6,5	0,18	22,0		Розтяг
2	6,1	0,52			5,4	0,10			5,4	0,13			

В результаті аналізу відмов, викликаних руйнуванням керамічних основ резисторів було встановлено, що на кількість поломок впливає і номінальне значення опорів. Попередні якісні дослідження показали, що резистори з опором до 1 кОм не мають підгінних спіральних нарізок, в той час, як резистори опором до 1 МОм і більш мають, відповідно, одно- і двозаходну спіральну нарізку. Зазначені нарізки призводять до зменшення площі поперечного перерізу резистора і виникненню концентраторів напружень. При порівнянні для кожного типу резисторів для кожного заводу-виготовлювача були відібрані по сто резисторів кожного з найбільш поширених номіналів. Спочатку порівнювалися резистори різних номіналів в діапазоні до 1 кОм, потім від 1 кОм до 1 МОм, потім вище 1 МОм, причому кожна з двох порівнюваних груп резисторів була виготовлена на одному і тому ж заводі і мала один і той же тип.

Розрахунки показали, що, незалежно від типу і заводу-виробника, в межах кожної із зазначених груп з надійністю $P = 0,99$ міцність резисторів має несуттєве відмінність. Тому для порівняння далі були відібрані резистори типу ОМЛТ-0125, виготовлені на Одеському заводі, опором 47 Ом, 560 кОм, 2 МОм.

Порівняння руйнівальних зусиль при згині і розтягуванні для трьох зазначених груп показало, що резистори опором вище 1 кОм з надійністю $P=0,99$ несуттєво відрізняються по міцності, в той час як резистори до 1 кОм є істотно міцнішими. Порівняння міцності резисторів зазначених номіналів проведено на основі даних, наведених у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння міцності кераміки резисторів різних опорів

Опір резистора	Характеристика вибірки			
	σ_s , МПа	σ^2 , МПа ²	T	T^*
ОМЛТ-0,125-47 Ом	149	1296	—	—
ОМЛТ-0,125-560 кОм	122	57,3	7,39	2,6
ОМЛТ-0,125-2,0 МОм	—	—	—	—

Деякі ЕРЕ, володіючи близькими за величиною розмірами і електричними характеристиками, мають різні механічні властивості. З метою з'ясування, наскільки істотною є ця відмінність для резисторів різних типів були відібрані по 50 резисторів опором 56 Ом кожного з типів, виготовлених на Одеському заводі, які піддавались випробуванню на згин.

Обробка результатів експерименту показала, що найбільш міцними є резистори типу С2-23-0,062; найменш міцними – резистори типу ОМЛТ-0,125; резистори типу ОСМЛМ-0,125 є істотно менш міцними, ніж резистори типу С2-23-0,062 і істотно більш міцними, ніж резистори ОМЛТ-0,125. Характеристики кожної вибірки наведені в табл. 3. Значення T вибирали для ймовірності $P=0,99$. Число ступенів свободи при виборі T брали таким: у разі порівняння напружень, що підкоряються одномодальним законам - 98; у разі, коли один із законів є багатомодальним - сумі кількостей елементів, що утворюють підвибірки з мінімальним математичним очікуванням, без двох.

Приклад порівняння напружень, що виникають в кераміці при руйнуванні, наведено для резисторів типів ОСМЛМ-0,125 і С2-23-0,062. Гістограми, побудовані за результатами випробування на міцність при згині резисторів зазначених типів, наведені на рис. 4. Аналіз цих гістограм показує, що отримані в вибірках

значення руйнівних напружень для резисторів ОСМЛМ-0,125 мають тривершинну функцію щільності ймовірностей, а для резисторів С2-23-0,062 – нормальний закон розподілу. Відповідно до методики, викладеної у попередньому розділі, тривершинна гістограма апроксимується лінійною комбінацією трьох гауссових функцій щільності ймовірностей (рис. 5).

Таблиця 3

Порівняння граничних напружень, що виникають в кераміці резисторів різних типів

Тип резистора	Характеристика вибірки				
	σ_g , МПа	σ^2 , МПа ²	n	T	T^*
ОМЛТ-0,125	155	661,5	50	9,95	3,42
ОСМЛМ-0,125	197	22,05	33		
ОМЛТ-0,125	155	661,5	50	6,17	2,63
С2-23-0,062	246	61,7	50		
ОСМЛМ-0,125	197	22,05	33	45,88	3,42
С2-23-0,062	246	61,7	50		

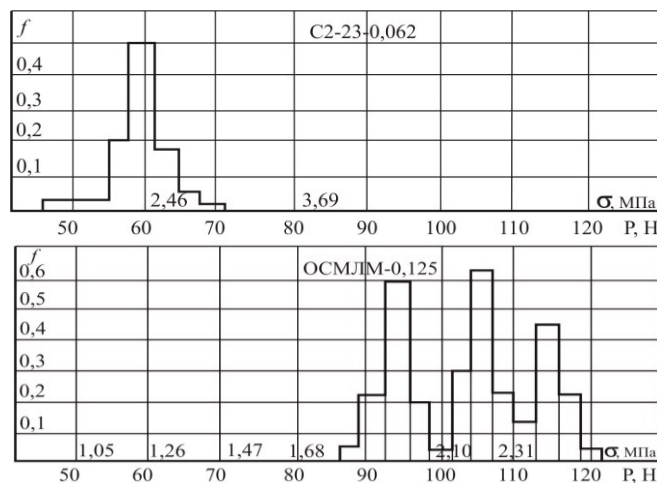


Рис. 4. Гістограми зусиль, що руйнують кераміку резисторів С2-23-0,062 і ОСМЛМ-0,125 при статичному згині

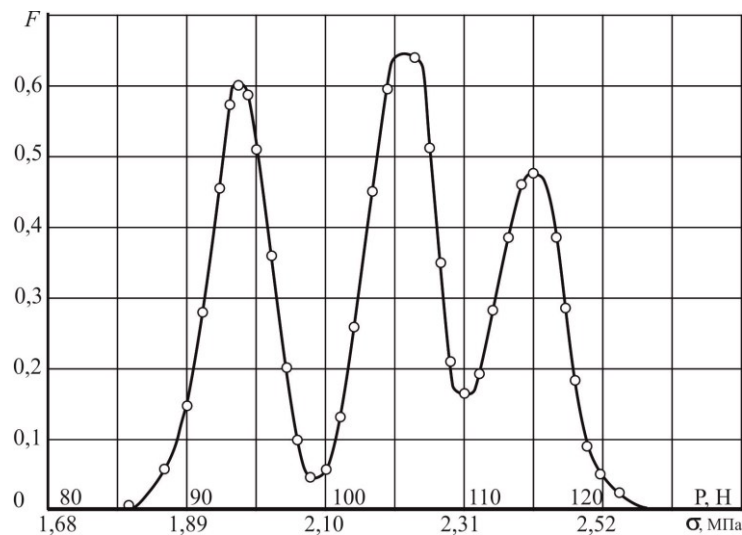


Рис. 5. Апроксимувальна функція

Таблиця 4

Порівняння міцності кераміки резисторів ОСМЛМ-0,125 і С2-23-0,062

$\sigma \cdot 10$, МПа	18,38	19,64	21,53	22,16	23,41	24,05	25,31	20,90
$f(x, \mu_i, \sigma_i, \rho_i)$	0,067	0,6	0,333	0,67	0,167	0,467	0,067	0,067
μ_1 Н	μ_2 Н	μ_3 Н	σ_1 Н ²	σ_2 Н ²	σ_3 Н ²	ρ_1	ρ_2	ρ_3
19,68	22,09	24,07	22	23	24	0,33	0,39	0,28

Для подальшої обробки результатів випробувань на основі наявної гістограми визначено дев'ять невідомих параметрів тримодального закону розподілу ($\mu_i, \sigma_i, \rho_i, i=1,2,3$). Для цього застосовано метод інтерполяції на восьмиточковій множині. Вузли інтерполяції, а також значення шуканої функції в цих вузлах наведені в таблиці 4. У результаті був записаний закон ЩР (3), що дало змогу точніше описати розподіл значень вимірних значень і врахувати їх при визначенні механічних характеристик резисторів.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі. У результаті проведених досліджень був запропонований метод опису вимірних даних за допомогою полі модальних сумішей розподілу унімодальних законів. Розроблений метод статистичної обробки є більш універсальним за існуючі параметричні методи. У випадку, коли є оцінки підлягають емпіричні дані, сформовані під дією декількох домінуючих причин, причому виявити ці причини і розділити вибірку на відповідні до них підвибірки не видається можливим, метод є більш точним за існуючі.

Застосування методу дало можливість експериментально визначити і порівняти характеристики міцності резисторів, виготовлених на різних заводах. Обґрунтовано, що значні відхилення у цих значеннях, очевидно є причиною недостатньої міцності конструкцій мікромодулів.

Література

1. Кофанов Ю.Н., Ройзман В.П. Методы системного анализа вибрационной прочности изделий / Монография - Москва: изд. Радио и связь, 2007, 178 с.
2. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 2 : Динамическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с.
3. Лопухин В.А. Обеспечение точности электронной аппаратуры: Конструкторско-технологические методы. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ие, 1980. - 269 с.
4. Гусев В.П. и др. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.П. Гусева и А.В. Фомина. М.: Сов. Радио, 1963. 367с.
5. Горощко А.В. Стан проблеми забезпечення якісного проектування структурно-складних технічних виробів та технологічних процесів їх виготовлення / А.В. Горощко, В.П. Ройзман // Вісник Хмельницького національного університету. - 2012. №5. - С. 59-68.
6. Горощко А.В., Ройзман В.П. Про задачу обробки статистичних матеріалів, що не підкоряються одномодальним законам розподілу. Современные достижения в науке и образовании : сб. тр. VII междунар. Науч. Конф., посвящ. 50-летию Хмельниц. Нац. Ун-та, 25 авг.-1 сент.2012 г., г. Оpatiya (Хорватия). - Хмельницкий-2012.-107 с. (укр., рус., англ.). ISBN 966-96180-35-43. С. 58-66.
7. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства. М.: Изд-во АН СССР, 1950. - 416 с.
8. Райнксхе К. Модели надежности и чувствительности систем: Пер. с нем. М.: Мир, 1979. - 452 с.
9. Ийуду К.А. Оптимизация устройств автоматизации по критерию надежности / К.А. Ийуду. М.: Л. Энергия, 1966. - 194 с.
10. Ройзман В. П., Горощко А. В. Метод ідентифікації параметрів моделей складних технічних систем // Вісник в техніці та технологіях. № 3 (79). 2015. - С. 44-49.
11. Зайцев Г. Н., Любомудров С. А., Федюкин В. К. Нормирование точности геометрических параметров машин : учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В. К. Федюкина. М. : Академия, 2008. 368 с.
12. Орлов А. И. Прикладная статистика : учебник. М. : Экзамен, 2004. 656 с.
13. Owen A. Empirical likelihood ratio confidence regions // The annals of statistics. 1990. Vol. 15, No. 1. P. 90–120.
14. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие. – 2-е изд., стер. М. : Высшая школа, 2000. 480 с.

References

1. Kofanov YU.N., Royzman V.P. Metody sistemnogo analiza vibratsionnoy prochnosti izdeliy / Monografiya Moskva: izd. Radio i svyaz', 2007, 178 s.
2. Mekhanika v elektronike. Monografiya: [v 3 t.] T. 2 : Dinamicheskaya prochnost' / Royzman V. P. Khmel'nitskiy : KHNU – 2015. - 313 s.
3. Lopukhin V.A. Obespecheniye tochnosti elektronnoy apparatury: Konstruktorsko-tehnologicheskiye metody. L.: Mashinostroyeniye. Leningradskoye otd-iyе, 1980. 269 s.
4. Gusev V.P. i dr. Raschet elektricheskikh dopuskov radioelektronnoy apparatury / Pod red. V.P. Guseva i A.V. Fomina. M.: Sov. Radio, 1963. 367s.
5. Goroshko A.V. Stan problemi zabezpechennya yakisnogo proyektuvannya strukturno-skladnikh tekhnichnikh virobiv ta tekhnologichnikh protsesiv ikh виготовлення / A.V. Goroshko, V.P. Royzman // Visnik KhNU. 2012. №5. S. 59-68.
6. Goroshko A.V., Royzman V.P. Pro zadachu obrobki statistichnikh materialiv, shcho ne pidkoryayut'sya odnomodal'nim zakonam rozpodilu. Sovremennyye dostizheniya v nauke i obrazovanii : sb. tr. VII mezhdunar. Nauch. Konf., posvyashch. 50-letiyu Khmel'nits. Nats. Un-ta, 25 avg.-1 sent.2012 g., g. Opatiya (Khorvatiya). - Khmel'nitskiy : KHNU; FOP Storozhuk O.V.-2012.-107 s.
7. Borodachev N.A. Osnovnyye voprosy teorii tochnosti proizvodstva. M.: Izd-vo AN SSSR, 1950. 416 s.
8. Raynkshe K. Modeli nadezhnosti i chuvstvitel'nosti sistem: Per. s nem. M.: Mir, 1979. 452 s.
9. Iyudu K.A. Optimizatsiya ustroystv avtomatiki po kriteriyu nadezhnosti / K.A. Iyudu. M.: L. Energiya, 1966. 194 s.
10. Royzman V. P., Goroshko A. V. Metod identifikatsii parametrv modeley skladnikh tekhnichnikh sistem // Vibrateii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. № 3 (79). 2015. C. 44-49.
11. Zaytsev G. N., Lyubomudrov S. A., Fedyukin V. K. Normirovaniye tochnosti geometricheskikh parametrov mashin : ucheb. posob. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / pod red. V. K. Fedyukina. M. : Akademiya, 2008. 368 s.
12. Orlov A. I. Prikladnaya statistika : uchebnik. M. : Ekzamen, 2004. 656 s.
13. Owen A. Empirical likelihood ratio confidence regions // The annals of statistics. 1990. Vol. 15, No. 1. P. 90–120.
14. Ventsel' Ye. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya : ucheb. posobiye. – 2-ye izd., ster. M. : Vysshaya shkola, 2000. 480 s.

Надійшла / Paper received: 13.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 621.391.251

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-7

КОРЕЦЬКА Л. О., ФОРКУН І. В., МЕДЗАТИЙ Д. М.
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПАПЕРУ

У статті наведено дослідження основних метрологічних характеристик засобів вимірювального контролю вологості паперу: теоретичну та експериментальну градувальні характеристики, похибки засобу вимірювань вологості паперу (абсолютну, відносну, зведену), встановлено клас точності вимірювального засобу. Наведено алгоритм виконання комплектною повірки засобу.

Ключові слова: автоматизована система контролю вологості, метрологічні характеристики, надлишковий метод, вологість паперу.

KORETSKA L., FORKUN I., MEDZATYI D.
Khmelnytskyi National University

STUDY OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF AUTOMATED MEANS OF MEASURING CONTROL OF PAPER HUMIDITY

The moisture content of the paper plays a very important role, as it affects the strength, stability of the size and shape of the sheets. Control over the preparation of printing machines for printing, which aims to ensure the correct position of the print on the paper, twisting, warping, static electricity, the formation of wrinkles and folds is impossible without control over the humidity of the paper and the dynamics of its change. The greatest stability of paper moisture is observed at a humidity of 45%. And the most favorable range of humidity - 40-60%. But when you move sheets of paper from storage areas where the temperature is lower, to the room where the printing will take place and the temperature is higher, and accordingly, a difference in humidity is created, which will affect the humidity of the paper. After weaving the polyethylene sheets of paper begin to absorb moisture until there is a balance of humidity in the environment. Changing the moisture content of the paper leads to printing defects, the use of more ink, incompatibility of inks on the prints, and others. Therefore, measuring the moisture content of the paper before printing is of great importance. The optimum moisture content in the paper is 4.5–5.5 %. High-precision automated measuring instruments should be used to monitor such small values.

High-precision determination of paper humidity in an automated humidity control system is important because the range of usability of paper that is suitable for use is quite small. Inaccurate measurement can lead to the paper being considered unusable by the system, and vice versa.

The use of surplus methods of measuring the humidity content of sheet materials provides automatic correction of errors, which are due to the influence of the following factors: absolute values of the parameters of the conversion function of the measuring channel and their deviation from the nominal values; nonlinearity and instability of the parameters of the transformation function of the measuring channel as a result of the influence of external destabilizing factors; attenuation of the flow of optical radiation introduced by the elements of the optical path and contamination of the optical elements. The extraction of the error components is carried out as a result of processing the obtained intermediate data according to a certain equation of surplus measurements.

The article studies the metrological characteristics of the automated paper humidity control system, which is based on the use of the method of surplus measurements. The accuracy class of the automated control system is determined.

Keywords: automated humidity control system, metrological characteristics, surplus method, paper humidity.

Вступ. Вміст вологи у папері відіграє досить важливу роль, оскільки це впливає на міцнісні показники, стійкість розмірів та форми листів. Контроль за підготовкою друкувальних машин до друку тиражу, який має на меті забезпечити правильне положення відтиску на папері, скручуванням, коробленням, статичною електрикою, утворення зморшок та складок неможливий без контролю за вологістю паперу та динамікою її зміни. Найбільш стабільність вологості паперу спостерігається при вологості оточуючого середовища 45 %. А найбільш сприятливий діапазон вологості повітря – 40-60%. Але при перенесенні листів паперу з складських приміщень, де температура нижча, у приміщення, де відбуватиметься друк і температура є вищою, і відповідно, створюється і різниця вологості, яка впливатиме на вологість паперу. Після знаття поліетилену листи паперу починають вбирати вологу до тих пір поки не настане рівновага відносно вологості повітря навколишнього середовища. Зміна вологості паперу призводить до дефектів друку, використання більшої кількості фарби, несуміщення фарб на відтисках і ін. Тому вимірювання значення вологості паперу перед друком має велике значення. Оптимальний вміст вологості в папері становить 4,5–5,5 %. Для контролю таких невеликих значень повинні використовуватись високоточні автоматизовані засоби вимірювального контролю.

Результати досліджень. У попередніх дослідженнях було показано [1–3], що використання надлишкових методів вимірювального контролю вологості листових матеріалів забезпечує автоматичну

корекцію похибок, які обумовлені впливом наступних факторів: абсолютних значень параметрів функції перетворення вимірювального каналу та їх відхилення від номінальних значень; нелінійністю та нестабільністю параметрів функції перетворення вимірювального каналу у результаті впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів; послаблення потоку оптичного випромінювання, що вноситься елементами оптичного тракту та забрудненням оптичних елементів. Вилучення складових похибки здійснюється у результаті обробки отриманих проміжних даних за певним рівнянням надлишкових вимірювань. Зменшення випадкових складових похибки вимірювання можливе за рахунок здійснення багаторазових вимірювань у кожному такті та їх статистичної обробки. Проведемо дослідження метрологічних характеристик засобу вимірювального контролю вологості паперу.

Для визначення дійсного значення концентрації вологи в папері розроблено метод надлишкових вимірювань, який полягає в виконанні чотирьох тактів вимірювання потужностей потоків оптичного випромінювання, які перетворені у напруги. У першому такті проводилось вимірювання так званого зміщення нуля. У другому такті у оптичний тракт встановлювався зразок листового матеріалу із відомим значенням вологості. Потужність послабленого потоку оптичного випромінювання перетворювали у напругу. У третьому такті вимірювалось значення напруги, у яку перетворено потужність послабленого потоку оптичного випромінювання, який містить інформацію про зразок матеріалу та про досліджуваний матеріал. У четвертому такті проводилось вимірювання значення напруги, у яку перетворено потужність послабленого потоку ОВ, що пройшов через досліджуваний матеріал. Далі за рівнянням надлишкових вимірювань (1) визначалось дійсне значення вологості паперу:

$$C_x = C_0 \frac{\ln(U_2 - U_0) - \ln(U_1 - U_0)}{\ln(U_2 - U_0) - \ln(U_3 - U_0)}. \quad (1)$$

Для перевірки запропонованого методу було розроблено автоматизований цифровий оптико-електронний засіб, який забезпечує прийом послабленого потоку ОВ, перетворення його у електричний сигнал та обробку інформації про вологість досліджуваного матеріалу за вимірюваними значеннями потужності послабленого потоку ОВ. Такий засіб міститиме в собі оптичні, електронні, механічні та інші елементи [4–6]. Структурна схема засобу наведена на рис. 1.

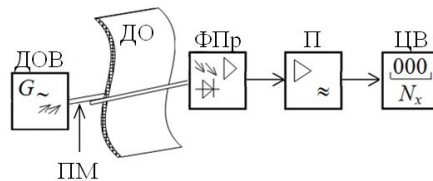


Рис. 1. Структурна схема цифрового оптико-електронного засобу вимірювального контролю вологості листових матеріалів: ДОВ – джерело оптичного випромінювання, ПМ – протяжний механізм, ДО – досліджуваний об’єкт, ФПр – фотоприймач, П – підсилювач, ЦВ – цифровий вольтметр

Згідно з цією структурною схемою засіб вимірювального контролю містить джерело оптичного випромінювання ДОВ, на виході якого формується потік оптичного випромінювання, який потрапляє на досліджуваний об’єкт ДО. Протягування листового матеріалу за допомогою протяжного механізму ПМ дозволяє вимірювати потужність послабленого потоку оптичного випромінювання, що пройшов через об’єкт дослідження, у кількох місцях. Послаблений потік оптичного випромінювання, потрапляє на фотоприймач ФПр, який перетворює його у електричний сигнал. Сигнал з виходу фотоприймача ФПр подається на підсилювач, з якого подається на цифровий вольтметр ЦВ.

Здатність засобу вимірювальної техніки витримувати метрологічні характеристики у заданих межах визначає його надійність. Для оцінки відповідності метрологічних характеристик їх нормованим значенням проводять процес перевірки засобів вимірювальної техніки, яка полягає у визначенні похибок засобів вимірювальної техніки і винесення рішення про їх придатність до застосування [7].

Повірку засобів вимірювальної техніки можна здійснювати двома методами: поелементно; комплексно. Поелементна перевірка передбачає визначення метрологічних характеристик кожного вимірювального перетворювача окремо. на основі відомих функціональних залежностей визначають сумарні метрологічні характеристики засобу, що повіряється. Під час комплексної перевірки визначають метрологічні характеристики засобу вимірювальної техніки як єдиного цілого без визначення метрологічних характеристик окремих її частин.

Для визначення метрологічних характеристик розробленого засобу вимірювальної техніки запропоновано використати метод зразкових засобів, в основу якого покладено одночасне вимірювання фізичної величини засобом, що повіряється, та зразковим засобами вимірювальної техніки. При цьому оператор має встановити, що на зразковий і на засіб, який повіряється, діє одна і та інтенсивність фізичної величини.

Характерною рисою методу зразкових засобів є застосування в автоматизованій системі зразкових засобів, що мають відомі і стабільні метрологічні характеристики. До зразкових засобів вимірювальної техніки пред'являється така вимога: «Точність зразкового засобу має бути в 3–5 раз вищою ніж точність засобу, який повіряється».

Для здійснення комплектної повірки необхідно виконати наступну послідовність дій [7]:

1. Отримати градувальні характеристики засобу вимірювальної техніки для контрольованих матеріалів;
2. Навести структурну схему повірки;
3. Використати або запропонувати методику визначення дійсного значення;
4. Визначити із діапазону вимірювання 3–5 точок, в яких необхідно провести вимірювальний експеримент;

5. В цих точках провести одночасне вимірювання зразковим засобом і засобом, що повіряється. Виміряне значення отримане зразковим засобом прийняти за дійсне значення C_{x_d} , а засобом, що повіряється, – за виміряне C_{x_b} ;

6. Оцінити в цих точках діапазону вимірювання абсолютну, відносну, зведену похибки;

7. Знайти із ряду відносних і зведених похибок максимальні значення і за допомогою метрологічного ряду встановити клас точності.

Для визначення градувальної характеристики необхідно визначитись із значенням контрольованої величини, допусками на її зміну та кроком квантування.

Для офсетного паперу (№ 1, першого сорту) згідно ГОСТ 9094–89 [8] значення контрольованого параметра повинно знаходитись у межах (2):

$$C_x = 6\% \pm 1\%. \quad (2)$$

Для забезпечення вимірювального контролю у заданому діапазоні задамось верхньою межею вимірювання $C_{x_{\max}} = 8\%$.

Крок квантування становить (3):

$$h = \frac{C_{x_{\max}}}{2^n} = \frac{8\%}{2^{10}} = 0,008\%. \quad (3)$$

Градувальна характеристика за (3) засобу контролю вологості паперу матиме вигляд (рис. 2, а):

$$C_x = h \cdot N = 0,008\% \cdot N, \quad (4)$$

де N – кількість імпульсів, які підрахує двійковий лічильник за АЦП-перетворення.

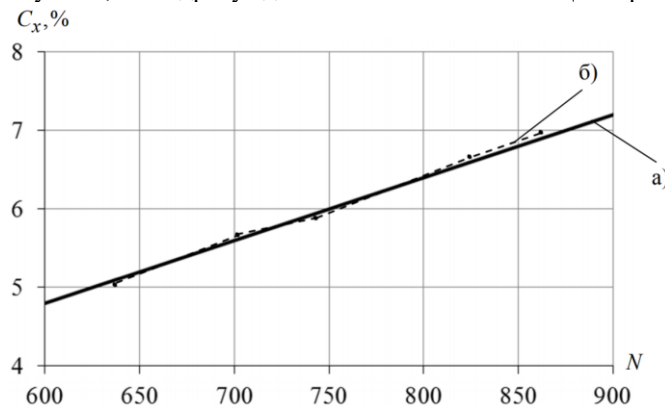


Рис. 2. Теоретична градувальна характеристика (а) та отримані експериментальні дані (б)

Для експериментального визначення дійсного значення вологості засобом контролю необхідно виконати вимірювання вологості згідно ГОСТ 13525.19-91 (ISO 28785) при температурі $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$. Обладнання та матеріали відповідають умовам цього Державного стандарту. Вологість зразка паперу визначається за формулою (у відсотках):

$$C_x = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де m – маса ємності для зважування, г; m_1 – маса ємності для зважування із зразком паперу до висушування, г; m_2 – маса ємності для зважування із зразком паперу після висушування, г.

Результати описаного експерименту прийнято за дійсні значення і занесено до таблиці 1 та позначені на рис. 2, б.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Дійсне значення вологи, %	5,08	5,65	5,98	6,54	6,89	Нормоване значення
Виміряне значення вологи, %	5,04	5,71	5,92	6,59	6,97	–
Абсолютна похибка, %	-0,04	+0,06	-0,06	+0,05	+0,08	0,08
Відносна похибка, %	0,79	1,06	1,01	0,77	1,16	2,0
Зведена похибка, %	0,50	0,75	0,75	0,63	1,00	1,0

Проведемо перевірку адекватності запропонованої математичної моделі. Для цього визначимо похибку між даними, що отримані теоретично, та експериментальними даними:

$$\delta_{\text{ММ}} = \frac{C_{x(\text{теорет})} - C_{x(\text{експ})}}{C_{x(\text{експ})}} \cdot 100\%.$$

Встановлено, що похибка між результатами теорії та практики не перевищує 1,5 %.

За допомогою програмного забезпечення NUMERI була побудована статична характеристика (рис. 3) вимірювального каналу засобу вимірювального контролю вологості паперу, яка була апроксимована поліномом I ступеня. Експериментальна функція перетворення вимірювального каналу виглядає наступним чином:

$$C_x = -0,03135 + 1,0550 \cdot C_{x_3}. \quad (6)$$

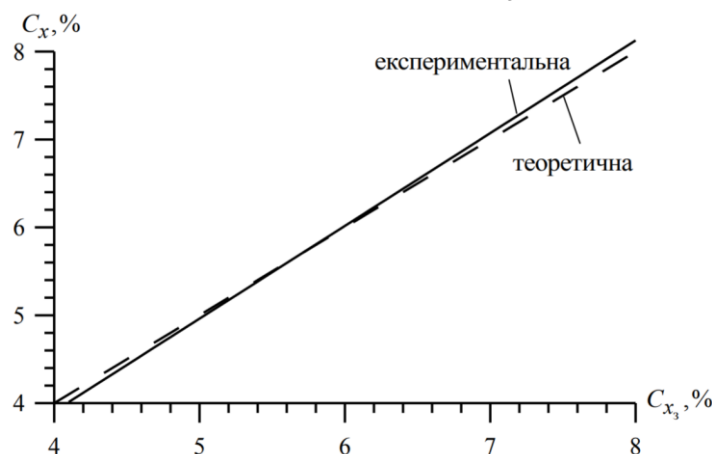


Рис. 3. Експериментальна градувальна характеристика

Висновки. У результаті досліджень метрологічних характеристик встановлено:

- теоретична статична характеристика засобу є лінійною;
- експериментальна статична характеристика представляється у вигляді полінома першого порядку і має як адитивну (0,3135 % (ваг.)) так і мультиплікативну (1,055 % (ваг.)) складову похибки;
- випадкова складова похибки розподілена за нормальним законом. Систематична складова похибки не перевищує 0,0017 % (ваг.), а середнє квадратичне відхилення – 0,319 % (ваг.);
- максимальна зведена похибка засобу контролю не перевищує 1,00 %, клас точності засобу становить 1,0.

Література

1. Ковтун Л.О. Надлишкові вимірювання вологості оптично-прозорих листових матеріалів та їх ефективність. / В.Т. Кондратов, Л.О. Ковтун // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. -2009. -№1. –С. 21-27.
2. Ковтун Л.О. Оцінка вірогідності контролю вологості оптично-прозорих листових матеріалів (офсетного паперу) [Текст] / Л. О. Ковтун // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №4. – С. 36-39.
3. Ковтун Л.О. Надлишковий метод вимірювального контролю вологості паперу із використанням двоканального широкодіапазонного оптико-електронного засобу / Л.О. Ковтун, Д.М. Медзатий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 2. – С. 170-175.
4. Кучеренко, О. К. Розрахунок і конструювання оптичних приладів [Електронний ресурс] : навчальний посібник . – Київ : НТУУ «КПІ», 2011.
5. Міхеєнко Л.А. Учебный посібник з дисципліни "Оптичні вимірювання". Частина 1. Метрологічна обробка результатів вимірювання. -К.:каф. ООЕП,2009 - 39с
6. Міхеєнко Л.А., Мамута М.С. Основи конструювання приладів: Навчальний посібник – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 202с.
7. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: Навчальний посібник. – Вінниця, ВДТУ, 2001. – 219 с.
8. ГОСТ 9094-89. Бумага для печати офсетная.

References

1. Kovtun L.O. Nadlishkovi vimirjuvannja vologosti optichno-prozorih listovih materialiv ta ih effektivnist'. / V.T. Kondratov, L.O. Kovtun // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. -2009. -№1. –S. 21-27.
2. Kovtun L.O. Ocinka virogidnosti kontrolju vologosti optichno-prozorih listovih materialiv (ofsetnogo paperu) [Tekst] / L. O. Kovtun // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2013. – №4. – S. 36-39.
3. Kovtun L.O. Nadlishkovij metod vimirjuval'nogo kontrolju vologosti paperu iz vikoristannjam dvokanal'nogo shirokodiapazonnogo optiko-elektronnoho zasobu / L.O. Kovtun, D.M. Medzatij // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2017. – №2. – S. 170-175.
4. Kucherenko, O. K. Rozrahunok i konstruvannja optichnih priladiv [Elektronnij resurs] : navchal'nij posibnik . – Kiiv : NTUU «KPI», 2011.
5. Miheenko L.A. Uchbovij posibnik z disciplini "Optichni vimirjuvannja". Chastina 1. Metrologichna obrobka rezul'tativ vimirjuvannja. -K.:kaf. OOEP,2009 - 39s
6. Miheenko L.A., Mamuta M.S. Osnovi konstruvannja priladiv: Navchal'nij posibnik – K.: NTUU «KPI», 2015. – 202s.
7. Volodars'kij Є.T., Kuharchuk V.V., Podzharenko V.O., Serdjuk G.B. Metrologichne zabezpechennja vimirjuvan' i kontrolju: Navchal'nij posibnik. – Vinnicja, VDTU, 2001. – 219 s.
8. GOST 9094-89. Bumaga dlja pečati ofsetnaja.

Надійшла / Paper received: 17.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

UDK 620.91

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-9

MARTYNYUK V., FORKUN Y., FORKUN I., NOVAK T.
Khmelnytsky national university

ARCHITECTURE OF SOLAR PANEL INTELLIGENT MONITORING SYSTEM BY MEANS OF INDUSTRIAL CONTROLLER

The paper is devoted to increasing the efficiency of real-time monitoring of the basic solar panel parameters. The main disadvantage of existing solar panel monitoring systems is the inability to troubleshoot a single solar panel of large power plants. This is due to the fact that modern inverters transmit voltage, current and power data of solar panel string. To determine which particular panel has bad parameters, it is necessary to disconnect all panels in the string and check their parameters separately. Another disadvantage of existing solar panel monitoring systems is the inability to measure the temperature of each panel individually, which significantly affects the solar panel performance. The solar panel intelligent monitoring system was developed and based on using the measuring sensors. The solar panel intelligent monitoring system is connected to the Internet via Wi-Fi. The solar panel intelligent monitoring system improves the measurement accuracy of the basic solar panels parameters. The solar panel intelligent monitoring system reduces the detection time of solar panels with bad parameters and characteristics.

Keywords: solar panel, intelligent monitoring system, solar panel string, detection time, parameters.

МАРТИНЮК В. В., ФОРКУН Ю. В., ФОРКУН І. В., НОВАК Т. О.
Хмельницький національний університет

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЕРУ

Стаття присвячена підвищенню ефективності моніторингу основних параметрів сонячної батареї в режимі реального часу. Основним недоліком існуючих систем моніторингу сонячних панелей є неможливість усунення неполадок однієї сонячної панелі великих електростанцій. Це пов'язано з тим, що сучасні інвертори передають дані напруги, струму та потужності сонячної батареї. Щоб визначити, яка конкретна панель має погані параметри, необхідно від'єднати всі панелі в рядку та перевірити їх параметри окремо. Ще одним недоліком існуючих систем моніторингу сонячних панелей є неможливість вимірювати температуру кожної панелі окремо, що суттєво впливає на продуктивність сонячної панелі. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей була розроблена і базується на використанні вимірювальних датчиків. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей підключена до Інтернету через Wi-Fi. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей покращує точність вимірювання основних параметрів сонячних панелей. Інтелектуальна система моніторингу сонячних панелей зменшує час виявлення сонячних панелей з поганими параметрами та характеристиками.

Ключові слова: сонячна панель, інтелектуальна система моніторингу, рядок сонячних панелей, час виявлення, параметри.

Introduction. The trouble-free operation of solar panels and all elements of a solar power plant is a prerequisite for efficient electricity production and a profitable investment in a solar power plant. To ensure long trouble-free operation, periodic audits (diagnostics, defect recommendations) of all elements of a solar power plant are required.

Detecting defective and finding inefficient solar panels with reduced efficiency affects the level of electricity generation during the operation of a solar station. If the solar panels are connected in series, the failure of one of the elements can lead to partial or total loss of power of the entire solar power plant. In addition, due to the fact that solar panels are made up of a large number of semiconductor cells, the generation of heat in a faulty element can lead to the destruction of neighboring elements, the problem will grow over time. Therefore, it is necessary to identify defective solar panels on time, which will allow them to be quickly replaced. This will maximize system life and maximize efficiency.

For timely detection of defective solar panels, it is necessary to continuously monitor the performance of the equipment, which allows timely detection of disturbances in the operation of solar panels, as well as control access to individual modules.

The solar monitoring system consists of modules that record the signals of current, voltage and temperature sensors of individual solar panels, as well as sensors of wind speed, position of the Sun, door sensors or sensors of unauthorized access to network inverters. The system modules are connected to a local controller, which in turn is connected to a higher level controller via a Modbus RS485 or CAN bus. Modular construction provides high configuration flexibility and system expansion. Thanks to this module they are suitable for use both in big power solar plants and in small power solar plants.

Monitoring is also important because during the day there may be a sharp drop in power, which may be due to various factors, such as shading the solar panel with certain objects or contamination of the solar panel surface (leaves, snow and dust).

By analyzing the solar panel monitoring systems, we can point out some draw-backs, such as the inability to measure the parameters of each solar panel separately, since most existing systems connect to the inverter and measure the main characteristics of the entire string, the high cost of such a system, and the inability to measure the temperature.

The renewable energy monitoring system (REMS) is proposed in [1]. The main advantages of REMS are the concept of an open source and low-cost data acquisition and transmission system using multi-user cloud remote monitoring. The REMS architecture is based on the Internet of Things (IoT) and Cloud computing principles. The REMS consists of three main parts: San USB microcontroller, Raspberry Pi (Rpi) Embedded Linux System (ELS) and Online Web Monitor for real-time cloud monitoring.

Another solar monitoring system is designed with the help of Lab VIEW and DAQ card and presented in [2]. The solar panel is connected to the battery and then with sensors. The proposed system is connected by four sensors with Lab VIEW via DAQ hardware to acquire data. Lab VIEW has shown a high performance in communicating with several devices simultaneously and high capability of displaying several variables behavior at a time.

The solar monitoring system proposed in [3] is developed to get information on the defected solar panels for timely repair and maintenance. This system can be used up to 146 V and 15.5 A solar cell systems with an automatic selection of best resolutions.

Lab-VIEW based real-time interface system in paper [4] presents the detailed characterization of the performance and dynamic behavior of photovoltaic systems. They developed a software tool that integrates several types of instruments into a single system which can offer online measurements of all data sources and compare simulation results with monitored data in real-time. The proposed method provides a fast, secure and reliable system by making the system database-ready for performance analysis of the PV systems. The integration methodology of robust simulation and monitoring data in real-time can be used to study the fault diagnosis of a PV system.

To solve the current problem of monitoring photovoltaic (PV) systems especially for regions in developing countries or remote areas; an Arduino based open-source electronic platform data logger was developed [5]. This data logger meets the International Electro technical Commission (IEC) standards requirements with a resolution of 18-bits, including 8 analog inputs for measuring up-to 8 PV modules. They mentioned that these data logger can be customized for the specific needs of each project.

The remote intelligent monitoring system [6] is based on Tiny OS for monitoring and management for PV power generation. This system had implemented remote monitoring and reverse control by the host computer, ARM gateways, wireless sensor networks, and other components.

A simple sensor-based microcontroller data acquisition system for monitoring the temperature data in solar installations is presented in [7]. The system can easily change the date; time of experiment start and end, sampling rate and deals correctly with corruption such as power failure. The proposed data acquisition system can handle up to 16 sensors, has user interface system (4 buttons LCD screen), own storage systems such as flash memory or SD card; therefore, it doesn't require any external computer to store the sensors data. This system automatically creates a new file on the SD card every day and records data on it and data can be handled and analyzed easily by any mathematical software such as Excel or MATLAB. The system monitors the sensors remotely by using the internet.

The Smart Remote monitoring system is presented in [8] which is using IOT that can monitor the Solar PV PCU and stores data in the cloud database through an easily manageable web interface. The proposed system has flexibility by using GPRS technology to interconnect the Solar PV Power Conditioning Unit to the Remote server.

Paper [9] presents the solar cell data acquisition system. The solar cell is characterized by impedance which depends on environmental conditions. The solar cell data acquisition system is designed to measure the impedance of the solar cell. These impedance measurements are also used in the electrochemical capacitor quality control [10]. The experimental Nyquist plot was fitted by using the improved expression for impedance of the solar cell.

Solar panel intelligent monitoring system block diagram. The proposed solar panel intelligent monitoring system is based on the WiFi ESP8266 Development Board WEMOS D1. The WEMOS D1 board can be configured to work on Arduino environment using BOARDS MANAGER. The PAC1710 sensor is used to measure the voltage, current and power of the solar panel. This sensor measures the voltage developed across an external sense resistor to represent the high-value current of the solar panel. The PAC1710 also measures the voltage and calculates the average power over the integration period. The long integration time allows for solar panel intelligent monitoring system polling cycles without losing any power information.

The PAC1710 sensor is used because its maximum measured voltage is 40 V. Usually, the solar panel maximum voltage is less than 40 V. The main advantage of the PAC1710 sensor is capability to measure voltage, current and power of the solar panel without using additional current and power sensors. I2C bus is used to transmit the voltage, current and power data to the WEMOS D1 board.

The DS18B20 digital thermometer is used for the temperature measurements. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with WEMOS D1 board. The measured temperature range for the DS18B20 digital thermometer is from $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. This temperature range corresponds to the solar panel operation temperature range. The solar panel intelligent monitoring system block diagram is shown in figure 1.

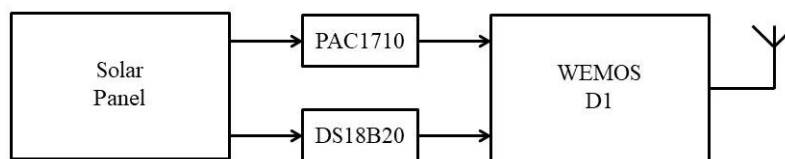


Fig. 1. Solar panel intelligent monitoring system block diagram

The solar panel intelligent monitoring system was designed as the prototype print-ed circuit board (PCB) with the PAC1710 sensor and the resistor shunt. The solar panel current passes through the resistor shunt and creates the voltage drop on it. The PCB is connected to the WEMOS D1 board and shown in figure 2.

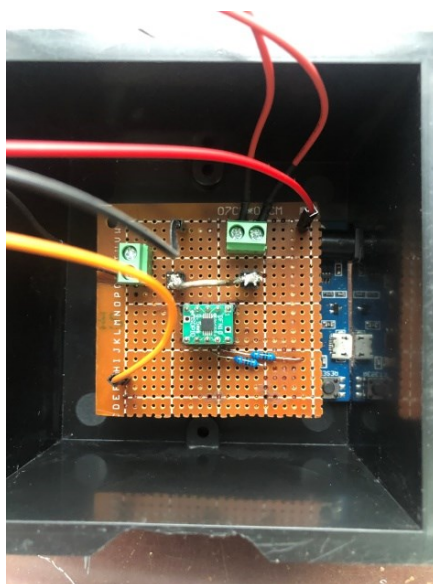


Fig. 2. Solar panel intelligent monitoring system PCB

The voltage, current, power and temperature data of the solar panel are sent via WiFi to the open Home Automation Bus (openHAB). OpenHAB is an open source, technology agnostic home automation platform which runs as the center of the smart home. The openHAB's strength is its ability to integrate a multitude of other devices and systems. Also openHAB includes other home automation systems, (smart) devices and other technologies in a single solution. OpenHAB provides a uniform user interface and a common approach to automation rules across the entire system, regardless of the number of manufacturers and sub-systems involved.

Solar panel intelligent monitoring system software algorithm. The solar panel intelligent monitoring system software algorithm consists of the following steps. The flowchart of the solar panel intelligent monitoring system software is shown in figure 3.

The first step is the declaration of variables and data input:

Tempr is temperature; Volt is the solar panel voltage; Curr is the solar panel current; WLAN_SSID is the WiFi network name; WLAN_PASS is the WiFi network password; MQTT_SERVER is the IP address of MQTT server; MQTT_SERVERPORT is the MQTT server port; MQTT_USERNAME is the name for authorization on MQTT server; MQTT_PASSWORD is the password for authorization on MQTT server; MQTT_TOPIC is the "topic" to which data will be transferred; buttonPin is the Arduino pin that reads temperature. The Tempr, Volt, and Curr variables are used to exchange data between the WEMOS D1 board and Open-Hab.

The second step is the initialization of WEMOS D1 board ports for connection with the DS18B20 digital thermometer.

The third step is the initialization of the WEMOS D1 board on the WiFi network and its operation with OpenHAB.

The fourth step is the transfer procedure for the temperature, current, voltage and power data from the sensors to the WEMOS D1 board and to OpenHAB.

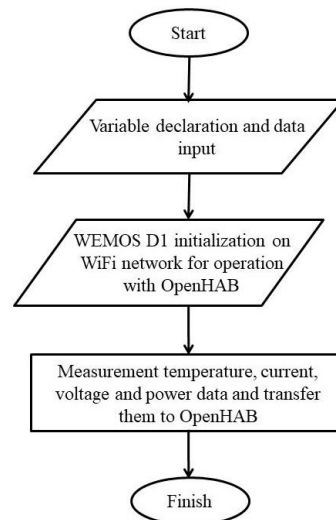


Fig. 3. Flowchart of the solar panel intelligent monitoring system algorithm

The main aim of the OpenHab website is to display the parameters of the solar panel such as temperature, voltage, current and power. These data are updated every 10 seconds. According to these data, graphs of parameters are plotted versus time. The OpenHAB website is shown in figure 4.

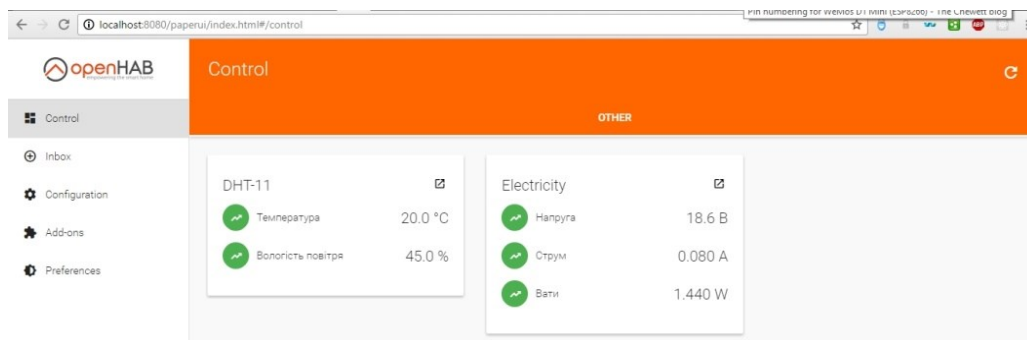


Fig. 4. OpenHab website

Experimental setup of solar panel intelligent monitoring system. The experimental setup of solar panel intelligent monitoring system is shown in figure 5.



Fig. 5. Experimental setup of solar panel intelligent monitoring system

The experimental setup of solar panel intelligent monitoring system consists of the solar panel ALM-10M, the prototype printed PCB with the PAC1710 sensor and the resistor shunt, WEMOS D1 board, DS18B20 digital thermometer which are mounted on the reverse side of the solar panel. To confirm the operation of the solar panel intelligent monitoring system the rheostat was connected to the solar panel as load. By changing the rheostat resistance the operation of the solar panel intelligent monitoring system was confirmed. Figure 6 shows dependences of voltage, current and power versus time at the rheostat resistance change.

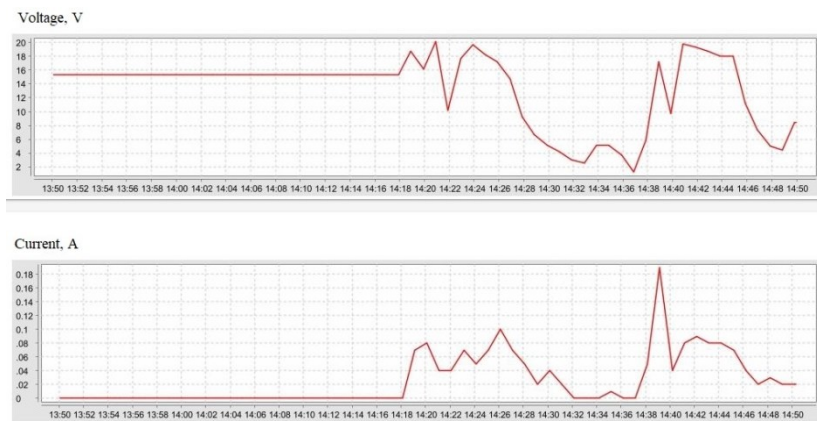


Fig. 6. Dependences of voltage, current and power versus time at the rheostat resistance change

Conclusions. The solar panel intelligent monitoring system was developed using OpenHab home automation technology platform. The solar panel intelligent monitoring system connects via Wi-Fi to track real-time energy generation from anywhere on the globe via a computer or smartphone connected to the Internet. By using the solar panel intelligent monitoring system the measurement accuracy of the solar panel parameters was increased. The solar panel intelligent monitoring system reduces the detection time of panels with bad parameters and characteristics.

To prepare data on the solar panel measurement parameters obtained from the WEMOS D1 board for sending from the operator's computer to the Web server and for further processing, it is necessary to establish a connection between these two nodes. In most cases, such tasks use a serial interface that is physically implemented using a USB-MicroUSB cable. The serial interface lets us send control signals from operator's computer to the WEMOS D1 board and retrieve process information backwards. In this way, the computer communicates with the WEMOS D1 board, which accordingly manages and receives the measurement parameters using the USB port. The developed software allows obtaining values of voltage, current and temperature produced by the solar panel.

References

1. S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana, H. Saha, "An IOT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit", 2nd International Conference on Controle, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC) (2016).
2. O. Chieochan, A. Saokaew, E. Boonchieng, "Internet of Things (IOT) for smart solar energy: A case of study of the smart farm of Maejo University", International Conference on Controle, Automation and Information Sciences (ICCAIS) (2017).
3. R. I. S. Pereira, I. M. Dupont, P. C. M. Carvalho, S. C. S. Jucá, "IoT embedded Linux system based on Raspberry Pi applied to realtime cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant", Measurement 114 (2018) 286-297.
4. M. D. Phung, M. De La Villefromoy, Q. Ha, "Management of solar energy in micro grids using IoT-based dependable control" 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (2017).
5. K. Naga Venkatarao, K. Vijay Kumar, "An IoT Based Smart Solar Photo Voltaic Remote Monitoring", International Journal of Engineering Technology, Management and Research (IJMETMR) (2017).
6. Jongbae Kim, Jinsung Byun, Daebeom Jeong, Myeong-in Choi, Byeongkwan Kang, Se-hyun Park, "An IoT-Based Home Energy Management System over Dynamic Home Area Networks", International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 11, no. 10, Jan (2015).
7. S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana and H. Saha, "An IoT based smart solar photo voltaic remote monitoring and control unit", 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), Kolkata, pp. 432-436. (2016).
8. B. Shrihariprasath and V. Rathinasabapathy, "A smart IoT system for monitoring solar PV power conditioning unit", 2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave), Coimbatore, pp. 1-5, (2016).
9. V. Martynyuk, M. Fedula, R. Petrus, D. Makaryshkin and L. Kovtun, "Solar cell data acquisition system", 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017), Metz, France, pp.140-146 (2019).
10. V. Martynyuk, M. Fedula, M. Ortigueira and O. Savenko "Methodology of Electrochemical Capacitor Quality Control with Fractional Order Model", AEU - International Journal of Electronics and Communications, V. 91, pp. 118-124 (2018).

Надійшла / Paper received: 22.02.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 004.932
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-9

БЕДРАТЮК Л. П., БЕДРАТЮК Г. І.
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕТОДІВ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З ДОПОМОГОЮ МОМЕНТНИХ ІНВАРІАНТІВ

У роботі запропоновано новий метод оцінки якості масштабування напівтонових зображень на основі геометричних моментів зображення. Вводиться поняття нормалізованих моментів довільного порядку і доводиться, що вони не змінюються при масштабуванні зображень і тому можуть слугувати мірою для оцінки якості зображень при масштабуванні. Проведені числові експерименти показали, що нормалізовані моменти ефективно виявляють спотворення зображення при різних типах інтерполяції і поводять себе аналогічно як і відомі індекси якості зображень.

Ключові слова: якість зображення, масштабування, інтерполяція зображення, індекси якості, нормалізовані інваріанти.

BEDRATYUK L., BEDRATYUK A.
Khmelnytsky National University

SCALING IMAGE QUALITY ASSESSMENT VIA NORMALIZED MOMENT INVARIANTS

Digital image processing often leads to a loss of image quality, which is expressed in the appearance of unwanted artifacts on the converted image – changes in sharpness, contrast, dynamic range, tone reproduction, pixelation, curvature of straight lines, aliasing, and so on. The process of determining the level of conformity of the original and converted image is called image quality assessment. Image quality can be assessed in two ways: subjectively and objectively. Subjective methods are based on the visual assessment of image attributes performed by the observer. Despite their efficiency and reliability, subjective methods are quite expensive, require a large number of people and cannot be automated in real time. Objective methods for assessing the quality of the processed image attempt to quantify the apparent errors between the converted image and the original image using different metrics. Objective and subjective methods do not necessarily agree with each other and do not give the same accuracy, because a person can often capture significant differences in images that are not yet recognized by the implemented algorithms.

The paper proposes a new method for assessing the quality of scaling grayscale images based on the geometric moments of the image. The normalized moments of arbitrary order is introduced and it is proved that they do not change under image scaling and, therefore, may serve as a measure to assess the quality of images. Numerical experiments have shown that the normalized moments effectively detect image distortion for different types of interpolation and behave similarly to the known image quality indices.

Keywords: image quality, scaling, image interpolation, quality indices, normalized invariants.

1. Вступ. Цифрова обробка зображення часто призводить до втрати якості зображення, яка виражається у появі на перетвореному зображенні небажаних артефактів – зміни різкості, контрасту, динамічного діапазону, тонового відтворення, появи пікселізації, викривлення прямих ліній, аліасингу, тощо. Процес визначення рівня відповідності оригінального і перетвореного зображення називається **оцінкою якості зображення**. Якість зображення можна оцінити двома способами: суб'єктивним та об'єктивним. Суб'єктивні методи ґрунтуються на візуальній оцінці атрибутів зображення, яка виконується спостерігачем. Незважаючи на свою ефективність і надійність, суб'єктивні методи досить затратні, вимагають залучення великої кількості людей і їх неможливо автоматизувати в режимі реального часу. Об'єктивні методи оцінки якості обробленого зображення намагаються кількісно оцінити видимі помилки між перетвореним зображенням та оригінальним зображенням, використовуючи різні метрики. Об'єктивні і суб'єктивні методи не обов'язково узгоджуються між собою і не дають однакової точності, оскільки людина часто може фіксувати суттєві відмінності в зображеннях, які ще не розпізнають реалізовані алгоритми. Вимірювання якості візуального зображення має принципове значення для численних програм для обробки зображень та відео. Існує біля сотні різноманітних метрик [1–3] для вимірювання якості зображення, найбільш популярні з них – середня квадратична помилка (MSE), пікове співвідношення сигналу до шуму (PSNR), універсальний індекс якості зображення (UQI), індекс структурної схожості (SSIM), індекс дескрипторної схожості (FSIM), градієнтна міра подібності (GSM), міра рівня шуму (NQM).

Одним із найпоширеніших методів обробки зображень, яке часто зустрічається в застосуваннях, є масштабування, тобто збільшення, або зменшення розмірів растрового зображення без зміни його пропорцій. Фактично, масштабування є передискретизацією зображення, яке при збільшенні масштабу називається **інтерполяцією**, а при зменшенні – **децимацією**. В даній статті ми розглядаємо лише інтерполяцію напівтонових зображень. Останнім часом з'явилося багато різноманітних методів інтерполяції, див. [4]–[5], що робить актуальним вивчення методів оцінки якості такої інтерполяції. Ідеальний алгоритм інтерполяції, повинен зберігати якісні характеристики обробленого зображення, оскільки інтерпольовані

зображення як правило спотворюються артефактами, таким як розмиття, розриви країв, ефекту «шахової дошки». Крім того, застосовувані методи повинні мати високу швидкість та низькі вимоги до пам'яті, особливо коли вони орієнтовані на додатки для зображень у реальному часі, такі як мобільні телефони чи цифрові камери. Існує велика кількість методів інтерполяції зображень, відмітимо такі як метод найближчого сусіда, лінійна інтерполяція, бікубічна, ітерполяція сплайнами, інтерполяція Ланцошата і інші, див. огляд [9–10].

Розробка методів інтерполяції зображень традиційно знаходиться в полі зору дослідників, проте набагато менше було приділено уваги на розробку методів її оцінки. Слідуючи [9], схематично всі такі методи можна поділити, на дві категорії. Перша категорія включає всі методи, за допомогою яких можна оцінити критерії *достовірності* алгоритму інтерполяції. У цьому випадку оцінюються характеристики продуктивності інтерпольованого зображення у термінах артефактів. Для цього зображення зменшується, потім збільшується до початкових розмірів, і вже відомими методами оцінюється якість цього зображення і початкового, див. наприклад [11]. Друга категорія оцінки включає методи, які вимірюють обчислювальні характеристики самого алгоритму інтерполяції, його часову та просторову складності.

В статті ми пропонуємо новий метод оцінки якості інтерполяції на основі геометричних моментів зображення. Геометричні моменти та їхні інваріанти вперше були введені в роботі [12] і інтенсивно використовуються в комп'ютерному зорі та розпізнаванні образів. На основі моментів будуються глобальні дескриптори зображення, які характеризують форму об'єктів на зображенні і є стійкими до простих перетворень – паралельного перенесення, поворотів і рівномірного масштабування. Зокрема, нормалізовані геометричні моменти є інваріантними до масштабування зображень. Той факт, що нормалізовані моменти не змінюються для оригінального та ідеально інтерпольованого зображення, дозволяє використати нормалізовані моменти як природню міру якості інтерполяції. Крім того, недоліком стандартних методів оцінки якості інтерполяції є те, що досліджуване зображення фактично зазнає інтерполяції два рази – один раз при зменшенні зображення, і другий раз при збільшенні. Така подвійна обробка спотворює зображення, що може негативно вплинути на якість оцінювання методу інтерполяції. Запропонований нами метод не потребує попереднього зменшення і дозволяє порівнювати якість зображень різних розмірів.

Стаття організована наступним чином. В розділі 2 вводиться поняття геометричних моментів, нормалізованих геометричних моментів і доводиться, що нормалізовані моменти є інваріантами відносно розтягу зображення. Також вводиться поняття моментної метрики. В розділі 3 дана коротка характеристика методів інтерполяції які будуть аналізуватися – інтерполяція за найближчим сусідом, лінійна інтерполяція та віконна інтерполяція Ланцоша. В розділі 4 наводяться результати числових експериментів з обчислення нормалізованих моментів та аналізу їхньої поведінки при інтерполяції.

2. Нормалізовані моментні інваріанти та моментна метрика. Введення моментних інваріантів було одним із яскравих прикладних застосувань класичної теорії інваріантів до проблеми класифікації зображень. В важливій роботі [12] було вперше запропоновано для вирішення проблем розпізнавання розглядати добре відомі в математиці статистичні моменти. Дамо необхідні означення. Під цифровим зображенням ми будемо

розуміти функцію від двох змінних $f(x, y)$, яка задана на деякій множині Ω площини $\mathbb{R}^2$ і яка приймає в цій області скінченні значення.

Геометричним моментом порядку $p + q$ функції $f(x, y)$ називається вираз

$$m_{pq}(f(x, y)) = m_{pq} = \iint_{\Omega} x^p y^q f(x, y) dx dy, \Omega \subset \mathbb{R}^2.$$

Для дискретного бінарного зображення його геометричний момент $m_{0,0}$ є кількістю білих пікселів. Також, в термінах моментів виражається координати центру мас зображення:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{0,0}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{0,0}}.$$

Нормалізованим моментом μ_{pq} порядку $p + q$ називається вираз

$$\eta_{p,q} = \frac{m_{pq}}{m_{0,0}^{\frac{p+q}{2}+1}}.$$

Нагадаємо, що S -кратним рівномірним по осям масштабуванням зображення $f(x, y)$ називається нове зображення $\tilde{f}(x, y) = f(sx, sy)$. Геометрично, рівномірне масштабування є гомотетією, яка зберігає лінії, кути між ними, пропорції відрізків та яскравості пікселів. Тому при рівномірному масштабуванні неперервного зображення не відбувається жодних спотворень.

Доведемо, що нормалізовані моменти є *інваріантами* відносно рівномірного масштабування зображення. Обчислимо спочатку геометричний момент масштабованого зображення $\tilde{f}(x, y)$. Маємо:

$$m_{pq}(f(sx, sy)) = \tilde{m}_{pq} = \iint_{\tilde{\Omega}} x^p y^q f(sx, sy) dx dy = \iint_{\Omega} \left(\frac{x}{s}\right)^p \left(\frac{y}{s}\right)^q f(x, y) \frac{dx}{s} \frac{dy}{s} = \frac{1}{s^{p+q+2}} m_{p,q}.$$

Тут під $\tilde{\Omega}$ позначена область, у яку перейшла область Ω при масштабуванні. Зауважимо, що виконана заміна змінних в подвійному інтегралі, є фактично оберненим масштабуванням, яке переводить $\tilde{\Omega}$ в Ω .

Отже, геометричний момент $\tilde{m}_{pq}$ масштабованого зображення відрізняється від геометричного моменту оригінального зображення $\tilde{m}_{pq}$ лише числовим множником, зокрема $\tilde{m}_{pq} = \frac{1}{s^2} m_{0,0}$. Тому

$$\tilde{\eta}_{p,q} = \frac{\tilde{m}_{pq}}{(\tilde{m}_{0,0})^{\frac{p+q}{2}+1}} = \frac{\frac{1}{s^{p+q+2}} m_{p,q}}{(\frac{1}{s^2} m_{0,0})^{\frac{p+q}{2}+1}} = \frac{m_{p,q}}{m_{0,0}^{\frac{p+q}{2}+1}} = \eta_{p,q}, (p, q) \neq (0, 0).$$

Отже, нормалізований момент $\eta_{p,q}$ є інваріантом відносно масштабування і приймає однакові значення як на зображенні $f(x, y)$ так і на зображенні $\tilde{f}(x, y)$.

При переході до дискретного зображення розміру $M \times N$ -пікселів, інтеграли замінюються сумами і вираз для геометричних моментів приймає такий вигляд

$$m_{p,q} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y),$$

а вираз для $\eta_{p,q}$ залишається тим самим. Аналогічно, можна показати, що нормалізований момент є інваріантом масштабування.

Для оцінки спотворень існують різноманітні методи, найбільш поширеним є середньо квадратичне відхилення

$$MSE(f, \tilde{f}) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - \tilde{f}(x, y))^2.$$

Проте, як зазначають різні автори, див. наприклад [13], не існує сильної кореляції між зоровою деградацією якості зображення та середньо квадратичним відхиленням. У більшій мірі структуру зображення відображають універсальний індекс якості UQI і індекс структурної схожості SSIM. Також, якісна метрика повинна задовольняти природну умову – якщо при масштабуванні відбулися спотворення зображення, то чим більші ці спотворення тим більшою повинна бути відстань між оригіналом і інтерпольованим зображенням.

В розділі 4 ми експериментально підтвердимо що нормалізовані геометричні моменти задовольняють цій умові монотонності, вивчаючи поведінку нормалізованих моментів при інтерполяції зображень.

Тому ми пропонуємо ввести такі дві метрики як міру оцінки якості масштабування зображень

$$\rho_1(f, f') = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (\eta_{p,q} - \eta'_{p,q})^2,$$

$$\rho_2(f, f') = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |\eta_{p,q} - \eta'_{p,q}|, (x, y) \neq (0, 0).$$

Ми оцінимо якість методу інтерполяції та порівняємо їх, використовуючи різні метрики.

3. Алгоритми інтерполяції. Інтерполяція зображень може бути описана як процес використання відомих даних для оцінки значень у невідомих місцях. По суті масштабування є повторною дискретизацією зображення різноманітними інтерполяційними алгоритмами. Пояснимо причини виникнення артефактів при інтерполяції. Припустимо, що нам потрібно збільшити зображення в два рази, або в три рази. При такому збільшенні, кожен піксель старого зображення буде оточений околom із трьох, відповідно, восьми пікселів, див Рис.1, рівень яскравості яких невідомий:

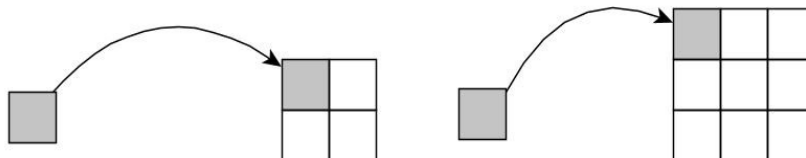


Рис. 1. Збільшення зображення в два рази (ліворуч) і в три рази (праворуч) в околі пікселя

Якщо значення пікселів покласти рівними 0, отримаємо деградоване зображення, низької якості рис. 1, праворуч:

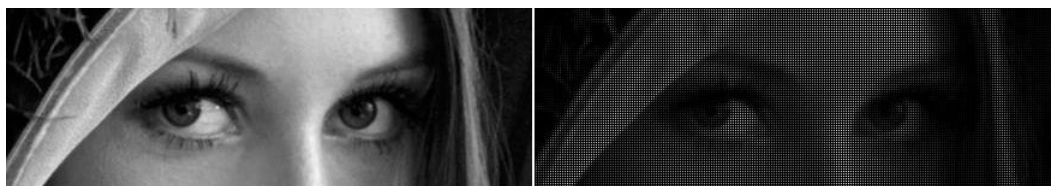


Рис. 2. Оригінальне зображення (ліворуч) та частина збільшеного зображення (праворуч)

Всі відомі алгоритми інтерполяції зводяться до методів присвоєння пікселям таких значень, щоб інтерпольоване зображення було візуально схожим на оригінал, і не містило нової небажаної інформації. Існує велика кількість алгоритмів інтерполяції, їхня кількість постійно збільшується. Розглянемо три стандартні алгоритми масштабування зображення, які ми будемо використовувати для оцінки критеріїв ефективності інтерполяції.

При інтерполяції методом найближчого сусіда, новим пікселям присвоюються значення пікселя оригінального зображення рис. 3

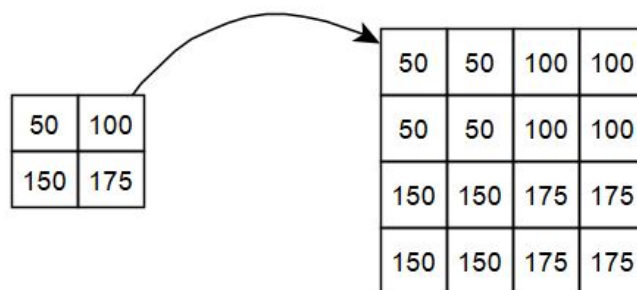


Рис. 3. Розподіл пікселів при збільшенні зображення в два рази

Це простий, легкий у реалізації, алгоритм, але він часто приводить до появи на зображенні небажаних артефактів, зокрема значного спотворення прямолінійних контурів при збільшенні кратності масштабування.

Білінійна інтерполяція є узагальненням звичайної лінійної інтерполяції на випадок функції двох змінних. При білінійній інтерполяції, невідоме значення яскравості $f(x, y)$ пікселя з координатами (x, y) визначається відомою яскравістю чотирьох найближчих пікселів $(x_1, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_1), (x_2, y_2)$ які розміщені так як вказано на рис. 4:

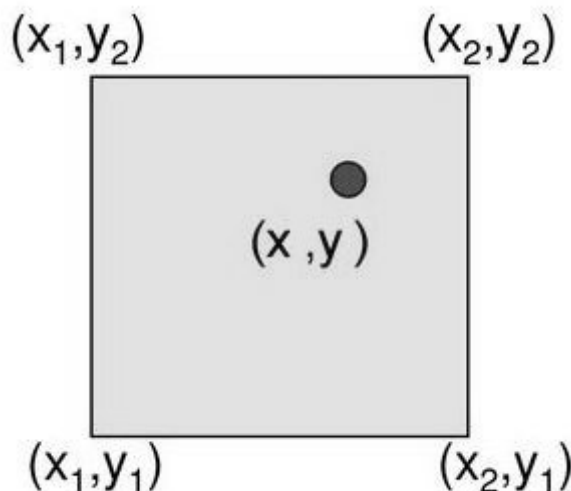


Рис. 4. Розташування пікселів при білінійній інтерполяції

За наступною формулою

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

де невідомі a_0, a_1, a_2, a_3 визначаються з системи рівнянь

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_1 & y_2 & x_1y_2 \\ 1 & x_2 & y_1 & x_2y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f((x_1, y_1)) \\ f((x_1, y_2)) \\ f((x_2, y_1)) \\ f((x_2, y_2)) \end{bmatrix},$$

записаній у матричній формі.

Інтерполяція Ланцоша визначається згорткою зображення $f(x, y)$ з двовірним ядром

$$W_{Ln}(x, y) = w_{Ln}(x)w_{Ln}(y),$$

де

$$w_{Ln}(x) = \begin{cases} 1, \text{ для } |x| = 0, \\ \frac{n}{\pi^2 x^2} \sin\left(\pi \frac{x}{n}\right) \sin(\pi x), \text{ для } 0 < |x| < n, \\ 0, \text{ для } |x| \geq n. \end{cases}$$

Нове значення пікселя у збільшеного зображення $\tilde{f}(x, y)$ в результаті такої згортки має вигляд

$$\tilde{f}(x, y) = \sum_{v=y-n+1}^{y+n} [\sum_{u=x-n+1}^{x+n} f(u, v) W_{Ln}(x-u, y-v)].$$

для цілих x, y .

4. Чисельні експерименти. Розглянуті три алгоритми масштабування реалізовані в бібліотеці OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Для збільшення зображень ми будемо використовувати стандартну функцію `cv2.resize` з такими параметрами інтерполяції: `cv2.INTER_NEAREST`, `cv2.INTER_LINEAR` і `cv2.INTER_LANCZOS4`. Для інтерполяції Лакоша використовувалося 8×8 -ядро. Всі числові експерименти проводилися з зображенням *Lena*, яке є стандартним зображенням в теорії цифрової обробки зображень.

Ми розглянули зображення *Lena.jpg*, розміру 68×100 пікселів а потім збільшували це зображення в 2,3,...10 разів, з кроком 100 пікселів по ширині, від 100 до 1000 пікселів, а висота зображення підбиралася так, щоб відношення висоти до ширини було константою для всіх отриманих зображень. Цим самим усувалися геометричні спотворення зображення. Коефіцієнт розтягу k , таким чином, приймав 10 значень від 1 до 10. Дослідимо, як інтерполяція впливає на нормалізовані інваріанти низьких порядків. Для того щоб уникнути оперування дуже малими числами ми розглянемо такий модифікований коефіцієнт

$$\tilde{\eta}_{p,q} = -\ln(\eta_{p,q}) = -\ln\left(\frac{m_{pq}}{\frac{p+q}{2}+1}\right).$$

Спочатку дослідимо інтерполяцію за найближчим сусідом. Максимальне десятикратне збільшення має вигляд рис. 5.



Рис. 5. Оригінал (ліворуч) та збільшене в 10 раз зображення методом найближчого сусіда

З чітко візуально фіксованими спотвореннями та артефактами. Нам потрібно перевірити, чи нормалізовані моменти, як пропонований інструмент виявлення спотворень, правильно відреагують на ці спотворення. Значення нормалізованих інваріантів малого порядку показані в таблиці 1.

Таблиця 1

Нормалізовані моменти зображення збільшеного за алгоритмом найближчого сусіда

LIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tilde{\eta}_{1,0}$	2.6969	2.6924	2.691	2.6902	2.6898	2.6895	2.6893	2.6891	2.689	2.6889
$\tilde{\eta}_{0,1}$	3.2694	3.2615	3.2588	3.2575	3.2567	3.2562	3.2558	3.2554	3.2554	3.2552
$\tilde{\eta}_{2,0}$	5.1522	5.1451	5.1428	5.1416	5.1409	5.1404	5.1401	5.1399	5.1397	5.1395
$\tilde{\eta}_{1,1}$	5.941	5.9289	5.9249	5.9229	5.9217	5.9209	5.9204	5.9199	5.9196	5.9193
$\tilde{\eta}_{0,2}$	6.1997	6.1884	6.1846	6.1827	6.1816	6.1808	6.1803	6.1799	6.1796	6.1793
$\tilde{\eta}_{3,0}$	7.518	7.5084	7.5051	7.5035	7.5026	7.5019	7.5015	7.5011	7.5009	7.5007
$\tilde{\eta}_{2,1}$	8.3761	8.3616	8.3568	8.3544	8.3529	8.352	8.3513	8.3508	8.3504	8.3501
$\tilde{\eta}_{1,2}$	8.8647	8.8491	8.8439	8.8413	8.8398	8.8387	8.838	8.8375	8.837	8.8367
$\tilde{\eta}_{0,3}$	9.0027	8.9877	8.9827	8.9802	8.9787	8.9777	8.977	8.9765	8.9761	8.9757

Перший рядок таблиці вказує на коефіцієнт послідовного збільшення зображення Lena. Кожен наступний рядок таблиці є значенням відповідного модифікованого нормалізованого моменту на одному із 10 інтерпольованих зображень. Як видно з таблиці, із збільшенням коефіцієнта розтягу, значення модифікованого нормалізованого коефіцієнта рівномірно і монотонно зменшуються.

Тепер дослідимо лінійну інтерполяцію. Максимальне десятикратне збільшення показано на рис. 6.



Рис. 6. Оригінал (ліворуч) та збільшене в 10 раз зображення лінійним методом

Візуальний аналіз показує, що якість лінійної інтерполяції дещо краща за інтерполяцію методом найближчого сусіда. Результати обчислень модифікованих нормалізованих моментів наведено в таблиці 2:

Таблиця 2

Нормалізовані моменти зображення збільшеного лінійним алгоритмом

LIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tilde{\eta}_{1,0}$	2.6969	2.692	2.6905	2.6896	2.6892	2.6888	2.6886	2.6884	2.6883	2.6881
$\tilde{\eta}_{0,1}$	3.2694	3.2611	3.2585	3.2571	3.2563	3.2557	3.2554	3.255	3.2549	3.2546
$\tilde{\eta}_{2,0}$	5.1522	5.1443	5.1418	5.1403	5.1398	5.139	5.1388	5.1385	5.1384	5.1381
$\tilde{\eta}_{1,1}$	5.941	5.9282	5.9241	5.9218	5.9207	5.9197	5.9192	5.9187	5.9184	5.918
$\tilde{\eta}_{0,2}$	6.1997	6.1877	6.1838	6.1817	6.1807	6.1798	6.1793	6.1788	6.1785	6.1782
$\tilde{\eta}_{3,0}$	7.518	7.5072	7.5038	7.5017	7.5009	7.4999	7.4996	7.4991	7.499	7.4986
$\tilde{\eta}_{2,1}$	8.3761	8.3605	8.3554	8.3526	8.3513	8.3501	8.3495	8.3488	8.3485	8.3481
$\tilde{\eta}_{1,2}$	8.8647	8.848	8.8426	8.8397	8.8382	8.8369	8.8363	8.8356	8.8353	8.8348
$\tilde{\eta}_{0,3}$	9.0027	8.9867	8.9815	8.9787	8.9773	8.9761	8.9755	8.9748	8.9745	8.974

Нарешті дослідимо інтерполяцію Ланцоша. Максимальне десятикратне збільшення показано на рис. 7.

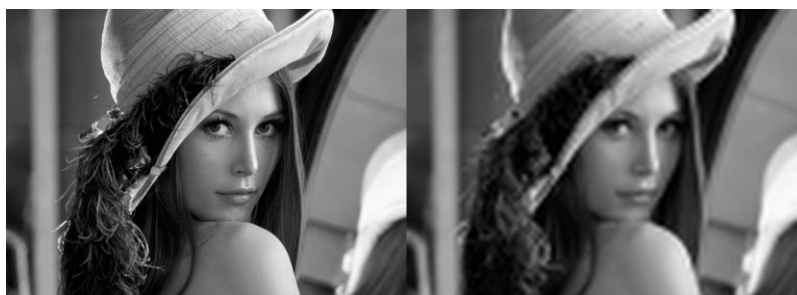


Рис. 7. Оригінал (ліворуч) та збільшене в 10 раз зображення алгоритмом Ланцоша

Візуальний аналіз показує, що якість лінійної інтерполяції є кращою за інтерполяцію двома методами які розглядалися вище. Результати обчислень модифікованих нормалізованих моментів наведено в таблиці 3:

Таблиця 3

Нормалізовані моменти зображення збільшеного алгоритмом Ланцоша										
LIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tilde{\eta}_{0,1}$	3.2577	3.2569	3.2564	3.256	3.2538	3.2538	3.2538	3.2538	3.2526	3.2526
$\tilde{\eta}_{1,0}$	2.6961	2.6937	2.6935	2.6928	2.6938	2.6928	2.6928	2.6923	2.6931	2.6924
$\tilde{\eta}_{2,0}$	5.1524	5.1483	5.148	5.1466	5.1488	5.147	5.1469	5.1461	5.1477	5.1465
$\tilde{\eta}_{1,1}$	5.9288	5.9243	5.9244	5.9235	5.9228	5.921	5.9214	5.921	5.9208	5.9197
$\tilde{\eta}_{0,2}$	6.1809	6.1791	6.1792	6.1792	6.1753	6.1749	6.1754	6.1758	6.1735	6.1733
$\tilde{\eta}_{2,1}$	8.3651	8.3581	8.3584	8.3569	8.3579	8.3548	8.3554	8.3546	8.3555	8.3536
$\tilde{\eta}_{1,2}$	8.8453	8.8395	8.8403	8.8394	8.8375	8.8352	8.8361	8.8359	8.835	8.8335
$\tilde{\eta}_{3,0}$	8.9765	8.974	8.9746	8.9747	8.9691	8.9685	8.9694	8.9699	8.9667	8.9664
$\tilde{\eta}_{0,3}$	8.9765	8.974	8.9746	8.9747	8.9691	8.9685	8.9694	8.9699	8.9667	8.9664

На рис. 8–10 графічно представлена поведінка модифікованих нормалізованих моментів.

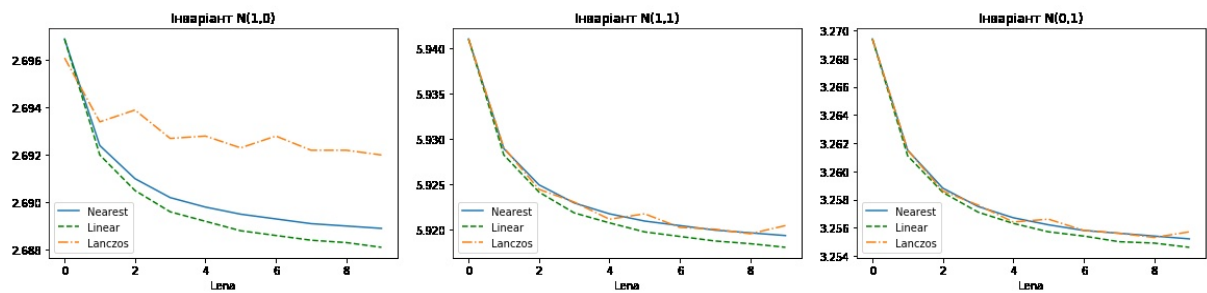


Рис. 8. Графік $\tilde{\eta}_{1,0}, \tilde{\eta}_{1,1}, \tilde{\eta}_{0,1}$

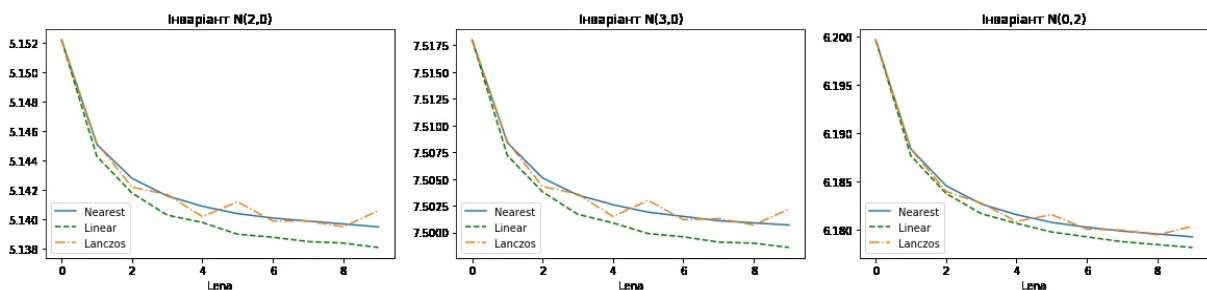


Рис. 9. Графік $\tilde{\eta}_{2,0}, \tilde{\eta}_{0,2}, \tilde{\eta}_{3,0}$

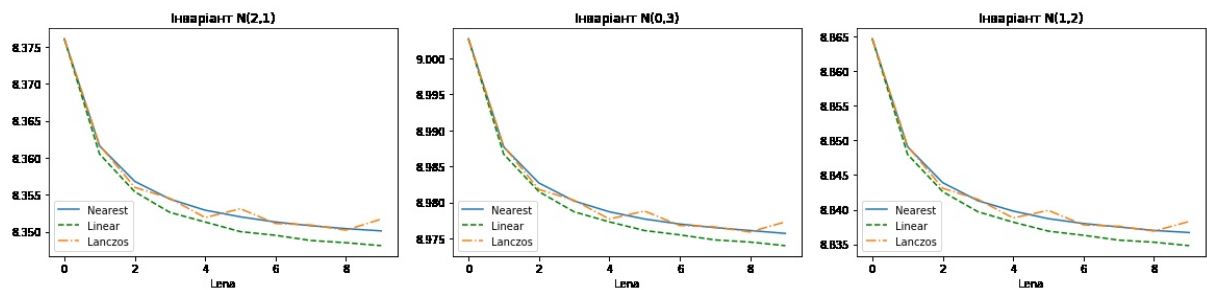


Рис. 10. Графік $\tilde{\eta}_{2,1}, \tilde{\eta}_{1,2}, \tilde{\eta}_{0,3}$

4. Порівняння з іншими метриками. Використаємо інші популярні метрики, які базуються на співставленні з еталоном (reference metrics), для порівняння якості зображень, зокрема MSE – середньо квадратичне відхилення, PSNR – пікове співвідношення сигналу до шуму (рис. 11) MSSIM – модифікований індекс структурної схожості, індекс варіації інформації VIPF (рис. 12).

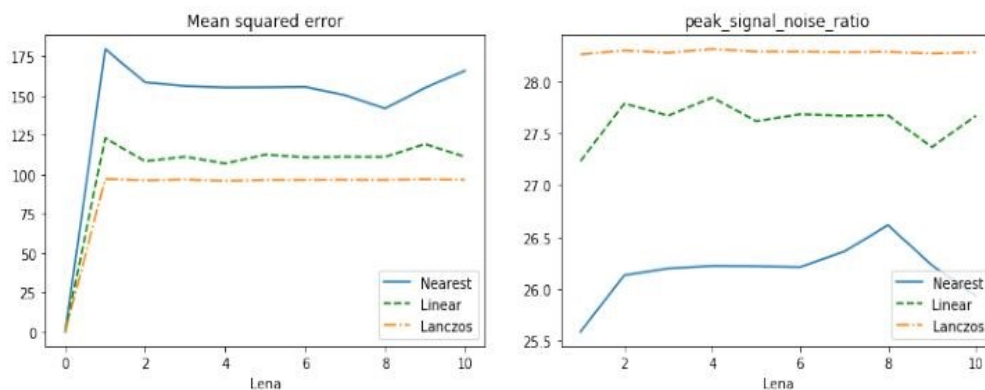


Рис. 11. Графіки індексів MSE і PSNR

З графіків видно, що індекси MSE та PSNR ніяк не реагують на спотворення зображення, тому вони не можуть застосовуватися для оцінки якості інтерполяції зображень.

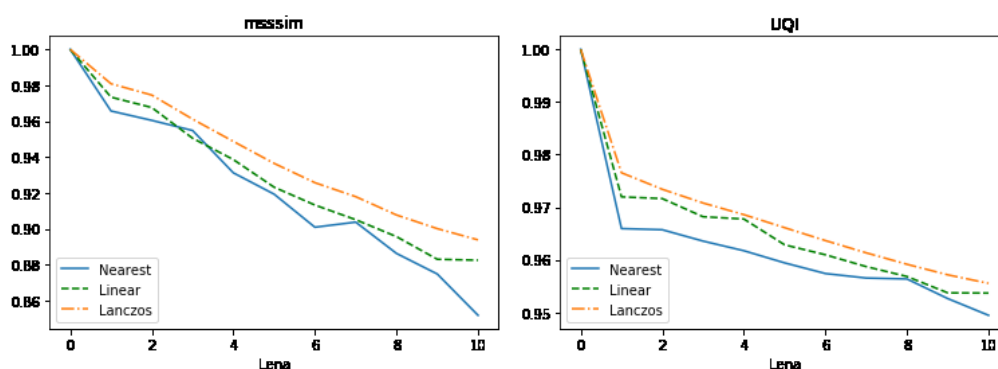


Рис. 12. Графік індексів msssim і UQI

З графіків видно, що індекси MSSIM та UQI добре реагують на спотворення зображення.

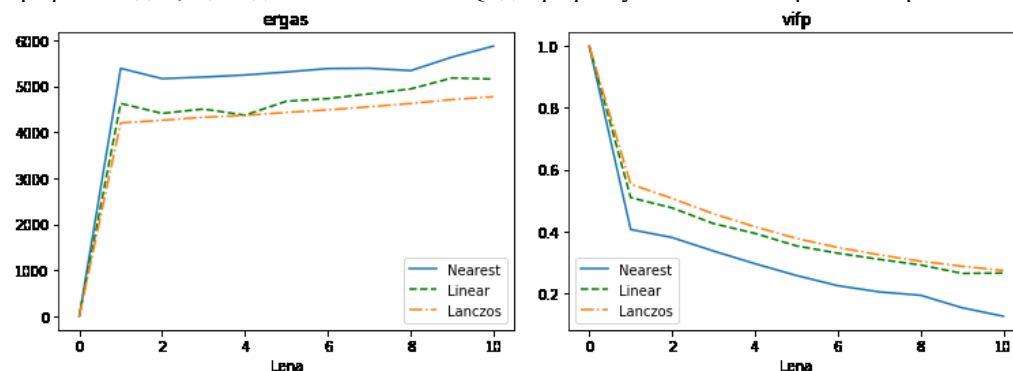


Рис. 13. Графік індексів ergas і vifp

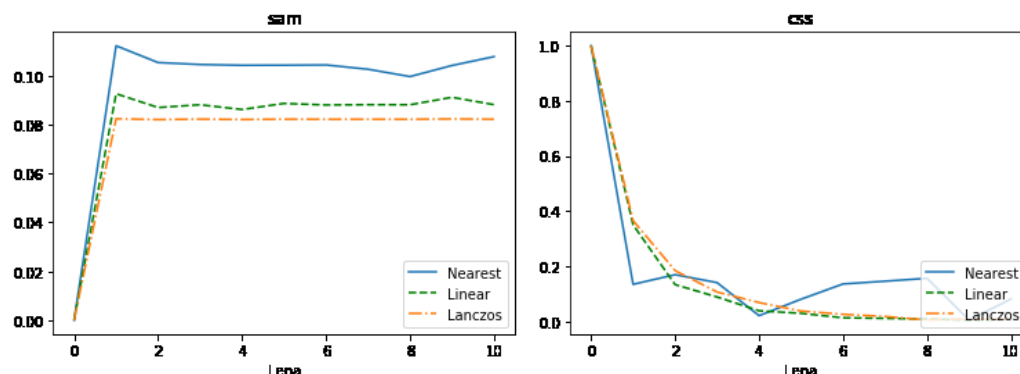


Рис. 13. Графік індексів SAM і CSS

З графіків видно, що індекси ERGAS та SAM не реагують на спотворення зображення а індекси VIPF та CSS чутливі до спотворень.

Висновки. Вимірювання якості візуального зображення має принципове значення для обробки зображень та відео. Метою дослідження якості зображень є розробка алгоритмів, які можуть автоматично оцінювати якість зображень чи відеозаписів перцептивно послідовно. Алгоритми оцінки якості зображення інтерпретують якість зображення як вірність, або схожість із «еталонним» або «ідеальним» зображенням у певному перцептивному просторі. В даній статті вводяться нормалізовані моменти зображення, доводяться що вони інваріантні відносно рівномірного масштабування і пропонуються для оцінки якості масштабованих зображень. Зокрема, нормалізовані моменти можуть бути використані для оцінки якості алгоритмів інтерполяції зображень, що є актуальним, оскільки нові алгоритми з'являються постійно і виникає потреба оцінки якості їхньої роботи. Результати експериментальних обчислень на конкретному зображенні показали, що нормалізовані моментні інваріанти монотонно реагують на деградацію зображення і можуть застосовуватися поряд з відомими індексами якості зображень такими як SSIM, MSSIM, QUI.

References

1. Pedersen M., Hardeberg J., Full-Reference Image Quality Metrics: Classification and Evaluation, Computer Graphics and Vision, Vol. 7, No. 1, 2011, 1–80
2. Samajdar, T., Quraishi, M. I. (Analysis and Evaluation of Image Quality Metrics. Information Systems Design and Intelligent Applications, 2015, 369–378.
3. K. Kipli et al., "Full reference image quality metrics and their performance," 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Penang, 2011, pp. 33-38
4. Khan, S., Lee D., Khan, M., Gilal A., Efficient Edge-Based Image Interpolation Method Using Neighboring Slope Information, in IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 133539-133548
5. Harb, S.M.E., Isa, N.A.M., Salamah, S. New adaptive interpolation scheme for image upscaling. Multimed Tools Appl 75, 2016, 7293–7325.
6. Singh A., Singh J., Content adaptive single image interpolation based Super Resolution of compressed images. International Journal of Electrical and Computer Engineering (2088-8708) . 2020, (Part II), Vol. 10 Issue 3, p3014-3021. 8p
7. Oliveira, W. A. A. de, Guliato, D., Oliveira, D. C. B. de, Silva, R. L. de S. da, Giraldi, G. A. New Technique for Binary Morphological Shape-Based Interpolation. International Journal of Image and Graphics, 19(02), 2019, 1950007
8. Richter, T. A global image fidelity metric: Visual distance and its properties, 2013 IEEE International Conference on Image Processing, Melbourne, VIC, 2013, pp. 369-373,
9. Amanatiadis A., Ioannis I., A survey on evaluation methods for image interpolation, Meas. Sci. Technol. 20, 2009, 104015
10. Lehmann T., Gonner C., Spitzer K., "Survey: interpolation methods in medical image processing," in IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 18, no. 11, 1999, 1049-1075
11. Hwang J. W., Lee H. S., 2004 Adaptive image interpolation based on local gradient features IEEE Signal Process. Lett. 11, 2004, 359–362
12. Hu M. K.: Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Trans. Inform. Theory. 8(2), 1962, 179–187

Надійшла / Paper received: 03.05.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 004.056.55
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-10

ГРЕСЬ О. В.
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
РОЗОРІНОВ Г. М.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ПІЛЬКЕВИЧ Ю. Г.
Київський національний університет будівництва і архітектури
КОСТЯК М. Ю., ПАРХУЦЬ Л. Т.
Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОТОКОВОГО ШИФРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

У роботі запропоновано програмну реалізацію системи кодування-декодування інформації з додатковим поточним шифруванням псевдовипадковими послідовностями, що генеруються на основі логістичного відображення. Додаткове шифрування унеможливує розшифрування інформації, якщо третій стороні не відомі значення початкових умов логістичного відображення, що використовується для генерування послідовностей шифрування. Запропонована система була реалізована на програмному рівні з використанням сучасних програмних засобів, зокрема мови програмування C++. Робота системи досліджувалась на прикладі кодування текстової інформації. Результати тестування показали, що запропонована система має більшу швидкодію на 10 % порівняно з аналогічними системами стиснення та шифрування інформації на основі дискретних відображень

Ключові слова: псевдовипадкова послідовність, логістичне відображення, шифрування, кодування.

HRES O.
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
ROZORINOV H.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
PILKEVICH Ju.
Kyiv National University of Construction and Architecture
KOSTIAK M., PARKHUTS L.
Lviv Polytechnic National University

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF INFORMATION STREAM ENCRYPTION SYSTEM BASED ON DISCRETE MAPS

The paper proposes a system of encoding/decoding information with its additional stream encryption by elements of a chaotic sequence generated on the basis of discrete maps. The system consists of the following blocks: encoding / decoding unit, encryption/decryption unit, pseudorandom sequence generator, initial conditions task unit. The proposed system uses the method of adaptive arithmetic compression with additional streaming encryption of compressed information by pseudorandom sequences generated on the basis of discrete maps. A binary adaptive arithmetic encoder is used as the coding unit.

A modified diffusion transformation is used as the encryption method. At the output of the system, a compressed binary code message is generated, which is further encrypted by pseudorandom sequences. Additional encryption makes it impossible to decrypt the information unless the key to start the pseudorandom generator is known. The use of a modified diffusion transformation as an encryption method, which contains an additional parameter used as an additional key for encryption, can increase the impact of this parameter on the complexity of decrypting encoded data, as well as increase cryptographic and noise immunity of the system as a whole.

The proposed system was implemented at the software level using modern software, in particular the programming language C++.

The operation of the system was studied on the example of encoding text information.

The test results showed that the proposed system of encoding-decoding information with additional streaming encryption by pseudorandom sequences generated on the basis of discrete maps has 10 % higher speed than similar systems of compression and encryption of information on the basis of discrete maps and has increased cryptographic stability.

Keywords: pseudo-random sequence, logistic mapping, encryption, coding.

Вступ. Постановка задачі. Забезпечення захисту інформації в системах обміну інформацією є однією із складних проблем, для вирішення якої застосовують організаційні, технічні та криптографічні методи. Одним із напрямів вирішення проблеми захисту інформації є її криптографічний захист.

В наш час розроблено і використовується багато алгоритмів шифрування для криптографічного захисту. Найбільш поширений тип шифрів – це симетричні шифри, які розподіляються на два класи: блочні шифри, які мають високу стійкість до криптоатак, але не дуже велику швидкодію, та поточкові шифри, які мають дещо меншу криптостійкість, але більшу швидкодію, ніж блочні.

Достатньо ефективним засобом підвищення стійкості шифрування є комбіноване використання декількох різних способів шифрування, тобто послідовне шифрування вихідного тексту за допомогою двох або більше методів [1, 2].

Водночас з поширенням інтернет-технологій та розвитком безпілотних літальних апаратів, виникає проблема захищеності трафіка рухомих об'єктів, а саме, даних командної, аудіо- відео- та іншої інформації засобами малої обчислювальної потужності та високої швидкодії. Тому останнім часом стало поширеним використання поточкових методів шифрування інформації для захисту трафіка рухомих об'єктів з використанням інтернет-мереж.

У зв'язку з цим слід звернути увагу на математичний апарат теорії динамічного хаосу, що відкриває нові можливості для розроблення швидкодіючих шифрів з достатнім рівнем стійкості на основі генераторів псевдовипадкових послідовностей (ПВП) з дискретними функціями відображення. Непередбачуваність поведінки хаотичних систем є основною причиною їх використання при розробленні криптостійких генераторів ПВП, розробленні нових та підвищенні стійкості існуючих методів та систем поточкового шифрування інформації на основі дискретних відображень.

Аналіз основних публікацій. Над проблемою розроблення криптостійких генераторів ПВП на основі хаосу та їх застосування для шифрування інформації активно працюють ряд закладів та науковців як в Україні, так і за її межами. Аналіз публікацій останніх двох десятиліть, тема яких присвячена використанню хаосу у криптографії, та огляд сучасних швидкодіючих методів поточкового шифрування інформації на основі дискретних відображень для застосування в інформаційних системах показав, що проблема підвищення швидкодії криптографічних систем повністю не вирішена. Виходячи з цього, розроблення нових криптостійких та підвищення стійкості існуючих систем поточкового шифрування інформації на основі генераторів хаосу з дискретними функціями відображення із забезпеченням достатнього рівня швидкодії є актуальною задачею.

Основна частина. У системах з дискретним часом моделлю джерела хаотичних коливань в найпростішому випадку виступає різницеве рівняння першого порядку, що описується формулою [1, 2]:

$$x(k+1) = f[a(k), x(0), x(k)] \quad (1)$$

де $k=1, 2, 3, \dots$ – відліки дискретного часу,

Логістичне відображення є однією з найбільш відомих одномірних дискретних хаотичних систем для генерування ПВП, аналітичне представлення якого задається різницевою рівнянням [1, 2]:

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n), \quad (2)$$

де λ – параметр керування, x_n – початкове значення змінної, x_{n+1} – значення змінної.

Залежно від значення λ генеровані коливання можуть бути періодичними, квазі-періодичними або хаотичними. Встановлено, що для логістичного відображення при $\lambda \geq 3.56$ спостерігається режим хаотичних коливань [1, 2].

В роботі запропонована система кодування/декодування інформації з її додатковим шифруванням елементами хаотичної послідовності, генерованої на основі дискретних відображень [3, 4]. В основі системи лежить спосіб кодування-декодування інформації з додатковим шифруванням, запропонований в [3].

Система складається з наступних блоків: блок кодування/декодування, блок шифрування/розшифрування, генератор ПВП, блок завдання початкових умов. Схема реалізації системи кодування-декодування з додатковим поточковим шифруванням на основі дискретних відображень показана на рис. 1.

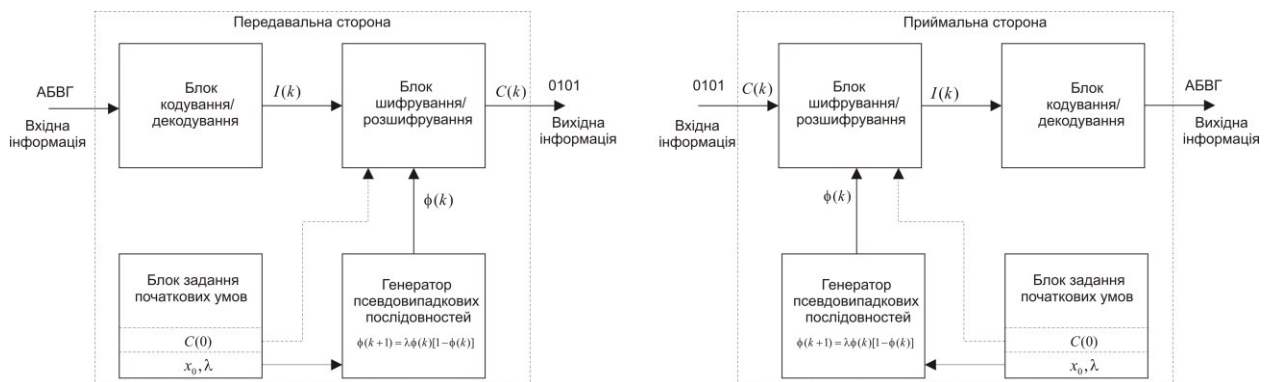


Рис. 1. Схема реалізації системи кодування-декодування з додатковим поточковим шифруванням на основі дискретних відображень

Запропонована система використовує метод адаптивного арифметичного стиснення з додатковим поточковим шифруванням стиснутої інформації псевдовипадковими послідовностями, генерованими на

основі дискретних відображень. Як блок кодування використовується двійковий адаптивний арифметичний кодер [3, 8].

Система працює наступним чином [3, 4] Інформація, що поступає на вхід системи (блоку кодування) на передавальній стороні, кодується та стискається за алгоритмом адаптивного арифметичного кодування, внаслідок чого формується двійкова послідовність (І), що представляє закодовану інформацію. Далі, закодована інформація надходить на вхід блоку шифрування, в якому зашифровується елементами псевдовипадкової послідовності, генерованої на основі логістичного відображення.

В якості методу шифрування використовується модифіковане перетворення дифузії, запропоноване [5]. Дане перетворення зв'язує значення поточних закодованих байтів інформації (тексту) $I(k)$ з наступними байтами інформації (тексту), отриманими після шифрування $C(k)$. Механізм дифузії описується наступною формулою:

$$C(k) = \phi(k) \oplus \{[I(k) + \phi(k)] \bmod N\} \oplus I(k-1), \quad (3)$$

де $C(k)$ – байти зашифрованої інформації (тексту), $I(k)$ – байт інформації (тексту), отриманої після стиснення; $I(k-1)$ – попередній байт інформації (тексту), отриманої після стиснення (з виходу блоку кодування) (при $k = 1$ замість $I(k-1)$ беремо відповідне задане нами значення $C(0)$, яке, зокрема, можна вважати додатковим ключем шифрування), $\phi(k)$ – байти псевдовипадкової послідовності, генерованої на основі логістичного відображення:

$$\phi(k+1) = \lambda \phi(k)[1 - \phi(k)]. \quad (4)$$

Обернене перетворення дифузії переписується у наступному вигляді:

$$I(k) = \{\phi(k) \oplus C(k) \oplus I(k-1) + N - \phi(k)\} \bmod N. \quad (5)$$

Таким чином, на виході системи утворюється стиснуте двійкове кодове повідомлення (С), що додатково зашифроване псевдовипадковими послідовностями. Додаткове шифрування унеможливує розшифрування інформації, якщо не відомий ключ для запуску генератора псевдовипадкової послідовності.

Як ключ для генератора на основі логістичного відображення виступають наступні параметри: початкова умова ϕ_0 та значення параметру керування λ (в нашому випадку $\lambda = 3,99$). На приймальній стороні розшифрування та декодування інформації здійснюється у зворотному порядку.

Використання в якості методу шифрування модифікованого перетворення дифузії, яке містить додатковий параметр, що застосовують як додатковий ключ для шифрування, дозволяє підвищити вплив цього параметру на складність розшифрування кодованих даних, а також підвищити крипто- та завадостійкість системи в цілому.

Для синхронізації передавальної та приймальної сторін можна використати, наприклад, спосіб синхронізації, запропонований в роботі [6]. Цей спосіб полягає у надсиланні через певні проміжки часу потокового значення змінної логістичного відображення, період надсилання значень якої визначається шляхом програмного знаходження часу встановлення синхронізації. Це дозволяє забезпечити однозначне розшифрування інформації в системах потокового шифрування та їх стабільну роботу.

Алгоритм роботи способу кодування – декодування інформації з додатковим потоковим шифруванням ПВП, генерованими на основі дискретних відображень, представлений на рис. 2.

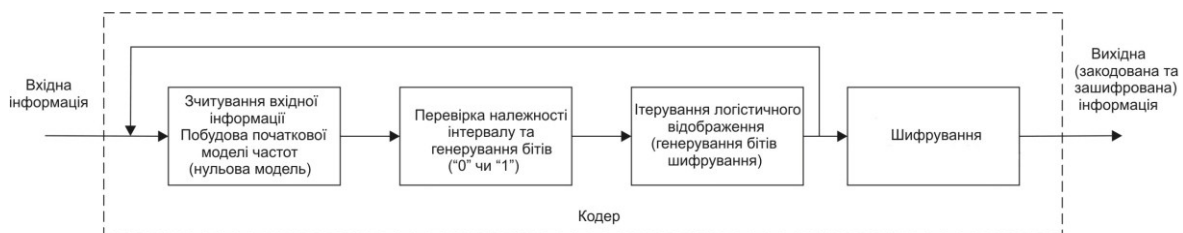


Рис. 2. Алгоритм роботи способу кодування-декодування інформації з додатковим потоковим шифруванням

Алгоритм обрахунку інтервалу та формування біту «0» або «1» наведений на рис. 3. Використовуючи значення параметру керування та початкової умови хаотичного коливання за якими здійснюється генерування псевдовипадкової послідовності на стороні кодера системи, аналогічну послідовність можна згенерувати на приймальній стороні системи.

Таким чином, на виході системи утворюється зашифроване хаотичними послідовностями стиснуте двійкове кодове повідомлення. Додаткове шифрування унеможливує розшифрування інформації, якщо третій стороні не відомі значення параметрів логістичного відображення та початкове значення хаотичного коливання x_0 , що використовується для генерування послідовностей шифрування.

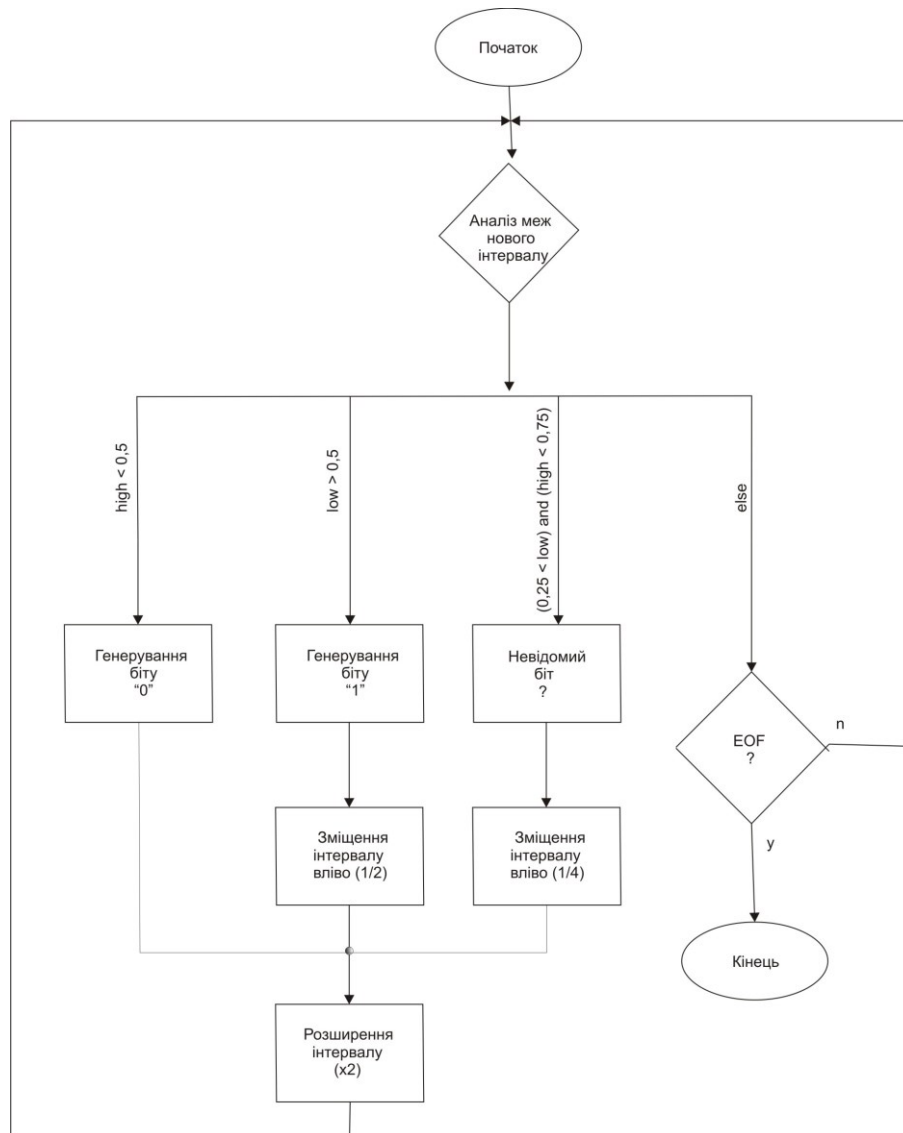


Рис. 3. Алгоритм генерування бітів «0» та «1» у системі стиснення інформації з потоковим побітовим шифруванням

Ефективність процедури стиснення оцінюється коефіцієнтом стиснення, що визначається наступним чином:

$$k = \frac{L(S')}{L(S)} \quad (6)$$

де $L(S)$ – виражена в бітах довжина отриманого на виході кодера повідомлення в результаті стиснення рядка S ; $L(S')$ – довжина вхідного повідомлення в бітах.

Розшифрування та декодування інформації здійснюється у зворотному порядку. Стиснуте та зашифроване повідомлення надходить на вхід блоку розшифрування. В блоці розшифрування здійснюється побітове додавання інформації з елементами псевдовипадкової послідовності, генерованої при тих же умовах, що і послідовність в кодері. На виході блоку розшифрування утворюється стиснуте двійкове повідомлення (без шифрування), що поступає на вхід відповідного блоку декодування та перетворюється у вихідну інформацію.

Програмна реалізація системи. Елементи системи кодування-декодування даних з шифруванням може бути реалізований на апаратно-програмному рівні (можливе використання сучасних мікроконтролерів, ПЛІС, а також сучасних мов програмування, наприклад, C++). Запропонована система була реалізована на програмному рівні з використанням сучасних програмних засобів, зокрема мови програмування C++.

Інтерфейс програми, що реалізує розроблену систему кодування-декодування з потоковим шифруванням інформації ПВП, генерованими на основі дискретних відображень, приведений на рис. 4. Початкова умова x_0 та параметр керування λ , які необхідні для генерування псевдовипадкової

послідовності для шифрування, вводяться у відповідні вікна програми. На рис. 4 показана робота системи на прикладі шифрування текстової інформації при значеннях початкової умови $x_0 = 0,5$ та параметру керування $\lambda = 3,87$. Дана програмна реалізація також може бути доповнена й іншими методами кодування, наприклад такими як Хаффмана, Шенона-Фано та ін. (рис. 4).

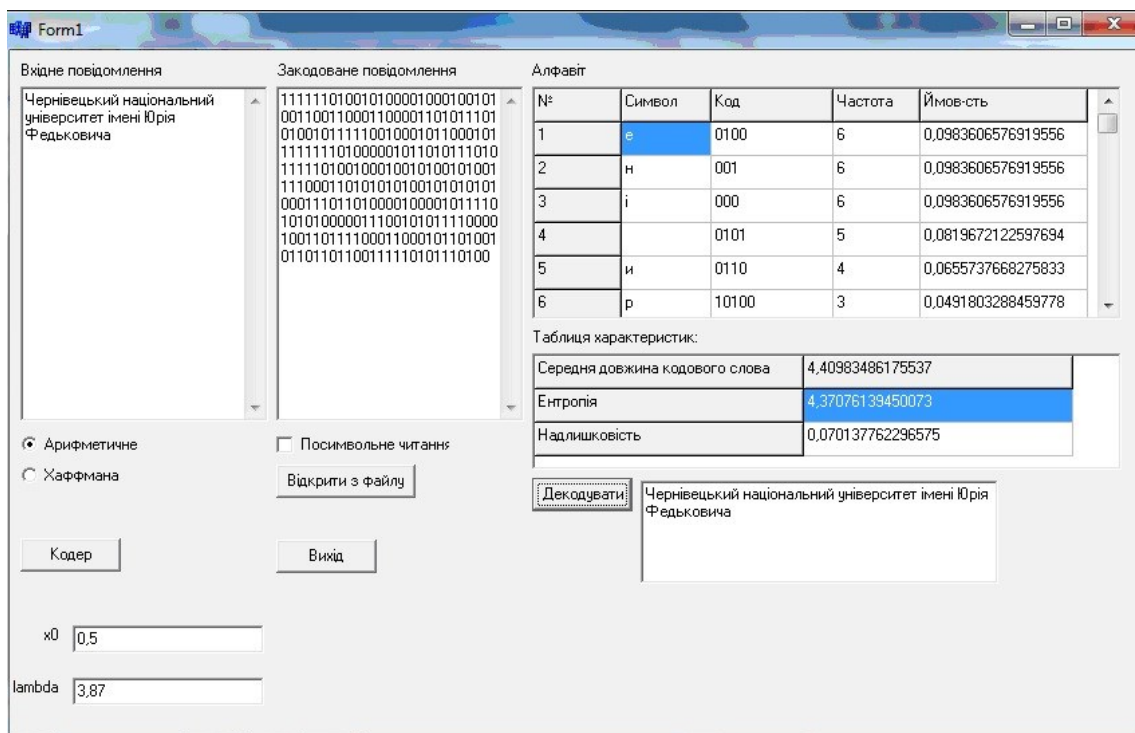


Рис. 4. Інтерфейс програми, що реалізує спосіб кодування-декодування з поточним шифруванням інформації ПВП, генерованими на основі дискретних відображень

Робота системи досліджувалась на прикладі кодування текстової інформації.

В таблиці 1 приведені результати роботи розробленої системи та інших систем кодування інформації з додатковим її шифруванням на основі дискретних відображень. Порівняння проводилось з використанням ноутбука з процесором марки Celeron M 1,6 GHz з 2Гб ОЗП.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз розробленої системи з іншими системами кодування інформації з додатковим її шифруванням на основі дискретних відображень

Початковий розмір файла, Кб	Система кодування-декодування інформації з додатковим шифруванням на основі дискретного відображення		Розроблена система		Відсоток підвищення швидкодії	
	Час кодування, мс	Час декодування, мс	Час кодування, мс	Час декодування, мс	кодування	декодування
1523	590	631	540	581	8,5	7,9
1443	570	601	515	549	9,6	8,7
1428	480	521	443	487	7,7	6,5

В таблиці 2 наведені результати порівняння результатів роботи запропонованої системи (на основі адаптивного арифметичного методу) із відомим методом стиснення LZW [7]. Із таблиці 2 випливає, що значення коефіцієнту стиснення інформації для LZW-кодера, в основному, є вищим, ніж арифметичного. Недоліками LZW-кодера є висока обчислювальна складність методу та менша швидкість стиснення. Швидкодія запропонованої системи стиснення є більшою за швидкодією відомих аналогів [8–10], і забезпечує при цьому захист інформації шляхом її шифрування ПВП.

Результати тестування показали, що запропонована система кодування-декодування інформації з додатковим поточним шифруванням псевдовипадковими послідовностями, генерованими на основі дискретних відображень, має на 10 % більшу швидкодію на відміну від аналогічних систем стиснення та шифрування інформації на основі дискретних відображень та володіє підвищеною криптостійкістю.

Таблиця 2

Порівняння результатів роботи запропонованої системи кодування-декодування інформації з шифруванням з LZW кодером

Розміри файлів, що підлягали стискуванню, Кб	Розміри стиснутих файлів, Кб (арифметичне кодування та шифрування)	Коефіцієнт стиснення	Розміри стиснутих файлів, Кб (LZW-кодер)	Коефіцієнт стиснення
1396	989	1,41	646,3	2,16
1403	1040	1,35	577,4	2,43
1428	946	1,51	631,85	2,26

Підвищення швидкодії запропонованої системи на відміну від аналогічних систем стиснення та шифрування інформації з використанням генераторів на основі дискретних відображень, у яких використовується процедура зміни інтервалів, що відображають символи, у відповідності із ключем шифрування на кожному кроці алгоритму арифметичного кодування, досягається за рахунок того, що шифрування відбувається за меншу кількість кроків. Також в запропонованій системі, на відміну від аналогічних, використовується один генератор ключових послідовностей, що використовуються для шифрування, та побітове шифрування здійснюється після кожної ітерації (тобто після кожного циклу генерування двійкового «0» або «1»).

Висновки. В роботі запропоновано програмну реалізацію системи кодування-декодування інформації з додатковим потоковим шифруванням псевдовипадковими послідовностями, що генеруються на основі логістичного відображення. Додаткове шифрування унеможливує розшифрування інформації, якщо третій стороні не відомі значення початкових умов логістичного відображення, що використовується для генерування послідовностей шифрування. Запропонована система була реалізована на програмному рівні з використанням сучасних програмних засобів, зокрема мови програмування C++. Робота системи досліджувалась на прикладі кодування текстової інформації. Також був проведений порівняльний аналіз швидкодії існуючих систем арифметичного кодування з наступним побітовим шифруванням та розробленої системи. Результати порівняння показали, що запропонована система має більшу швидкодію на 10 % на відміну від аналогічних систем стиснення та шифрування інформації на основі дискретних відображень. Підвищення швидкодії запропонованої системи зумовлене тим, що шифрування відбувається за меншу кількість кроків, в запропонованій системі для шифрування використовується один генератор ключових послідовностей а також стиснення та побітове шифрування здійснюється після кожної ітерації системи.

Література

1. Kocarev L. Pseudorandom bits generated by chaotic maps / L. Kocarev, G. Jakimoski // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions. – 50(1). – 2003. – P. 123–126.
2. Pareek N.K. Cryptography using multiple one-dimensional chaotic maps / N.K. Pareek, Vinod Patidar, K.K. Sud // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 10(7). – 2005. – P. 715–723.
3. Пат. на корисну модель 129426 Україна, МПК H03M 7/00, H03M 7/30 (2006.01) Спосіб кодування-декодування даних з шифруванням / О.В. Гресь, В.М. Косован, Г.М. Розорінов, А.П. Саміла. Заявники і патентовласники О.В. Гресь, В.М. Косован, Г.М. Розорінов, А.П. Саміла. – № u201805660; заявл. 22.05.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20.
4. Гресь О.В. Дослідження генераторів псевдовипадкових послідовностей на основі дискретних відображень / О.В. Гресь, М.І. Скрипський, В.М. Косован, Г.М. Розорінов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – №4. – С. 243–251.
5. Гресь О.В. Аналіз алгоритмів шифрування інформації на основі хаотичних відображень / О.В. Гресь, В.М. Косован, М.І. Скрипський, Г.М. Розорінов, П.М. Шпатар / Сучасний захист інформації. – 2015. – №3. – с. 49–58.
6. Политанский Р. Л. Система передачи данных с шифрованием хаотическими последовательностями / Р. Л. Политанский, П. М. Шпатарь, А. В. Гресь, А. Д. Верига // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – №2-3. – С. 28–32.
7. Somefun O. M. Evaluation of dominant text data compression techniques / O. M. Somefun, A. O. Adebayo // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. – 2014. – Vol. 3, Issue 6. – Pp. 162 – 169.
8. Kwok-Wo Wong, Qiuzhen Lin, Jianyoung Chen "Simultaneous Arithmetic Coding and Encryption Using Chaotic Maps" // IEEE Transaction on Circuits and Systems II, Express Briefs, Vol.57, No.2, February, 2010. – Pp. 146–150).
9. Bose R. A novel compression and encryption scheme using variable model arithmetic coding and coupled chaotic system / R. Bose, S. Pathak // IEEE transactions on circuits and systems—i: regular papers, . – april 2006 – Vol. 53, NO. 4. – pp. 848–857
10. Wang B. Encrypting the compressed image by chaotic map and arithmetic coding / B. Wang, X. Zheng, S. Zhou, C. Zhou, X. Wei, Q. Zhang, C. Che // Optik. – 2014. – Vol. 125 – pp. 6117–6122.

References

1. Kocarev L. Pseudorandom bits generated by chaotic maps / L. Kocarev, G. Jakimoski // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions. – 50(1). – 2003. – P. 123–126.
2. Pareek N.K. Cryptography using multiple one-dimensional chaotic maps / N.K. Pareek, Vinod Patidar, K.K. Sud // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 10(7). – 2005. – P. 715–723.
3. Pat. na korysnu model 129426 Ukraina, MPK H03M 7/00, H03M 7/30 (2006.01) Sposib koduvannia-dekoduvannia danykh z shyfruvanniam / O.V. Hres, V.M. Kosovan, H.M. Rozorinov, A.P. Samila. Zaiavnyky i patentovlasnyky O.V. Hres, V.M. Kosovan, H.M. Rozorinov, A.P. Samila. – № u201805660; zaiavl. 22.05.2018; opubl. 25.10.2018, Biul. № 20.

4. Hres O.V. Doslidzhennia heneratoriv psevdovypadkovykh poslidovnostei na osnovi dyskretnykh vidobrazhen / O.V. Hres, M.I. Skrypskyi, V.M. Kosovan, H.M. Rozorinov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2017. – №4. – S. 243-251.
5. Hres O.V. Analiz alhorytmiv shyfruvannia informatsii na osnovi khaotychnykh vdobrazhen / O.V. Hres, V.M. Kosovan, M.I. Skrypskyi, H.M. Rozorinov, P.M. Shpatar/ Suchasnyi zakhyst informatsii. – 2015. – №3. – s. 49-58.
6. Polytanskyi R. L. Systema peredachy dannykh s shyfrovanyem khaotycheskymy posledovatelnostiamy / R. L. Polytanskyi, P. M. Shpatar, A. V. Hres, A. D. Veryha // Tekhnolohiya y konstruyrovanye v elektronnoi apparature. – 2014. – №2-3. – S. 28-32.
7. Somefun O. M. Evaluation of dominant text data compression techniques / O. M. Somefun, A. O. Adebayo // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. – 2014. – Vol. 3, Issue 6. – Pp. 162 – 169.
8. Kwok-Wo Wong, Qiuzhen Lin, Jianyoung Chen "Simultaneous Arithmetic Coding and Encryption Using Chaotic Maps" // IEEE Transaction on Circuits and Systems II, Express Briefs, Vol.57, No.2, February, 2010. – PP. 146-150).
9. Bose R. A novel compression and encryption scheme using variable model arithmetic coding and coupled chaotic system / R. Bose, S. Pathak // IEEE transactions on circuits and systems—i: regular papers, . – april 2006 – Vol. 53, NO. 4 . – pp. 848-857
10. Wang B. Encrypting the compressed image by chaotic map and arithmetic coding / B. Wang, X. Zheng, S. Zhou, C. Zhou, X. Wei, Q. Zhang, C. Che // Optik. – 2014 . – Vol. 125 – pp. 6117–6122.

Надійшла / Paper received: 12.02.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 519.816
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-11

ПЯТИН І. С., БОЙКО Ю. М.
Хмельницький національний університет

МЕТОДИКА ПОЛЯРНОГО КОДУВАННЯ В 5G МОБІЛЬНИХ ЗАСОБАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Полярний код застосовується для керуючої інформації низхідної лінії зв'язку і висхідної лінії зв'язку (DCI/UCI) для розширеного мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB), а також для широкомовного каналу (BCH). Схема каналного кодування представляє собою комбінацію виявлення помилок, виправлення помилок, узгодження швидкості, переміщення бітів і відображення інформації на фізичні канали управління або транспортного рівня. У статті досліджена модель низхідної лінії зв'язку з полярним кодуванням і видами модуляції (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) по каналу передачі з AWGN. Досліджено завадостійкість схем з полярним кодуванням та різними кодовими швидкостями. Проаналізована структурна схема моделі прийняття рішення про режим модуляції цифрової системи зв'язку. Досліджені залежності BER від ефективної швидкості полярного коду з різними видами модуляції. На основі отриманих залежностей розроблений алгоритм вибору виду модуляції для кодової швидкості $R=0,5$.

Ключові слова: полярний код, каналне кодування, генераторний поліном, модуляція, технологія 5G.

PYATIN I., BOIKO J.
Khmelnytskyi National University

POLAR CODING TECHNIQUE IN 5G MOBILE TELECOMMUNICATIONS WITH MULTI-POSITION MODULATION

This article discusses the polar code coding model for 5G technology, from code concatenation through interleaving functions to rate allocation and matching schemes for a particular polar code. The aim of this work is to compare polar codes that are used with different types of modulation and to investigate the dependence of the bit error rate (BER) on the effective code rate. On the basis of the obtained dependencies, the concept of choosing the type of modulation for a cellular digital communication system has been developed. Construction of the polar code includes identifying the channel reliability values associated with each bit to be encoded. This identification can be efficiently performed taking into account the length of the code and the specific signal-to-noise ratio. However, 5G provides for different code lengths, rates and channel conditions, and it is not possible to use different reliability vectors for each parameter combination. Polar codes are easy to implement, have a low complexity of description, while retaining good error correction performance in many code and channel parameters. Polar codes are used for the downlink and uplink control information (DC/UCI) for the enhanced mobile broadband (eMBB) case and for the broadcast channel (BCH). An alternative channel coding scheme for eMBB channel data that can be used as a flexible LDPC coding concept for all block sizes. One of the main problems with SC decoding is the problem of latency, mainly due to the fact that the information bits need to be decoded one at a time. To reduce the delay in SC decoding, you can group the processing of multiple bits to speed up the decoding process. Unlike LDPC codes, which are usually decoded as a graphical representation of a parity check matrix, decoding of polar codes is performed in a graphical representation of a generator matrix. Modern wireless communication systems often require knowledge of the signal to noise ratio (SNR) at the receiver. For example, SNR estimates are commonly used in mobile transmission power control schemes, service and adaptive modulation, and soft decoding procedures. Compared with the traditional satellite communication system, the mode of the adaptive communication system is no longer fixed, unchanged. For example, a high efficiency modulation mode and a high data rate are used in ideal channel conditions, while a low efficiency modulation mode is introduced at a low SNR. It is this concept that is explored in the manuscript.

Keywords: polar code, channel coding, generator polynomial, modulation, 5G technology

Вступ. В мобільних телекомунікаціях, транспортна мережа включає в себе ділянку мережі між опорною мережею оператора і базовою станцією. У 5G (Fifth Generation) може використовуватися набір доступних частотних діапазонів. Частоти в діапазоні 694–790 МГц плануються застосовувати за межами великих міст завдяки великій зоні покриття. Частоти в діапазонах від 1 ГГц до 6 ГГц, зокрема 3,8–4,4 ГГц, 4,4–4,99 ГГц і 5,9 ГГц, забезпечать покриття великих міст. Частоти в міліметровому діапазоні (вище 24 ГГц) – 24–29,5 ГГц, 30–55 ГГц, 66–75 ГГц, 81–86 ГГц, будуть придатні для точкового покриття в місцях найбільшого скупчення абонентів: аеропорти, вокзали, стадіони, тощо.

В стандартах технології 5G NR версії 15 для доступу до радіозв'язку були введені дві нові схеми каналного кодування фізичного рівня для полярних кодів і кодів з низькою щільністю перевірок на парність (LDPC) з метою заміни згорткового коду і турбокоду, що використовувались у стандарті 4G (LTE – Long-Term Evolution) [1–7]. Існує три основні сценарії використання 5G [1]: розширений широкосмуговий мобільний зв'язок (eMBB), наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) і масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Ці сценарії вимагають покращеної пропускної здатності, низької затримки і надійності в порівнянні з системою 4G. Канальні коди 5G повинні підтримувати змінну швидкість і довжину коду як для керуючої інформації, так і призначених для користувача даних, а також гібридний автоматичний запит на повторення (HARQ) даних користувача. Багато схем кодування, включаючи 4G, були оцінені на

основі вищезазначених вимог, і LDPC-кодування було прийнято для даних користувача, в той час як полярне кодування було прийнято для керуючої інформації сценарію eMBB, а також для стільникового зв'язку з низькою затримкою. Канальне кодування використовується для виправлення помилок передачі, викликаних шумом, завадами і низьким рівнем сигналу [8–10].

Побудова полярного коду включає в себе ідентифікацію значень надійності каналу, пов'язаних з кожним бітом, який повинен бути закодований. Ця ідентифікація може бути ефективно виконана з урахуванням довжини коду і конкретного відношення сигнал/шум. Однак в рамках 5G передбачені різні довжини коду, швидкості і умови каналу, і використання різних векторів надійності для кожної комбінації параметрів неможливо. Полярні коди легко реалізувати, вони мають низьку складність опису, зберігаючи при цьому хороші показники виправлення помилок за багатьма параметрами коду і каналу [11–17].

Велика частина доступної літератури не враховує конкретні коди розроблені для 5G, а також процес їх кодування із врахуванням їх подальше широкого використання [1–18]. Як кодування, так і процес декодування можуть фактично привести до значних витрат на забезпечення заданої швидкості і складності реалізації схем кодування. Тому при проектуванні схем декодування слід враховувати, що продуктивність декодерів тісно пов'язана з характеристиками полярного коду [19–22].

У запропонованій статті розглянуто модель полярного кодування, для технології 5G, від процедури конкатенації коду через функції перемешування, до схем виділення і узгодження швидкості для конкретного полярного коду. Мета роботи – порівняти полярні коди які використовуються у складі сигнально-кодових конструкцій та різними видами модуляції. В статті представлено результати експериментальних досліджень залежності ймовірності бітової помилки (BER) від ефективної швидкості коду. На основі отриманих залежностей розроблено концепцію вибору виду модуляції для стільникової системи цифрового зв'язку.

Полярні коди. Утворення полярних кодів ґрунтується на властивості поляризації степені матриці Кронекера з ядром $G_2 \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, що відповідає перетворенню $G_N = G_2^{\otimes n}$, з $N = 2n$. Ефект поляризації створює N віртуальних каналів з різним ступенем надійності, кожен з яких може передавати один біт u_i . В (N, K) структурі полярного коду, довжиною N і розмірністю K бітів, повідомлення розподіляються в K найбільш надійних каналах, які називаються інформаційним набором I , а інші $N - K$ каналів утворюють «заморожений» набір F значень які дорівнюють нулю. Таким чином вхідний вектор $u = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$ створюється шляхом присвоєння $u_i = 0$, якщо $i \in F$, і збереження інформації для решти елементів. Кодове слово x обчислюється за виразом:

$$x = uG_N \quad (1)$$

Система зв'язку з полярними кодами. Розглянемо методику кодування полярних каналів, обрану для системи зв'язку 5G New Radio (NR) з прикріпленням циклічного надлишкового коду CRC (Cyclic Redundancy Check).

Концепції поляризації каналу – це принципово новий базис кодування, пов'язаний з потенційною можливістю досягнення максимальної пропускної здатності телекомунікаційного каналу. Маючи кращі або порівнянні характеристики з LDPC і турбокодами, вони замінюють згорткові коди з додатковим бітом, що використовуються в системах LTE для каналів управління. Полярні коди застосовуються для керуючої інформації низхідної лінії зв'язку і висхідної лінії зв'язку (DCI/UCI) для випадку використання розширеного мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB), а також для широкомовного каналу (VCH). Альтернативною є схема канального кодування для канальних даних типу eMBB яка може бути використана як гнучка концепція LDPC-кодування для всіх розмірів блоків.

Розглянемо компоненти, що дозволяють виконати моделювання низхідної лінії зв'язку з полярним кодуванням і використанням різних видів модуляції по каналу передачі з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN).

На рис. 1 наведена структурна схема обробки сигналу для низхідної лінії зв'язку з виділенням відповідних компонентів і їх параметрів.



Рис. 1. Структурна схема каналу зв'язку з полярними кодами (ЦНК – блок прикріплення циклічного надлишкового коду; ПК – кодер полярного коду УШ – узгодження швидкості; М – модулятор; КП – канал передачі AWGN; ДМ – демодулятор; ВШ – відновлення швидкості; ПДК – декодер полярного коду; ВЦНК – блок вилучення циклічного надлишкового коду)

Для низхідної лінії зв'язку вхідні біти перемежуються до виконання полярного кодування. Біти ЦНК (Циклічного надлишкового коду), додані в кінці інформаційних бітів.

У випадку полярного кодування будемо використовувати незалежний від відношення синга/шум (SNR) метод, в якому надійність кожного підканалу обчислюється в автономному режимі, а впорядкована послідовність зберігається для максимальної довжини коду [23–29].

Схема каналного кодування представляє собою комбінацію виявлення помилок, виправлення помилок, узгодження швидкості, перемеження бітів і відображення інформації на фізичні канали управління або транспортного рівня.

Розглянемо розрахунок CRC (Cyclic redundancy check) – циклічного надлишкового коду.

На вході ми маємо A бітів, для низхідної лінії зв'язку додається 24 біти CRC.

Позначимо вхідні біти для обчислення CRC через $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{A-1}$, а біти парності через $p_0, p_1, p_2, p_3, \dots, p_{L-1}$, де A – розмір вхідної послідовності, L – кількість бітів парності (довжина циклічного надлишкового коду). Біти парності для циклічного надлишкового коду довжиною $L = 24$ генеруються циклічним генераторним поліномом за виразом:

$$g(D) = D^{24} + D^{23} + D^{21} + D^{20} + D^{17} + D^{15} + D^{13} + D^{12} + D^8 + D^4 + D^2 + D + 1 \quad (2)$$

Біти після приєднання CRC позначаються як $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{B-1}$, де $B = A + L$.

Інформаційні біти доставляються в блок кодування каналу. Вони позначаються через $c_0, c_1, c_2, c_3, \dots, c_{K-1}$, де K – кількість бітів, які кодуються за допомогою полярного кодування відповідно з стандартом [3] шляхом установки $n_{max}, I_{IL} = 1, n_{PC} = 0, n_{PC}^{wm} = 0$. Після виконання кодування біти позначаються як $d_0, d_1, d_2, d_3, \dots, d_{N-1}$, де N – кількість кодованих бітів.

Розглянемо полярні коди довжиною N з кодовою швидкістю R , що відповідає $K=N \cdot R$ інформаційним бітам. Кодування полярних кодів 5G виконується за допомогою вхідної двійкової послідовності u кодера довжини N , для якої значення бітових положень $N - K$ фіксовані. Для двійкового симетричного каналу введення-виведення без пам'яті (MBIOS – memoryless binary input output symmetric channel) значення таких фіксованих позицій, які називаються «замороженими» бітами, дорівнює нулю. Канал MBIOS, характеризується ймовірністю переходу $p_{Y|X}(y|x)$, який задовольняє рівняння $p_{Y|X}(y|0) = p_{Y|X}(-y|1)$ для $X \in \{0,1\}$ – множини вхідних значень і $Y \in \mathcal{Y}$ – множини вихідних значень і $\mathcal{Y}$ може бути або дискретним, або безперервним.

Кодування полярних кодів 5G графічно представимо рис. 2, на якому зліва вхід кодера, а справа – вихід кодера. Генераторна матриця G_N полярних кодів 5G має вигляд $B_N G_N$, де B_N – біт-обернена матриця перестановок. В наслідок інваріантності реверсування бітів G_N утворюється генераторна матриця яка дозволяє отримати трансформований вихідний сигнал кодера. Можливі довжини полярних кодів 5G становлять 2^n для $5 \leq n \leq 10$ для висхідної лінії зв'язку і $7 \leq n \leq 9$ для низхідної лінії зв'язку. Полярні коди забезпечують пропускну здатність каналів MBIOS з використанням декодування за алгоритмом послідовного виключення (SC – Successive Cancellation) [1].

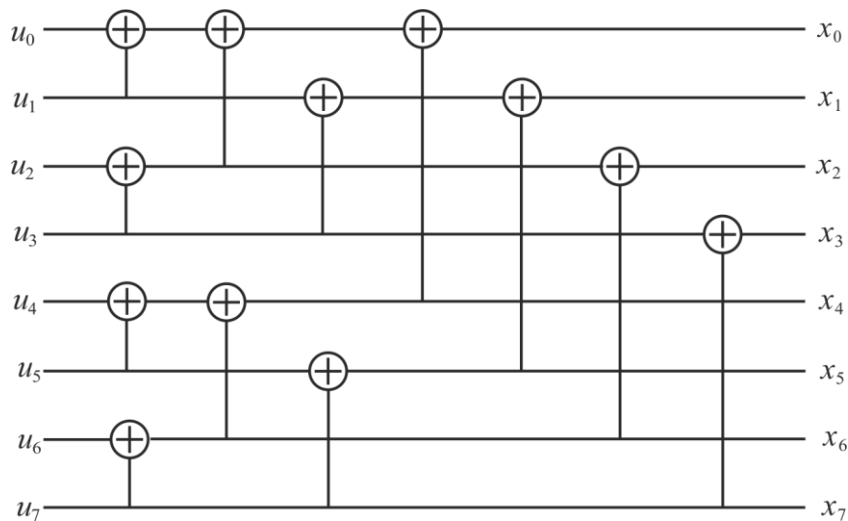


Рис. 2. Кодування полярних кодів довжиною 8 бітів

Розглянемо процеси узгодження та відновлення швидкості.

Вхідну бітову послідовність для узгодження швидкості позначимо як $d_0, d_1, d_2, d_3, \dots, d_{N-1}$. Вихідна бітова послідовність після узгодження швидкості позначимо як $f_0, f_1, f_2, f_3, \dots, f_{E-1}$, де E – довжина узгодженої за швидкістю вихідної послідовності.

Вхідна бітова послідовність для блоку конкатенації кодового блоку є послідовністю f_k , для $r = 0, \dots, C - 1$ і $k = 0, \dots, E_r - 1$, де E_r – число бітів узгодження швидкості для r -го кодового блоку. Вихідна бітова послідовність з блоку конкатенації кодового блоку представляє собою послідовність g_k для $k = 0, \dots, G - 1$. Конкатенація кодових блоків складається з послідовної конкатенації виходів.

Полярно-кодований набір бітів (N) узгоджується за швидкістю для виведення заданої кількості бітів (E) для створення сузір'я цифрової модуляції. Кодовані біти перемежуються за субблоками і передаються до кільцевого буфера довжиною N . Залежно від бажаної швидкості кодування і значень K , E і N , кожний з яких повторюється ($E \geq N$), і виколється або укорочується ($E < N$) шляхом зчитування вихідних бітів з буфера:

- для виколування біти E взяті з кінця;
- для укорочення біти E взяті з початку;
- для повторення біти E повторюються за модулем N .

Для низхідної лінії зв'язку вибрані біти передаються в модуль створення сузір'я цифрової модуляції, тоді як для висхідної лінії вони додатково перемежуються перед створенням сузір'я цифрової модуляції.

Неявне кодування CRC бітів повідомлення низхідної лінії зв'язку (DCI або BCH) або висхідної лінії зв'язку (UCI) вимагає використання декодування за алгоритмом списку послідовного виключення з використанням CRC (CA-SCL – CRC Aided Successive Cancellation List) [3] в якості алгоритму каналного декодера. Причому, декодування CA-SCL може перевершити ефективність турбокодів або кодів LDPC.

Алгоритм декодування SCL можна описати в термінах методу максимальної правдоподібності. Однак, кращі результати можна досягти декодуванням SCL в області логарифмічного відношення правдоподібності (LLR). Декодування списком характеризується параметром L , який представляє кількість найбільш ймовірних збережених шляхів декодування. В кінці декодування найбільш ймовірний шлях коду серед L шляхів є виходом декодера. Однак при збільшенні L продуктивність декодера також поліпшується.

Для вхідного повідомлення, яке об'єднано з CRC, декодування CA-SCL видаляє будь-який з шляхів, для яких CRC є недійсним. Це додаткове розуміння остаточного вибору шляху додатково підвищує продуктивність в порівнянні з декодуванням SCL. Для низхідної лінії зв'язку використовується CRC з 24 бітів.

Розглянемо SC (Successive Cancellation) декодування [1]. Для кожного вхідного біта u_i кодера довжиною N полярних кодів для $0 \leq i < N$ визначимо бітовий канал з входом u_i і входом $-y_0^{N-1}, u_0^{i-1}$ з ймовірністю переходу $W_N^{(i)}(y_0^{N-1}, u_0^{i-1} | u_i)$ для спостереження y_0^{N-1} . Іншими словами, існує N різних бітових каналів для довжини N полярних кодів. Основною особливістю полярних кодів є явище поляризації бітового каналу, в якому частина бітових каналів, ємність яких наближається до 1, стає достатньо близькою до пропускної здатності базового каналу MBIOS, в той час як ємність бітових каналів, що залишилися, наближається до 0. Отже, шляхом передачі інформаційних бітів може бути розроблена проста стратегія (або код) для досягнення заданої пропускної здатності.

Розглянемо приклад поляризації бітового каналу при SC-декодуванні який представимо на рис. 3. У кожному ядрі, представленому через G_2 , u_0 завжди менш надійний, ніж u_1 , і таке співвідношення можна використовувати для визначення того, що надійність монотонно зростає по відношенню до індексу положення біта для випадку коду довжиною у 4 біти. Довші полярні коди створюються шляхом об'єднання кількох коротших полярних кодів, і поділ на «погані» і «хороші» канали відбувається в кожному ядрі G_2 , починаючи з крайньої правої сторони і до крайньої лівої сторони. Результуючий порядок надійності бітового каналу не завжди буде монотонним по відношенню до індексу положення біта для полярних кодів довгих 4 бітів.

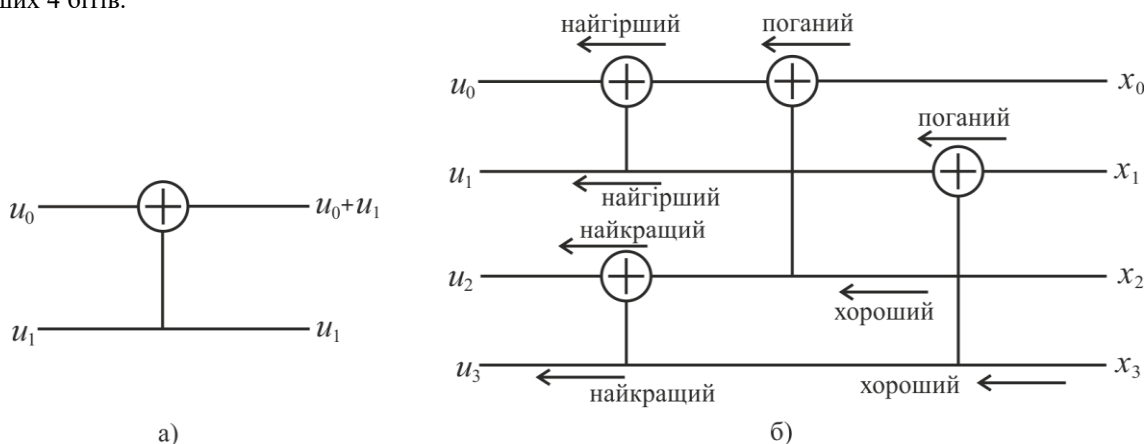


Рис. 3. Бітова поляризація каналу: а – ядро поляризації каналу G_2 ; б – полярний кодер довжиною 4 біти

Вищезазначена концепція бітового каналу тісно пов'язана з декодуванням SC. Насправді, $W_N^{(i)}(y_0^{N-1}, u_0^{i-1} | u_i)$ – це показник, який декодер SC використовує для прийняття рішення щодо інформаційного біта u_i , припускаючи, що всі попередні рішення вірні або відомі. Наступна кількість

повідомлень рекурсивно обчислюються для $0 < m < \log_2 N$, $0 \leq l \leq 2^{m-1}$ і $0 < j < N/2^m$ для ідентифікації $\hat{u}_i$ для $0 \leq i < N$. Нижче величини $W_{2^m}^{(2l)}$ і $W_{2^m}^{(2l+1)}$ для $m = \log_2 N$ і $0 \leq l \leq N/2$ відповідають вищезазначеній ймовірності переходу бітового каналу $W_n^i(y_0^{N-1}, u_0^{i-1} | u_i)$ для $0 \leq i < N$.

Розглянемо траєкторію генерації повідомлень для $W_N^{(0)}(u_0)$ полярних кодів довжиною 8 бітів. При декодуванні SC кожний бітовий канал змінюється один за одним для оцінки $W_N^{(i)}(u_i)$ та прийняття рішення $\hat{u}_i$. Значення u_i , які відповідають «замороженим» бітам, відомі декодеру. Аналогічна процедура може бути визначена з використанням логарифмічного відношення правдоподібності $\log(W(y_i | x_i = 0)) / (W(y_i | x_i = 1))$, замість ймовірності $W(y_i | x_i = 0)$.

Хоча полярні коди досягають пропускну здатності каналів MBIOS з використанням декодера SC, їх характеристики кінцевої довжини помітно гірше, ніж у інших типових схем каналного кодування [1]. SCL-декодування може розглядатися для подолання цієї проблеми. Як приклад розглянемо декодування SCL з розміром списку $L = 4$ з полярними кодами довжиною 8 бітів, де u_i з $i = 0, 1, 2, 4$ «заморожені». Перший інформаційний біт декодування u_3 і декодер обчислює $W_N^{(3)}(u_3)$ для цього біту. Однак замість прийняття рішення щодо u_3 , декодер зберігає обидва значення $\hat{u}_3 = 0$, $\hat{u}_3 = 1$ і визначає наступні повідомлення у відповідності з обома гіпотезами. Поки декодер обчислює $W_N^{(5)}(u_5)$ при обох гіпотезах для декодування u_5 , декодер все ще не приймає рішення відносно u_5 і зберігає дані виду $(\hat{u}_3, \hat{u}_5) = (0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$.

Декодер обчислює наступні повідомлення за всіма чотирма гіпотезами $W_N^{(6)}(u_6)$. Після цього декодер здатен прийняти рішення. Оскільки кількість гіпотез $(\hat{u}_3, \hat{u}_5, \hat{u}_6)$ дорівнює 8, що перевищує розмір списку, декодеру необхідно вибрати 4 з 8, щоб продовжити процес декодування. Такий вибір заснований на співвідношенні $W_N^{(6)}(u_6) = P(y_0^{N-1}, \hat{u}_0^5 | u_6) \alpha P(y_0^{N-1}, \hat{u}_0^5 | u_6)$, що визначає ймовірність кожної гіпотези; декодер обирає 4 гіпотези $W_N^{(6)}(u_6)$, які є найімовірнішими. В кінці декодування, гіпотеза (або кандидат) з найбільш високим значенням $W_N^{(N-1)}(u_{N-1})$ обирається у якості остаточного результату декодування. Зберігаючи список, декодер SCL намагається не приймати швидке рішення; зазначимо, що для кожного біта кожного кандидата в списку приймається жорстке рішення, тому операція декодування для кожного кандидата в списку аналогічна декодуванню SC. Іншими словами, SCL-декодування з розміром L списку буде виглядати з обчислювальної точки зору аналогічно виконанню L разів SC-декодування. Оскільки система 5G використовує код CRC, продуктивність вищезгаданого декодування SCL може бути додатково покращена з урахуванням CA-SCL [1].

Однією з основних проблем, пов'язаних з декодуванням SC, є проблема затримки, в основному через те, що інформаційні біти необхідно декодувати по одному. Для зменшення затримки, що виникає при SC декодуванні, можна згрупувати обробку декількох біт для прискорення процесу декодування. На відміну від кодів LDPC, декодування яких звичайно представляється у вигляді графічного представлення матриці перевірки на парність, декодування полярних кодів виконується в графічному поданні генераторної матриці. Такі обставини в поєднанні з тим фактом, що значення «заморожених» бітів відомі декодеру, дозволяє декодеру ефективно здійснювати обробку таких бітів під час декодування.

Полярні коди 5G повинні підтримувати функцію узгодження швидкості, щоб вибрати будь-яку кількість переданих бітів з вихідного сигналу з породжувальним кодом.

Розглянемо перемеження. В полярних кодах 5G використовується проміжний блок субблоків. Кодований вихідний сигнал розділений на 32 субблоки рівної довжини, які перемежуються. Узгодження швидкості застосовується до кодованого перемеженого сигналу на виході, а вихід узгодження швидкості відображається на символи QAM. Для висхідної лінії зв'язку існує ще один перемежувач, який використовується до виходу узгодження швидкості перед відображенням символу QAM.

Розглянемо виколування бітів. Виколування є типовим способом застосування узгодження швидкості. При виколуванні бітів, довжина материнського коду N більше, ніж розмір вихідного сигналу узгодження швидкості E і деякі кодовані виходи не передаються відповідно з вихідним розміром узгодження швидкості. Схему виколування можна розглядати як спосіб вибору ненадісланих позицій. У полярних кодах 5G перші $N - E$ бітів перед перемеженням виходу виколують. Такий вибір виколотих позицій бітів не є систематично виправданим, оскільки при ретельному виборі виколотих бітів може бути досягнута краща продуктивність [1, 6]. Простіше кажучи, подібно за схемою інформаційної послідовності, надійність бітового каналу з кожним іншим шаблоном виколування повинна бути оцінена, щоб знайти хороший шаблон виколування. Однак, існує залежність шаблону виколування від довжини коду, довжини інформації і SNR, тощо. Така схема може працювати гірше, ніж інші більш прості схеми, якщо шаблон виколування не може бути спроектований для кожного конкретного випадку, що нелегко здійснити на практиці. У цьому сенсі схема виколування, прийнята для 5G полярних кодів, може розглядатися як практичний компроміс.

Проколування вихідних бітів кодера створює бітові канали з нульовою надійністю, які повинні бути «заморожені». Якщо x_0 виколотий, то u_0 не може бути визначений, оскільки u_0 переноситься тільки на

x_0 . Так само, якщо x_0 і x_1 виколоті, то u_0 і u_1 не декодуються. У полярних кодах 5G вхідні індекси бітів, що відповідають виколотим вихідним індексам «заморожуються» і це просте правило задовольняє описаним вище вимогам для уникнення положення з нульовою надійністю.

Оцінка відношення сигнал/шум. Важливою особливістю системи бездротового зв'язку 5-го покоління – є висока швидкість передачі даних. Для забезпечення високої швидкості передачі даних в гігабітному діапазоні системою бездротового зв'язку 5-го покоління визначальним фактором є пошук ідеальної схеми модуляції і кодування. Схеми модуляції використовуються по-різному. Наприклад, для користувачів, що знаходяться ближче до базової приймально-передавальної станції (BTS), застосовується модуляція QAM (квадратурна амплітудна модуляція). Тому, що це може забезпечити високу швидкість передачі даних у випадку високого значення SNR, оскільки SNR має велике значення ближче до BTS. Модуляція QPSK використовується для користувачів, що знаходяться ближче до границі соти, оскільки там значення SNR є низьким (схема модуляції QPSK забезпечує високу швидкість передачі даних у випадку низьких значень SNR). Щоб збільшити швидкість передачі даних за рахунок зменшення BER, необхідно провести пошук ефективної схеми кодування.

Відношення рівня сигналу до рівня шуму використовується для визначення якості сигналу. Використовується показник рівня сигналу який приймається – повна потужність сигналу на вході приймача яка вимірюється у децибелах на міліват (dBm). Визначення рівня сигналу потрібно для діагностики проблем відсутності сигналу мережі. Потужність сигналу визначається після перенесення його частоти з основної на проміжну, але до підсилення. Відношення сигнал/шум дає верхні границі пропускної здатності (або швидкості передачі інформації) у системах бездротового зв'язку.

Щоб розробити математичну модель для оцінки SNR, потрібно відповідна математична модель для подання поширення вхідного сигналу і завад. Загальний підхід до моделі полягає в припущенні, що модель поширення складається з випадкової компоненти і не випадкової (або детермінованої) компоненти [5].

Детермінована складова має встановити, як сигнал затухає або послаблюється, коли він поширюється середовищем передачі, що досягається шляхом введення функції втрат на трасі або затухання. Поширеним вибором для функції втрат на шляху передачі є степенева функція. Наприклад, якщо сигнал переміщається з точки x в точку y , то він затухає з коефіцієнтом, який визначається функцією втрат на трасі: $t(|x - y|) = |x - y|^\alpha$, де показник втрат на трасі $\alpha > 2$.

Випадковий компонент моделі включає в себе замирання сигналу, обумовлене багатопроменевим поширенням, яке викликано зіткненням і відображенням сигналів від різних завад, таких як будівлі. Це включено в модель шляхом введення випадкової величини з деяким розподілом ймовірностей [5–8].

Сучасні системи бездротового зв'язку часто вимагають знання відношення сигнал/шум в приймачі. Наприклад, оцінка SNR звичайно використовуються в схемах управління потужністю мобільної передачі, обслуговування і адаптивної модуляції, а також процедури м'якого декодування.

У порівнянні з традиційною системою супутникового зв'язку, режим адаптивної системи зв'язку більше не є фіксованим, незмінним. Наприклад, високоефективний режим модуляції і висока швидкість передачі даних використовуються в ідеальних умовах каналу, а низькоефективний режим модуляції впроваджується при низькому SNR.

Оцінка SNR системи стільникового і супутникового зв'язку є обов'язковою. З одного боку, оцінка відношення сигнала / шум забезпечує перемикання, управління потужністю і необхідну інформацію про якість каналу. З іншого боку – адаптивно забезпечує більш ефективний алгоритм демодуляції для підвищення характеристик якості демодуляції.

Методи оцінки SNR, поділяються на залежні від даних (DA) і не залежні від даних (NDA). Для оцінювання типу DA, потрібно дослідити виділений сигнал, наприклад базовий символ, перед виявленням даних. У порівнянні з оцінювачем DA, оцінювач NDA не залежить від даних, тому можливість такої методики більш загальна.

На підставі результатів оцінки SNR, рішення про те, який режим модуляції використовувати, приймається шляхом призначення порогів перемикання $s_1, s_2, \dots, s_N$ режимів. Пороги перемикання отримані при обмеженні конкретного цільового значення BER.

Пропонується здійснювати визначення перемикання режиму модуляції для схеми адаптивної модуляції з постійною потужністю. Використовували криву BER кожної складової режиму модуляції, щоб знайти значення SNR, які задовольняють цільовим вимогам BER для кожного режиму модуляції. З цією метою використовували різні рівні перемикання. З огляду на баланс BER і спектральну ефективність, розроблена стратегія вибору режиму модуляції для досягнення максимально можливої спектральної ефективності при постійному середньому BER. Структурна схема моделі прийняття рішення про режим модуляції цифрової системи зв'язку приведена на рис. 4.

Оцінка SNR заснована на теорії оцінки максимальної правдоподібності. Основна ідея методу оцінки максимальної правдоподібності полягає в тому, щоб припустити, що шум представлено як «білий» з дисперсією σ^2 та потужністю сигналу яка дорівнює P_s .

Результати моделювання. Залежності BER від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму E_b/N_0 для модуляції 16-QAM, 64-QAM і 256-QAM при ефективній швидкості коду $R = 0,5$ зображені на рис. 5. Залежності BER від відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму E_b/N_0 для модуляції BPSK і QPSK при ефективній швидкості коду $R = 0,5$ зображені на рис. 6.

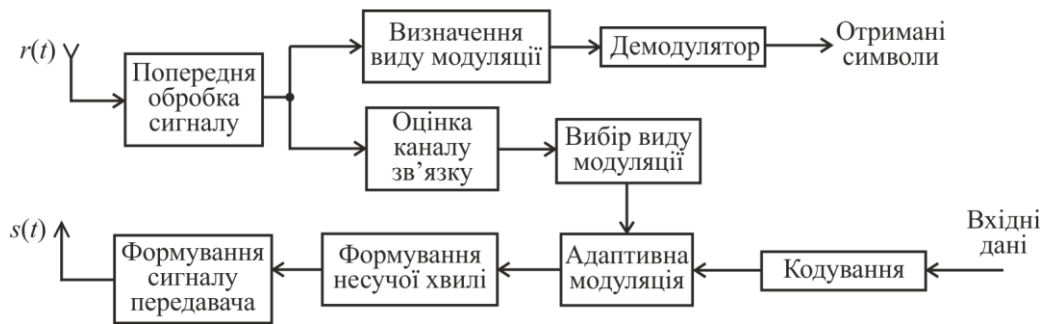


Рис. 4. Структурна схема прийомо-передавача з концепцією прийняття рішення про режим модуляції цифрової системи зв'язку

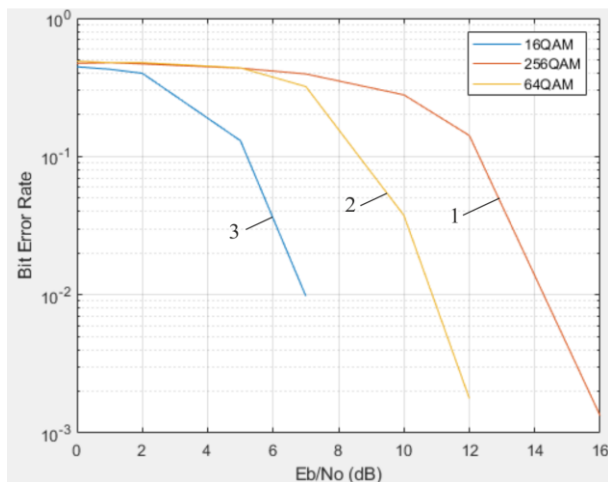


Рис. 5. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для системи зв'язку з полярним кодом і ефективною швидкістю $R = 0,5$ та модуляцією (1 – 256-QAM; 2 – 64-QAM; 3 – 16-QAM)

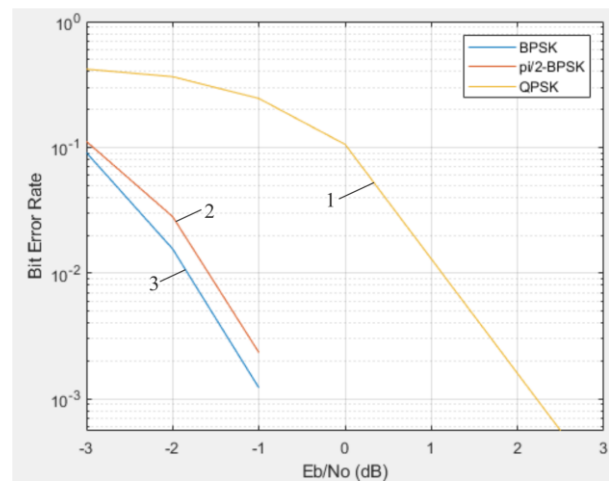


Рис. 6. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для системи зв'язку з полярним кодом і ефективною швидкістю $R = 0,5$ та модуляцією (1 – QPSK; 2 – $\pi/2$ -BPSK; 3 – BPSK)

Для відношення сигнал/шум (E_b/N_0) 1дБ, модуляція 16-QAM з полярним кодом ефективніше 64-QAM і 256-QAM, частота появи помилок зменшується майже у два рази, а для відношення сигнал/шум (E_b/N_0) 4дБ, частота появи помилок зменшується у двадцять разів.

Для ефективної швидкості полярного коду $R = 0,5$ найбільшій швидкості передачі 8 біт на символ з помилкою $BER=10^{-3}$ можна досягти використанням модуляції 256-QAM при відношенні сигнал/шум більше 17 дБ. Модуляція 64-QAM зменшує швидкість передачі у 3/4 рази, але зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 3,5 дБ при помилці $BER=10^{-3}$. Модуляція 16-QAM зменшує швидкість передачі у 2 рази (порівняно з модуляцією 256-QAM), але зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 7 дБ при помилці $BER=10^{-3}$. Результати моделювання системи зв'язку з полярним кодом і модуляцією QPSK і BPSK при ефективній швидкості коду $R=0,5$ показані на рис. 5.

Для відношення сигнал/шум (E_b/N_0) 2дБ модуляція QPSK з полярним кодом ефективніше BPSK, частота появи помилок зменшується у 2,3 рази. Модуляція $\pi/2$ -BPSK з полярним кодом ефективніше BPSK, частота появи помилок зменшується у 1,1 рази. Модуляція QPSK з полярним кодом швидкістю $R=0,5$ ефективніше модуляції BPSK на 3 дБ.

Для ефективної швидкості полярного коду $R=0,5$ модуляція BPSK ефективніше модуляції QPSK на 3 дБ, помилка $BER=10^{-3}$ досягається при меншому відношенні сигнал/шум.

Залежність BER від відношення енергії біта до спектральної густини потужності-шуму E_b/N_0 для модуляції 16-QAM, 64-QAM і 256-QAM при ефективній швидкості коду $R=0,05$ показані на рис. 6.

Для ефективної швидкості полярного коду $R=0,05$ найбільшій швидкості передачі 8 біт на символ з помилкою $BER=10^{-3}$ можна досягти використанням модуляції 256-QAM при відношенні сигнал/шум більше 13 дБ. Використання модуляції 64-QAM і 16-QAM зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 11 дБ при помилці $BER=10^{-3}$.

Сузір'я модуляції приймає бінарні значення 0 або 1 в якості вхідних даних і створює комплексні символи модуляції на виході.

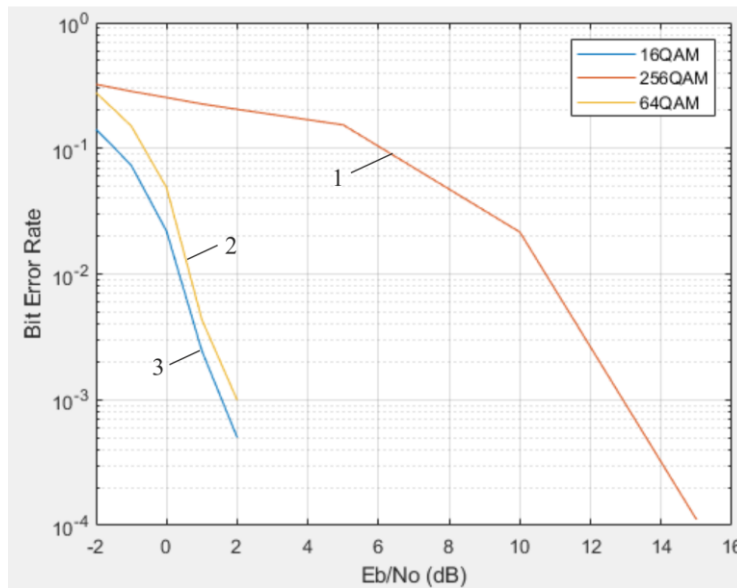


Рис. 6. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для системи зв'язу з полярним кодом та ефективною швидкістю кодування $R=0.05$, використана модуляція: 1 – 256-QAM; 2 – 64-QAM; 3 – 16-QAM

У випадку модуляції $\pi/2$ -BPSK біт $b(i)$ відображається як комплексний символ модуляції $d(i)$ згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{e^{j\frac{\pi}{2}(i \bmod 2)}}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))]$$

У випадку модуляції BPSK біт $b(i)$ відображаються як комплексний символом модуляції $d(i)$, згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))]$$

У випадку модуляції QPSK пари бітів $b(2i)$, $b(2i + 1)$ відображаються як комплексний символ модуляції $d(i)$ згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(2i)) + j(1 - 2b(2i + 1))]$$

У випадку модуляції 16QAM четверки бітів $b(4i)$, $b(4i + 1)$, $b(4i + 2)$, $b(4i + 3)$ відображаються як комплексний символ модуляції $d(i)$ згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{10}} \{ (1 - 2b(4i)) [2 - (1 - 2b(4i + 2))] + j(1 - 2b(4i + 1)) [2 - (1 - 2b(4i + 3))] \}$$

У випадку модуляції 64QAM групи з шести бітів $b(6i)$, $b(6i + 1)$, $b(6i + 2)$, $b(6i + 3)$, $b(6i + 4)$, $b(6i + 5)$ відображаються як комплексний символ модуляції $d(i)$ згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{42}} \{ (1 - 2b(6i)) [4 - (1 - 2b(6i + 2)) [2 - (1 - 2b(6i + 4))]] + j(1 - 2b(6i + 1)) [4 - (1 - 2b(6i + 3)) [2 - (1 - 2b(6i + 5))]] \}$$

У випадку модуляції 256QAM групи з восьми бітів $b(8i)$, $b(8i + 1)$, $b(8i + 2)$, $b(8i + 3)$, $b(8i + 4)$, $b(8i + 5)$, $b(8i + 6)$, $b(8i + 7)$ відображаються як комплексний символ модуляції $d(i)$ згідно з виразом:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{170}} \{ (1 - 2b(8i)) [8 - (1 - 2b(8i + 2)) [4 - (1 - 2b(8i + 4)) [2 - (1 - 2b(8i + 6))]]] + j(1 - 2b(8i + 1)) [8 - (1 - 2b(8i + 3)) [4 - (1 - 2b(8i + 5)) [2 - (1 - 2b(8i + 7))]]] \}$$

Висновки. У статті проведено дослідження системи зв'язу з полярним кодуванням і додаванням циклічного надлишкового коду, що визначений 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для інформації каналу управління нового радіо (DCI – Downlink control information, UCI – Uplink control information) і ширококомовного каналу (BCH – Broadcast channel). Показано використання компонентів на всіх етапах

обробки (кодування, узгодження швидкості, відновлення швидкості і декодування) та використання їх з різними видами модуляції для передачі по каналу AWGN. Для ефективної швидкості полярного коду $R=0,5$ найбільшої швидкості передачі 8 біт на символ з помилкою $BER=10^{-3}$ можна досягти використанням модуляції 256-QAM при відношенні сигнал/шум більше 17 дБ. Модуляція 64-QAM зменшує швидкість передачі у $3/4$ рази, але зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 3,5 дБ при помилці $BER=10^{-3}$. Модуляція 16-QAM зменшує швидкість передачі у 2 рази (у порівнянні з модуляцією 256-QAM), але зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 7 дБ при помилці $BER=10^{-3}$. Для відношення сигнал/шум (E_b/N_0) 1дБ, модуляція 16-QAM з полярним кодом ефективніше 64-QAM і 256-QAM, частота появи помилок зменшується майже у два рази, а для відношення сигнал/шум (E_b/N_0) 4дБ, частота появи помилок зменшується у двадцять разів. Для ефективної швидкості полярного коду $R=0,5$ модуляція BPSK ефективніше модуляції QPSK на 3 дБ, помилка $BER=10^{-3}$ досягається при меншому відношенні сигнал/шум. Для ефективної швидкості полярного коду $R=0,05$ найбільшої швидкості передачі 8 біт на символ з помилкою $BER=10^{-3}$ можна досягти використанням модуляції 256-QAM при відношенні сигнал/шум більше 13 дБ. Використання модуляції 64-QAM і 16-QAM зменшує вимоги до відношення сигнал/шум на 11 дБ при помилці $BER=10^{-3}$. При зменшенні ефективної швидкості полярного коду, зменшуються вимоги до граничного відношення сигнал/шум (E_b/N_0) для заданого виду цифрової модуляції.

References

1. V. Bioglio, C. Condo and I. Land, "Design of Polar Codes in 5G New Radio," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp.1, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2967127>.
2. Z. B. Kaykac Egilmez, L. Xiang, R. G. Maunder and L. Hanzo, "The Development, Operation and Performance of the 5G Polar Codes," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 1, pp. 96-122, Firstquarter 2020, <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2960746>.
3. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and M. Stepanov, "Method of the adaptive decoding of self-orthogonal codes in telecommunication," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 19, no. 3, pp. 1287-1296, Sept. 2020, <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1287-1296>.
4. J. Bae, A. Abotabl, H. Lin, K. Song and J. Lee, "An overview of channel coding for 5G NR cellular communications," APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 8, E17. 2019, <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2019.10>.
5. M. Dhuheir and S. Öztürk, "Polar Codes Analysis of 5G Systems," 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, 2018, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751838>.
6. O. İşcan and W. Xu, "Polar Codes with Integrated Probabilistic Shaping for 5G New Radio," 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690833>.
7. E. Sasoglu, "Polarization and Polar Codes," in Polarization and Polar Codes, vol.8, no. 4, pp. 259-381, Oct. 2012. <http://dx.doi.org/10.1561/01000000041>.
8. Y. Fang, G. Bi, Y. L. Guan and F. C. M. Lau, "A Survey on Protograph LDPC Codes and Their Applications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 1989-2016, Fourthquarter 2015, <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2436705>.
9. J. Li, Z. Gao and Y. Lv, "Gaussian Approximation Optimized SC- Flip Decoding Algorithm of Polar Codes," 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 2020, pp. 1124-1127, <https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9084888>.
10. M. A. Hanif and S. Vafi, "An Efficient Serially Concatenated Polar Code with Unequal Error Protection Property," 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Singapore, 2019, pp. 497-501, <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2019.8821724>.
11. J. Cheng, H. Li, M. Ye, L. Wang and C. Zhang, "Systematic Polar Codes Based on 3x3 Kernel Matrix," 2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), Haikou, China, 2019, pp. 77-79, <https://doi.org/10.1109/CISCE.2019.00024>.
12. M. Hu, J. Li and Y. Lv, "A comparative study of polar code decoding algorithms," 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, 2017, pp. 1221-1225, <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122551>.
13. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.
14. J. Boiko and O. Eromenko, "Signal Processing in Telecommunications with Forward Correction of Errors," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 11, no. 3, pp. 868-877, Sept. 2018, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v11.i3.pp868-877>.
15. A. Cyriac and G. Narayanan, "Polar Code Encoder and Decoder Implementation," 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES), Coimbatore, India, 2018, pp. 294-302, <https://doi.org/10.1109/CESYS.2018.8723895>.
16. Fa-Long Luo, "Deep Learning Techniques for Decoding Polar Codes," in Machine Learning for Future Wireless Communications, IEEE, 2020, pp.287-301, <https://doi.org/10.1002/9781119562306.ch15>.
17. M. Chiu, "Interleaved Polar (I-Polar) Codes," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 66, no. 4, pp. 2430-2442, April 2020, <https://doi.org/10.1109/TIT.2020.2969155>.
18. C. Condo, V. Bioglio, H. Hafermann and I. Land, "Practical Product Code Construction of Polar Codes," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 68, pp. 2004-2014, 2020, <https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2981766>.
19. P. Chen, B. Bai, Z. Ren, J. Wang and S. Sun, "Hash-Polar Codes With Application to 5G," in IEEE Access, vol. 7, pp. 12441-12455, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892969>.
20. H. Vangala, E. Viterbo and Y. Hong, "A comparative study of polar code constructions for the AWGN channel, Jan. 2015, [online] Available: <https://arxiv.org/abs/1501.02473>.
21. H. MahdaviFar, M. El-Khamy, J. Lee and I. Kang, "Polar Coding for Bit-Interleaved Coded Modulation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 5, pp. 3115-3127, May 2016, <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2443772>.
22. J. Boiko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions," 2017 IEEE 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, 2017, pp. 173-178, <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246374>.

23. E. Arikan, "Systematic Polar Coding," in IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 8, pp. 860-862, August 2011, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.061611.110862>.
24. P. Chen, M. Xu, B. Bai and X. Ma, "Design of polar coded 64-QAM," 2016 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC), Brest, 2016, pp. 251-255, <https://doi.org/10.1109/ISTC.2016.7593115>.
25. X. Wu and J. Yuan, "Partially Information Coupled Bit-Interleaved Polar Coded Modulation for 16-QAM," 2019 IEEE Information Theory Workshop (ITW), Visby, Sweden, 2019, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ITW44776.2019.8989376>.
26. S. D. Galiuk, M. Y. Kushnir and R. L. Politskiy, "Communication with use of symbolic dynamics of chaotic systems," 2011 21st International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, 2011, pp. 423-424.
27. K. Smelyakov, A. Chupryna, D. Sandrkin and M. Kolisnyk, "Search by Image Engine for Big Data Warehouse," 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, Lithuania, 2020, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/eStream50540.2020.9108782>.
28. X. Jia, F. Wang, Y. Sun and S. Zhang, "A Novel Modulation Scheme of Polar Codes," 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Limassol, 2018, pp. 1385-1390, <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2018.8450407>.
29. S. Kumar Das, Mobile Terminal Receiver Design: LTE and LTE-Advanced. John Wiley & Sons, 2017, <https://doi.org/10.1002/9781119107422>.

Надійшла / Paper received: 03.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 004.9

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-12

БАРМАК О. В., КАЛИТА О. Д., МАНЗЮК Е. А.
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІЧНИХ ПРОЯВІВ ЕМОЦІЙ

В статті проведено аналіз системи Facial Action Coding System (FACS) Полла Екмана та спрощеної моделі яка уможливує реалізацію розпізнавання емоційних проявів на обличчі швидким чином. Аналіз було проведено на основі даних отриманих Amsterdam Interdisciplinary Centre for Emotion (AICE).

У запропонованій моделі реалізована гіперплощинна класифікація мимічних проявів основних емоційних станів. Основною перевагою запропонованого підходу є невелика обчислювальна складність, що дасть змогу реалізувати розпізнавання змін емоційного стану людини за мимічними проявами без використання спеціалізованого обладнання (для відео-камер з низькою роздільною здатністю або на великій відстані). Сферою застосування виступає контроль за водієм під час керування транспортом, оператором складного виробництва тощо.

Проведення дослідження та обробка зібраних даних дозволили виділити основні ділянки обличчя, що впливають на відображення емоційних станів. Це ділянки обличчя з бровами, очами та ротом. Для визначення форм групування станів як відображення сукупності ознак було застосовано підхід, що дозволив використати методи візуалізації даних. Це було необхідно для наочного відображення характерних форм групування даних. Саме такі груповані дані і визначають класи емоційних проявів. Важливим аспектом стала можливість встановлення границь розділення класів, тобто емоційних станів. Розташування границь може коректуватися залежно від якості та кількості даних. Така форма адаптації дозволила застосовувати технологію розпізнавання мимічних проявів емоцій більш гнучко та адаптувати її. Незважаючи на те, що мимічні прояви в силу фізіологічних особливостей є типовими проявами емоції, границі розділення даних необхідно коректувати для точного розмежування класів емоцій. Це дозволяє гіперплощинна класифікація.

Основною перевагою запропонованого підходу була невелика обчислювальна здатність. Вона дала змогу реалізувати розпізнавання змін емоційного стану людини за мимічними проявами на обличчі без використання спеціалізованого обладнання.

Ключові слова: розпізнавання мимічних проявів емоції, гіперплощинна класифікація, спрощена модель.

BARMAK O., KALYTA O., MANZIUK E.
Khmelnitsky National University

SIMPLIFIED MODEL FOR RECOGNITION FACIAL EMOTIONS

In the article, we analyze Paul Ekman's Facial Action Coding System (FACS) and a simplified model that enables the recognition of facial emotional manifestations in the faster way. The analysis was based on data obtained from the Amsterdam Interdisciplinary Center for Emotion (AICE).

The model realizes the hyperplane classification of mimic expressions of the main facial emotional states. The main advantage of this approach is small computational complexity, which will allow realizing the recognition of the changes in people's emotional state without any special equipment (for low-resolution or long-distance video cameras). The sphere of application is control over the drivers in the process of driving the vehicle, complex production operators, etc.

As a result of the research and processing of the collected data, the main areas of the face were identified, in which changes in facial expressions directly affect the reflection of emotional states. These are areas with eyebrows, eyes, and lips.

To determine the forms of grouping states as a reflection of a set of features, we apply the approach proposed in the paper. The approach allows the use of data visualization techniques to visually display characteristic forms of data grouping. These grouped data determine the classes of emotional displays. An important aspect is the ability to set the boundaries of class division, in our case, emotional states. The location of borders can be adjusted depending on the quality and quantity of data. This form of adaptation allows a more flexible application of the technology of recognition of mimic expressions of emotions and adaptation to the data body. Although mimic displays due to physiological particularities are typical displays of emotions, the boundaries of data separation need to be adjusted for accurate distinguishment of classes of emotions. This allows the use of hyperplane classification.

The validity of the proposed model is suggested to test on the synthesized data. This is possible because the real input will belong to the same intervals as artificially created. The main advantage of the proposed approach is the small computational complexity that will allow the recognition of changes in the human emotional state by facial expressions without the use of specialized equipment (for low-resolution or long-distance video cameras).

Keywords: facial emotion recognition, hyperplane classification, simplified model.

Вступ. У 1969 р. шведський вчений Карл-Герман Йортшю розробив систему класифікації емоцій відповідно до виразу обличчя [7]. У 1978 р. Екман і Фрейзен розробили свою систему класифікації базуючись на методиці Йортшю [2]. У 2002 р. ця система була суттєво оновлена [3]. Її суть полягає у кодуванні рухів м'язів обличчя. Цей підхід став широко використовуватись у всьому світі психологами на аніматорами. Для того щоб обійти суб'єктивність суджень та великий обсяг часу необхідний для дослідження було створено автоматизовану систему яка визначає обличчя на відео, знаходить необхідні ознаки та класифікує емоції [6].

За допомогою FACS [10] можна закодувати та описати практично будь-яку емоцію використовуючи так звані action-units (AU). FACS визначає action-unit, як напруження або розслаблення одного чи декількох м'язів на обличчі.

В результаті дослідження та обробки зібраних даних були виділені основні ділянки обличчя, зміни міміки яких прямо впливають на відображення емоційних станів [1]. Це ділянки обличчя з бровами, очами та ротом. Заключним етапом дослідження стало виділення множин якісних характеристик зміщень точок або груп точок, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Якісні характеристики ділянок обличчя

Емоції	Брови	Очі	Губи
Гнів	Опущені	Без змін	Стиснуті
Горе	Без змін	Опущені верхні повіки	Опущені кутики
Задоволення		Злегка опущені верхні повіки	Без змін
Страх	Сильно підняті	Підняті верхні повіки	Підняті кутики губ
Радість	Без змін	Підняті зовнішні кутики очей	Злегка підняті кутики губ

Метою статті є оприлюднення результатів дослідження по побудові спрощеної моделі для за допомогою якої можлива реалізація розпізнавання емоційних проявів на обличчі швидким чином. У моделі реалізована гіперплощинна класифікація мімічних проявів основних емоційних станів. Основною перевагою запропонованого підходу є невелика обчислювальна складність, що дає змогу реалізувати розпізнавання змін емоційного стану людини за мімічними проявами без використання спеціалізованого обладнання (для відео-камер з низькою роздільною здатністю або на великій відстані). Сфера застосування – контроль за водієм під час керування транспортом, оператором складного виробництва тощо.

Синтез моделі. Виходячи з потреби ідентифікації мімічних проявів засобами звичайних камер із невисокою роздільною здатністю або на великій відстані та за результатами з таблиці 1 введемо наступну градацію для ділянок обличчя:

- очі: {розплющені, примружені, нормальні};
- губи: {розтягнуті, зжаті, нормальні};
- брови: {підняті, опущені, нормальні}.

За наведеною градацією, отриманні у дослідженні мімічні прояви емоцій подаються наступним чином (табл. 2).

Таблиця 2

Подання мімічних проявів емоцій якісними характеристиками

Орган	Радість	Горе	Страх	Гнів	Задоволення
Очі	Нормальні	Нормальні	Розплющені	Примружені	Нормальні
Губи	Розтягнуті	Зжаті	Нормальні	Нормальні	Розтягнуті
Брови	Підняті	Опущені	Підняті	Опущені	Опущені

Наведене у таблиці 2 подання мімічних проявів у розрізі емоційних станів слугуватиме основою для наступного синтезу моделі за якою буде проводитися ідентифікація. Визначені емпіричним шляхом ознаки формально подамо наступним чином:

x_1 – ознака міміки ділянки обличчя з очима;

x_2 – ознака міміки ділянки обличчя з губами;

x_3 – ознака міміки ділянки обличчя з бровами.

$x_1, x_2, x_3 \in [0,1]$, причому $x_1 \in [0,0.2]$ – для примружених очей; $x_1 \in [0.4,0.6]$ – для нормальних очей; $x_1 \in [0.8,1]$ – для розплющених очей; $x_2 \in [0,0.2]$ – для зжатих губ; $x_2 \in [0.4,0.6]$ – для нормальних губ; $x_2 \in [0.8,1]$ – для розтягнутих губ; $x_3 \in [0,0.2]$ – для опущених брів; $x_3 \in [0.4,0.6]$ – для нормальних брів; $x_3 \in [0.8,1]$ – для піднятих брів. Існуючі у запропонованій синтетичній моделі проміжки, що не використовуються ($]0.2,0.4[$, $]0.6,0.8[$) служать для моделювання хорошої роздільності між різними емоційними станами при їх класифікації.

Гіперплощинна класифікація. Сформовані сукупності характерних ознак для визначення відповідних емоційних станів. Мімічні прояви природно мають граничні стани і в той же час характеризуються типовою сукупністю ознак зовнішніх проявів цих станів. Відповідно до цього і було емпірично визначено межі проявів ознак. Однак слід зазначити, що існує природний розподіл і вказані межі відповідають найбільш типовим проявам. Для визначення форм групування станів як відображення сукупності ознак застосуємо підхід запропонований у роботі [8]. Підхід дозволяє використати методи візуалізації даних для наочного відображення характерних форм групування даних. Ці груповані дані і визначають класи емоційних проявів. Важливим аспектом є можливість встановлення границь розділення класів, у нашому випадку, емоційних станів. Розташування границь може коректуватися залежно від якості та кількості даних. Така форма адаптація дозволяє більш гнучко застосовувати технологію розпізнавання мімічних проявів емоцій та адаптувати до корпусу даних. Хоча мімічні прояви в силу фізіологічних

особливостей є типовими проявами емоцій, однак границі розділення даних необхідно коректувати для точного розмежування класів емоцій. Це дозволяє використання гіперплощинна класифікація. Адаптуємо застосування технології гіперпросторового розділення до розпізнавання емоційних проявів.

Вхідні дані, а саме їх ознаки необхідно трансформувати наступним чином:

- зниження багатовимірного простору ознак до двовимірного. При невеликій кількості ознак мінімізується втрата інформативності даних при пониженні розмірності;
- візуальне представлення даних у двовимірному просторі із застосування програмних інструментів;
- побудова границь розділення класів групованих даних;
- Встановлення відповідностей груп даних мимічним емоційним станам;
- відображення границь класів емоційних станів у вихідному мірному просторі ознак у виді гіперплощин;
- встановлення просторових гіпероб'ємів обмежених гіперплощинами з даними, що належать цим гіперкубам;
- побудова правил визначення приналежності нового елемента даних для певного класу як знаходження його просторового положення відносно гіперплощин.

Для пониження мірності простору ознак використовується метод багатомірного шкалювання (multidimensional scaling – MDS) [9, 4]. За розмірну характеристику приймається відносне розтушування об'єктів один відносно іншого за сукупністю ознак. Міра віддалення об'єктів використовується як міра відмінності.

Вихідні дані подаються у вигляді матриці «об'єкт-ознака» та визначається відстань між i - і j -м об'єктом, яку позначимо $\delta_{ij} = d(X_i, X_j)$. Положення об'єктів в багатовимірному просторі визначається таким чином $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$, $i = 1 \dots n$. Розмірність простору встановлюємо відповідно до кількості вибраних нами характеристик емоційних проявів мимічного характеру.

Застосуємо Евклідову метрику для обрахунку відстаней між об'єктами:

$$\text{dist}(X_i, X_j) = \left(\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2 \right)^{0.5} \quad (1)$$

При шкалюванні простору, особливо високої розмірності, можливе спотворення та втрата інформативності даних. Для мінімізації цього впливу використаємо таку міру якості відображення як стрес, та запишемо її у вигляді функції найменших квадратів:

$$\sigma = \sum_{i < j} w_{ij} (d(Y_i, Y_j) - \delta_{ij})^2, \quad (2)$$

Такий запис дозволяє відобразити мінімізацію відмінності відстаней між даними в редукованому та вихідному просторі. Так як забезпечити мінімізацію цієї функції в загальному випадку досить складно, скористаємось наближеним методом заміни вихідної функції більш просторою та керованою сурогатною функцією. Це реалізується на базі ітеративного використання алгоритму SMACOF [11]. Відповідно до цього забезпечується мінімізація функції втрат при пониженні простору.

Для забезпечення оптимізації та ефективності пониження простору використаємо наступні етапи. Спочатку сформуємо матрицю попарних відстаней вхідних даних. Далі необхідно сформувати матрицю загальних відстаней між об'єктами. Для отриманої матриці з метою оптимального відображення даних відносного розташування необхідно провести подвійне центрування. В цьому випадку візуальне відображення буде оптимально відцентроване по відношенню до даних. Визначаються власні значення та власні вектори матриці. Наступним кроком є оптимізація розташування положення даних із застосування сурогатної функції.

За мету ставиться отримання даних з координатними, які можна відобразити на площині тобто у двовимірному просторі. Отримані дані будуть мати дві узагальнені координати. Так як використовуємо дані для того щоб отримати модель розпізнавання емоційних проявів використовуємо навчальну вибірку. Тобто дані у нас попередньо розмічені. Таким чином на візуальній площині ми можемо спостерігати групування даних та встановити за якими емоційними проявами ці дані групуються. Найбільш важливим аспектом є можливість розділити ці групи даних. Чим краще вони роздільні і чим між цими групами є більша відстань тим більший допуск можемо дати на розсіювання значень ознак. Таким чином важлива роздільність даних за сукупністю ознак. Перевагою застосування візуалізації є можливість провести ефективний аналіз даних на роздільність, наявність викидів, та формування границь класів з ефективними допусками за розсіюванням узагальнених ознак. Відповідно до групування даних встановлюємо класи та графічно проводимо границі цих класів.

Границі класів визначаються використовуючи кусочно-лінійні розділювачі. Використання дискримінантної лінійної функції обумовлено необхідністю вирішення завдання проєкції в початковий простір ознак.

Лінійний класифікатор $d(\bar{x})$ визначається $d(\bar{x}) = \bar{W}^T \bar{x} + w_n$, де $\bar{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})^T$ – вектор ознак, який визначає образ об'єкту класифікації; $\bar{W} = (w_0, w_1, \dots, w_{n-1})^T$ – вектор вагових коефіцієнтів класифікатора; w_n – порогове значення.

Належність до класу визначається правилом відношення до класифікатора. Тобто визначається розташування об'єкту відносно лінії класу.

Кусочно-лінійний підхід з формування границі класу дозволяє утворити будь-яку форму шляхом комбінації лінійних елементів. Якщо просторова конфігурація групи об'єктів складна, кількість лінійних елементів границі збільшується. Однак це не порушує загального підходу використання лінійного розділювача. Таким чином є можливість сформулювати загальну нелінійність границі класу застосовуючи локальну лінійну роздільність із обмеження самої локалізації. Локалізація лінійного розмежування визначається методами візуального аналізу, що і є перевагою застосування запропонованого підходу.

Далі, відповідно, лінійні елементи границь проектується у вихідний простір та утворюють у ньому гіперплощини. У гіперпросторі гіперплощини перетинаються та формують гіперкуби. Саме ці гіперкуби є просторовими об'ємами класів. Щоб визначити належність нового об'єкту до класу немає необхідності знаходження перетинів площин. Важливим є утворення границь у двовимірному візуальному просторі та відповідних їм елементів гіперплощин і вихідному просторі. В двовимірному просторі визначається границя класу, тобто певний контур. Новий об'єкт по відношенню до цього контуру розташовується так як і усі інші елементи цього класу. Таким чином можна сформулювати правила відношення до класу, правила встановлення розташування об'єктів класу по відношенню до кусочно-лінійного контуру границі класу.

Встановлення розташування об'єктів класу по відношенню до границь класу відбувається у відповідності з правилами дерева рішення. Застосування дерева рішень дозволяє забезпечити швидкий процес класифікації при отриманій моделі.

Застосування візуального аналізу визначення границь групованих об'єктів є ключовим елементом формування моделі класифікації. Використання кусочно-лінійних контурів границь класів дозволяє сформувати дискримінантні розділювачі досить складної нелінійної залежності. Візуальне визначення границь також дає можливість оптимізувати обчислення при формуванні моделі мінімізуючи кількість лінійних елементів та залежить від досвіду та кваліфікації аналітика. При необхідності як межі класів так і кількість лінійних елементів може бути змінена. Найбільш оптимальних є забезпечення мінімально необхідними границями класів.

Ключовим елементом застосування запропонованого підходу є участь аналітика у процесі навчання моделі класифікації. Аналітик застосовуючи необхідний інструментарій визначає границі класів, звичайно базуючись на візуалізованих даних. Надалі навчена система розпізнавання емоцій працює самостійно і є повністю автоматичною.

Навчена модель класифікації даних є дерево рішень відносного розташування об'єктів даних відносно границь класів. За цими правилами і визначається положення нового об'єкта у просторі ознак відносно границь класів, а, відповідно і класифікується новий об'єкт.

Результати синтезу моделі. Валідність запропонованої моделі пропонується перевірити на синтезованих даних. Це можливо тому, що реальні вхідні данні будуть належати тим же проміжкам, що і штучно створені.

За наведеними у таблиці 2 емоційними проявами і відповідними їм проміжками для x_1, x_2, x_3 згенеровано вхідні данні та візуалізовано їх у двовимірному просторі за запропонованим підходом (рис. 1).

Таблиця 3

	F01	F02	F03	F04	F05	Горе		M02	M03	M04	M05	M06	M07
Очі	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5	0.2	
Брови	0.1	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0	0.1	0.2	0.2	0.1	
Губи	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Як видно з рисунка, синтезовані данні згруповані за емоціями, що підтверджує спроможність запропонованої моделі використовуватись для класифікації емоційних станів.

Далі, слідуючи кроками запропонованого підходу вказані кусочно-лінійні роздільники для класів, що відповідають емоційним станам.

Слідуючи далі, згідно запропонованому підходу, отримано параметри гіперплощин.

За допомогою отриманих параметрів гіперплощин побудовано дерево рішень для гіперплощинної класифікації мімічних проявів емоційних станів.

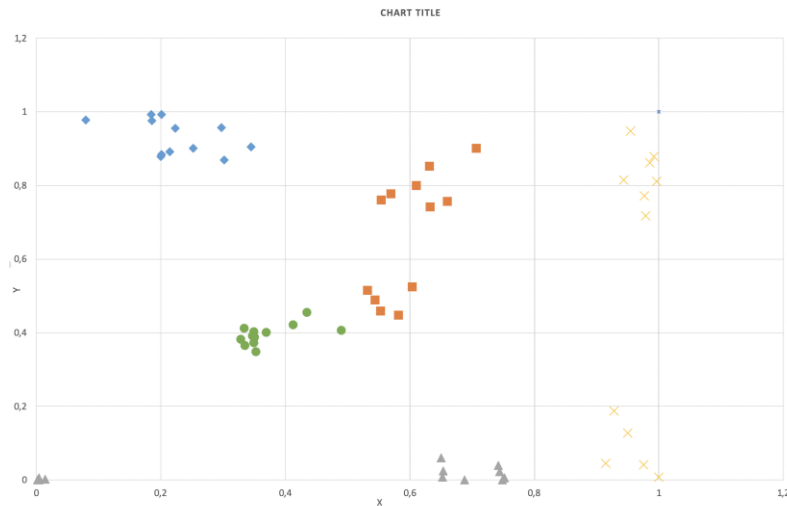


Рис. 1. Візуалізація емоційних станів

Аналіз точок. Також деякі класи емоцій можна візуально розділити на 2 групи. Такі як прояви злості та горя.

Це пояснюється тим, що у частини респондентів на фото повіки примружені $[0, 0.2]$, а у іншої частини повіки у нормальному стані $[0.4, 0.6]$.

Таблиця 4

Злість

	F01	F02	F03	F04	F05	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07
Очі	0.8	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0.8
Брови	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
Губи	0.1	0.2	0	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0.1

У частини респондентів на фото повіки примружені $[0, 0.2]$, а у частини – розширені $[0.8, 1]$.

Порівняння FACS та спрощеної моделей. Система FACS налічує 100 action-units та характеризує ступінь вираженості зміни стану м'язів 5-ма рівнями:

- A. Мінімальний.
- B. Незначний.
- C. Явний.
- D. Сильний або екстремальний.
- E. Максимальний.

Happiness	6+12
Sadness	1+4+15
Fear	1+2+4+5+7+20+26
Anger	4+5+7+23

У запропонованій моделі емоції визначаються простіше ніж у Екмана. За одиницю виміру взято Action Unit (AU) [5]. А саме:

1. Злість по FACS визначається як:

- опущені брови (AU4);
- припідняті верхні повіки (AU5);
- припідняті нижні повіки (AU7);
- зжаті губи 23 (AU23).

В нашій моделі злість характеризують:

- примружені очі (опущена верхня повіка і припіднята нижня повіка);
- брови опущені;
- зжаті губи.

2. Горе по FACS визначається як:

- внутрішні частини брів підняті (AU1);
- опущені брови (AU4);
- опущені кутики губ (AU15).

В нашій моделі горе визначається як:

- нормальний стан верхньої та нижньої повік;
- опущені брови;
- зжаті губи.

3. Страх по FACS визначається як:

- внутрішні частини брів підняті (AU1);
- зовнішні частини брів підняті (AU2);
- опущені брови (AU4);
- припідняті верхні повіки (AU5);
- припідняті нижні повіки (AU7);
- губи натягнуті (AU20);
- опущена щелепа (AU26).

Запропонована модель визначає страх як:

- опущені верхні повіки та припідняті нижні повіки;
- підняті брови;
- нормальний стан губ.

4. Радість по FACS визначається як:

- щоки підняті (AU6);
- розтягнуті кутику губ (AU12).

Спрощена модель визначає радість як:

- опущені верхні повіки та припідняті нижні повіки;
- брови у нормальном стані;
- розтягнуті губи.

Ми не відслідковуємо опущення щелепи та кутиків губ. FACS розглядає послідовність мімічних проявів. Іноді ці прояви протилежні. Як при страху (підняття брів а потім їх опускання). Пропонована модель відслідковує тільки один мімічний прояв (підняті брови).

Висновки. У роботі проведено аналіз системи Facial Action Coding System (FACS) Полла Екмана та спрощеної моделі яка уможливує реалізацію розпізнавання емоційних проявів на обличчі швидким чином. У спрощеній моделі реалізована гіперплощина класифікація мімічних проявів основних емоційних станів на обличчі. Основною перевагою запропонованого підходу є невелика обчислювальна складність, що дасть змогу реалізувати розпізнавання змін емоційного стану людини за мімічними проявами на обличчі без використання спеціалізованого обладнання (для відео-камер з низькою роздільною здатністю або на великій відстані). Сфера застосування запропонованого підходу – використання у системах контролю за: водієм під час керування транспортом, оператором складного виробництва тощо.

Подальші дослідження направлені на виявлення на зображенні обличчя, отриманого з відео-камер з низькою роздільною здатністю або на великій відстані, параметрів моделі у потрібному форматі та створення відповідних інформаційних систем.

Література

1. Бармак О.В. Інформаційна технологія визначення критеріїв ділянок обличчя, що відтворюють емоційну міміку / О. В. Бармак, Калита О.Д., Гащук Т.О., Скрипник Т.К. // Вісник Хмельницького національного університету. Сер.: Технічні науки. Хмельницький. – 2018, №6(2). – С.130-134.
2. Екман П. Система кодування рухів обличчя: Техніка для виміру рухів обличчя / П.Екман, В. Фрізен // Consulting Psychologists Press. Palo Alto, California. – 1978.
3. Екман П. Система кодування рухів обличчя: Посібник / П.Екман, В. Фрізен, Дж. С. Хареф // Research Nexus eBook. Salt Lake City, Utah. – 2002.
4. Cox T.F., Cox M.A.A.: Multidimensional scaling, 2nd edn. Chapman and Hall / CRC, Boca Raton, 2001.
5. Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook. – [Електронний ресурс]. – <https://imotions.com/blog/facial-action-coding-system/>.
6. Hamm J., Kohler C.G., Gur R.C., Verma R. : Automated Facial Action Coding System for dynamic analysis of facial expressions in neuropsychiatric disorders, Journal of Neuroscience Methods / Philadelphia, USA, 2011.
7. Hjortsjö C.H.: Man's Face and Mimic Language, Studentlitteratur / Lund, Sweden, 1970.
8. Intel® RealSense™ Depth Camera D435. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>.
9. Krak I., Barmak O., Manziuk E., Kulias A. (2020) Data Classification Based on the Features Reduction and Piecewise Linear Separation. In: Vasant P., Zelinka I., Weber G.W. (eds) Intelligent Computing and Optimization. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1072. Springer, Cham.
10. Ramachandran V.S. Microexpression and macroexpression, Oxford: Elsevier Academic Press / Lund, Sweden, 2012, pp. 173-183.
11. Van der Maaten, L.J.P., Postma, E.O., van den Herik, H.J.: Dimensionality reduction: a comparative review. Technical report TiCC-TR 2009-005. Tilburg University 2009.

References

1. BARMACK, O. V., KALYTA O.D., HASHCHUK T.O. & SKRYPNYK, T. K. (2018) Information technology for determining the criteria of facial areas that reproduce emotional facial expressions // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 6, 2018 (2). p. 130-134.

2. EKMAN P., FRIESEN W. Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement, Consulting Psychologists Press / Palo Alto, California, 1978.
3. EKMAN P., FRIESEN W.V., HAGER J.C. : Facial Action Coding System: the Manual, 2nd edition, Research Nexus eBook / Salt Lake City, Utah, 2002.
4. COX T.F., COX M.A.A.: Multidimensional scaling, 2nd edn. Chapman and Hall / CRC, Boca Raton, 2001.
5. Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook. – [Електронний ресурс]. – <https://imotions.com/blog/facial-action-coding-system/>.
6. HAMM J., KOHLER C.G., GUR R.C., VERMA R. : Automated Facial Action Coding System for dynamic analysis of facial expressions in neuropsychiatric disorders, Journal of Neuroscience Methods / Philadelphia, USA, 2011.
7. Hjortsjö C.H.: Man's Face and Mimic Language, Studentlitteratur / Lund, Sweden, 1970.
8. INTEL® REALSENSE™ Depth Camera D435. [Online] Available from: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/> [Accessed: 15 January 2020].
9. KRAK I., BARMAK O., MANZIUK E., KULIAS A. (2020) Data Classification Based on the Features Reduction and Piecewise Linear Separation. In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) Intelligent Computing and Optimization. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1072. Springer, Cham.
10. RAMACHANDRAN V.S. Microexpression and macroexpression, Oxford: Elsevier Academic Press / Lund, Sweden, 2012, pp. 173-183.
11. VAN DER MAATEN, L.J.P., POSTMA, E.O., VAN DEN HERIK, H.J.: Dimensionality reduction: a comparative review. Technical report TiCC-TR 2009-005. Tilburg University, 2009.

Надійшла / Paper received: 12.02.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 004.9

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-13

ПРЕЙЗНЕР Є. Е., ЯШИНА О. М.
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СФЕРІ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

В даній статті описано та досліджено сучасний стан використання штучного інтелекту (ШІ) в сфері охорони здоров'я, його методів та засобів. Під час огляду обсягів використання та методів застосування ШІ в медицині в сучасному світі, також розглядалися питання про поточний стан розвитку сфери ШІ в цілому, її актуальність, перспективність та можливості на даному етапі розвитку.

Не зважаючи на велику кількість інвестицій в розробку ШІ для використання в медицині, на даний момент ефективність роботи всіх існуючих рішень недостатньо висока.

Ключові слова: штучний інтелект(ШІ). охорона здоров'я, ринок штучного інтелекту

PREIZNER E., YASHYNA O.
Khmelnitskyi National University

METHODS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FIELD OF HEALTHCARE

The vital activity and adequate functioning of society directly depends on the preservation of the health of the population of any state. The most important area in this direction is health care, because health in general is a key aspect of the existence of any living organism, including humans. This means that the importance of health is difficult to overestimate. For this reason, countries around the world are making significant efforts to improve the quality of health care, using the latest advances in science and technology.

Such achievements undoubtedly include developments in the field of information technology (IT), as this industry in the modern world is one of the most promising in terms of the number of achieved results of human activity. Thus, today strong investment investments are made in the development of software for health care, because the development of high quality and effective health care is impossible without the use of modern means of medical information processing, implementation of intellectual management methodology and advanced communication technology.

This article describes and explores the current state of artificial intelligence (AI) in health care. During the review of the scope and methods of application of AI in medicine in the modern world, also considered the current state of development of AI in general, its relevance, prospects and opportunities at this stage of development.

Today all the artificial intelligence systems that exist are called weak AI, because it can't learn the way people do or think the way people do. It can do only one thing, such as searching the Internet for queries, recognizing objects in images, diagnosing a specific disease. Besides at the moment the efficiency of all existing solutions in the field of healthcare is not high enough. However the AI field is still growing, for example over the past four years, annual investment in artificial intelligence increases by more than \$4.25 billion (total investment in 2014) and at the same time the field of Healthcare led AI investment with \$4 billion investment in 2019.

Key words: artificial intelligence (AI). healthcare, artificial intelligence market.

Вступ. Життєдіяльність та адекватне функціонування суспільства напряму залежить від збереження здоров'я населення будь-якої держави. Найважливішою сферою в цьому напрямку є охорона здоров'я, адже здоров'я загалом є основним аспектом існування будь-якого живого організму, у тому числі людини. А це означає, що важливість здоров'я досить важко переоцінити. З цієї причини країни по всьому світу докладають чималих зусиль, щоб поліпшити якість охорони здоров'я, використовуючи для цього новітні досягнення науки і технологій.

До таких досягнень безперечно відносяться розробки у сфері інформаційних технологій (ІТ), оскільки дана галузь у сучасному світі є однією із найперспективніших за кількістю досягнутих результатів людської діяльності. Так, вже сьогодні в розробку програмних засобів для галузі охорони здоров'я здійснюються потужні інвестиційні вклади, адже розвиток високоякісної й ефективної охорони здоров'я неможливий без застосування сучасних засобів опрацювання медичної інформації, упровадження методології інтелектуального керування та високорозвиненої техніки зв'язку [1].

Методологічною основою для написання даної статті стали праці різних науковців як вітчизняних, так і зарубіжних. Зокрема Карпов О.Н., Бондаренко М.Ф. займаються мовними системами штучного інтелекту; Деркач Т.М. досліджує використання штучного інтелекту у сфері праці; доктринальний аналіз поняття штучного інтелекту здійснили Васильєв А.А., Шпоппер Д.; можливості та методи використання нейронних мереж досліджували Ларіонова А.В., Арутюнян В.Г.; Гусев А.В. визначив перспективи використання нейронних мереж в системі охорони здоров'я.

Мета статті полягає у дослідженні та висвітленні сучасного стану використання штучного інтелекту в сфері охорони здоров'я.

Виклад основного матеріалу. В сучасних умовах термін «штучний інтелект» є досить розповсюдженим та широкоживим. Це пов'язано перш за все із сучасними тенденціями розвитку

інформаційних технологій (ІТ), адже сьогодні найважливішою сферою досліджень ІТ є саме штучний інтелект. Подібні напрями розвитку можна легко пояснити, якщо поглянути на переваги розробок в даній сфері і порівняти їх з іншими досягненнями. Так, на відміну від інших програмних засобів ШІ дає можливість ефективно вирішувати велике коло задач у різних сферах діяльності людини, зокрема економіці, науці, виробництві, охороні здоров'я, побуті, освіті, банківській сфері, торгівлі тощо. До таких задач відносять завдання класифікації, кластеризації, моделювання, прийняття рішень, задачі регресії для прогнозування, оцінки будь-якої цифрової інформації та ін.

Фактично в даний час на основі методів штучного інтелекту створюються і розвиваються різні програмні системи, головною особливістю яких є здатність вирішувати інтелектуальні завдання так, як це робила б людина, яка розмірковує над їх вирішенням [2].

Системи ШІ умовно можна поділити на два класи – сильний ШІ і слабкий ШІ. Сильний, або універсальний, штучний інтелект визначається як ШІ, який можна порівняти з людським інтелектом, тобто ШІ, який може вчитися так, як це роблять люди, і при цьому не поступається за рівнем розвитку більшості людей, а в багатьох сенсах навіть перевершує їх [3].

Так, всі інші системи, включаючи системи штучного інтелекту, які оточують нас зараз, називаються слабким ШІ, оскільки вони можуть робити тільки одну справу, наприклад здійснювати пошук по запитах в Інтернеті, розпізнавати об'єкти на зображеннях, ставити діагноз по конкретному захворюванню тощо. Використання такого ШІ робить життя комфортнішим, а роботу – більш продуктивною. Такі системи з кожним днем все більше вдосконалюються, але вже зараз системи з ШІ багато завдань роблять краще, ніж люди. Однак які б заняття не вміли робити подібні системи, окремо це всього лише потужні інструменти, що швидко розвиваються, рік від року просуваючи технології ШІ вперед і наближаючи створення сильного ШІ [3].

У зв'язку з еволюцією поняття ШІ необхідно також згадати про так званий ефект ШІ (AI Effect). Цей ефект полягає в тому, що кожен раз, коли ШІ справді досягає немислимого раніше результату спостерігачі знецінюють значимість цієї навички і перестають вважати її задачею ШІ.

Проте даний ефект ніяк не впливає на колосальний ріст світового ринку штучного інтелекту. Це чітко видно по обсягам інвестицій в компанії, що займаються розробкою ШІ (рис. 1). Так в кінці січня 2020 р. компанія CB Insights провела щорічний аналіз глобальних тенденцій інвестування в штучний інтелект і повідомила, що в 2019 році стартапи, які спеціалізуються на технологіях ШІ залучили рекордні інвестиції – \$26,6 млрд, уклавши більше 2200 угод по всьому світу. Для порівняння, в 2018 році було укладено близько 1900 угод на загальну суму \$22,1 млрд, а в 2017-му – близько 1700 угод на \$16,8 млрд [4]. Тобто з 2016-го р. щорічно обсяг інвестицій збільшується більше, ніж на \$4,25 млрд (загальний обсяг інвестицій в 2014 році).

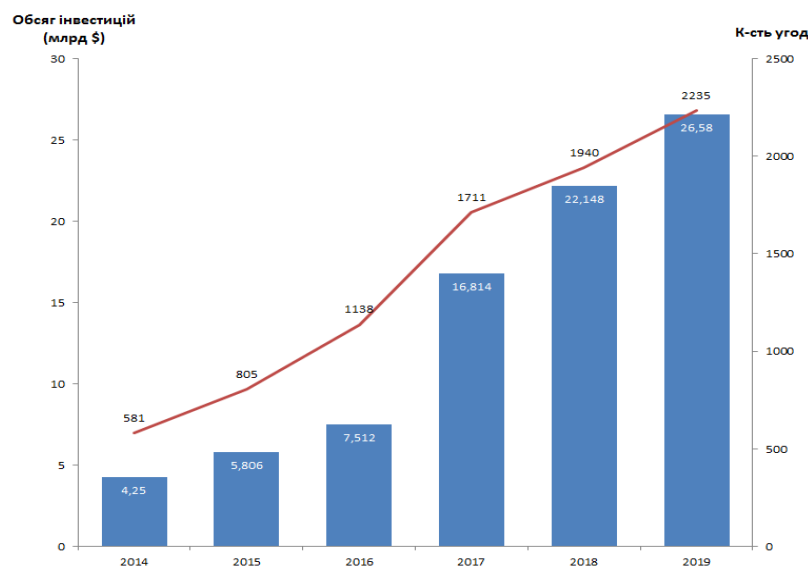


Рис. 1. Обсяг інвестицій в компанії ШІ

Якщо ж поглянути на дану ситуацію з боку інвестицій в розробку штучного інтелекту для певних галузей, то за підсумками 2019 року серед сфер інвестицій лідируючу позицію займала охорона здоров'я – до компаній, які займаються розробкою ШІ в даній галузі інвестори вклали \$4 млрд. За нею слідують такі сфери, як фінанси (\$2,2 млрд), роздрібна торгівля (\$1,5 млрд), продажі та кібербезпека. Активність угод зі злиттів і поглинань також була найвищою в сфері охорони здоров'я, продажів і роздрібною торгівлі [5]. Крім того за прогнозами аналітиків IDC поширення коронавірусу COVID-19 призведе до вибухового зростання витрат на штучний інтелект в світі.

Подібний інтерес до розвитку ІІІ в медицині цілком виправданий, адже дані технології допоможуть вирішувати широкий спектр різноманітних задач в різних галузях медицини, таких як:

- розпізнавання медичних зображень (знімків МРТ, висновків УЗД, кардіограм, результатів комп'ютерної томографії);
- розробка оптимального раціону харчування із врахуванням персональних особливостей організму;
- розробка лікарських препаратів (мікроскопічний аналіз, вивчення ефективності препаратів, дослідження вірусів і пошук ефективних вакцин);
- розробка зручних протезів з урахуванням анатомічних особливостей людини;
- віддалена допомога пацієнту;
- лікування ракових захворювань (аналіз клінічної картини стану пацієнта і надання ефективної схеми лікування).

Вже сьогодні найбільші ІТ-компанії світу, такі як IBM, Microsoft, Google, Intel та інші мають власні розробки на основі штучного інтелекту, які допомагають вирішувати подібні задачі. Так компанія IBM використовує свій суперкомп'ютер оснащений системою штучного інтелекту під назвою IBM Watson для визначення оптимальної, доказової, заснованої на даних стратегії лікування раку. Дана програма використання ресурсів суперкомп'ютера має назву IBM Watson for Oncology і з 2013 року використовується для допомоги в прийнятті управлінських рішень при лікуванні хворих на рак легень. Перед запуском цієї програми в Watson для навчання були завантажені сотні тисяч медичних документів, в тому числі 25 тисяч історій хвороб, понад 300 медичних журналів і понад 200 підручників, загальним обсягом близько 15 млн сторінок тексту, але незважаючи на це ефективність роботи даної програми знаходиться під сумнівом [6].

Програма IBM Watson for Oncology працює так: медпрацівник вводить в програму історію хвороби пацієнта, вона порівнює її зі своєю величезною бібліотекою наукових статей і клінічних рекомендацій і після натискання на кнопку «Запитати Ватсона» видає свої клінічні рекомендації на основі кращих сучасних клінічних практик, найсучасніших досліджень і інших досягнень доказової медицини [7]. Крім IBM Watson for Oncology компанія IBM має ще один проект, який використовує ІІІ в сфері охорони здоров'я. Він має назву IBM Medical Sieve і зараз знаходиться на стадії розробки. Головною метою даного проекту є допомога лікарям у дослідженні медичних зображень (результати МРТ, рентген-знімків, кардіограм).

Ще одна програма для допомоги в лікуванні раку належить компанії Microsoft і має назву Hanover. Суть її роботи полягає в тому, щоб опрацювати всі документи про існуючі на даний момент лікарські засоби проти раку (сьогодні в світі розробляються сотні нових лікарських засобів проти раку, а нові дослідження публікуються щохвилини) та передбачити, які препарати та які комбінації є найбільш ефективними. Інакше кажучи, дана програма повинна допомогти лікарям лікувати пацієнтів за допомогою персоналізованих комбінацій, спрямованих на конкретні складові їх захворювання, з врахуванням останніх розроблених препаратів, адже жодному лікарю не уявляється можливим ознайомитись зі всіма роботами в даній галузі [8].

Холдинг Alphabet теж має проект, який застосовує технології ІІІ в медицині, цей проект має назву DeepMind Health (раніше належала компанії Google і називалась Google DeepMind Health) та використовується в лондонських лікарнях для діагностики очних хвороб і для довідкової допомоги при лікуванні деяких онкологічних захворювань [7].

Висновки. На основі опрацювання спеціальної літератури в ході здійсненого дослідження можна зробити наступні висновки. На даному етапі розвитку штучний інтелект хоч і не може вчитися як людина, проте він все ж являється потужним інструментом для виконання одних задач та перспективним для інших. Саме тому з кожним роком сфера штучного інтелекту та кількість компаній в ній значно зростає (рис. 1). Крім того сьогодні найбільш пріоритетною галуззю використання ІІІ є сфера охорона здоров'я.

Найбільш оптимальні та вдосконалені рішення в даній сфері можуть створити тільки ті компанії, що мають доступ до надвеликих об'ємів даних. Це говорить про те, що відсутність великої кількості даних для навчання є однією з головних перешкод в розробці ІІІ, що в свою чергу дещо гальмує розвиток відповідної сфери. Також варто зазначити, що існуючі на даний момент рішення в області охорони здоров'я тільки розвиваються і поки що не можуть значно покращити існуючі методи лікування або створити нові. Проте, вони здатні допомагати людині слідувати за станом свого здоров'я, надавати рекомендації для покращення здоров'я і прискорювати розробку ліків. Крім того вони можуть оптимізувати деякі аспекти роботи лікаря та зробити високоякісну медицину більш доступною.

Література

1. Naux R. Health care in the information society: what should be the role of medical information? // *Methods Inf. Med.* – 2002. – № 41(1). – Р. 31-35.
2. Гусев А. В. Перспективы нейронных сетей и глубокого машинного обучения в создании решений для здравоохранения // *Врач и информационные технологии.* – 2017. – № 3. – С. 92-105.
3. Пройдаков Э. М. Современное состояние искусственного интеллекта // *Научно-технические исследования.* 2018. № 2018. С. 129–153.

4. CB Insights: AI startup funding hit new high of \$26.6 billion in 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://venturebeat.com/2020/01/22/cb-insights-ai-startup-funding-hit-new-high-of-26-6-billion-in-2019/>
5. Investors poured \$4B into healthcare AI startups in 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fiercehealthcare.com/tech/investors-poured-4b-into-healthcare-ai-startups-2019>
6. Искусственный интеллект в медицине [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://22century.ru/popular-science-publications/artificial-intelligence-in-medicine>
7. Как доктор Ватсон не смог победить рак [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://medportal.ru/mednovosti/kak-doktor-vatson-ne-smog-pobedit-rak/>
8. Artificial intelligence project slices cancer data [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.heraldtribune.com/news/20161004/artificial-intelligence-project-slices-cancer-data>

References

1. Haux R. Health care in the information society: what should be the role of medical information? // *Methods Inf. Med.* – 2002. – № 41(1). – P. 31-35.
2. Gusev A. V. Perspektivy neyronnykh setey i glubokogo mashinnogo obucheniya v sozdanii resheniy dlya zdravookhraneniya // *Vrach i informatsionnyye tekhnologii.* – 2017. – № 3. – S. 92-105.
3. Proydakov E. M. Sovremennoye sostoyaniye iskusstvennogo intellekta // *Naukovedcheskiye issledovaniya.* 2018. № 2018. S. 129–153.
4. CB Insights: AI startup funding hit new high of \$26.6 billion in 2019 [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://venturebeat.com/2020/01/22/cb-insights-ai-startup-funding-hit-new-high-of-26-6-billion-in-2019/>
5. Investors poured \$4B into healthcare AI startups in 2019 [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://www.fiercehealthcare.com/tech/investors-poured-4b-into-healthcare-ai-startups-2019>
6. Iskusstvennyy intellekt v meditsine [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://22century.ru/popular-science-publications/artificial-intelligence-in-medicine>
7. Kak doktor Watson ne smog pobedit rak [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://medportal.ru/mednovosti/kak-doktor-vatson-ne-smog-pobedit-rak/>
8. Artificial intelligence project slices cancer data [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://www.heraldtribune.com/news/20161004/artificial-intelligence-project-slices-cancer-data>

Надійшла / Paper received: 11.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 004.4

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-14

ОНИСЬКО А. І.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

СЕМЕНИШИНА І. В.

Подільський державний аграрно-технічний університет,
Навчально-науковий інститут дистанційної освіти, Кам'янець-Подільський, Україна

КРУПСЬКИЙ Я. В.

Вінницький державний педагогічний університет ім. Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ В УПРАВЛІННІ ПРОЕКТАМИ

У статті розглядаються теоретико-методологічні аспекти прийняття інвестиційних рішень за допомогою сучасних комп'ютерних технологій, дається визначення основних понять, проводиться порівняння найпоширеніших сучасних програм, які використовуються українськими підприємствами.

Проаналізовано переваги та недоліки більш розповсюджених програм автоматизації розробки інвестиційних проектів з боку адаптації їх до використання в умовах українського законодавства.

Ключові слова: інвестування, управління проектами, автоматизація, консалтинг.

ONYSKO A.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute National Technical University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SEMENYSHYNA I.

State Agrarian And Engineering University in Podilia,
Academic and research institute of distance learning, Kamianets-Podilsky, Ukraine

KRUPSKYI Y.

Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine

APPLICATION OF NEW SOFTWARE PRODUCTS IN PROJECT MANAGEMENT

To ensure effective work, project managers and project team members must be well versed in various disciplines of management, economics, socio-psychological disciplines, including such as management theory, operations management, personnel management, economic theory, business economics, psychology, conflict, decision making and support systems, information systems and technologies, etc. It is difficult for a specialist to become a good project manager, so project management in Ukraine is seen as a superstructure of invariant knowledge within a specific professional activity, knowledge, skills and practical skills in project management. The use of modern information technologies will ensure the completeness, timeliness of information display of processes, the possibility of their modeling, analysis, forecasting.

Project management software is designed to make the work of a project manager easier and more efficient, to apply for planning assistance, project cost management, activity tracking, and scheduling.

As more and more public works departments face the realities of increasing workload and reducing resources, the search for technological applications that can increase productivity is becoming increasingly important. The use of project management software as a tool for managing and organizing work has grown rapidly and continues to increase in all areas.

The article considers the theoretical and methodological aspects of investment decision-making using modern computer technology, defines the basic concepts, compares the most common modern programs used by Ukrainian enterprises. The advantages and disadvantages of more common programs for automation of investment project development from the point of view of their adaptation to use in the conditions of the Ukrainian legislation are analyzed.

Key words: investing, project management, automation, consulting.

Постановка проблеми. Для забезпечення ефективної роботи проектні менеджери та члени проектної команди повинні бути добре обізнаними в різних дисциплінах з галузі менеджменту, економіки, соціально-психологічних дисциплін, зокрема таких, як теорія управління, операційний менеджмент, менеджмент персоналу, економічна теорія, економіка підприємств, психологія, конфліктологія, системи прийняття і підтримки рішень, інформаційні системи і технології тощо. Фахівцеві вузького профілю важко стати добрим керівником проекту, тому проектний менеджмент в Україні розглядається як надбудова інваріантних знань в рамках конкретної професійної діяльності, знаннями, уміннями і практичними навичками з управління проектами. Застосування сучасних інформаційних технологій забезпечить повноту, своєчасність інформаційного відображення процесів, можливість їхнього моделювання, аналізу, прогнозування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі вже накопичено достатньо інформації щодо автоматизації аналізу та планування, проаналізовано втрати, які може понести підприємство внаслідок прийняття недостатньо обґрунтованих рішень. Питанням застосування інформаційних систем щодо розробки та обґрунтування інвестиційних рішень присвячені праці І. В. Грабовської [2], Л. З. Сітшаєвої [9], А.М. Ткаченко, К.І. Маменко [10], О.М. Теліженка, В.В. Вітлінського, А.В. Матвійчика, А.В. Щербака [13] та ін.

Мета роботи. Програмне забезпечення для управління проектами розробляється, щоб зробити роботу менеджера проекту простішою та ефективнішою, надання заявок на допомогу в плануванні, управління витратами на проект, відстеження діяльності та моніторинг графіків.

Оскільки дедалі більше відділів громадських робіт стикаються з реаліями збільшення навантаження та скорочення ресурсів, пошук технологічних додатків, що дозволяють підвищити продуктивність, стає все більш важливим. Використання проекту програмне забезпечення для управління як інструмент управління та організації роботи швидко зростало і продовжує збільшувати темпи у всіх галузях.

Виклад основного матеріалу. Після того, як проект прийнятий, він не запускається і не розвивається лише на основі досвіду менеджера. Для структурованого підходу до управління проектами рекомендується використовувати методологію та програмні засоби.

Менеджеру проекту потрібні процедури для координації людей та діяльності в проекті, способу проектування та нагляду за проектом та будь-якого втручання, якщо він не розвивається, як планувалося. Він визначає конкретні цілі, діяльність, яку потрібно здійснити, терміни та ресурси для кожного етапу. На основі пильного моніторингу, який дає автоматичний контроль будь-яких відхилень від плану, проект може здійснюватися контролювано та організовано. Термін управління проектами стосується визначення проекту, планування, подальшого моніторингу, контролю та збору висновків проекту [1]. Чим більший і складніший проект, тим більше необхідно мати офіційний, стандартний та структурований процес. Протягом останніх років було опубліковано низку методологій щодо способів спрощення процесу управління проектами, простішого впровадження та реагування на очікування клієнтів. Наприклад, Prince2 – це керований процесом метод управління проектами, який визначає 45 окремих підпроцесів та організовує їх у вісім процесів наступним чином [2]: запуск проекту; планування; ініціювання проекту; керування проектом; контроль етапу; управління доставкою продукції; управління межами етапів; закриття проекту.

Зазвичай фази інкапсулюють певні робочі процеси, такі як «Інженерія вимог» та «дизайн». UP використовує інший підхід, розділяючи етапи життєвого циклу з дисциплін робочого циклу. Цьому є чотири причини:

1. Робочий процес може охоплювати кілька етапів. Наприклад, тестування починається під час етапу розробки, дотримуючись підходу V-Modell щодо узгодження плану випробувань до випуску програмного забезпечення і триває до кінця приймальних випробувань у перехідному етапі і, можливо, після цього в планування наступної ітерації UP життєвого циклу.

2. Для виконання всіх цих функцій може знадобитися кілька різних робочих процесів або дисциплінованих вимог до завершення етапу. Наприклад, кодування та тестування одночасні або перемежовані завдання на етапі будівництва, але вимагають різних дисциплін.

3. Одні і ті ж (або дуже подібні) завдання, можливо, доведеться виконувати кілька разів протягом одинарної ітерації фази. Це відбувається під час поступового розвитку та швидкого прототипування.

4. Де повний процес повторюється (наприклад, для другого випуску).

Завдання планування та обґрунтування можуть скористатися результатами попередніх ітерацій. Термін «цілеспрямований» дуже добре описує філософію UP. Кожна фаза закінчується з ідентифікованим моментом часу, коли в проекті відбувається велика зміна стану. Початкова фаза закінчується, коли клієнт може дозволити постачальнику продовжувати проект. Тобто на початковій фазі виробляються докази (включаючи масштаб звіт, бюджет та план ресурсів, графік та аналіз ризиків), за якими клієнт приймає рішення продовжувати. Це є важливою віхою в еволюції проекту. Інші – це стабілізація бачення проекту та архітектури (цілі етапу розробки), готовність до розгортання системи, розробленої на етапі будівництва, і кінцева мета: продукт прийняття.

Процес лінійного водоспаду можна розбити на чотири Фази UP, кожна з яких має свою мету, виражену як етап. Початок веде до здатності визначити системні вимоги як цілі життєвого циклу для цієї ітерації. Результати розробки в архітектурі життєвого циклу або контурний дизайн. Кінець етапу будівництва позначено наявністю перевірених компонентів або початковою експлуатаційною потужністю. Цикл повторюється при необхідності після випуску продукту. Зверніть увагу, як етапи зменшують потребу в ітерації протягом життєвого циклу. У них виявлені не вирішені проблемні пункти етапу або розглядаються перед переходом до наступного етапу, або відкладаються до наступної ітерації UP.

Використання терміна «віха» відноситься до XVIII ст., коли придорожні камені позначали відстань до пункту призначення. Віхи не є мірою відстані; вони говорять вам, скільки далі вам доведеться пройти. У типовому проекті де діяльність планується назад від узгодженої кінцевої точки, важливим етапом не є дата досягнення погодженого стану – це дата, на яку ціль планувалась бути досягнутою. Існує велика різниця.

Методологія TenStep [3] є гнучким та масштабованим підходом і забезпечує основу для управління всіма видами проектів. Після того, як проект затверджений і готовий до виконання, методологія TenStep задіяна для планування та управління роботою, яку потрібно виконати.

Різні ролі та обов'язки, пов'язані з проектом, повністю описані та адаптовані з урахуванням складності проекту та точності управлінської діяльності. Він забезпечує загальну мову для всіх учасників

проекту. Будучи структурованим методом, TenStep має життєвий цикл, який складається з чотирьох основних послідовних фаз: підготовка, планування, виконання та збирання врожаю. Отже, ці етапи охоплюють десять етапів, описаних наступним чином [3]:

1. Визначте роботу – планування проекту для забезпечення того, щоб команда проекту та спонсор погоджували необхідну роботу та мали спільне уявлення про цілі проекту, результати, обсяг, ризик, вартість, підхід (із Статуту проекту).

2. Складіть графік і бюджет - графік є важливим інструментом, що описує роботу, яку потрібно виконати, порядок дій, необхідні зусилля та призначені ресурси. Ці два кроки не обов'язково послідовні, їх можна виконати паралельно. Здебільшого керівник проекту не може заповнити діаграму проекту, не склавши загального графіку проекту.

3. Управління графіком та бюджетом – це безперервна діяльність керівника проекту з метою забезпечення завершення проекту за графіком та в межах бюджету. Керівник проекту повинен періодично оцінювати графік і визначати поточний стан проекту. Для більшості проектів графік потрібно переглядати щотижня.

4. Управління проблемами – визначте проблеми, що перешкоджають прогресу проекту. Іноді ці проблеми не можуть бути повністю вирішені керівником проекту та командою проекту, тому для швидкого та ефективного вирішення цих питань може знадобитися стороння допомога.

5. Управління змінами – оскільки початкові процеси визначення та планування не є досконалими, можуть відбутися потенційні зміни. Керівник проекту та команда повинні охоплювати всі аспекти змін: зміни масштабу, зміни конфігурації та загальні зміни.

6. Управління комунікацією – включає звітування команди проекту перед керівником проекту та звітування керівника проекту перед спонсором. Дві типові форми передачі статусу проекту – це зустріч про стан і звіти про стан. Для великих проектів інший підхід заснований на Плані управління комунікаціями.

7. Управління ризиками – визначення ризиків як майбутніх умов або обставин, які існують поза контролем команди проекту та можуть мати несприятливий вплив на проект. Керівник проекту повинен провести оцінку ризиків разом із командою проекту та клієнтом, виявити ризики високого, середнього та низького рівня та знайти рішення для кожного виду ризику.

8. Управління людськими ресурсами – керівник проекту виконує функції управління людьми шляхом придбання, розвитку та управління проектною командою.

9. Управління якістю – метою управління якістю є спочатку зрозуміти очікування клієнта з точки зору якості, а потім реалізувати активний план, який відповідає цим очікуванням. Команда та клієнт визначають одну або кілька метрик щодо цього. Отже, кроки 9 та 10 тісно пов'язані.

10. Керувати метриками – цей крок зосереджений на зборі метрикс, щоб визначити, наскільки результати відповідають очікуванням клієнта. Усі проекти повинні збирати основну метричну інформацію щодо вартості, зусиль та тривалості. Залежно від результатів, можуть бути здійснені коригувальні дії або заходи щодо вдосконалення процесу, щоб зробити процеси більш ефективними та результативними [4].

Управління метриками можна ефективно використовувати в середніх та великих масштабних проектах, оскільки є достатньо часу для збору даних, аналізу результатів та внесення відповідних змін.

Існує багато програмних додатків для управління проектами, деякі з них реалізують методологію TenStep, але вони також дуже дорогі.

Експериментальне програмне забезпечення Управління дослідницькими проектами – RPM – це альтернативний підхід до управління дослідницькими проектами відповідно до запитів, сформульованих методологією TenStep.

Найважливіші специфікації програмного забезпечення RPM, яке було розроблено з використанням Системи управління базами даних Microsoft Access та мови VBA [5] для реалізації модулів.

Програмне забезпечення RPM складається з усіх компонентів для координації людей та діяльності в проекті, способу проектування та нагляду за проектом, а також заходів, які слід вжити, якщо проект має бути скоригований, якщо він не розвивається як планувалося. На основі методології TenStep, використовуючи RPM, пильний моніторинг проекту може здійснюватися контрольовано та організовано. У цьому програмному забезпеченні проект ділиться на керовані фази, кожна з яких визначає свої конкретні цілі, ресурси та заходи, які потрібно здійснити. Це дає змогу автоматично контролювати будь-які відхилення від плану.

Структура бази даних RPM занадто складна, щоб бути представленою одним зображенням. Він містить таблиці з конкретною інформацією про етапи проекту (бюджет, терміни та залучені особи) та взаємозв'язки між ними. RPM повинен бути реалізований у мережі Інтранет, а для підвищення рівня безпеки деякі модулі захищені паролем, відомим лише керівнику проекту.

Принципи рухливого розвитку значною мірою засновані на «збиранковому мисленні», а підхід до виробництва, вироблений в роботі В. Едвардса Демінга в 1950-х роках. «Худий» підхід має п'ять основних принципів, які відстоюють спритний підхід. Нам не потрібно витрачати час тут на обговорення наслідків та відмінності між спритними та більш традиційними підходами, заснованими на цих п'яти принципах.

1. Визначте види діяльності, які додають вартості товару чи послугі від замовника перспективою і спрямована на усунення марнотратної діяльності, яка не додає вартості. Спритний практик побачить цінність на короткій щоденній зустрічі персоналу з нетерпінням і відходів у щотижневому письмовому звіті про хід огляду назад.

2. Зрозумійте, як цінність доставляється замовнику як наскрізний процес. Визначте цінні аспекти, які не переживають цього наскрізного процесу та частин процесу, які не додають вартості. Спритний практикуючий бачив мало або нічого не бачив цінності проведення всебічного аналізу вимог у тих сферах, де вони вимагають змінюватися в міру розвитку системи.

3. Розробіть спосіб видалення відходів із процесу, зосередившись на вдосконаленні потік вартості та складні способи роботи, що зменшують потік. Спритний практик побачить кореляцію між розміром завдання (наприклад, збільшенням функціональності, що поставляється) та ризик того, що він міститиме помилки та інші форми марної роботи.

4. Дізнайтеся, як реагувати на пріоритети клієнта, а не зберігати фіксовані способи роботи. Спритний практик побачить переваги наявності гнучкої та мультикваліфікована команди, яку можна сконфігурувати для зменшення ризику вузьких місць відповідаючи на запити замовника.

5. Метою ощадливого підходу у виробництві є створення досконалого ланцюжка створення вартості через принципи постійного вдосконалення та повного управління якістю.

Відповідно до етапів методології TenStep, система буде містити шість функціональних модулів:

1. Ініціалізація – відповідає першому та другому кроку методології TenStep (Визначте роботу, побудуйте графік та бюджет) і складається з трьох частин: 1) реєстрація фази, 2) інформація про першу версію зберігає, 3) звіти.

2. Оцінка – відповідає третьому етапу (Управління графіком та бюджетом), що має на меті періодично оцінювати графік та визначати поточний стан проекту.

3. Зміни – охоплює етапи управління проблемами та управління змінами; рекомендується виконати цей модуль після модуля оцінки, що дозволяє побачити стан проекту. Керівник проекту може змінити інформацію про фазу (бюджет, умови), а потім зберегти ці зміни в новій версії, автоматично збільшеній.

4. Комунікація – охоплює етапи керування комунікацією та управління людськими ресурсами – включає звіти команди проекту керівнику проекту та менеджеру команди та клієнту.

5. Ризики – відповідає стадії управління ризиками – це складний модуль, який аналізує можливі ризики та можливі рішення для кожної ситуації. Після фінансової та часової оцінки кожного рішення, заявка вказує оптимальне рішення.

6. Якість та показники – охоплює етапи управління якістю та управління метриками – цей модуль призначений для здійснення остаточної оцінки всього проекту шляхом обчислення значень кількох показників та порівняння їх з оптимальними значеннями, очікуваними клієнтом. Він призначений для планування етапів проекту до початку командної роботи.

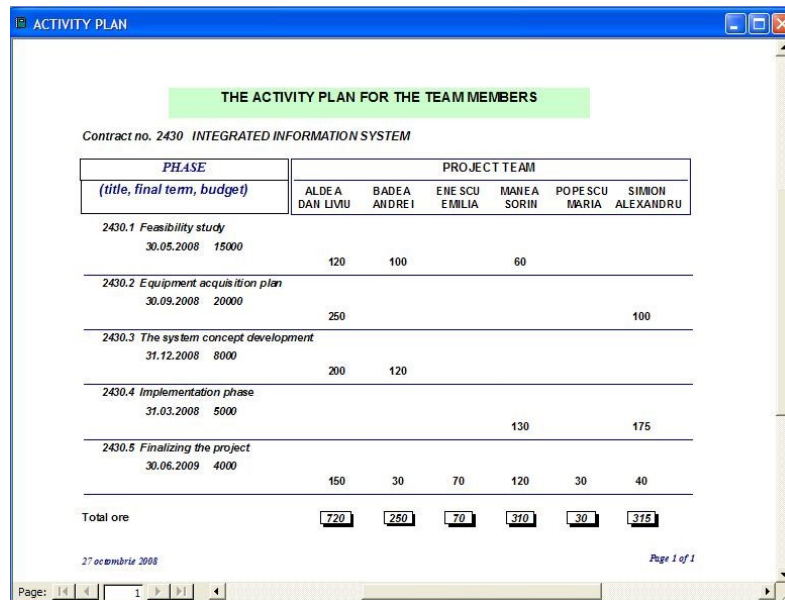
Керівник проекту повинен забезпечити спільне розуміння командою проекту та клієнтом того, що проект забезпечує, коли він буде завершений, які будуть витрати, хто виконає роботу та як буде виконана робота. Отже, керівник проекту повинен визначити ролі членів команди відповідно до діяльності проекту, фаз та специфікацій для кожної з них. Модуль ініціалізації призначений для введення основної інформації про мету, бюджет, терміни та персонал, задіяний на етапах проекту. Програмне забезпечення RPM пропонує відповідні форми для введення цих елементів (рис. 1).

Member Code	No. of hours
1 ALDEA DAN LIVIU / Project manager	120
2 MANEA SCORIN / Member of team	60
3 ENESCU EMILIA / Member of team	100
4 POPESCU MARIA / Member of team	0
5 SIMION ALEXANDRI / Member of team	
6 BADEA ANDREI / Member of team	

Рис. 1. Модуль ініціалізації: Phase-Budget-Term

Цей модуль захищений від запису паролем, але його інформацію може прочитати будь-який член команди. Після того, як графік проекту буде закінчений і готовий до виконання, його слід авторизувати та зберегти автоматично як першу версію в таблиці історії.

Також програмне забезпечення RPM використовує звіт (рис. 2) та графічне зображення, аналогічно діаграмі Ганта для Phases – Team worker – Time (рис. 3). З часом у проєкті можуть виникнути різні аспекти, і їх буде розглядати інший модуль: Зміни. Тільки керівник проєкту може змінити початкову інформацію про обсяг, графік або вартість, після узгодження з клієнтом.



THE ACTIVITY PLAN FOR THE TEAM MEMBERS

Contract no. 2430 INTEGRATED INFORMATION SYSTEM

PHASE (title, final term, budget)	PROJECT TEAM					
	ALDE A DAN LIVIU	BADEA ANDREI	ENE SCU EMILIA	MANEA SORIN	POPE SCU MARIA	SIMON ALEXANDRU
2430.1 Feasibility study 30.05.2008 15000	120	100	60			
2430.2 Equipment acquisition plan 30.09.2008 20000	250					100
2430.3 The system concept development 31.12.2008 8000	200	120				
2430.4 Implementation phase 31.03.2008 5000				130		175
2430.5 Finalizing the project 30.06.2009 4000	150	30	70	120	30	40
Total ore	720	250	70	310	30	315

27 octombrie 2008 Page 1 of 1

Рис. 2. Модуль ініціалізації: Фази - працівник групи

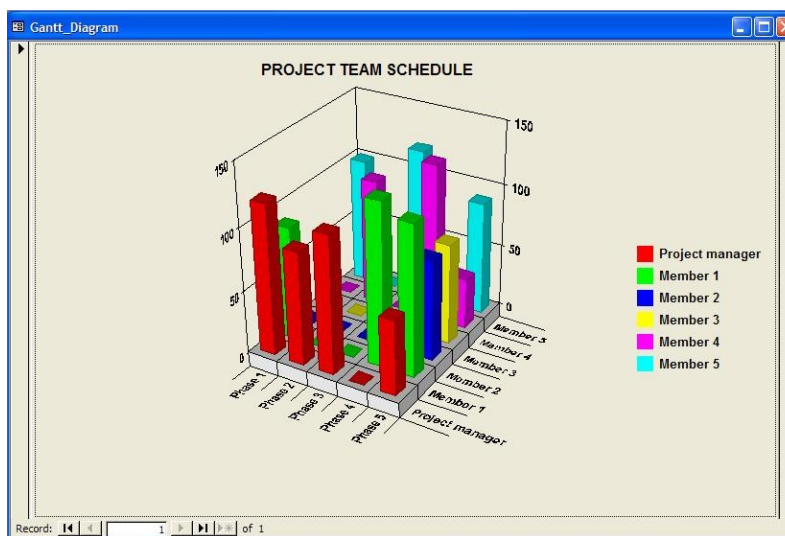


Рис. 3. Модуль ініціалізації: етапи – план робочого колективу

Оціночний модуль. Керівник проєкту та кожен член команди повинні періодично оцінювати графік та визначати поточний стан проєкту. Після створення графіка та бюджету проєкту керівник проєкту повинен керувати ними, щоб забезпечити завершення проєкту за графіком та в межах бюджету. Бюджет відображає суму грошей, яку можна витратити в рамках проєкту. Залежно від правил уповноваженого органу, бюджет структурується за видами (внутрішня робоча сила, матеріали, інвестиції, розповсюдження тощо), а звіти аналізують розвиток цих категорій (див. рис. 4).

Процес визначення фінансового обґрунтування проєкту охоплюється фінансовою заявкою.

Керівник проєкту повинен зробити правильний розподіл бюджету між фазами проєкту та періодично контролювати витрати. Для цього програмне забезпечення RPM має два типи графічних звітів: витрати за періодами (рис. 5) та витрати за проєктом (рис. 6).

The screenshot shows the 'PHASE/COST' window. At the top, there's a yellow header 'PHASE COST'. Below it, a table lists project phases. The first row is selected: '2430.1 Feasibility study' with a 'Final term' of '30.05.2008' and a 'Budget' of '15000'. Below this is a 'COST/PHASE' section with a table of cost categories.

Cost Categories	Estimated Values	Actual Values
1 Personnel costs	5000	4800
2 Materials, services costs	500	550
3 Utility costs	9500	9500
4 Investments		

Record: 1 of 3

Рис. 4. Модуль оцінки: структура бюджету

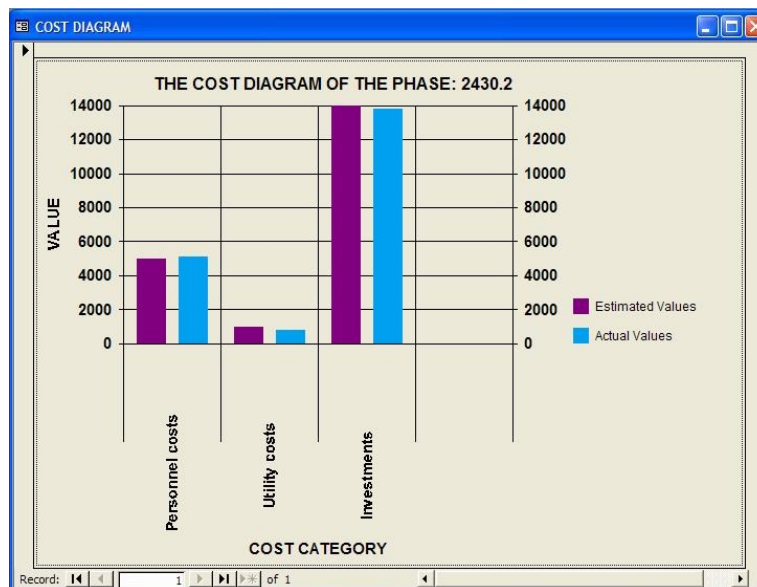


Рис. 5. Модуль оцінки: витрати за періодами

Обидва вони представляють порівняльний огляд між оціночними значеннями та поточними витратами, періоди часу різні: фаза або від початку до поточного стану. Аналогічним чином наше програмне забезпечення містить ще одне додаток, яке оцінює кінцеві терміни етапів та час роботи кожного члена команди (приблизний та фактичний).

Модуль змін. Для більшості проектів графік потрібно періодично переглядати. Графік є найважливішим аспектом управління проектами, і всі процеси управління проектами інтегровані в графік. Керівник проекту повинен здійснити коригувальні дії та оновити графік з поточним станом роботи за допомогою цього програмного модуля. Існує ряд пов'язаних аспектів змін, які можуть відбутися в проекті. Якщо результати проекту змінюються протягом проекту (і, як правило, це означає, що клієнт має додаткові очікування), оцінки вартості, зусиль та тривалості можуть втратити силу. Якщо спонсор погодиться включити нову роботу до обсягу проекту, керівник проекту погодиться, що поточний бюджет та дедлайн будуть змінені (як правило, збільшені), щоб відобразити цю додаткову роботу.

Коли вимагається та затверджується зміна обсягу, керівник проекту повинен змінити бюджет і графік, щоб врахувати зміни. Що стосується змін, то не стосуються сфери, не передбачається, що ця зміна призведе до оновлення графіка або бюджету. Якщо діяльність на критичному шляху затримується на тиждень або місяць, керівник проекту не може дозволити собі, щоб весь проект буде на тиждень або місяць з розкладом. Натомість він повинен оцінити наявні ресурси та варіанти та повернути проект на колишній шлях.

Після запуску модуля оцінки керівник проекту повинен внести деякі зміни до попередньої версії розкладу. Модуль Зміни еквівалентний модулю Ініціалізація, він пропонує можливість менеджеру оновлювати інформацію про фази, включаючи додавання нових фаз. Кожна зміна зберігається в таблиці історії, маючи інший номер версії та останнє оновлення є поточним посиланням для команди проекту.

Комунікаційний модуль призначений для того, щоб канал зв'язку завжди був відкритим між керівником проекту та рештою команди. Крім того, деякі загальні відомості про хід проекту доступні клієнту (спонсору). Цей модуль включає звітування керівника проекту перед командою проекту та звітування керівника проекту перед клієнтом.

Доступ захищений, тому інформація є конфіденційною, лише для команди проекту. Кожен член команди складає робочий план згідно з діяльністю за графіком та повідомляє менеджеру про всі проблеми.

Модуль «Ризики» аналізує можливі ризики та пропонує пропозиції щодо вирішення для кожної ситуації. Перед початком виконання проекту команда повинна визначити ризики та внести їх до Списку ризиків. Використовуючи різні методи (включаючи мозковий штурм, історичні ситуації та статистику) для кожного ризику, команда вкаже шляхи вирішення можливої проблеми. Ризик відноситься до майбутніх умов або обставин, які існують поза контролем команди проекту, і можуть мати несприятливий вплив на проект if вони виникають [6]. Тоді як проблема є поточною проблемою, з якою потрібно боротися, ризик – це потенційна майбутня проблема, яка ще не відбулася. Реактивний менеджер проекту намагається вирішити проблеми, коли вони виникають. Активний менеджер проекту намагається запобігти потенційним проблемам до їх виникнення [7].

Програмне забезпечення RPM надає менеджеру проекту можливість визначити перелік ризиків разом з командою проекту та клієнтом, визначаючи високі, середні та низькі рівні ризиків для кожної фази. Усі проекти мають певний ступінь невизначеності через припущення, пов'язані з ними, та середовище, в якому вони виконуються. Незважаючи на те, що не всі ризики можна усунути повністю, більшість із них можна передбачити та керувати ними заздалегідь.

Метою модуля «Ризик» є виявлення ризикових подій для проекту, а потім створення Переліку ризиків та Переліку ризикових рішень, щоб мінімізувати ймовірність того, що подія ризику завдасть шкоди проекту. У разі виникнення події ризику команда повинна вибрати лише одне рішення, зробивши порівняльний аналіз наслідків (якість, терміни та бюджет), щоб мінімізувати вплив ризику. На рис. 6 представлена форма для представлення ризику та його рішень, тоді як на рис. 7 наведено приклад переліку ризикових рішень для дослідницького проекту.

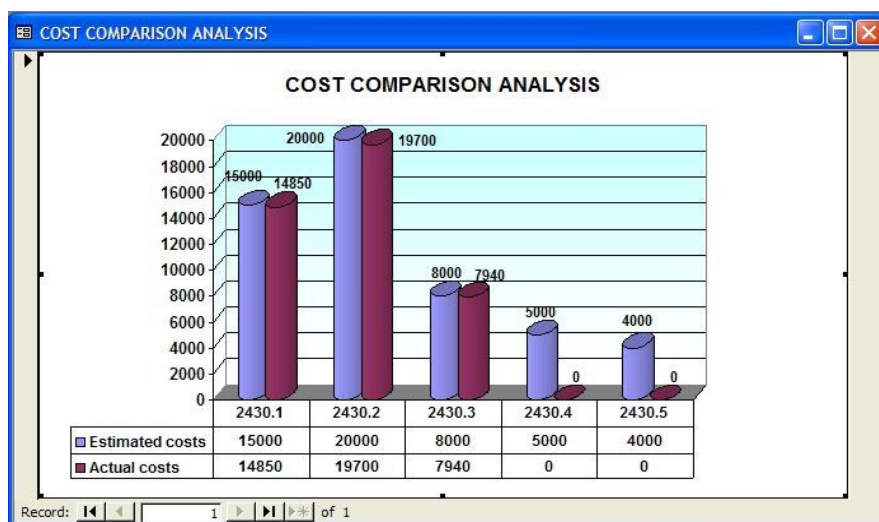


Рис. 6. Ризики та рішення

Модуль якості та метрик представляє метод оцінки за допомогою метрик, щоб вказати, наскільки проект та кінцеві результати відповідають вимогам та очікуванням клієнта.

Оскільки якість визначається клієнтом або керівником проекту, вона може бути абсолютно суб'єктивною. Однак у якості багато чого можна зробити об'єктивним. По-перше, для цього потрібно розбити загальний термін «якість» на конкретні аспекти якості, які є важливими для замовника [8]. Потім кожен з окремих аспектів може бути перетворений на одну або кілька метрик, які можна зібрати для вимірювання якості

Однією з особливостей якісного рішення може бути те, що воно має мінімальну кількість помилок. Цей параметр можна виміряти підрахунком помилок та дефектів після нанесення розчину. Для кожного показника група оцінювачів може скласти примітки, щоб зробити процес більш об'єктивним.

Рис. 7. Перелік рішень щодо ризиків

Отже, для управління якістю потрібно виміряти деякі характеристики проекту, інакше важко вдосконалити процеси. Оскільки метрики важко визначити та зібрати, потрібно оцінити якість за основною інформацією про метрики щодо вартості, зусиль та тривалості. Цей модуль зосереджений на оцінці цих показників, співвідносить їх у таблицю, яка встановлює примітки або вказівки, якщо результати знаходяться між деякими значеннями.

Модуль якості та показників може бути запущений у будь-який момент і, залежно від результатів, він може визначити коригувальні дії або заходи щодо вдосконалення процесу. Метрики використовуються для того, щоб дати деяку інформацію про якість у початковому стані та про те, чи якість з часом зростає чи зменшується. Управління метриками можна ефективно використовувати у середніх та великих проектах, оскільки є достатньо часу для збору даних, аналізу результатів та внесення відповідних змін [9].

Команди проекту повинні знати значення розрахункових даних (метрик). Програмне забезпечення RPM дає інтерпретацію метрик, щоб допомогти менеджеру, а також членам команди. Якщо інші показники також допомагають керувати проектом, може бути причина для збору та обчислення додаткової інформації для відповідної інтерпретації. Показники проекту є важливими, але найбільше значення від збору метрик отримують, якщо вони використовуються для вдосконалення на рівні організації.

Висновки. Програмне забезпечення для управління проектами будь-якого типу є владним запитом будь-якої дослідницької групи. Замість того, щоб втрачати час, враховуючи поточну ситуацію та рівень кожної фази, за допомогою відповідного програмного забезпечення команда може зосередитись на діяльності в рамках розробки проекту. Експериментальна система RPM відповідає правилам, визначеним у методології TenStep. Виходячи з того, що було представлено вище, розробка системи RPM призводить до таких висновків. Існує великий інтерес для управління проектами, особливо з боку дослідницького співтовариства та державних установ, причетних до досліджень. Майбутнє і все більше використання програмного забезпечення для управління проектами залежить головним чином від розвитку, безпеки та результатів процесів управління. Модулі RPM містять інформацію про управління та рішення для кожної проблеми та ризику, спочатку сформульовані командою проекту. Робоча група RPM може розробити це програмне забезпечення після тестування на ряді різних типів проектів, пропонуючи уніфіковану систему інтерфейсів.

Література

1. Ньютон, Р., Управління проектами - Крок за кроком: перевірений, практичний посібник з успішного ведення кожного разу, Бухарест, METEOR PRESS, с. 183, 2007.
2. ОФІС УРЯДОВОЇ КОМЕРЦІЇ, Управління успішними проектами за допомогою PRINCE2, 4-е видання, 457 с., ISBN 978-0-11-330946-7, 2005
3. МОСНАЛ, Т., МОСНАЛ, Ж., Lessons in управління проектами, Бухарест, ВИДАВНИК КОДЕКСІВ, с. 224, 2006
4. КРЕЙНЕР, С., 75 найвищих управлінських рішень, коли-небудь прийнятих ... та 21 з найгірших, Бухарест, TEORA, с. 150, 2002
5. БАЛТЕР, А., Доступ 2003, Бухарест, ВИДАВНИК НІКЕЛЕСКУ, с. 327, 2006
6. LEISHMAN, T., VANBUREN, J., Ризик не усвідомлювати ризик: Основи управління програмним ризиком, Серія семінарів STSC, Hill AFB, UT., 2003. 2

7. LEISHMAN, T., COOK, D., Ризики вимог можуть заглушити програмні проекти, CrossTalk 15.4, квітень 2002 р. 8. WOODWARD, S., J., Кількісні цілі: Фундаментальний прогрес в управлінні проектами розробки програмного забезпечення, осінь, випуск 200 методів та інструментів
8. LEISHMAN, T., COOK, D., Фактор ризику: протистояння ризику, що впливає на успіх програмних проектів, CrossTalk 17.5, травень 2005 р

References

1. Newton, R. (2007), Upravlinnia proektamy - Krok za krokom: perevirenyj, praktychnyj posibnyk z uspishnoho vedennia kozhnoho razu [Project Management – Stepbystep: The proven, practical guide to running a successful project, everytime], METEOR PRESS, Bucharest, Romania.
3. Government Commerce Office. (2005). “Managing successful projects with PRINCE2”, 4 edition, pp. 312-313.
4. Mochal, T. and Mochal, J. (2006), Uroky v upravlinni proektamy [Lessons in project management], Codecs Publisher, Bucharest, Romania.
5. Crainer, S. (2002), 75 Najvelychnishykh rishen' bud'-koly pryjnyatykh u sferi menedzhmentu.... ta 21 najhirshe rishennia [The 75 Greatest Management Decisions Ever Made...and 21 of the worst], Teora, Bucharest, Romania.
6. Balter, A. (2006), Dostup 2003 [Access 2003], Niculescu Publisher, Bucharest, Romania.
7. Leishman, T. and Vanburen, J. (2003). Ryzyk ne usvidomliuvaty ryzyk: Osnovy upravlinnia prohramnym ryzykom [The Risk of Not Being Risk Conscious: Software Risk-Management Basics], Hill AFB, UT.
8. Leishman, T. and Cook, D. (2002). “Requirements Risks Can Drown Software Projects”, CrossTalk, vol. 15 (4).
9. WOODWARD, S. (2004), “Quantified Objectives: A fundamental advance in Managing Software Development Projects”, vol. 200.
10. Leishman, T. and Cook, D. (2005), “Risk Factor: Confronting the Risk that impact Software Projects success”, CrossTalk, vol. 17 (5).

Надійшла / Paper received: 17.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 06.06.2020

МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ТА ВІДМОВСТІЙКОСТІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ РУЙНУЮЧОГО ВПЛИВУ ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В статті розроблений підхід до визначення ефективності інформаційних технологій (ІТ) на основі врахування кількісних величин, які характеризують відмовостійкість та живучість, та може бути розширений для врахування інших характеристичних величин. Для забезпечення відмовостійкості та живучості ІТ розроблено систему заходів, в результаті виконання яких отримано ІТ вузькоспеціалізованого використання для різних сфер застосування, де супроводжуванні процеси відносяться до ірреального або нереального часу із досить високими параметрами відмовостійкості, живучості та загалом резилентності і, в той же час, прийнятним рівнем фінансових витрат на її експлуатацію в умовах руйнуючого впливу зловмисного програмного забезпечення. В результаті використання розроблених заходів було отримано ІТ вузькоспеціалізованого використання для різних сферах застосування, де супроводжуванні процеси відносяться до ірреального або нереального часу із досить високими параметрами відмовостійкості, живучості та загалом резилентності і, в той же час, прийнятним рівнем фінансових витрат на її експлуатацію.

Ключові слова: мережа приманок, зловмисні дії, виявлення комп'ютерних атак, прогнозування, корпоративні комп'ютерні мережі.

STETSYUK M., GOROSHKO A., SAVENKO B.
Khmelnytsky National University

MODEL FOR ENSURING THE SUSTAINABILITY AND FAILURE RESISTANCE OF SPECIALIZED INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE CONDITIONS OF THE DESTRUCTIVE INFLUENCE OF MALICIOUS

Corporate computer networks of enterprises (organizations) use specialized IT to solve production problems or automate basic or auxiliary tasks, in particular, such as accounting and document management. Computer networks, when connected to the Internet, become objects of malicious activity.

The paper analyzes that the known methods and ways to ensure fault tolerance and survivability of specialized IT are insufficiently systematized and can not always be implemented due to the specifics of use and structure of specialized IT. Therefore, further research and development of new methods that would improve the resilience and survivability of specialized IT, including cyber-attacks and malware, is needed.

As a result of using the developed measures, IT of specialized use was obtained for various applications, where the accompanying processes belong to unreal or unreal time with high parameters of fault tolerance, survivability and overall resilience and, at the same time, an acceptable level of financial costs.

Thus, an approach to determining the effectiveness of IT based on quantitative values that characterize fault tolerance and survivability has been developed, and can be extended to take into account other characteristics. To ensure fault tolerance and survivability of IT, a system of measures has been developed which resulted in highly specialized IT applications for various applications, where the accompanying processes are unrealistic or unrealistic with high parameters of fault tolerance, survivability and overall resistance and, at the same time, acceptable financial costs for its operation.

Keywords: honeynet, malicious actions, detection of computer attacks, forecasting, corporate computer networks.

Вступ. Постановка задачі дослідження. В корпоративних комп'ютерних мережах підприємств (організацій) експлуатуються спеціалізовані ІТ для вирішення виробничих задач або автоматизації основних чи допоміжних задач, зокрема, наприклад обліку і ведення документообігу. Комп'ютерні мережі будучи під'єднаними до мережі Internet стають об'єктами для зловмисних дій. Захист інформаційних ресурсів мереж вирішуються за допомогою брандмауерів (firewall), антивірусів, систем виявлення атак (Intrusion Detection System, IDS), систем контролю цілісності, криптографічних засобів захисту. Але існуючі системи забезпечення захисту корпоративних мереж не забезпечують повного надійного захисту. Тому, необхідним є пошук більш ефективних шляхів захисту інформаційних ресурсів в корпоративних мережах від зловмисних дій. Для інформаційних технологій, які забезпечують життєдіяльність установи чи підприємства, тобто є спеціалізованими, наприклад, в такій сфері, як фінансово-господарська діяльність, питання живучості та відмовостійкості є більш ніж важливими, особливо, внаслідок зростання їх кількісних параметрів функціонування (збільшення користувачів, серверів, обсягів інформації в базах даних) і рівня складності, а особливо в умовах руйнуючого впливу зловмисного програмного забезпечення.

В цих умовах актуальності набирає питання розробки таких методів створення спеціалізованих ІТ, які б могли підтримувати свою живучість та відмовостійкість в умовах руйнуючого впливу зловмисного програмного забезпечення. Це було б одним із елементів з покращення рівня безпеки в корпоративних

комп'ютерних мережах. І його розвиток дозволив би створювати функціонально живучіші та відмовостійкіші спеціалізовані ІТ. Відомі методи не забезпечують достатнього рівня живучості та відмовостійкості, тому метою роботи є подальший розвиток відомих методів і створення нових для покращення безпеки в корпоративних комп'ютерних мережах за рахунок підвищення рівнів живучості та стійкості безпосередньо спеціалізованих ІТ.

1. Відомі методи створення спеціалізованих ІТ з підвищеним рівнем живучості та відмовостійкості в умовах руйнуючого впливу зловмисного програмного забезпечення

Під відмовостійкістю вважатимемо властивість системи зберігати повну або часткову працездатність у випадках відмов окремих елементів, що не пов'язані із зовнішніми нерегламентованими діями. Під живучістю інформаційної системи розуміється її властивість залишатися працездатною з допустимим зменшенням продуктивності в умовах негативних зовнішніх впливів (нерегламентованих дій) [1]. Ці поняття визначають таку мету – забезпечення доступності ІТ, яка досягається різними шляхами. Від забезпечення цих параметрів в прямій залежності знаходиться ефективність функціонування всієї спеціалізованої ІТ.

Відомі методи та способи забезпечення відмовостійкості та живучості спеціалізованих ІТ орієнтовані на різні їх типи, сфери застосування, особливості використання, розміщення в комп'ютерних засобах та особливостях реалізації в різних компонентах ІТ. Також, актуальним напрямом, який потребує дослідження є вплив зовнішніх факторів (розподілених атак, зловмисного програмного забезпечення) на функціонування ІТ та забезпечення відмовостійкості та живучості.

В [2] запропоновано інформаційну технологію оцінки структурної надійності технічних об'єктів, структура якої відповідає одному з відомих типів нейронних мереж. В [3, 4] розглянуто забезпечення надійності інформаційних систем. Для підвищення надійності інформаційних систем використовується підхід, заснований на оцінці та нейтралізації ризиків. В [5] показано як налагоджувані програмні системи складаються з великої кількості різних, критичних, некритичних та взаємозалежних конфігурацій. В [6] розглянуто як хмари стають важливою платформою для наукових програм роботи. В роботах [7, 8] досліджено хмарні програми, які розглянуто як складові з декількох компонентів хмарних служб, що спілкуються між собою через інтерфейси веб-служб, де кожен компонент виконує визначені функціональні можливості. В [9] представлено підхід для уникнення функціональних збоїв під час виконання в компонентних прикладних системах. В [10] запропонована проактивна схема відновлення, заснована на міграції служб, описані толерантні системи. В [11] толерантність відмов є головним питанням гарантування доступності та надійності критичних послуг, а також виконання застосунків. В [12] показано як хмарні обчислення пропонують нову потужність та гнучкість для високоефективних обчислювальних програм із забезпеченням великої кількості віртуальних машин для обчислювальних інтенсивних програм. В [13–16] кібер-стійкість та кібер-життєздатність представлено як тісно пов'язані між собою поняття, що поділяють подібні технології та практику. В [17–25] показано вплив на відмовостійкість та живучість ІТ різних типів зловмисного програмного забезпечення і комп'ютерних атак.

Відомі методи та способи забезпечення відмовостійкості та живучості спеціалізованих ІТ недостатньо систематизовані та не завжди можуть бути реалізовані через специфіку використання і будови спеціалізованих ІТ. Тому, необхідним є подальше дослідження та розробка нових методів, які б дозволили покращити відмовостійкість та живучість спеціалізованих ІТ, зокрема і від кібер-атак та зловмисного програмного забезпечення.

2. Забезпечення живучості та відмовостійкості спеціалізованих ІТ з підвищеним рівнем в умовах руйнуючого впливу зловмисного програмного забезпечення

Представимо спеціалізовану ІТ в корпоративних комп'ютерних мережах множиною її компонентів:

$$S_{IT} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (1)$$

де $S_i - i$ – та компонента спеціалізованої ІТ в корпоративних комп'ютерних мережах, $i = 1, 2, \dots, n$, n – кількість компонентів.

Для кожної компоненти S_i застосуємо функцію, яка включатиме всі критерії ефективності в корпоративних комп'ютерних мережах, застосування яких при розробці ІТ необхідно для подальшого користування нею. Зокрема, серед таких критеріїв будуть, також, критерії забезпечення відмовостійкості та живучості. Задамо критерії ефективності спеціалізованих ІТ вектором, компонентами якого будуть функції ефективності, що відповідатимуть конкретним критеріям:

$$K_e = (f_1, f_2, \dots, f_m), \quad (2)$$

де $f_j - j$ -та функція, яка задає один з критеріїв ефективності, $j = 1, 2, \dots, m$, m – кількість функцій.

Враховуючи те, що в цілому задача досягнення максимальної ефективності залежить від конкретних критеріїв, які можуть бути пов'язані між собою і відповідно впливати один на одного, при цьому

покращення ефективності одного може призводити погіршення іншого. Крім того, оскільки спеціалізовані ІТ складаються з компонентів, до яких застосовуються ті ж критерії із заданого вектору, то задача ускладнюється тим, що частина компонентів ІТ є різною і, відповідно, досягнення ефективності за тими ж наборами критеріїв буде різною. Тому, вибір оптимальних розв'язків є складною багатокритеріальною задачею. Загальну постановку задачі пошуку найкращої ефективності для спеціалізованих ІТ в корпоративних комп'ютерних мережах сформулюємо так:

$$\begin{cases} K_e(S_{IT}) \rightarrow \max; \\ f_j(S_i) \rightarrow \max, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

Введемо функцію, яка буде визначати максимальне значення критерію ефективності:

$$F: K_e(S_{IT}) \rightarrow \max; \quad (4)$$

Значення критерію ефективності задамо виразом з врахуванням вагових коефіцієнтів:

$$K_e(S_{IT}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{p=0}^{n_p} \sum_{q=0}^{n_q} (\alpha_{i,j,p,q} \cdot f_{j,q}(S_{i,p})), \quad (5)$$

де $\alpha_{i,j,p,q}$ – вагові коефіцієнти.

Розглянемо досягнення максимізації критеріїв за показниками відмовостійкості та живучості в конфігураціях інформаційних технологій, які побудовані на основі архітектури «клієнт – сервер» з їх забезпеченням за усіма ланках системи: від користувачів (клієнтська частина) до критично важливої серверної частини. Вибір для розгляду саме архітектури «клієнт – сервер» залежить від її особливостей, які проявляються в наступному: базові функції клієнтського застосунку розподіляються між клієнтом та сервером; програмне забезпечення автоматизованого робочого місця клієнтського комп'ютера працює з даними через запити до серверного програмного забезпечення; здійснюється повна підтримка багатокористувацької роботи; гарантується цілісність даних. Це відрізняє її від інших архітектур і дозволяє здійснити забезпечення відмовостійкості і живучості до кожної з ланок системи окремо.

Головною властивістю відмовостійкості є прозорість відмов її окремих компонентів для кінцевого користувача. Це означає, що відмовостійка система автоматично змінює свою конфігурацію у випадку відмови. Її програмне забезпечення в процесі виконання шукає обхідні шляхи, намагаючись в умовах відмови, привести виконувану функцію до успішного завершення. Задамо функцію $f_1(S_i), i = 1, 2, \dots, n$ визначення відмовостійкості в комп'ютерних системах в кількісному вигляді так:

$$f_1(S_i) = \frac{T_{f_1(S_i),1}}{T_{f_1(S_i),1} - (T_{f_1(S_i),2} + T_{f_1(S_i),3})}, \quad (6)$$

де i – кількість компонентів спеціалізованої ІТ, $i = 1, 2, \dots, n$, $T_{f_1(S_i),1}$ – час між сусідніми збоями; $T_{f_1(S_i),2}$ – час, необхідний для виявлення збою та пошуку шляху його обходу; $T_{f_1(S_i),3}$ – час, необхідний для відновлення ІТ після збою.

Як видно з формули (6), для ІТ з автоматичною системою забезпечення відмовостійкості вона буде наближатись до максимуму, через швидкість реакції. Для побудови таких систем немає теоретичних перешкод, але в практиці при їх реалізації, потрібно враховувати ряд значимих факторів: фінансові витрати реалізації автоматичної системи забезпечення живучості та відмовостійкості; складність системи. Для ІТ, призначених для інформаційного забезпечення у вузькій спеціалізованій предметній області, наприклад фінансово-господарська діяльність закладу вищої освіти, буде доцільним відмовитись від автоматичної системи керування відмовостійкістю на користь автоматизованої. При такому підході частина дорогих функцій управління надмірностями, присутніми в ІТ, буде покладена на людину, якщо це не загрожуватиме можливими значними втратами. Тоді, згідно формули (6), відмовостійкість $f_1(S_i)$ буде нижчою, ніж в першому випадку. Але вирішенням задачі побудови ІТ (аналогічно, як і в інших задачах проектування), є не забезпечення максимально можливої відмовостійкості системи, а знаходження прийняттого балансу параметрів системи, в рамках певного технологічного базису. А, також, в тому числі враховуючи вимоги критерію «відмовостійкість \ вартість». Дослідимо вирішення питань забезпечення відмовостійкості ІТ при використанні такої стратегії. Проаналізуємо фактори, що негативно впливають на відмовостійкість ІТ зі сторони клієнта. Негативні фактори, що впливають на відмовостійкість клієнтської частини ІТ поділяються на зовнішні та внутрішні. Серед зовнішніх факторів найбільшу загрозу представляють собою збої в роботі енергосистем живлення та природні явища, які можуть призвести до відмов компонентів комп'ютерів та комп'ютерних мереж. Для уникнення таких випадків живлення клієнтських комп'ютерів ІТ необхідно

виконувати від окремої лінії, яка обладнана захисними пристроями, наприклад, розрядниками. Для захисту від грозових наводок в довгих лініях комп'ютерних мереж, також, необхідно використовувати пристрої захисту.

Перед початком виконання поточного фрагменту алгоритму в реєстр фатальних помилок заноситься інформація про гіпотетично можливу помилку (код екземпляра робочого місця клієнта, код функції, № мітки, час і т. і.). В подальшому можливі наступні варіанти розвитку подій:

1. Фрагмент алгоритму функції успішно виконався. В цьому випадку інформація в реєстрі про помилку, що не сталась, знищується, а обчислювальний процес переходить до виконання наступного фрагмента.

2. В процесі виконання фрагменту сталась помилка, але вона успішно локалізована обробником помилок (рис. 2а). В цьому випадку інформація про помилку також може бути видалена з реєстру.

3. В процесі виконання фрагмента сталась помилка, яка не була локалізована обробником помилок (рис. 2б). В цьому випадку інформація про можливу помилку залишиться в реєстрі.

Задамо функцію $f_2(S_i)$, в якій $i = 1, 2, \dots, n$, визначення живучості в кількісних одиницях в комп'ютерних мережах виразимо так:

$$f_2(S_i) = \frac{T_{f_2(S_i),1} + T_{f_2(S_i),2}}{T_{f_2(S_i),1}}, \quad (7)$$

де $T_{f_2(S_i),1}$ – час функціонування процесу ІТ в стандартному режимі роботи, $T_{f_2(S_i),2}$ – час витрачений на процеси забезпечення живучості, $i = 1, 2, \dots, n$.

Таке визначення функції живучості надає можливість відобразити стандартний режим роботи значенням одиниці, а при виникненні потреби у забезпеченні живучості і у випадку набагато тривалішого часу, ніж час стандартного режиму роботи, значення функції відображатиме кількісну порядкову величину. На основі формул (5)–(7) отримаємо значення ефективності для ІТ з врахуванням показників відмовостійкості та живучості:

$$K_e(S_{IT}) = \sum_{j=1}^m \sum_{p=0}^{n_p} \sum_{q=0}^{n_q} \left(\alpha_{1,j,p,q} \cdot \frac{T_{f_1(S_i),1}}{T_{f_1(S_i),1} - (T_{f_1(S_i),2} + T_{f_1(S_i),3})} + \alpha_{2,j,p,q} \cdot \frac{T_{f_2(S_i),1} + T_{f_2(S_i),2}}{T_{f_2(S_i),1}} \right), \quad (8)$$

де $\alpha_{1,j,p,q}$ – коефіцієнт для значення, яке визначає відмовостійкість в кількісних одиницях; $\alpha_{2,j,p,q}$ – коефіцієнт для значення, яке визначає живучість в кількісних одиницях; $\alpha_{1,j,p,q} + \alpha_{2,j,p,q} = 1$.

Аналогічно, доданками в формулі (6) та її конкретизації формулою (9) для двох величин можуть бути інші показники, які характеризують ефективність ІТ.

В результаті використання перелічених заходів було отримано ІТ вузькоспеціалізованого використання для різних сферах застосування, де супроводжуванні процеси відносяться до ірреального або нереального часу із досить високими параметрами відмовостійкості, живучості та загалом резилентності і, в той же час, прийнятним рівнем фінансових витрат на її експлуатацію.

4. Експерименти

Для визначення на скільки ефективними є запропоновані рішення із забезпечення відмовостійкості та живучості проведемо порівняння критерія ефективності для ІТ без забезпечення відмовостійкості та живучості і з включенням цих характеристик на основі формули (8).

Значення величини критерія ефективності ІТ, в якій не забезпечуються вимоги відмовостійкості і живучості отримуємо з формули (8) так: 1) вирішення проблем, пов'язаних із відсутністю забезпечення в ІТ реалізованих відмовостійкості та живучості, покладено на оператора чи адміністратора, який постійно моніторить функціонування ІТ; вирішення проблемних ситуацій здійснюється тільки при їх виявленні. В першому випадку розрахунок за формулою (9) може бути аналогічним і значення отримає величини на порядки перевищуватиме значення критерію для ІТ, де забезпечується відмовостійкість та живучість. Якщо ж розглядати другий варіант, тоді $K_e(S_{IT}) = 1$. В цьому випадку, відношення між значеннями визначається за формулою (9) і дозволяє встановити ефективність запропонованих рішень із забезпечення відмовостійкості та живучості, а також покращувати досягнення ефективності за рахунок коригування коефіцієнтів:

$$\mu = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \sum_{p=0}^{n_p} \sum_{q=0}^{n_q} \left(\alpha_{1,j,p,q} \cdot \frac{T_{f_1(S_i),1}}{T_{f_1(S_i),1} - (T_{f_1(S_i),2} + T_{f_1(S_i),3})} + \alpha_{2,j,p,q} \cdot \frac{T_{f_2(S_i),1} + T_{f_2(S_i),2}}{T_{f_2(S_i),1}} \right)}, \quad (9)$$

де відсутність збоїв в роботі спеціалізованої ІТ або зовнішніх впливів означатиме, що час витрачений на їх обробку дорівнюватиме нулеві і відповідно відношення стане дорівнювати одиниці.

Якщо ж відбудеться збій або зовнішнє втручання, тоді значення μ буде більше одиниці. Ефективним значенням є значення мінімально відхилене від одиниці. Результати забезпечення відмовостійкості та живучості спеціалізованої ІТ зображені в реалізованій ІТ на рис. 1.

```
16 Apr 15 09:01:02 itz0 run-parts(/etc/cron.hourly) [17261]: starting 0anacron
17 Apr 15 09:01:02 itz0 run-parts(/etc/cron.hourly) [17270]: finished 0anacron
18 Apr 15 10:13:16 itz0 CROND[17274]: (root) CMD (/Stecjk/db-hourly)
19 Apr 15 11:43:16 itz0 sshd[30314]: False error in the operation of the
20 network device from 192.168.168.2 port 43760 ssh2
21 Apr 15 11:44:01,786 DEBUG :NetworkDevice eth0:
22 DEVICE="eth0"
23 BOOTPROTO="dhcp"
24 DEFROUTE="yes"
25 HWADDR="1C:C1:DE:78:C4:4C"
26 IPV6INIT="no"
27 NAME="eth0"
28 NM_CONTROLLED="yes"
29 ONBOOT="yes"
30 PEERDNS="yes"
31 PEERROUTES="yes"
32 TYPE="Ethernet"
33 IPV4_FALSE_MISTAKE=yes
34 UUID="ee9c32a3-47c2-4217-b817-82e1d91f6a5f"
35 Apr 15 11:44:12 itz0 sshd[29043]: pam_unix(sshd:session): session closed
36 for user swm
37 Apr 15 11:44:56 itz0 sshd[29078]: Network device configuration required ...
38 Apr 15 11:46:02,786 DEBUG : writeIfcfgFile eth1
39 to /etc/sysconfig/network-scripts/ifcfg-eth0 not needed
40 Apr 15 11:46:21,396 DEBUG : Network.write() called
41 Apr 15 11:46:21,397 DEBUG : /etc/sysconfig/network-scripts/ifcfg-eth1:
42 DEVICE=eth1
43 TYPE=Ethernet
44 UUID=8d82e92b-3b68-4829-a09b-c76783afecaa
45 ONBOOT=yes
46 NM_CONTROLLED=yes
47 BOOTPROTO=none
48 HWADDR=1C:C1:DE:78:C4:4D
49 IPADDR=192.168.1.2
50 PREFIX=24
51 DEFROUTE=yes
52 Apr 15 11:47:41 itz0 sshd[30314]: pam_unix(sshd:session): session opened for user swm by (uid=0)
53 IPV6INIT=no
```

Рис. 1. Вміст файлів-відомостей про збої та зовнішні впливи

Для зручності всі рядки фрагмента лог-файла були пронумеровані, а критичні позиції виділені.

В позиції 19 виявлено фатальну помилку в роботі мережевого адаптера «eth0» в момент звернення користувача з IP 192.168.168.2.

В позиції 35,36 закривається поточна сесія користувача SWM.

В позиції 37 система сповіщає, що потрібна реконфігурація мережевих пристроїв.

В позиції 38 сповіщається, що пристрій «eth0» відключається.

В позиціях 40,41 повідомляється, що активується резервний мережевий адаптер «eth1»

В позиції 52 сповіщається, що відкривається сесія користувача SWM, яка була припинена через вихід із ладу мережевого адаптера «eth0».

Напрями подальших досліджень. Важливим напрямом подальших досліджень для покращення ефективності ІТ є розробка методу забезпечення ефективного захисту інформації безпосередньо в структурі ІТ та обчислювальних процесах, що протікають в процесах обчислень. Їх врахування в загальному критерії визначенні ефективності ІТ дозволить збалансувати такі величини як живучість, відмовостійкість та захист інформації, виражені в кількісному вигляді, та стане основою розробки спеціалізованої ІТ з покращеними характеристиками.

Висновки. Таким чином, розроблений підхід до визначення ефективності ІТ на основі врахування кількісних величин, які характеризують відмовостійкість та живучість, та може бути розширений для врахування інших характеристичних величин. Для забезпечення відмовостійкості та живучості ІТ розроблено систему заходів в результаті виконання яких отримано ІТ вузькоспеціалізованого використання для різних сфер застосування, де супроводжуванні процеси відносяться до ірреального або нереального часу із досить високими параметрами відмовостійкості, живучості та загалом резилентності і, в той же час, прийнятним рівнем фінансових витрат на її експлуатацію.

Література

1. ДСТУ 3396.2-97 Protection of information. Technical protection of information. Terms and definitions. State Committee of Ukraine, Kyiv (1997) [in Ukrainian]
2. Savelyeva, O. S., Krasnozhan, O. M., Lebedeva, O. U. (2014). Using the structural fault-tolerance index in project designing. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 2, 130–135. doi: 10.15276/opu.2.44.2014.24.
3. S. Boranbayev, S. Altayev, A. Boranbayev. Applying the method of diverse redundancy in cloud based systems for increasing reliability, in Proceedings of the 12th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG 2015) (Las Vegas, Nevada, 2015), pp. 796–799.
4. Boranbayev A., Boranbayev S., Yersakhanov K., Nurusheva A., Taberkhan R. (2018) Methods of Ensuring the Reliability and Fault Tolerance of Information Systems. In: Latifi S. (eds) Information Technology - New Generations. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 738. Springer, Cham.
5. Chinnaiiah, M., Niranjana, N. Fault tolerant software systems using software configurations for cloud computing. J Cloud Comp 7, 3 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13677-018-0104-9>.
6. Zhu X, Wang J, Guo H, Zhu D, Yang LT, Liu L (2016) Fault-tolerant scheduling for real-time scientific workflows with elastic resource provisioning in virtualized clouds. IEEE Trans Parallel Distrib Syst 27(12):3501–3517. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2016.2543731>.
7. Liu J, Zhou J, Buyya R (2015) Software rejuvenation based fault tolerance scheme for cloud applications In: 2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing, 1115–1118, New York. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2015.164>.
8. Liu J, Wang S, Zhou A, Kumar SAP, Yang F, Buyya R (2016) Using Proactive Fault-Tolerance Approach to Enhance Cloud Service Reliability. IEEE Trans Cloud Comput PP(99):1–1. <http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2016.2567392>.
9. Nicolo P (2013) A frame work for self-healing software systems In: IEEE 35th International Conference on Software Engineering (ICSE), 1397–1400. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2013.6606726>.
10. Zhao W, Wenbing Z, Melliar-Smith PM, Moser LE (2010) Fault Tolerance Middleware for Cloud Computing In: 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing, 67–74, Miami. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2010.26>.
11. Bala A, Chana I (2012) Fault tolerance- challenges, techniques and implementation in cloud computing, ISSN (Online): 16940814. IJCSI Int J Comput Sci 9(1). www.IJCSL.org.
12. Egwuotuoha IP, Chen S, Levy D, Selic B (2012) A fault tolerance framework for high performance computing in cloud, Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid) In: Proceedings of the 12th IEEE/ACM international symposium. 13-16 May, 709–710. <https://doi.org/10.1109/CCGrid.2012.80>.
13. S. Pitcher, "New DoD Approaches on the Cyber Survivability of Weapon Systems (25 March 2019)," 25 March 2019. [Online]. Available: <https://www.itea.org/wp-content/uploads/2019/03/Pitcher-Steve.pdf>.
14. D. J. Bodeau, R. D. Graubart, R. M. McQuaid and J. Woodill, "Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice: Use Case Methodology and Examples (MTR 180449)," The MITRE Corporation, Bedford, MA, 2018.
15. D. Fitzpatrick, D. Bodeau, R. Graubart, R. McQuaid, C. Olin and J. Woodill, "(DRAFT) Cyber Resiliency Evaluation Framework for Weapon Systems: Foundational Principles and Their Potential Effects on Adversaries," The MITRE Corporation, Bedford, MA, 2019.
16. NIST, "Initial Public Draft of NIST SSP 800-160 Volume 2, Systems Security Engineering: Cyber Resiliency Considerations for the Engineering of Trustworthy Secure Systems," 21 March 2018. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Publications/sp/800-160/vol-2/draft/documents/sp800-160-vol2-draft.pdf>.
17. Lysenko, S., Savenko, O., Kryshchuk, A., Kljots, Y. Botnet detection technique for corporate area network. In: Proc. of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, pp. 363–368 (2013).
18. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., Savenko, B.: Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search. CEUR Workshop, Vol. 1844, pp. 555–569 (2017).
19. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., Savenko, B.: Approach for the Unknown Metamorphic Virus Detection. In: 9-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Technology and Applications, pp. 453–458 (2017).
20. Pomorova, O., Savenko, O., Lysenko, S., Kryshchuk, A. and Nicheporuk, A.: A technique for detection of bots which are using polymorphic code. In: 21st International Conference, CN, Springer, Brunów, Poland, pp. 265–276 (2014)
21. Kondratenko, Y., Kondratenko, N.: Soft Computing Analytic Models for Increasing Efficiency of Fuzzy Information Processing in Decision Support Systems. Chapter in book: Decision Making: Processes, Behavioral Influences and Role in Business Management, R. Hudson (Ed.), Nova Science Publishers, New York, 41–78 (2015)
22. Savenko O.S Research of methods of antiviral diagnostics of computer networks / O.S Savenko, S.M Lysenko // Visnyk of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2007. - № 2, v. 2. - P. 120–126.(in Ukrainian)
23. Savenko O.S., Payuk V.P., Savenko B.O, Kashtalyan A.S. Models of undocumented software bookmarks in local computer networks / Measuring and computing equipment in technological processes / 2019. - №2. - P.84-90.(in Ukrainian)
24. Савенко О.С. Модель процесу пошуку троянських програм в персональному комп'ютері / О.С. Савенко, С.М. Лисенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – №7. – С.87-92.
25. Савенко О.С. Дослідження та аналіз блокування процесів в комп'ютерній системі / О.С. Савенко, Ю.П. Кльоц, С.В. Мостовий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - № 3, Том 1.- С.248-251.

References

1. DSTU 3396.2-97 Protection of information. Technical protection of information. Terms and definitions. State Committee of Ukraine, Kyiv (1997) [in Ukrainian]
2. Savelyeva, O. S., Krasnozhan, O. M., Lebedeva, O. U. (2014). Using the structural fault-tolerance index in project designing. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 2, 130–135. doi: 10.15276/opu.2.44.2014.24.
3. S. Boranbayev, S. Altayev, A. Boranbayev. Applying the method of diverse redundancy in cloud based systems for increasing reliability, in Proceedings of the 12th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG 2015) (Las Vegas, Nevada, 2015), pp. 796–799.
4. Boranbayev A., Boranbayev S., Yersakhanov K., Nurusheva A., Taberkhan R. (2018) Methods of Ensuring the Reliability and Fault Tolerance of Information Systems. In: Latifi S. (eds) Information Technology - New Generations. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 738. Springer, Cham.
5. Chinnaiiah, M., Niranjana, N. Fault tolerant software systems using software configurations for cloud computing. J Cloud Comp 7, 3 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13677-018-0104-9>.
6. Zhu X, Wang J, Guo H, Zhu D, Yang LT, Liu L (2016) Fault-tolerant scheduling for real-time scientific workflows with elastic resource provisioning in virtualized clouds. IEEE Trans Parallel Distrib Syst 27(12):3501–3517. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2016.2543731>.

7. Liu J, Zhou J, Buyya R (2015) Software rejuvenation based fault tolerance scheme for cloud applications In: 2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing, 1115–1118, New York. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2015.164>.
8. Liu J, Wang S, Zhou A, Kumar SAP, Yang F, Buyya R (2016) Using Proactive Fault-Tolerance Approach to Enhance Cloud Service Reliability. IEEE Trans Cloud Comput PP(99):1–1. <http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2016.2567392>.
9. Nicolo P (2013) A frame work for self-healing software systems In: IEEE 35th International Conference on Software Engineering (ICSE), 1397–1400. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2013.6606726>.
10. Zhao W, Wenbing Z, Melliar-Smith PM, Moser LE (2010) Fault Tolerance Middleware for Cloud Computing In: 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing, 67–74, Miami. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2010.26>.
11. Bala A, Chana I (2012) Fault tolerance- challenges, techniques and implementation in cloud computing, ISSN (Online): 16940814. IJCSI Int J Comput Sci 9(1). www.IJCSI.org.
12. Egwuotuha IP, Chen S, Levy D, Selic B (2012) A fault tolerance framework for high performance computing in cloud, Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid) In: Proceedings of the 12th IEEE/ACM international symposium. 13-16 May, 709–710. <https://doi.org/10.1109/CCGrid.2012.80>.
13. S. Pitcher, "New DoD Approaches on the Cyber Survivability of Weapon Systems (25 March 2019)," 25 March 2019. [Online]. Available: <https://www.itea.org/wp-content/uploads/2019/03/Pitcher-Steve.pdf>.
14. D. J. Bodeau, R. D. Graubart, R. M. McQuaid and J. Woodill, "Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice: Use Case Methodology and Examples (MTR 180449)," The MITRE Corporation, Bedford, MA, 2018.
15. D. Fitzpatrick, D. Bodeau, R. Graubart, R. McQuaid, C. Olin and J. Woodill, "(DRAFT) Cyber Resiliency Evaluation Framework for Weapon Systems: Foundational Principles and Their Potential Effects on Adversaries," The MITRE Corporation, Bedford, MA, 2019.
16. NIST, "Initial Public Draft of NIST SSP 800-160 Volume 2, Systems Security Engineering: Cyber Resiliency Considerations for the Engineering of Trustworthy Secure Systems," 21 March 2018. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Publications/sp/800-160/vol-2/draft/documents/sp800-160-vol2-draft.pdf>.
17. Lysenko, S., Savenko, O., Kryshchuk, A., Kljots, Y. Botnet detection technique for corporate area network. In: Proc. of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, pp. 363-368 (2013).
18. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., Savenko, B.: Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search. CEUR Workshop, Vol. 1844, pp. 555–569 (2017).
19. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., Savenko, B.: Approach for the Unknown Metamorphic Virus Detection. In: 9-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Technology and Applications, pp. 453–458 (2017).
20. Pomorova, O., Savenko, O., Lysenko, S., Kryshchuk, A. and Nicheporuk, A.: A technique for detection of bots which are using polymorphic code. In: 21st International Conference, CN, Springer, Brunów, Poland, pp. 265-276 (2014)
21. Kondratenko, Y., Kondratenko, N.: Soft Computing Analytic Models for Increasing Efficiency of Fuzzy Information Processing in Decision Support Systems. Chapter in book: Decision Making: Processes, Behavioral Influences and Role in Business Management, R. Hudson (Ed.), Nova Science Publishers, New York, 41-78 (2015)
22. Savenko O.S Research of methods of antiviral diagnostics of computer networks / O.S Savenko, S.M Lysenko // Visnyk of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2007. - № 2, v. 2. - P. 120–126.(in Ukrainian)
23. Savenko O.S., Payuk V.P., Savenko B.O, Kashtalyan A.S. Models of undocumented software bookmarks in local computer networks / Measuring and computing equipment in technological processes / 2019. - №2. - P.84-90.(in Ukrainian)
24. Savenko O.S. Model of the process of searching for Trojan programs in a personal computer / O.S. Savenko, S.M. Lysenko // Radio electronic and computer systems. - 2008. - №7. - P.87-92. (in Ukrainian)
25. Savenko O.S., Klots Y.P., Mostoviy S.V. Research and analysis of process blocking in a computer system // Visnyk of Khmelnytsky National University. - 2007. - № 3, Volume 1.- P.248-251. (in Ukrainian)

Надійшла / Paper received: 11.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 004.75:004.8:004.49
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-16

КАШТАЛЬЯН А. С., САВЕНКО Б. О., БЕЛЬФЕР Р. Е.
Хмельницький національний університет

МОДЕЛІ ПРИМАНОК В КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ З ВРАХУВАННЯМ ТИПІВ ЗЛОВМИСНИХ АТАК

У статті розроблені моделі приманок на основі типових комп'ютерних атак, архітектурних особливостей приманок та з врахуванням архітектури розподіленої системи з приманками. Розподілена система та її компоненти стає хибним об'єктом атак і є інтегрованою в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки. Моделі приманок є основою для розробки принципово нових методів виявлення зловмисного втручання в функціонування корпоративних мереж. Особливістю є досягнення за рахунок конфігурування різних типів приманок та їх інтеграції не тільки з іншими системами забезпечення рівня безпеки корпоративних мереж і за рахунок їх представлення в багаторівневій системі, яка за своєю архітектурою буде здійснювати ефективну реакцію на зловмисні події. В роботі представлено типові особливості приманок та проаналізовано методи системного аналізу та теорії прийняття рішень для вирішення питань застосування приманок за типами атак та організації взаємодії компонентів багаторівневої системи.

Організація експериментальних досліджень представлена на основі побудови багаторівневої системи з приманками, яка динамічно змінюватиме свою конфігурацію та матиме систему прийняття рішень для оперативного реагування на події, що протікатимуть в мережі.

Представлено використання приманок як перспективний напрям у здійсненні захисту комп'ютерних мереж від зловмисних втручань, інформація про які обмежена або відсутня.

Ключові слова: мережа приманок, зловмисні дії, виявлення комп'ютерних атак, прогнозування, корпоративні комп'ютерні мережі.

KASHTALIAN A., SAVENKO B., BELFER R.
Khmelnitsky National University

HONEYPOTS MODELS IN CORPORATE COMPUTER NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT TYPES OF MALICIOUS ATTACKS

The article develops honeynet models based on typical computer attacks, architectural features of baits and taking into account the architecture of a distributed system with baits. The distributed system and its components become the target of false attacks and are integrated into the overall security system of corporate networks, which will generally help to improve the level of security. Bait models are the basis for the development of fundamentally new methods for detecting malicious interference in the functioning of corporate networks. The feature is the achievement by configuring different types of lures and their integration not only with other systems to ensure the level of security of corporate networks and by presenting them in a multilevel system, which by its architecture will effectively respond to malicious events. The paper presents typical features of baits and analyzes methods of system analysis and decision theory for solving problems of using baits by types of attacks and organizing the interaction of components of a multilevel system.

The organization of experimental research is based on the construction of a multilevel system with baits, which will dynamically change its configuration and will have a decision-making system for rapid response to events occurring in the network.

The article presents the use of baits as a promising direction in the protection of computer networks from malicious interference, information about which is limited or absent.

Keywords: honeynet, malicious actions, detection of computer attacks, forecasting, corporate computer networks.

Вступ. Постановка проблеми. Комп'ютерні мережні ресурси, які використовуються в роботі підприємств (організацій) стали невід'ємною частиною забезпечення технологічних процесів, що протікають в них. Але комп'ютерні мережі під'єднані до мережі Internet стають об'єктами для зловмисних дій [1–3]. Виявлення зловмисних дій та для захисту від них використовується багато різного типу та призначення систем [4]. Використовувані системи захисту корпоративних мереж не забезпечують повного надійного захисту. Тому, актуальним напрямом дослідження є пошук більш ефективних шляхів захисту від зловмисних дій в роботі мережі та виявлення їх. Основною вимогою до таких підходів є можливість виявлення нових типів, а також впливів, розподілених у часі. Перспективним напрямом захисту комп'ютерних мереж є використання окремих приманок та мереж приманок різного типу, а також їх інтеграція з іншими системами захисту. Метою дослідження є розробка моделей приманок на основі їх архітектурних особливостей, особливостей застосування та типів атак на мережі.

1. Методи виявлення зловмисних дій на основі приманок та мереж приманок

Приманки у локальних мережах та мережі Internet виконують функції збору та аналізу інформації щодо зловмисних дій в мережах [5–7]. Актуальними напрямками дослідження є розміщення приманок саме в корпоративних мережах для покращення безпеки в них. Розглянемо методи побудови таких приманок, які орієнтовані саме на використання в корпоративних комп'ютерних мережах підприємств (організацій). В роботах [8, 9] приведено результати використання мережі, що містить невелику кількість низькорівневих приманок, які дозволяють здійснювати пряме вимірювання атак та їх походження. Приманки описані в [9]

двох типів: низькорівневі та високорівневі, які призначені для виявлення загроз сервісам з операційними системами Linux та Windows. Вони є клієнтські та серверні і реалізовані на різних мовах програмування. Використання тіньових приманок пропонується в [10, 11]. Метод на основі застосування приманок до виявлення зловмисних дій, який змінює їх пасивну роль очікування атак на активне ефективне використання у взаємодії приманок та мережі, в якій вони розгорнуті, запропоновано в роботі [12].

Віртуалізація відіграє значну роль в останніх трендах хмарних обчислень та зберігання даних, що ускладнює задачу одночасного надання якісного сервісу та захисту від втручань. Використання приманок у віртуальних середовищах для попередження зловмисних дій та реагування на них запропоновано в [13]. Віртуальні приманки та мережі віртуальних приманок дозволяють зменшити витрати у порівнянні з фізичними приманками [14]. Підключення локальних пристроїв різноманітних пристроїв, в тому числі це стосується інтернету речей до таких мереж несе в собі загрозу не тільки доступу до даних, а також безпосереднього втручань в роботу цих пристроїв. Для збереження конфіденційності інформації та запобігання втручань в роботу використовуються приманки [15]. Приманки можуть бути ідентифіковані зловмисниками з використанням різних методів [16]. Ці підходи досліджуються та моделюються з метою захисту та здійснення контрзаходів щодо виявлення приманок [17, 18].

2. Моделі приманок для виявлення зловмисних дій

Для побудови моделей приманок згрупуємо і узагальнимо їх характеристики. З цією метою враховуватимемо рівні роботи приманок з урахуванням її функцій: виявлення; аналізу; реагування; виконання. На цих рівнях здійснюється збір інформації щодо втручань в роботу сервісу, визначається із зафіксованої активності зловмисна та визначається рівень її небезпеки для мережі, формуються правила попередження та виявлення атак. А на останньому рівні відбувається поєднуєднання двох основних функцій. На етапі виявлення за відомими сигнатурами виявляються атаки мережі на основі статичних патернів. На етапі попередження ці атаки блокуються як зловмисні. Тоді модель приманки, яка враховуватиме функції з яких вона формуватиметься, задамо так:

$$\mathbb{W}_P = \langle P, \Omega_I \rangle, \quad (1)$$

де P – множина, яка позначає сукупність функцій приманки; Ω_I – множину предикатів на множині P .

Розроблені моделі приманок, мереж приманок та аналіз особливостей типів приманок дають змогу вибудувати систему хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки. Моделі приманок та мереж приманок є основою для розробки принципово нових методів виявлення зловмисного втручання в функціонування корпоративних мереж. Це досягається за рахунок конфігурування різних типів приманок та їх інтеграції не тільки з іншими системами забезпечення рівня безпеки корпоративних мереж а і за рахунок їх представлення в багаторівневій системі, яка за своєю архітектурою буде здійснювати ефективну реакцію на зловмисні події.

Для виявлення атаки та визначення її типу потрібно визначити характерні ознаки певного типу атаки. Приманка повинна забезпечувати:

- 1) порти та сервіси, на які здійснюються атаки;
- 2) організацію збирання, зберігання та обробки даних мережного трафіку приманки;
- 3) взаємодію з мережею приманок.

Порти та сервіси, розгорнуті на приманці, залежить від типу/типів атак, які перехоплює приманка. Організація збирання та зберігання даних може бути реалізована однаково для різних типів атак.

Розглянемо типові архітектури приманок з урахуванням типових атак в корпоративних мережах.

Атака «поштова бомба» направлена на електронну поштову скриньку або на поштовий сервер. Основною метою цієї атаки є навмисне запобігання поштової комунікації та зниження продуктивності роботи мережі. В залежності від інтенсивності «поштової бомби» вплив атаки може бути від незручностей у використанні до повної відмови в обслуговуванні.

До типових атак «поштова бомба» можна віднести:

- 1). масова розсилка – цілеспрямоване відправлення великої кількості випадкового поштового трафіку на цільові електронні поштові адреси;
- 2) посилення на список – внесення електронних поштових адрес, визначених для атаки, в численні списки підписок, таким чином використовуючи сторонні джерела для надсилання поштового трафіку на ці цільові адреси;
- 3) архівна бомба – надсилання дуже великого заархівованого файлу на електронну поштову адресу, визначену для атаки;
- 4) вкладення – надсилання повідомлень з вкладеннями значних розмірів, що має на меті перевищення об'єму пам'яті, доступної на поштовому сервері.

Характерними ознаками атаки «поштова бомба» значний об'єм поштового трафіку. Це поштовий трафік може бути сформований у різний спосіб: одне повідомлення великого об'єму; значна кількість повідомлень невеликого об'єму, направлена на одну електронну поштову адресу; значна кількість

повідомлень невеликого об'єму, направлена на різні поштові електронні адреси, розташовані на одному сервері тощо. Зловмисний поштовий трафік може надходити від одного джерела або бути розподіленим, наприклад, у випадку атаки типу «поштова бомба».

Для виявлення атаки типу «поштова бомба» необхідно розгорнути на приманці SMTP-сервіс для імітації поштового серверу (рис. 1). Дані, які фіксує приманка:

- IP-адреса/ IP-префікс джерела повідомлення;
- ім'я домена/ URL/ тип URL джерела повідомлення;
- ID користувача/ користувачів;
- об'єм повідомлення, що надсилається.

На основі цих даних проводиться аналіз активності на SMTP сервісі приманки, визначаються порогові значення об'єму повідомлення/ повідомлень та швидкості їх надходження. Порогові значення використовуються для визначення поштового трафіку як зловмисного та такого, що потребує аналізу.

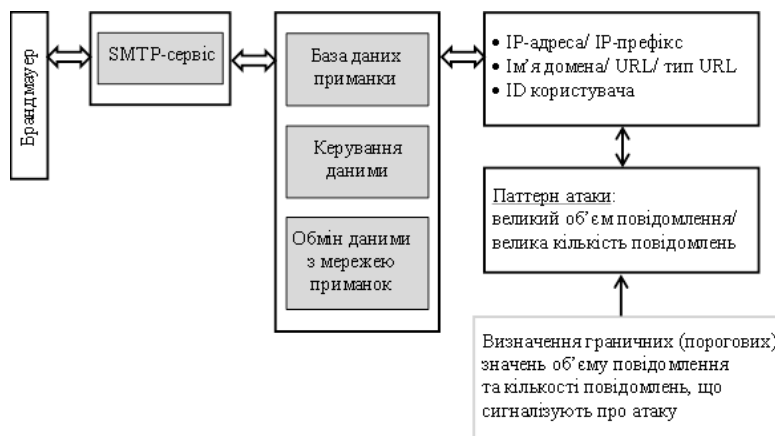


Рис. 1. Приманка для атаки «поштова бомба» (mailbomb)

Атаку Neptune можна охарактеризувати як напіввідкрита TCP SYN атаку. Для успішної реалізації атаки зловмисник використовує особливості попереднього встановлення з'єднання в TCP протоколі, постійно надсилаючи велику кількість SYN пакетів (запитів на встановлення зв'язку) безпосередньо на TCP сервер. Сервер надсилає у відповідь SYN/ACK пакет і чекає на ACK пакет від клієнта, який зловмисник не надсилає, і з'єднання залишається «напіввідкритим». Оскільки TCP сервер має обмежене число з'єднань, то відбувається переповнення, і робота сервера блокується.

Для виявлення атаки Neptune на приманці повинен бути розгорнутий сервіс, який працює за TCP протоколом, наприклад HTTP та FTP сервіси (рис. 2). Дані, які фіксує приманка:

- IP-адреса/ IP-префікс джерела запиту;
- ім'я домена/ URL/ тип URL джерела запиту;
- кількість «напіввідкритих» запитів.

З кількості «напіввідкритих» запитів формується часовий ряд активності зловмисників на серверах даної приманки, оскільки у випадку розподіленої атаки запити можуть надходити з різних джерел. В результаті аналізу мережний трафік класифікується як незловмисний/ зловмисний та визначаються граничне значення кількості запитів та швидкості їх надходження.

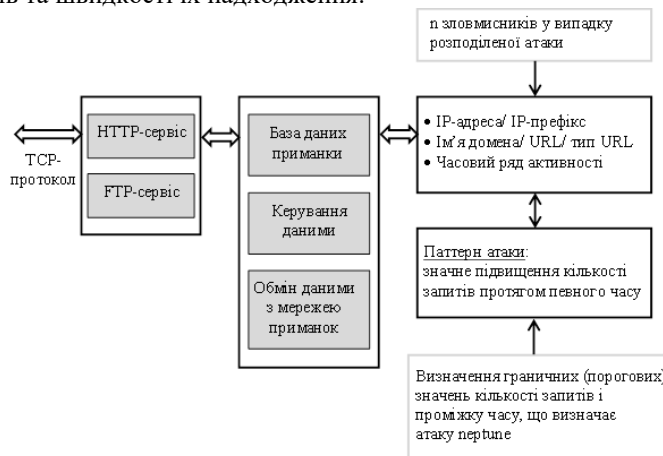


Рис. 2. Приманка для мережевої атаки neptune

Атака portsweep передбачає, що зловмисник сканує значну кількість портів цільового сервера з метою визначення сервісів, які на ньому використовуються.

Для виявлення цієї атаки на приманці має бути реалізована значна кількість портів, які можуть бути фізичні і віртуальні та відповідають портам реального сервісу. Дані, які збирає приманка:

- IP-адреса/IP-префікс;
- ім'я домена/URL/тип URL;
- наявність звернення до портів.

Кількість звернень до портів формує часовий ряд активності зловмисника (зловмисників у разі розподіленої атаки). Аналіз цього ряду дає можливість класифікувати активність як зловмисну.

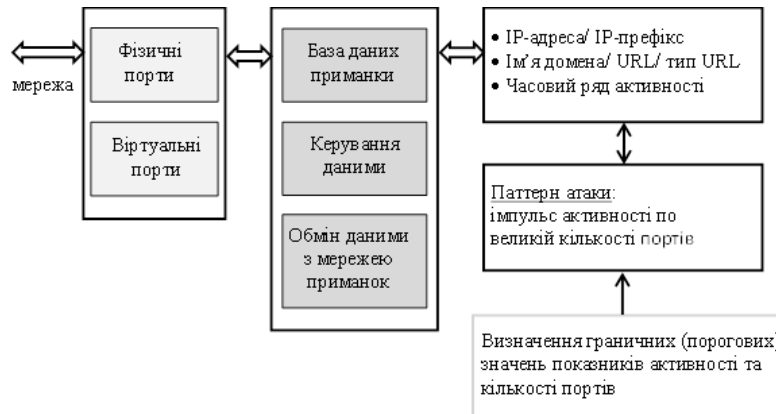


Рис. 3. Приманка для мережевої атаки portsweep

Розроблені моделі приманок для типових атак на основі (1) можуть бути застосовними для побудови мереж приманок в корпоративних мережах. Це дозволить їх використовувати в залежності від типів атак. Для організації функціонування такої мережі приманок необхідно використовувати методи теорії прийняття рішень з метою визначення динамічної зміни архітектури мережі приманок.

3. Застосування методів кластеризації поведінки зловмисників в корпоративних мережах, в яких розміщено мережу приманок для виявлення зловмисних дій

Пошук подібних зловмисників здійснюється на основі кластеризації їх поведінки, тобто часових рядів атак, які належать зловмисникам. Кластеризація часових рядів здійснюється різними методами, серед яких кластеризація на основі інформаційних критеріїв, кластеризація на основі гаусівських змішаних, кластеризація на основі прихованих марківських моделей, кластеризація на основі нейронних мереж.

Основними етапами пошуку подібних часових рядів активності зловмисників є: представлення даних ряду, вимірювання відстані між рядами, алгоритм кластеризації.

Представлення даних часового ряду має на меті виконання таких задач: значне зменшення розмірів даних, виділення основних глобальних та локальних характеристик, можливість відновлення ряду з цього представлення. Серед методів зменшення розмірності використовуються метод сингулярного спектрального аналізу, перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення, поліноміальні перетворення, використання авто регресивного рухомого середнього тощо.

Визначення відстані між рядами, що відображає подібність, є критичним етапом для виконання подальшої кластеризації. При порівнянні поведінки зловмисників практично немає можливості застосовувати оцінки відстані, які застосовуються в класичних методах кластеризації. Необхідно застосовувати функції порівняння часових рядів, які враховують такі особливості часових рядів як можливі шуми, часові зсуви, масштабування в часі і за амплітудою, лінійні зсуви, неоднорідності та розриви. Функції порівняння часових рядів враховують подібність у часі, формі та динаміці.

Для кластеризації часових рядів активності зловмисників використовуються різні методи кластеризації, зокрема графові (алгоритм виділення зв'язаних компонент, алгоритм FOREL, функціонали якості кластеризації), ієрархічні (агломеративні та ієрархічні алгоритми) та статистичні (ЕМ-алгоритм, метод k-середніх), чіткі та нечіткі. У випадку чіткої кластеризації один зловмисник відноситься до одного кластеру. Аналіз активності зловмисників показує, що дії одного зловмисника можуть відноситися до декількох кластерів, тому доцільно поряд з чіткими методами кластеризації використовувати методи нечіткої кластеризації. Серед методів нечіткої кластеризації варто виділити метод с-середніх, нейромережеві (самоорганізуючі карти Кохонена тощо) та генетичні алгоритми.

Для визначення та аналізу трендів активності зловмисників здебільшого використовуються статистичні підходи, які досить широко застосовуються в економетриці. Тренд відображає загальну тенденцію зростання, спадання або стабільність активності окремого зловмисника та групи зловмисників.

Зазвичай під трендом мається на увазі глобальна довготермінова середня тенденція поведінки часового ряду. Але у випадку аналізу активності зловмисників доцільно також розглядати короткотермінові тренди в межах певного періоду, відповідно до якого приймати рішення про стан захисту мережі та подальші дії. Часовий ряд містить систематичну та несистематичну складові. В сучасних підходах до аналізу та моделювання часових рядів вважається, що часовий ряд містить три систематичних складових, рівень, тренд, періодичні коливання, та одну несистематичну, шум. Розглядаються дві моделі часових рядів, які враховують ці чотири складові: адитивна та мультиплікативна. Реальні дані можуть містити як адитивні, так і мультиплікативні складові. Для виділення тренду як однієї складової необхідно розкласти часовий ряд на складові. Одним з класичних методів є декомпозиція методом рухомого середнього, а також застосування обчислення рухомого середнього до рухомого середнього та зваженого рухомого середнього. Також, поширеним методом декомпозиції є застосування поліноміальної регресії.

Здійснення аналізу викидів в одномірних та багатомірних часових рядах дозволяє проаналізувати аномально високу та аномально низьку активність зловмисників, це також дає інформацію про те, чи є атака розподіленою. Викиди можуть бути точковими та послідовними. Точковим викидом є точка спостереження в певний момент часу, яка відрізняється від сусідніх точок ряду (локальний викид) або від усіх точок ряду (глобальний викид). Послідовним викидом є послідовність точок, поведінка та/або значення яких відрізняються від сусідніх точок або точок ряду, при цьому окремі точки цієї послідовності можуть не бути викидами. У випадку якщо для визначення викидів використовуються дані всього ряду, то викиди будуть глобальними, у випадку використання сусідніх точок (часового вікна) викиди будуть локальними. Особливо доцільними для аналізу атак є методи визначення викидів, які працюють з потоками даних, тому що вони дозволяють визначати, чи є дані викидами одразу після їх надходження в реальному часі.

До методів визначення точкових викидів в одномірному та багатомірному часових рядах відносяться методи, які ґрунтуються на моделі, які ґрунтуються на густині та гістограмні. Найбільш популярним визначенням точкового викиду є точка, що суттєво відхиляється від очікуваного значення, визначення викиду на основі такого припущення ґрунтується на моделі часового рядку. Для побудови моделі часового ряду використовується ряд методів, серед яких вже згадані моделі рухомого середнього, декомпозиції часових рядів, штучних нейронних мереж. В процесі визначення викидів в потоках даних моделі періодично довчаються таким чином, щоб адаптуватися до надходження нових даних. Методи, що ґрунтуються на густині, визначають викиди на основі кількості сусідніх точок щодо потенційного викиду. Гістограмний метод ґрунтується на пошуку точок, видалення яких призводить до зменшення похибки гістограмного представлення часового ряду. У випадку багатомірного ряду точковий викид може стосуватися як однієї змінної ряду, так і декількох одночасно.

Для пошуку викидів в багатомірних рядах засовуються одномірні та багатомірні підходи. В одномірному підході багатомірний часовий ряд розглядається як сукупність одномірних рядів, до кожного з яких застосовується пошук викидів. Недоліком цього є не враховані кореляційні залежності багатомірного ряду, що в результаті може призвести до втрати інформації. Для уникнення цього та водночас використання одномірного підходу можуть застосовуватися методи зменшення розмірності багатомірного часового ряду. З одного боку це дозволяє зменшити кількість даних для аналізу і підвищити швидкість аналізу, з іншого боку врахувати кореляційні залежності. Серед таких методів метод головних компонент, аналіз незалежних компонент, Т-розподілене вкладення стохастичної близькості. При багатомірному підході пошук точкових викидів здійснюється із використанням одразу всіх вихідних даних без їх попереднього перетворення та розділення.

Для знаходження послідовних викидів використовуються характеристики послідовності точок одномірного або багатомірного часового ряду. До таких характеристик відносяться довжина, репрезентативність та періодичність. В більшості випадків визначаються послідовності викидів фіксованої довжини, але можливе також одночасне визначення послідовностей різної довжини. Порівняння послідовностей є більш складною задачею ніж порівняння точок, тому багато методів порівняння послідовностей для визначення викидів ґрунтуються не на оригінальних значеннях часового ряду, а на різних його представленнях. Зокрема з цією метою часто використовується дискретизація значень часового рядку. Періодичність послідовних викидів враховується у порівнянні з періодичністю нормальних значень часового ряду.

Прогнозування активності зловмисників передбачає раннє виявлення зловмисних дій та визначення ймовірності атак та їх характеристик на основі поточного стану та попередньо виявлених паттернів. Аналіз дій зловмисників дозволяє отримати патерни атак. Атаки можуть бути короткі та тривалі, інтенсивні та відносно непомітні. Вивчення цих патернів дозволяє вживати заходів підвищення безпеки мережі задля послаблення впливу зловмисників та зменшення втрат від втручань. Для прогнозування одномірних та багатомірних часових рядів розроблено значну кількість методів, більшість яких може бути застосована та адаптована до прогнозування різних типів атак, зокрема в мережі приманок.

До традиційних методів прогнозування часових рядів відноситься ряд методів, які ґрунтуються на авторегресії, рухомому середньому та згладжуванні. Класичні методи прогнозування часових рядів

передбачають оцінку періодичності (сезонності), тренду та стаціонарності ряду, тобто передбачають певні характеристики механізму генерації значень ряду. Але в багатьох випадках, в тому числі це стосується поведінки атак, механізм генерації подій є досить складним і попередньо невідомим. В цьому випадку генеровані дані не можуть бути описані аналітичними рівняннями. В часових рядах, які описують зловмисні дії, може бути відсутній або неявний тренд. Так само період може бути відсутній або відповідати складній залежності. В цьому випадку застосування традиційних методів аналізу та прогнозування часових рядів може не привести до бажаних результатів. Натомість сучасні методи машинного та глибокого навчання не передбачають, що часовий ряд має відповідати певним характеристикам, і дозволяє прогнозувати поведінку ряду навіть якщо механізм його генерації невідомий. На сьогоднішній день розроблено ряд нейромережних методів прогнозування одномірних та багатомірних часових рядів, які ґрунтуються на використанні різних архітектур нейронних мереж, серед яких нейронні мережі прямого розповсюдження (авторегресивні нейронні мережі, авторегресивні нейронні мережі з зовнішніми входами), рекурентні нейронні мережі (нейронні мережі Елмана та Джордана, LSTM та GRU нейронні мережі), згорткові нейронні мережі. Методи глибокого навчання постійно вдосконалюються, розробляються нові механізми підвищення точності та ефективності нейронних мереж, нові комбінації архітектури (наприклад, рекурентні згорткові мережі).

4. Постановка експериментів з багаторівневою системою мережі приманок

Постановку експериментів з мережею приманок в корпоративних мережах потрібно здійснювати з використанням розподіленої системи, компоненти якої мають змогу комунікувати між собою. Таку розподілену систему організуємо так, щоб кожна її компонента була багаторівневою. Це необхідно для розміщення на різних рівнях різних модулів з приманок та різних функцій. В такій розподіленій системі передбачено рівень для організації прийняття рішень про подальші дії. Для побудови такої розподіленої системи та розміщення в неї різного типу приманок необхідно розв'язати наступні задачі: встановити типові корпоративні мережі для яких буде використано пропоновану мережу приманок; визначитись із засобами захисту мережі, які будуть використовуватись; вибрати набір приманок різних типів для конфігурування мережі приманок; конфігурувати набір приманок в багаторівневу систему; провести узгодження взаємодії та уникнення конфліктів між стандартними використовуваними засобами захисту мережі та мережею приманок; здійснити активацію мережі приманок; провести первинне тестування стандартним набором тестів.

Проведення експериментальних досліджень з розробленою мережею приманок проводилось протягом тривалого часу (6 місяців) і мало на меті порівняння результатів з тими, які отримались без використання мережі приманок. Відсоткове покращення інтегрованого рівня безпеки в корпоративній мережі становило 3 %. Його збільшення в перспективі є можливим за рахунок уточнення та покращення моделей приманок та комп'ютерних атак, а також покращення взаємодії компонентів багаторівневої системи.

Результати експериментальних досліджень дозволяють здійснити побудову мережі приманок, які динамічно змінюватимуть свою конфігурацію та матимуть систему прийняття рішень для оперативного реагування на події, що протікатимуть в мережі.

Висновки. Використання приманок дозволяє створити хибні об'єкти атак в комп'ютерних мережах і зібрати інформацію про атаки для аналізу, тому цей напрям досліджень є перспективним напрямом у боротьбі із зловмисними втручаннями в роботу корпоративних мереж, інформація про які обмежена або відсутня. Розроблені моделі приманок з врахуванням їх архітектурних особливостей, особливостей типових атак є основою створення системи хибних об'єктів атак, інтегровану в загальну систему безпеки корпоративних мереж, що загалом сприятиме покращенню рівня безпеки за рахунок, також, аналізу зібраної інформації в приманці про атаки. При організації виявлення та взаємодії компонентів розподіленої системи необхідним є залучення методів системного аналізу та прийняття рішень, які дозволяють покращити результат роботи всієї розроблюваної системи в цілому. Проведені дослідження таких методів дозволили виокремити важливі з них для їх застосування в розроблюваній системі. Результати експериментальних досліджень дозволяють здійснити побудову мережі приманок на основі розподіленої багаторівневої системи.

Напрямами подальших досліджень є розробка нових методів виявлення зловмисного програмного забезпечення та комп'ютерних атак і удосконалення системи підтримки прийняття рішень в багаторівневій системі, яка включає в себе приманки.

Література

1. Савенко О.С. Модель процесу пошуку троянських програм в персональному комп'ютері / О.С. Савенко, С.М. Лисенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – №7. – С.87-92.
2. Савенко О. С. Дослідження методів антивірусного діагностування комп'ютерних мереж / О. С. Савенко, С. М. Лисенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 2, т. 2. – С. 120–126.
3. Савенко О.С. Дослідження та аналіз блокування процесів в комп'ютерній системі / О.С. Савенко, Ю.П. Кльоц, С.В. Мостовий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - № 3, Том 1.- С.248-251.
4. Савенко О.С., Паюк В.П., Савенко Б.О., Капшальян А.С. Моделі незадокументованих закладок програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах / 2019. - №2. – С.84-90.
5. Sokol Pavol/ Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets// Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. <http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf> [Access 18.04.2020].
6. Sochor Tomas/ Study of Internet Threats and Attach Methods Using Honeypots and Honeynets// Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Siera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, pp. 118–127, 2014.

7. Sochor Tomas. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection// Tomas Sochor, Matej Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P.Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, pp. 69-81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.
8. Nawrocki Marcin/ A Survey on Honeypot Software and Data Analysis// Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016 - <https://arxiv.org/abs/1608.06249> [Access 26.03.2020]
9. Sidirolglou S./ Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks// S. Sidirolglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229pp.
10. Anagnostakis K.G./ Shadow Honeypots// K.G. Anagnostakis, S. Sidirolglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16p.
11. Husak Martin. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats/ Martin Husak, Jan Vykopal// https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.04.2020]
12. Frank Yeong-Sung Lin/ Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet// Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages <https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/> [Access 10.04.2020]
13. Niels Provos/ A Virtual Honeypot Framework// Niels Provos. <http://www.citi.umich.edu/u/provos/papers/honeyd.pdf> [Access 12.04.2020]
14. Sai Sudha Gadde/ Securing Internet of Things (IoT) Using HoneyPots// Sai Sudha Gadde, Rama Krishna Srinivas Ganta, ASALG Gopala Gupta, Raghava Rao K, KRR Mohan Rao. International Journal of Engineering & Technology, 7 (2.7), 2018, pp.820-824.
15. Dahbul R./N. Enhancing Honeypot Deception Capability Through Network Service Fingerprinting// R.N. Dahbul, C. Lim, J. Purnama. International Conference on Computing and Applied Informatics 2019, Journal of Physics: Conf. Series 801 (2017) 012057
16. Surnin O./ Probabilistic Estimation of Honeypot Detection in Internet of Things Environment// O.Surnin, F. Hussain, R. Hussain, S. Ostrovskaya, A. Polovinkin, J.Y. Lee, X. Fernando. 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 18-21 Feb. 2019, 191-196pp.
17. Cheng Huang/ Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques// Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.
18. Husak Martin/ Survey of Attack Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security// Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Surveys & Tutorials – September 2018, https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

References

1. Savenko O.S. Model of the process of searching for Trojan programs in a personal computer / O.S. Savenko, S.M. Lysenko // Radio electronic and computer systems. - 2008. - №7. - P.87-92. (in Ukrainian)
2. Savenko O.S. Research of methods of antiviral diagnostics of computer networks / O.S. Savenko, S.M. Lysenko // Visnyk of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2007. - № 2, v. 2. - P. 120–126. (in Ukrainian)
3. Savenko O.S., Klots Y.P., Mostoviy S.V. Research and analysis of process blocking in a computer system // Visnyk of Khmelnytsky National University. - 2007. - № 3, Volume 1.- P.248-251. (in Ukrainian)
4. Savenko O.S., Payuk V.P., Savenko B.O., Kashatalyan A.S. Models of undocumented software bookmarks in local computer networks / Measuring and computing equipment in technological processes / 2019. - №2. - P.84-90.(in Ukrainian)
5. Sokol Pavol / Data Collection and Data Analysis in Honeypots and Honeynets// Pavol Sokol, Patrik Pekarčík, Tomáš Bajtoš. <http://spi.unob.cz/papers/2015/2015-19.pdf> [Access 18.04.2020].
6. Sochor Tomas/ Study of Internet Threats and Attack Methods Using Honeypots and Honeynets// Tomas Sochor, Matej Zuzcak - Springer International Publishing Switzerland 2014, A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): CN 2014, CCIS 431, pp. 118–127, 2014.
7. Sochor Tomas. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection// Tomas Sochor, Matej Zuzcak – Springer International Publishing Switzerland 2015, P.Gaj at al. (Eds.): CN 2015, CCIS 522, pp. 69-81, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19419-6 7.
8. Nawrocki Marcin/ A Survey on Honeypot Software and Data Analysis// Marcin Nawrocki, Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, Christian Keil, Jochen Schönfelder. arXiv:1608.06249v1 [cs.CR] 22 Aug 2016 - <https://arxiv.org/abs/1608.06249> [Access 26.03.2020]
9. Sidirolglou S./ Composite Hybrid Techniques for Defending Against Targeted Attacks// S. Sidirolglou, A.D. Keromytis. Part of the Advanced in Information Security book series (ADIS, volume 27), 2007, 213-229pp.
10. Anagnostakis K.G./ Shadow Honeypots// K.G. Anagnostakis, S. Sidirolglou, M. Polychronakis, A.D. Keromytis, P. Markatos. International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 9, September 2010, 16p.
11. Husak Martin. POSTER: Dragging Attackers to Honeypots for Effective Analysis of Cyber Threats/ Martin Husak, Jan Vykopal// https://is.muni.cz/repo/1188174/POSTER-Dragging_Attackers_to_Honeypots_for_Effective_Analysis_of_Cyber_Threats.pdf [Access 30.04.2020]
12. Frank Yeong-Sung Lin/ Effective Proactive and Reactive Defense Strategies against Malicious Attacks in a Virtualized Honeynet// Frank Yeong-Sung Lin, Yu-Shun Wang, Ming-Yang Huang. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 518213, 11 pages <https://www.hindawi.com/journals/jam/2013/518213/> [Access 10.04.2020]
13. Niels Provos/ A Virtual Honeypot Framework// Niels Provos. <http://www.citi.umich.edu/u/provos/papers/honeyd.pdf> [Access 12.04.2020]
14. Sai Sudha Gadde/ Securing Internet of Things (IoT) Using HoneyPots// Sai Sudha Gadde, Rama Krishna Srinivas Ganta, ASALG Gopala Gupta, Raghava Rao K, KRR Mohan Rao. International Journal of Engineering & Technology, 7 (2.7), 2018, pp.820-824.
15. Dahbul R./N. Enhancing Honeypot Deception Capability Through Network Service Fingerprinting// R.N. Dahbul, C. Lim, J. Purnama. International Conference on Computing and Applied Informatics 2019, Journal of Physics: Conf. Series 801 (2017) 012057
16. Surnin O./ Probabilistic Estimation of Honeypot Detection in Internet of Things Environment// O.Surnin, F. Hussain, R. Hussain, S. Ostrovskaya, A. Polovinkin, J.Y. Lee, X. Fernando. 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 18-21 Feb. 2019, 191-196pp.
17. Cheng Huang/ Automatic Identification of Honeypot Server Using Machine Learning Techniques// Cheng Huang, Jiaxuan Han, Xing Zhang, Jiayong Liu. Hindawi, Security and Communication Networks Volume 2019, Article ID 2627608, 8 pages.
18. Husak Martin/ Survey of Attack Projection, Prediction, and Forecasting in Cyber Security// Martin Husak, Jana Komarkova, Elias Bou-Harb, Pavel Celeda. IEEE Communication Surveys & Tutorials – September 2018, https://www.researchgate.net/publication/327449459_Survey_of_Attack_Projection_Prediction_and_Forecasting_in_Cyber_Security [Access 12.05.2020]

Надійшла / Paper received: 12.05.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 620.91

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-17

МАРТИНЮК В. В., РАДЕЛЬЧУК Г. І.,
КАШТАЛЬЯН А. С., ВЕРЖБИЦЬКИЙ Я. В.
Хмельницький національний університет

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК У ДИЗЕЛЬНЕ ПАЛИВО

У роботі проаналізовано систему автономного електроживлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо. Для більшої ефективності використання мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо використовується система автономного електроживлення постійного та змінного струму на основі відновлювальних джерел енергії у різних режимах її функціонування. Особливістю системи автономного електроживлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо є збільшення кількості генерованої електричної енергії фотоелектричних модулів (ФМ) за рахунок відслідковування їх точки максимальної потужності та позиціонування ФМ під прямим кутом до сонячного випромінювання.

Keywords: система автономного електроживлення, мобільна установка переробки пластикових пляшок у дизельне паливо, фотоелектричні модулі, точка максимальної потужності.

MARTYNYUK V., RADELCHUK G.,
KASHTALYAN A., VERJBYCKYI Y.
Khmelnitsky national university

SYSTEM ANALYSIS AND SIMULATION OF ELECTRIC POWER PROCESSES OF AUTOMATED MOBILE PLASTIC BOTTLE PROCESSING PLANT IN DIESEL FUEL

The paper analyzes the system of autonomous power supply of a mobile unit for processing plastic bottles into diesel fuel. For greater efficiency of use of the mobile installation of processing of plastic bottles into diesel fuel systems of autonomous power supply of direct and alternating current on the basis of renewable energy sources in various modes of its functioning are used. A feature of the autonomous power supply system of a mobile plastic bottle to diesel fuel processing plant is the increase in the amount of generated electric energy of photovoltaic modules (FM) by tracking their maximum power point and positioning the FM at right angles to solar radiation.

Keywords: autonomous power supply system, mobile installation for processing plastic bottles into diesel fuel, photovoltaic modules, maximum power point.

Вступ. Хмельницький національний університет активно співпрацює з компанією «Оболонь Ойл» в рамках спільної угоди про наукову співпрацю. Основним напрямком наукової співпраці є розробка системи електроживлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо компанії «Оболонь Ойл».

Компанія «Оболонь Ойл» вже 10 років розвиває технологію отримання полідизеля під назвою «полієвродизель» за власною запатентованою технологією. Цей продукт є «зеленим» заміником традиційного дизеля, адже для його виробництва не потрібно добувати і переробляти нафту. Натомість, мобільна установка «Оболонь Ойл» використовує для виробництва палива важкі для переробки і повторного використання полімерні відходи: поліетиленове пакування і мішки, каністри, пластикові ящики і пляшки.

Рішення від «Оболонь Ойл» скорочує викиди парникових газів та можливих токсичних продуктів горіння пластику: відходи перетворюються на полієвродизель і синтез-газ. На виході установки – 60 % фракції полієвродизеля та біля 40 % синтез-газу. Попутний газ замінятиме традиційний для двигунів внутрішнього згорання. А виробництво палива зі сміття не тільки прибирає пластикові відходи, але й скорочує енергетичний та вуглецевий слід всього ланцюжка виробництва нафтопродуктів. Окрім того, полієвродизель є менш димним.

Компанія має власний полігон для сміття, звідки й отримує матеріал для переробки, а також співпрацює з підприємствами. Зокрема, ПрАТ «Оболонь» обмінює пластикові відходи від своєї діяльності на екологічне паливо для своєї агротехніки. Мобільна установка переробки пластикових пляшок у дизельне паливо компанії «Оболонь Ойл», яка зображена на рис. 1, є не тільки мобільною, але й автономною.

Основним недоліком мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо є необхідність використання електричної енергії для живлення електричних двигунів дробарки пластикових пляшок та хімічного реактора переробки пластикових пляшок у дизельне паливо. Для більшої ефективності використання мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо використовується система автономного електроживлення постійного та змінного струму на основі відновлювальних джерел енергії у різних режимах її функціонування.

Сьогодні інтенсивно досліджують, як теоретично так і експериментально, автономні системи енергозабезпечення з використанням відновлюваних джерел енергії для використання у різних географічних частинах світу [1-4]. Однак для віддалених регіонів, де проведення центральної електромережі є економічно недоцільним, оптимальним варіантом є використання системи автономного електроживлення, яка містить кілька джерел генерації електроенергії: поновлюваних, як правило ФМ, та традиційних - зазвичай ДГ [2, 3].

Серед основних причин, що спонукають вчених всього світу до таких досліджень є зменшення викидів парникових газів завдяки вдосконаленню методів виробництва електроенергії [1, 5]; забезпечення можливості електроживлення віддалених регіонів з урахуванням економічних (пов'язаних із вартістю дизельного палива) аспектів, надійності та забруднення навколишнього середовища [4–6]; забезпечення електроенергією сільських районів слаборозвинених країн [7]; надійне джерело енергії групи швидкого реагування у віддалених місцях стихійного лиха для живлення вакцинного холодильника, системи очищення води та базової системи супутникового зв'язку [8], що має великий потенціал для порятунку людських життів.



Рис. 1. Мобільна установка переробки пластикових пляшок у дизельне паливо компанії «Оболонь Ойл»

У публікаціях проводиться аналіз роботи продуктивності систем автономного електроживлення з урахуванням середньої погодинної інсоляції сонячного світла, температури навколишнього середовища та профіля потужності навантаження [3]. Розробляються математичні моделі, що можуть бути використані для оцінки розміру, контролю та оцінки працездатності систем автономного електроживлення, що містить ФМ, ДГ та АБ [3, 5].

В роботі [6] вивчають поведінку АБ під впливом змінного освітлення ФМ, а ДГ використовується як резервне джерело енергії, коли потужності ФМ недостатньо. В літературі, в основному, проводяться дослідження систем автономного електроживлення невеликої потужності (до декількох кВт), які мають як постійну так і змінну вихідну напругу живлення [7–9].

У публікаціях щодо систем автономного електроживлення практично відсутній системний аналіз та моделювання процесів та методів збільшення ефективності відбору енергії від ФМ, компенсації струмів пікових (стартових) навантажень, балансування, контроль робочої температури та багатостадійний заряд АБ для довговічності їх експлуатації. Всі ці наукові проблеми вимагають поглиблених досліджень.

Структурної схеми системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо

Система живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо, побудована на основі перетворення сонячної енергії в електричну. Система складається з п'яти основних компонентів: фотоелектричні модулі, контролер заряду, інвертор, акумуляторна батарея та суперконденсаторна батарея.

Дані компоненти необхідні для безперебійного функціонування мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо.

Сукупність ФМ виступає в ролі ключового елементу у системі трансформації сонячного випромінювання в електроенергію. З'єднані разом, фотоелектричні модулі формують масив, розмір якого визначає кількість енергії, що виробляється системою в цілому.

Контролер заряду – один з принципово важливих приладів, що входять до переліку складових системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо. Він регулює напругу, що генерується масивом ФМ і контролює правильність та ефективність заряду акумуляторної батареї – запобігає підвищеного або заниженого рівня заряду.

Акумуляторна батарея призначена для накопичення та зберігання енергії, що виробляється ФМ. В системі живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо використовуються

спеціалізовані акумуляторні батареї, що мають багаторічний термін експлуатації. Компенсація пікових навантажень системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо є надзвичайно важливою для раціонального використання акумуляторної батареї.

Сучасні пристрої, такі, як системи керування електродвигунами, пускові пристрої та блоки безперебійного живлення, характеризуються значними піковими струмами, які створюють важкий режим роботи кіл живлення та акумуляторних батарей. Це призводить до значного скорочення строку їх експлуатації. Для перетворення постійного струму в змінний використовується інвертор з синусоїдальною формою вихідного сигналу з потужності 4 кВт.

На рис. 2 зображена структурна схема системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо. Для такої системи, вся електроенергія виробляється сонячними батареями, а в ніч і похмуру погоду – відбувається розряд акумуляторів. Передбачається, що потужності сонячних батарей достатня для живлення навантаження і зарядки акумуляторів.

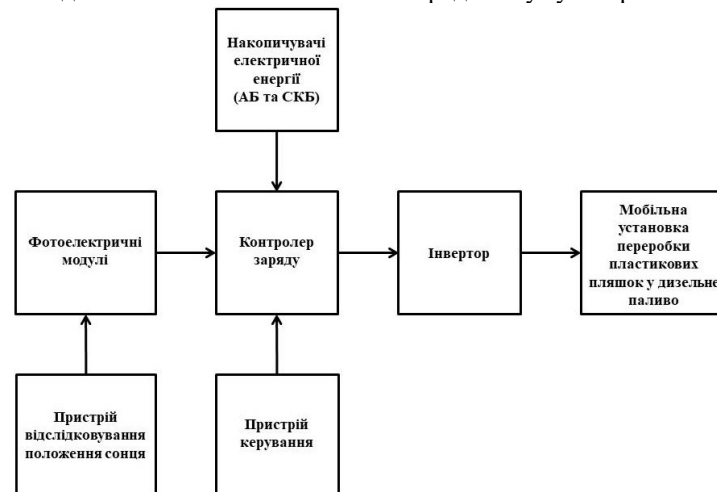


Рис. 2. Структурна схема системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо

Імітаційна модель системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо

Імітаційна модель системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо зображена на рис. 3. Модель описує процеси, які відбуваються за умов наявності в мережі різних типів навантажень.

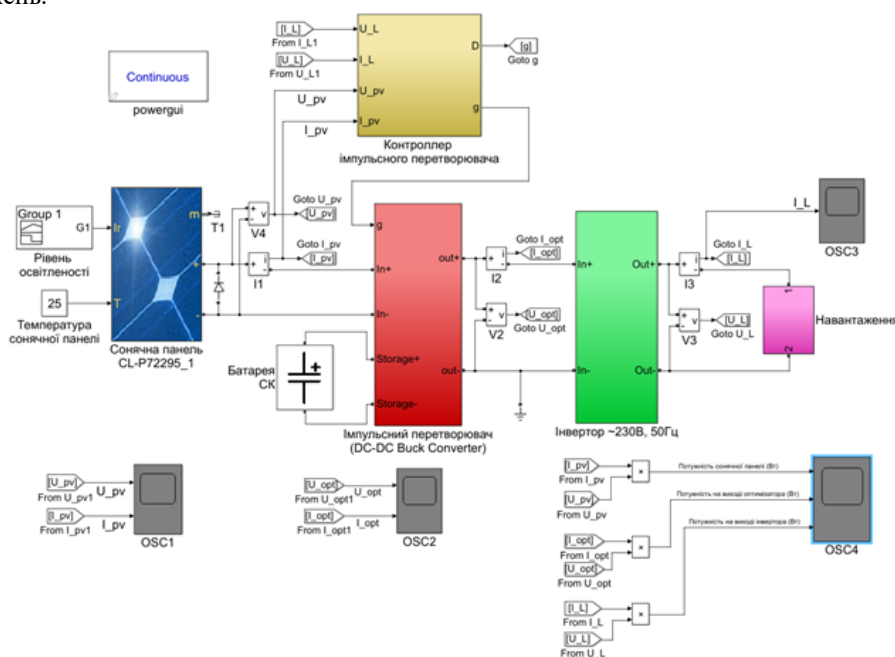


Рис. 3. Імітаційна модель системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо

Приведена імітаційна модель дає можливість підвищити ефективність роботи системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо за рахунок розширення можливостей

аналізу перехідних процесів при наявності нелінійного нестабільного навантаження. У моделі передбачена можливість безпосереднього відлагодження алгоритму відслідковування точки максимальної потужності сонячного модуля у вигляді функції MATLAB, яка може бути перетворена у двійновий код для контролера імпульсного перетворювача.

Імпульсний перетворювач та контролер імпульсного перетворювача, входять до складу оптимізатора, що призначений для відслідковування точки максимальної потужності сонячної панелі та підвищення ефективності передачі енергії від сонячної панелі до навантаження. Імпульсний перетворювач побудований на основі транзисторного ключа, двох захисних діодів та вихідного фільтра на елементах L1, C1. Керування перетворювачем здійснюється сигналом g, який подається від контролера перетворювача.

Алгоритм керування контролером імпульсного перетворювача задається безпосередньо, у вигляді функції на мові MATLAB, вхідними даними якої є струми і напруги сонячної панелі та навантаження. На основі оцінки робочої точки сонячної панелі та ступеня її узгодженості з навантаженням формується сигнал керування, який подається на генератор ШІМ-сигналу, який керує комутацією транзисторного ключа імпульсного перетворювача.

З виходу оптимізатора (імпульсного перетворювача) електрична енергія подається на вхід інвертора. Інвертор здійснює перетворення напруги, яка подається з оптимізатора у форму, стандартну для мережі змінного струму із середньоквадратичною амплітудою 220В та частотою гармонічних коливань 50Гц. Інвертор побудований за мостовою схемою, до якої входять чотири ключі на транзисторах з ізолюваним переходом (IGBT).

Форму напруги на виході інвертора задає ШІМ-генератор, який подає відповідні сигнали керування до чотирьох транзисторних ключів. На виході інвертора розташований LC-фільтр, призначений для згладжування форми вихідної напруги та трансформатор, який забезпечує на виході необхідну амплітуду 325,2В.

Таким чином, запропонована імітаційна модель еквівалента нелінійного нестабільного навантаження дозволяє проводити аналіз ефективності системи живлення мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо.

Висновки. В роботі проведено аналіз та моделювання система живлення автоматизованої мобільної установки переробки пластикових пляшок у дизельне паливо. Така система дозволяє відчутно збільшити продуктивність сонячної системи, постійно відстежуючи точку максимальної потужності кожного сонячного модуля, та характеризується перевагами:

- а) мінімізація споживання енергії на керування двокоординатного поворотного механізму для позиціонування сонячної батареї за рахунок виключення процесу пошуку Сонця за хмарами;
- б) можливість функціонування автоматизованої системи безперервного стеження за Сонцем для фотоелектричних установок на сонячних батареях при повній хмарності;
- в) розроблена автоматизована система безперервного стеження за Сонцем дозволяє контролювати необхідне положення сонячної панелі при дії на неї зовнішніх факторів (вітру, граду і т.д.).

Література

1. Григораш О.В., Степура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 272 с.
2. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат. – 2008. – 231 с.
3. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КНОРУС, 2010. – 232 с.
4. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. и др. Возобновляемые источники электроэнергии: ермины, определения, достоинства и недостатки// Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – №32. – С. 189 – 192.
5. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2008. – 187 с.
6. Амерханов Р.А., Богдан А.В., Вербицкая С.В., Гарькавый К.А. Проектирование систем энергообеспечения: Учебник для студентов вузов / Под общ. ред. Р.А. Амерханова– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 548 с.
7. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. – Краснодар. – 2011. – 188 с.
8. Григораш О.В. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае/ О.В. Григораш, В.В. Тропин, А.С. Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар, 2012. – №09(083). С. 188 – 199. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.
9. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плутников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – 128 с.

References

1. Hryhorash O.V., Stepura Yu.P., Suleimanov R.A. y dr. Vozobnovliaemye ystochnyky elektroenerhyy. – Krasnodar: KubHAU, 2012. – 272 s.
2. Lukutyn B.V., Surzhykova O.A., Shandarova E.B. Vozobnovliaemaia enerhetyka v detsentralyzovannom elektrosnabzhenyy. – M.: Enerhoatomyzdat. – 2008. – 231 s.

3. Sybykyn Yu.D., Sybykyn M.Iu. Netradytsionnye y vozobnovliaemye ystochnyky enerhyu. – M.: KNORUS, 2010. – 232 s.
4. Hryhorash O.V., Stepura Yu.P., Uskov A.E. y dr. Vozobnovliaemye ystochnyky elektroenerhyu: ermyuny, opredeleniya, dostoynstva y nedostatky// Труды Kubanskoho gosudarstvennoho ahrarnoho unyversyteta. – 2011. – №32. – S. 189 – 192.
5. Lukutyn B.V. Vozobnovliaemye ystochnyky elektroenerhyu: uchebnoe posobyе. – Tomsk: Yzd-vo Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta. – 2008. – 187 s.
6. Amerkhanov R.A., Bohdan A.V., Verbytskaia S.V., Narkavyy K.A. Proektyrovanye system enerhoobespecheniya: Uchebnyk dlia studentov vuzov / Pod obshch. red. R.A. Amerkhanova– 2-e yzd., pererab. y dop. – M.: Enerhoatomyzdat, 2010. – 548 s.
7. Hryhorash O.V., Stepura Yu.P., Uskov A.E. Statycheskye preobrazovately y stabylizatory avtonomnykh system elektrosnabzheniya. – Krasnodar. – 2011. – 188 s.
8. Hryhorash O.V. Ob effektivnosti y tselesoobraznosti yspolzovaniya vozobnovliaemykh ystochnykov elektroenerhyu v Krasnodarskom krae/ O.V. Hryhorash, V.V. Tropyn, A.S. Oskyna // Polytematycheskyi setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskoho gosudarstvennoho ahrarnoho unyversyteta (Nauchnyi zhurnal KubHAU) [Elektronnyi resurs]. – Krasnodar: KubHAU, 2012. – №09(083). S. 188 – 199. – Rezhym dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.
9. Lukutyn B.V., Muravlev Y.O., Plotnikov Y.A. Systemy elektrosnabzheniya s vetrovyymy y solnechnymy elektrostantsiyamy. – Tomsk: Yzd-vo Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta. – 2015. – 128 s.

Надійшла / Paper received: 17.01.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ В ХОДІ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ

В роботі розглянуті питання підвищення ефективності системи фазової синхронізації фазокогерентних систем телекомунікації і управління в радіотехнічних пристроях. А саме, подано результати синтезу та аналізу схеми побудови комбінованої системи фазової синхронізації при умові зменшення сталих динамічних похибок в ході стеження за несучою частотою, фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом. В результаті досліджень встановлено, що синтез розімкнутого каналу в комбінованих системах синхронізації дозволяє реалізувати їх по інваріантним схемам, які забезпечують зменшення сталих динамічних похибок шляхом підвищення порядку астатизму. Застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора, дозволяє підвищити порядок астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку. Розімкнутий канал виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок частотного дискримінатора з запропонованою в роботі передавальною функцією дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вище порядку та не впливає на стійкість системи. Проведений в роботі аналіз запропонованих схем показав, що впливу на дисперсію фазової помилки системи синхронізації можна досягнути зміною параметрів ланки розірваного зв'язку схеми побудови вказаної системи.

Ключові слова: синхронізація несучої частоти, замкнута система синхронізації, комбінована система синхронізації, синтез розірваного зв'язку, порядок астатизму.

TUROVSKY O.
State University of Telecommunications

EVALUATION OF POSSIBILITIES TO IMPROVE WORK EFFICIENCY SYSTEMS OF SYNCHRONIZATION OF A RADIO TECHNICAL DEVICE DURING CARRIER FREQUENCY TRACKING

The successful solution of the problem of further improving the efficiency of communication systems largely depends on the quality of operation of systems and devices that are part of them. Phase synchronization systems are widely implemented in various radio engineering devices of communication, radar and control technology, as well as in the device of precise magnetic recording. In particular, in phase-coherent telecommunications and control systems, they are used to restore the carrier and clock frequencies and for coherent demodulation of analog and digital signals with angular modulation.

The issues of increasing the efficiency of the phase synchronization system of phase-coherent telecommunication and control systems in radio engineering devices are considered in the work. Namely, the results of synthesis and analysis of the scheme of construction of the combined system of phase synchronization under the condition of reduction of constant dynamic errors during monitoring of the carrier frequency, the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal are presented. As a result of research it is established that the synthesis of the open channel in the combined synchronization systems allows to realize them on invariant schemes which provide reduction of constant dynamic errors by increase of the order of astatism. The use as an open communication frequency discriminator, allows to increase the order of astatism of the combined system synchronization system to the second order. The open channel is made in the form of parallel (serial) connection of two links of the frequency discriminator with the proposed transfer function allows to increase the order of astatism to the third and higher order and does not affect the stability of the system. The analysis of the proposed schemes showed that the effect on the phase error dispersion of the synchronization system can be achieved by changing the parameters of the broken link of the scheme of construction of the specified system.

Keywords. carrier frequency synchronization, closed synchronization system, combined synchronization system, broken link synthesis, astatism order.

Вступ. Наукові дослідження проблем передачі даних, пошук шляхів і методів підвищення ефективності використання засобів зв'язку, є надзвичайно важливими для вирішення завданнями, що стоять перед сучасними системами зв'язку та телекомунікації.

Успішне вирішення завдання подальшого підвищення ефективності систем зв'язку багато в чому залежить від якості функціонування систем і пристроїв, що входять до їх складу. У різні радіотехнічні пристрої техніки зв'язку, радіолокації і управління а також в пристрої точного магнітного запису широко впроваджені системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах телекомунікації і управління вони застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1].

Робота систем синхронізації характеризується впливом ряду збурень та шумів на їх роботу. А саме адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (в разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та інших [2, 3]. У ряді випадків необхідно забезпечити високу точність роботи системи в сталому і перехідному режимах.

Так, наприклад, в лініях космічного зв'язку основними збуреннями є адитивний гауссовський шум і доплерівські зміщення частоти.

Тому системи синхронізації, що працюють в таких умовах, повинні характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією.

Постановка задачі. Питання підвищення якості функціонування комбінованої системи фазової синхронізації (КСС) є постійними важливими науковими завданнями і в ряді досліджень вирішуються методом створення відповідних оптимальних схем їх побудови в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки та одночасно, забезпечення високої швидкодії. Вказані схеми вирішують питання мінімізації фазової помилки через розробку науково обґрунтованих оптимальних схем побудови, які функціонують на основі розроблених математичних моделей. Вказані математичні моделі, в свою чергу, повинні враховувати параметри всіх функціональних складових ланок і елементів вказаної схеми системи синхронізації. А кінцевою метою їх розробки є обґрунтування схеми побудови, яка може забезпечити малу дисперсію фазової помилки в ході стеження за несучою частотою при забезпеченні високої швидкодії вказаної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначене в роботі [4] наукове завдання та подані результати його вирішення показують, що одним з шляхів вирішення завдання по підвищенню ефективності роботи системи синхронізації в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки є удосконалення її схеми побудови. Подані в даній роботі результати дають змогу оцінити вплив значень дробового інтервалу інтерполяції інформаційно-управляючої системи на величину помилки пристрою синхронізації та провести оцінку помилки за констеляційною діаграмою, оцінити джитер за розкритом око-діаграми і зміну завадостійкості при фіксованому значенні ймовірності бітової помилки. Питання синтезу схеми побудови пристрою синхронізації в даній роботі не розглядалися.

У наукових роботах [3, 5, 6] описані дослідження, спрямовані в основному на оптимізацію параметрів фільтра і системи в цілому для класу замкнутих систем синхронізації (ЗСС). Однак ЗСС через властивих їм протиріч не дозволяють в ряді випадків забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи по двом і більше суперечливим показникам.

Проведений аналіз ЗСС показав, що при обліку адитивного гаусівського шуму і нестабільності генераторів, прагнення мінімізувати дисперсію фазової помилки в класі ЗСС викликає погіршення динаміки системи та не дозволяє збільшити порядок астатизму.

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих систем синхронізації (КСС), які можуть поєднувати принципи регулювання по відхиленню і збуренню, що визначалось в якості перспективних методів в роботах [1, 7]. Однак можливості КСС різного типу на сьогоднішній день мало досліджені.

У даній роботі розглядалися саме особливості синтезу розімкненого зв'язку при зменшенні сталих динамічних похибок і мінімізації дисперсії фазової помилки під час стеження за несучою частотою. Безпосередньо зменшення сталих динамічних похибок системи пов'язано з порядком її астатизму, тобто підвищення останнього приводить до зменшення вказаних похибок.

Таким чином, розробка науково обґрунтованої схеми побудови системи синхронізації та оцінка її можливості щодо мінімізації фазової помилки в ході стеження за несучою частотою є актуальною науковою задачею, рішення якої присвячена дана стаття.

Основна частина. Структурна схема лінійної моделі системи синхронізації КСС, яка розглядалась в роботі, зображена на рис. 1. До складу вказаної моделі КСС входить додаткова ланка з передавальною функцією, за допомогою якої здійснено розімкнений зв'язок та утворено розімкнутий канал управління [7].

Користуючись вище запропонованою моделлю КСС, вирішимо завдання підвищення ефективності її роботи шляхом синтезу розімкненого зв'язку з умови підвищення порядку астатизму, при стеженні за несучою частотою (пілот – сигналом), фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом, а впливом шуму можна знехтувати. Таке завдання виникає, наприклад, в апаратурі багатостанційного доступу, коли опорна станція супутникового зв'язку передає сигнал синхронізації (кодове слово), а усі інші станції на цьому інтервалі передають сигнали з не модульованими несучими. Розгляд та синтез КСС з розімкненим зв'язком проводився при умові підвищення порядку астатизму.

Розглянемо КСС з розімкненим зв'язком при умові підвищення порядку астатизму. Структурна схема комбінованої системи синхронізації КСС зображена на рис. 1. Де $W_4(S)$ – передавальна функція ланки, що синтезується.

У відповідності до схеми рис. 1 запишемо рівняння динаміки КСС [6]:

$$\Phi(S) = \Phi_{\text{вх}}(S) - \Phi_{\text{вих}}(S), \quad \Phi_{\text{вих}}(S) = W_3(S)\Sigma(S), \quad \Sigma(S) = W_4(S)\Phi_{\text{вх}}(S) + W_1(S)W_2(S)\Phi(S).$$

Якщо виключити проміжні змінні, отримаємо рівняння динаміки КСС щодо помилки:

$$[1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)]\Phi(S) = [1 - W_3(S)W_4(S)]\Phi(S), \quad (1)$$

звідки випливає умова абсолютної інваріантності [9]: $1 - W_3(S)W_4(S) = 0$.

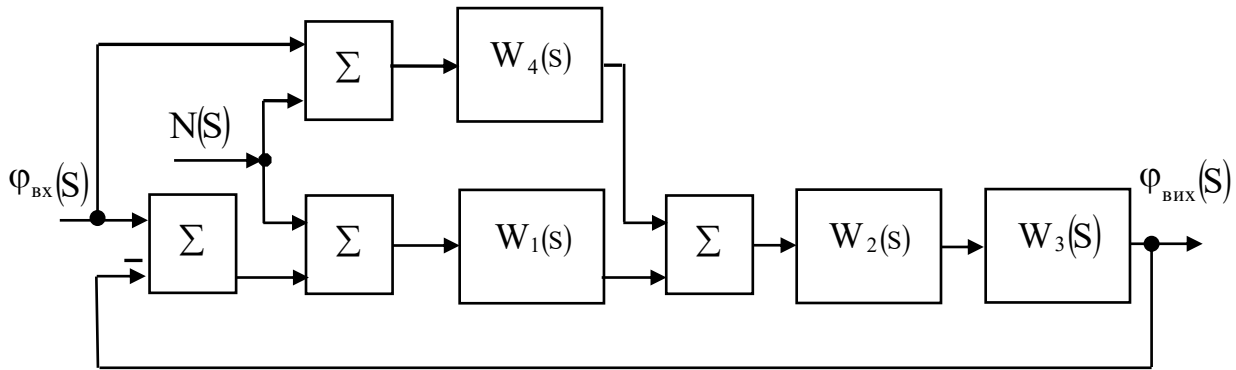


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою

З огляду на те, що $W_i(s) = D_i(s)/F_i(s)$, перепишемо рівність (1) наступним чином:

$$\begin{aligned} [F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s)\varphi(s) = \\ = [F_3(s)F_4(s) - D_3(s)D_4(s)]F_1(s)F_2(s)\varphi_{\text{вх}}(s) \end{aligned} \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що знаменник передавальної функції розімкнутого каналу $F_4(s)$ входить в характеристичне рівняння КСС (2) у вигляді співмножника

$$F_k(s) = [F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s) = F_3(s)F_4(s)$$

де $F_3(s) = F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)$ – характеристичний поліном КСС.

Тому розімкнений зв'язок не впливає на стійкість системи [8].

Наявність різниці в правій частині рівняння динаміки КСС (2) дозволяє за рахунок відповідного вибору поліномів $D_4(s)F_4(s)$ впливати як на сталу, так і на перехідну складові помилки [7, 8].

З виразу (2) видно, що для досягнення абсолютної інваріантності в системі, передавальна функція розімкнутого каналу повинна мати наступний вигляд:

$$W_4(s) = 1/W_3(s) = F_3(s)/D_3(s) = D_4(s)/F_4(s) \quad (3)$$

Звідси випливає, що порядок полінома $D_4(s)$ повинен бути вище порядку полінома $F_4(s)$, що неможливо з умов фізичної реалізації [7,8].

Таким чином, досягнення абсолютної інваріантності в неперервних системах за допомогою ланок або обчислювальних пристроїв неперервного типу неможливе. Проте, введення в розімкнутий канал системи фізично реалізованих ланок $W_4(s)$, дозволяє підвищити порядок астатизму системи і синтезувати $\mathcal{E}$ – інваріантні системи [9].

Як впливає з розглянутих вище прикладів, для зменшення сталої помилки необхідно підвищувати порядок астатизму системи. Причому значення, до якого ми прагнемо при синтезі системи, визначається характером зміни вхідного впливу і вимогами до точності системи в сталому режимі [9].

Запишемо в загальному вигляді передавальну функцію фізично реалізованого розімкнутого зв'язку:

$$W_4(s) = \left(\sum_{i=0}^n K_{4i} s^i \right) / \left(\sum_{j=0}^m T_{4j} s^j \right) = D_4(s)/F_4(s), \quad m \geq n. \quad (4)$$

Порядок астатизму системи V визначається ступенем оператора S , що є загальним множником чисельника передавальної функції по помилці [9].

Передавальна функція по помилці КСС відповідно до рівняння (2):

$$W_{\varphi K}(s) = \frac{[F_3(s)F_4(s) - D_3(s)D_4(s)]F_1(s)F_2(s)}{[F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s)} = \frac{D_{\varphi K0}(s)S^{v_K}}{F_K(s)}. \quad (5)$$

Підставивши в вираз (5) вираз (4) і заклавши вимогу, щоб система мала астатизм порядку $v_K=1$, отримаємо вираз для чисельника передавальної функції, яка визначається виразом:

$$D_{\Phi K}(S) = \left[F_3(S) \sum_{j=0}^m T_{4j} S^j - D_3(S) \sum_{i=0}^n K_{4i} S^i \right] F_1(S) = D_{\Phi K0}(S) S^l. \quad (6)$$

Завдання зводиться до вибору коефіцієнтів K_{4i} і T_{4j} передавальної функції розімкнутого каналу таким чином, щоб поліном $D_{\Phi K}(S)$ містив S^l в якості загального множника.

Необхідно відзначити, що поліном $F_4(S)$ входить до характеристичного рівняння комбінованої системи синхронізації. Тому область зміни параметрів T_{4j} обмежена вимогами до якості перехідного процесу.

Якщо порядок вищої похідної вхідного сигналу r і потрібно усунути усталену помилку, то повинна виконуватись нерівність $l > r$.

Загальний вигляд передавальної функції $W_4(S)$ розімкнутого зв'язку, що задовольняє умові виразу (4) і забезпечує $V_k = 1$ визначається виразом [9]:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=V_3}^n K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^m T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S), \quad (7)$$

де V_3 – порядок астатизму вихідної системи без зв'язку.

Зазвичай беруть $m = n$. Вища ступінь поліномів $D_4(S)$ і $F_4(S)$ буде $V_3 + \Delta v - 1 = m$

де $\Delta v = 1 - V_3$ – величина, на яку необхідно підвищити порядок астатизму.

Отже, $m = l - 1$.

Оскільки порядок астатизму вихідної системи $V_3 = 1$, то вираз (7) буде:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=1}^{l-1} K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^{l-1} T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S). \quad (8)$$

Підставивши поліноми $D_4(S)$, $F_4(S)$ з (8) в (6) отримаємо

$$D_{\Phi K}(S) = (T_{40} - K_3 K_{41}) S + (T_{41} - K_3 K_{42}) S^2 + \dots + (T_{4(l-2)} - K_3 K_{4(l-1)}) S^{(l-1)} + (T_{4(l-1)}) S^l \quad (9)$$

З виразу (9) з урахуванням виразу (6) отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{40} - K_3 K_{41}, \\ T_{41} - K_3 K_{42}, \\ \dots, \\ T_{4(l-2)} - K_3 K_{4(l-1)} = 0 \end{array} \right\}.$$

Визначимо вид передавальної функції розімкнутого зв'язку для розглянутих вище випадків.

Порядок вищої похідної вхідного сигналу $r = 1$. Необхідний порядок астатизму $l = 2$. Вид передавальної функції розімкнутої зв'язку відповідно до виразу (8):

$$W_4(S) = (K_{41} S) / (T_{41} S + T_{40}) \quad (10)$$

Поліном (9) при цьому має вигляд:

$$D_{\Phi K}(S) = (T_{40} - K_3 K_{41}) S + T_{42} S^2$$

При виконанні умови $K_{41} = T_{40} / K_3$ отримаємо $D_{\Phi K}(S) = T_{41} S^2$, тобто застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора дозволяє підвищити порядок астатизму системи до другого порядку.

При $r = 2$; $l = 3$, вид передавальної функції $W_4(S)$ буде:

$$W_4(S) = (K_{42}S^2 + K_{41}S) / (K_{42}S^2 + T_{41}S + T_{40})$$

З виразу (9) отримаємо $T_{40} - K_3 K_{41} = 0$, $T_{41} - K_3 K_{42}$ тоді $D_{\phi k}(S) = T_{42}S^2$, тобто отримаємо систему синхронізації з астатизмом третього порядку.

Розімкнутий канал з такою функцією передачі може бути виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок з передавальної функцією виду (10).

Структурна схема комбінованої системи синхронізації КСС з розірваним каналом з включенням двох ланок, як варіант реалізації, зображена на рис. 2.

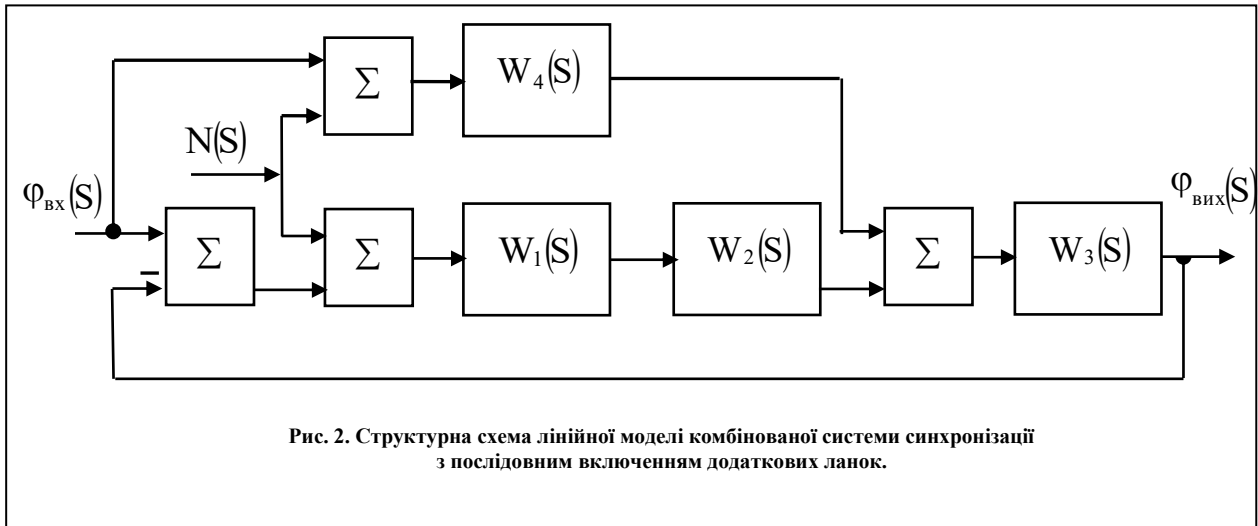


Рис. 2. Структурна схема лінійної моделі комбінованої системи синхронізації з послідовним включенням додаткових ланок.

Оцінка впливу ланки розімкненого зв'язку комбінованої системи синхронізації на дисперсію фазової помилки під час стеження за несучою частотою

Певні результати впливу параметрів розімкнутого зв'язку КСС на відносну дисперсію фазової помилки $\eta = \sigma_{\phi k}^2 / \sigma_{\phi 3}^2 = f(K_4, T_4)$ системи фазової синхронізації подані залежностях рис. 3 [10, 11]

$$\eta = \sigma_{\phi n}^2 / \sigma_{\phi 3}^2$$

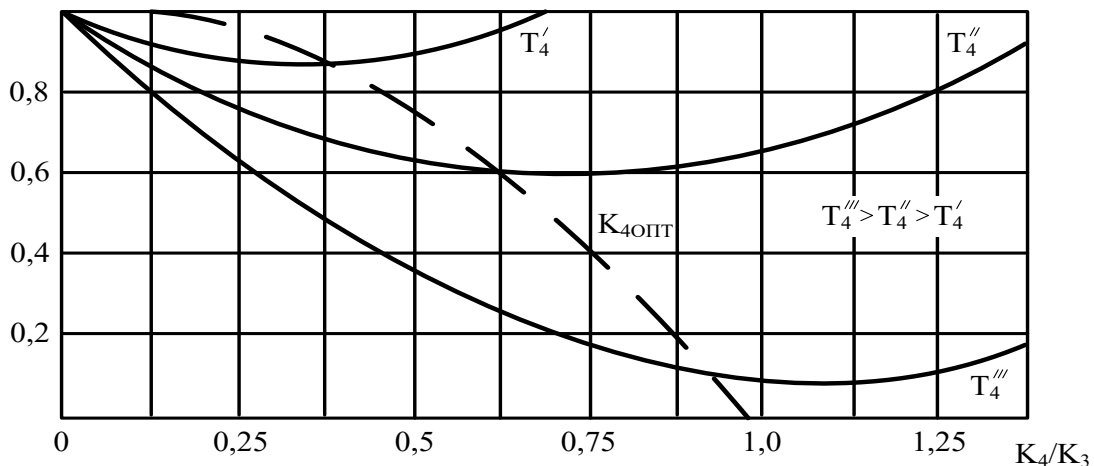


Рис. 3. Залежність дисперсії фазової помилки КСС від параметрів розімкнутого каналу

Їх аналіз показує, що збільшення параметра сталої часу T передавальної функції ланки розімкнутого зв'язку схеми синхронізації несучої частоти зменшує дисперсію фазової помилки $\delta_{\phi k}^2$ та викликає зміну оптимального параметра коефіцієнт підсилення фазового дискримінатора K .

Висновки. Аналіз результатів моделювання за допомогою запропонованих виразів показав, що ведення в розімкнутий канал комбінованої системи синхронізації фізично реалізованих ланок, дозволяє підвищити порядок астатизму системи і синтезувати інваріантні системи.

Застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора, дозволяє підвищити порядок астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку. Розімкнутий канал виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок частотного дискримінатора з запропонованою в роботі передавальною функцією дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вище порядку та не впливає на стійкість системи.

Впливу на дисперсію фазової помилки системи синхронізації можна досягнути зміною параметрів ланки розірваного зв'язку схеми синхронізації системи [12, 13].

Запропоновано в роботі аналітичні вирази можуть стати основою методики синтезу КСС при умові підвищення точності в сталому режимі.

Література

1. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. 2-е изд., перераб. и доп. / Б.И. Шахтарин. –Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. –360 с.
2. Mucchi L. Impact of synchronization errors and multiple access interference to the performance of UWB impulse radio systems / L. Mucchi, D. Marabissi, M. Ranaldi, E. Del Re and R. Fantacci // Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No.04TH8738). -Sydney, NSW, Australia, 2004. –PP. 477-483.
3. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. –Хмельницький, 2015. –№ 1. –С. 204–213.
4. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2017. – Вип. 1'(30). – С. 8–28.
5. Глухов А. В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем / А. В. Глухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. –Тамбов, 2013. –Том 19, № 4. – С.751-756.
6. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. 2010. –Boston: Prentice Hall. – 992 p.
7. Scheers B., Le Nir V. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions / B. Scheers, V. Le Nir // Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010). –Wroclaw, Poland, September 27–28, 2010. –PP.366–373.
8. Хоровиц П. Искусство схемотехники (в 3-х томах) / Хоровиц П., Хилл У. –М.: Мир, 1993.
9. Мисрихаиов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами / М.Ш. Мисрихаиов. –Москва: Энерготомиздат, 2003. – 236 с.
10. Marey M. Analysis of the Narrowband Interference Effect on OFDM Timing Synchronization / M. Marey, H. Steendam, // IEEE Transactions on Signal Processing. Sept. 2007. –Vol. 55, No. 9/ –PP. 4558-4566,
11. Turovsky O.L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise/ O.L. Turovsky // Technology audit and production reserves. 2020. –Vol 3, No 4. –PP. 16-22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.
12. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.
13. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.

References

1. Shakhhtar B.I. Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh. 2-ye izd., pererab. i dop. / B.I. Shakhhtar. –Moskva: Goryachaya liniya – Telekom, 2016. –360 s.
2. Mucchi L. Impact of synchronization errors and multiple access interference to the performance of UWB impulse radio systems / L. Mucchi, D. Marabissi, M. Ranaldi, E. Del Re and R. Fantacci // Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No.04TH8738). -Sydney, NSW, Australia, 2004. –PP. 477-483.
3. Boiko J. M. Otsynuvannya yakisnykh pokaznykh prystroyiv synkhronizatsiyi syhnaliv zasobiv telekomunikatsiy / Y. M. Boyko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. –Khmelnytsky, 2015. –№ 1. –S. 204–213.
4. Boiko J. M. Syntez i analiz informatsiyno-upravlyayuchykh system synkhronizatsiyi zasobiv telekomunikatsiy / Y. M. Boyko // Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnya : mizhvidom. nauch.-tekh. zb. Nats. tekhn. un-t Ukrainy "Kyiv. politekhn. in-t im. Ihorya Sikorskoho". – Kyiv, 2017. – Vyp. 1 – (30). – S. 8–28.
5. Glukhov A. V. Optimizatsiya parametrov tsifrovyykh fil'trov vysokoskorostnogo modulyatora dlya PLC-modemov / A. V. Glukhov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –Tambov, 2013. –Tom 19, № 4. – S.751-756.
6. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. 2010. –Boston: Prentice Hall. – 992 p.
7. Scheers B., Le Nir V. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions / B. Scheers, V. Le Nir // Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010). –Wroclaw, Poland, September 27–28, 2010. – PP. 366–373.
8. Khorovits P. Iskustvo skhemotekhniki (v 3-kh tomakh) / Khorovits P., Khill U. –М.: Mir, 1993.
9. Misrikhaiov M.S. Invariantnoye upravleniye mnogomernymi sistemami / M.S. Misrikhaiov. –Moskva: Energotomizdat, 2003. –236 s.
10. Marey M. Analysis of the Narrowband Interference Effect on OFDM Timing Synchronization / M. Marey, H. Steendam // IEEE Transactions on Signal Processing. Sept. 2007. –Vol. 55, No. 9/ –PP. 4558-4566,
11. Turovsky O.L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise/ O.L. Turovsky // Technology audit and production reserves. 2020. –Vol 3, No 4. –PP. 16-22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.

12. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.

13. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.

Надійшла / Paper received: 11.05.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 621.396.963
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-19

ЯНОВИЦЬКИЙ О. К., БАЙДИЧ Л. Е., ФОРКУН І. В.
Хмельницький національний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ВОДНЮ

Розглядаються питання регулювання величини кислотності електроліту в гальванічних ваннах автоматизованих автооператорних гальванічних ліній. Процедура відбору зразків розчинів електролітів та визначення рН проводиться працівниками хімічної лабораторії з ціллю подальшої корекції кислотного електроліту. В роботі пропонується автоматизація процесу регулювання концентрації іонів водню. Ідея заключається в тому, що за певний період часу автоматично проводиться вимір датчиком кислотності значення рН електроліту і визначається ΔpH . Це значення аналізується за допомогою мікропроцесора і видається команда на блок управління для здійснення корекції електроліту шляхом добавки відповідного коригуючого розчину. При трьохпозиційному регулюванні кислотності електроліту коли $pH_{вим} < pH_{min}$ включається блок коригуючого розчину, підвищується рН електроліту, в разі умови коли $pH_{вим} \geq pH_{max}$ включається інший блок коригуючого розчину. Підвищення точності регулювання кислотності забезпечує зниження витрати коригуючих розчинів, підвищення продуктивності автоматизованих автооператорних гальванічних ліній і підвищення якості виробів.

Ключові слова: гальванічне покриття, чутливий елемент активності іонів, аналого-цифровий перетворювач, блок управління, ежектор, розподільник потоку, магістраль рециркуляції електроліту, ванна електроліту, ванна промиваючого розчину, електромагнітний клапан.

YANOVITSKYI A., BAYDICH L., FORKUN I.
Khmelnytskyi national university

AUTOMATION OF THE PROCESS OF REGULATING THE CONCENTRATION OF HYDROGEN IONS

The issues of regulating the acidity of the electrolyte in galvanic baths of automated auto-galvanic lines are considered. The procedure of sampling electrolyte solutions and determining the pH is performed by employees of the chemical laboratory for the purpose of further correction of the acid electrolyte. The paper proposes automation of the process of regulating the concentration of hydrogen ions. The idea is that for a certain period of time the pH value of the electrolyte is automatically measured by the acidity sensor and the ΔpH is determined. This value is analyzed by a microprocessor and a command is issued to the control unit to correct the electrolyte electrolyte by adding an appropriate corrective solution. When adjusting the acidity of the electrolyte in three positions, when the $pH_{meas} < pH_{min}$ turns on the block of the correcting solution, the pH of the electrolyte increases, in the case when the $pH_{meas} \geq pH_{max}$ turns on another block of the correcting solution. Improving the accuracy of acidity control reduces the consumption of corrective solutions, increases the productivity of automated auto-galvanic lines and improves product quality.

Key words: galvanic coating, sensitive element of ion activity, analog-to-digital converter, control unit, ejector, flow distributor, electrolyte recirculation line, electrolyte bath, washing solution bath, solenoid valve.

Вступ. Для підвищення якості гальванічного покриття, з більшості електролітів, важливо підтримувати оптимальне значення рН розчинів. Процедуру відбору зразків розчинів електролітів та визначення концентрації іонів гідрогену (яка змінюється в часі) проводять працівники хімічної лабораторії за певною методикою з використанням різних пристроїв [1].

В роботі пропонується автоматичний пристрій регулювання рН розчинів електролітів з підвищеною надійністю і точністю.

Основна частина. Пристрій автоматичного процесу регулювання концентрації іонів водню показаний на блок-схемі (рис. 1), на рис. 2 приведена структурна схема блока управління пристроєм.

Пристрій регулювання концентрації іонів водню містить ванну ВЕ з електролітом, блок БУ управління, датчик ДК кислотності з поміщеними в нього чутливими елементами, всмоктувальну трубу ТЕ електроліту, всмоктувальну трубу ТР промивного розчину, ванну ВПР з промивним розчином, розподільник РП потоку, сифон СЗ сливу електроліту, ежектор Е1, всмоктувальну трубу ВТЕ1 ежектора, нагнітаючу трубу НТ1, всмоктувальну трубу ВТД, електромагнітний клапан ЕК1, блок БПР подачі коригуючого розчину, магістраль МРЕ рециркуляції електроліту, насос НР рециркуляції.

Блок БПР подачі коригуючого розчину містить ванну ВКР з коригувальним розчином, ежектор Е2, електромагнітний клапан ЕК, всмоктувальну трубу ВТЕ2, нагнітаючу трубу НТ2 ежектора Е2, трубу ТЗ сливу коригуючого розчину.

Розподільник РП потоку містить два електромагнітних клапана ЕК2 і ЕК3. Клапан ЕК2 в знеструмленому стані закритий, а клапан ЕК3 відкритий, тобто ванна ВЕ з електролітом відключена, а ванна ВПР з промивним розчином підключена до датчика ДК кислотності. При подачі напруги на обмотки клапанів ЕК2 і ЕК3 ванна ВПР з промивним розчином відключається, а ванна ВЕ з електролітом

підключається до датчика ДК кислотності. Залежно від складу робочого електроліту в ванні ВЕ, технологічного процесу, закону регулювання кислотності електроліту пристрій може містити один, два або більше блоків подачі коригувальних розчинів (наприклад, блоки БПР₁,...,БПР_n).

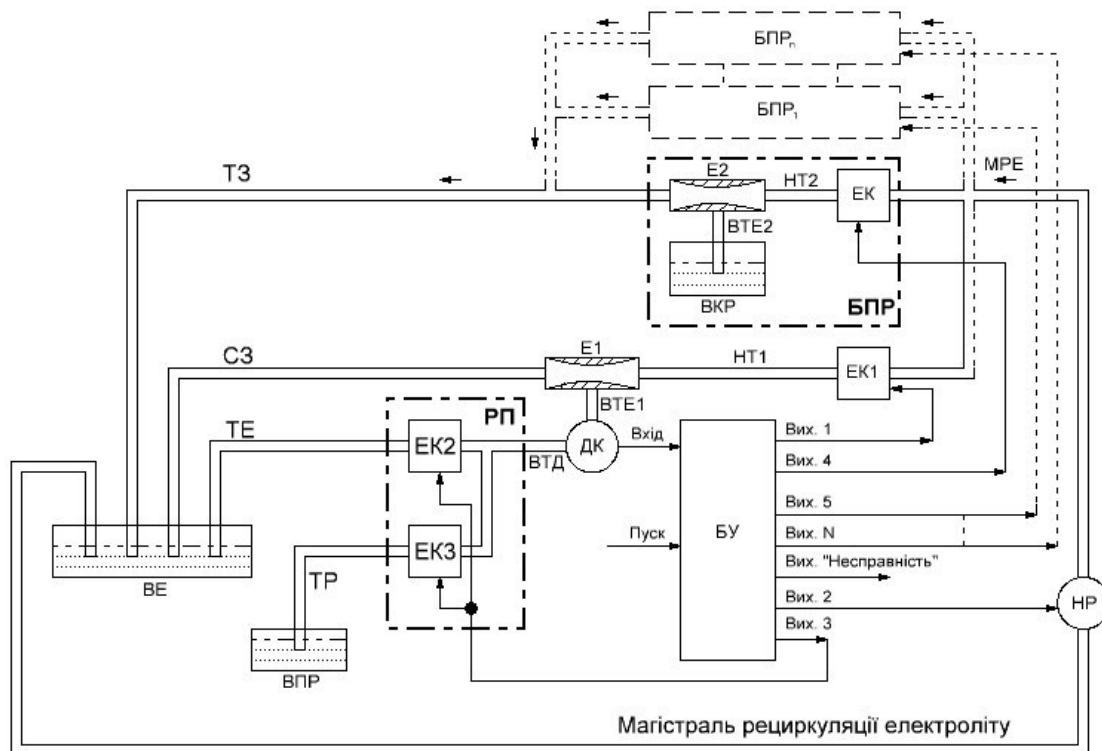


Рис. 1. Блок схема пристрою регулювання концентрації іонів водню

При двопозиційному регулюванні (більше, менше) і одному корегуючому розчині пристрій містить один блок подачі коригуючого розчину (БПР).

При трьопозиційному регулюванні (менше, норма, більше) і двох коригуючих розчинів пристрій містить два блоки подачі коригуючого розчину (БПР і БПР₁).

Можливе корегування електроліту подачею декількох коригувальних розчинів включенням блоків БПР, БПР₁,...,БПР_n.

Один з можливих варіантів виконання блоку БУ управління приведений на рис. 2.

Блок БУ управління містить перетворювач ПЕ чутливих елементів активності іонів водню, аналого-цифровий перетворювач АЦП, мікро електронно обчислювальну машину (мікро ЕОМ) мЕОМ і в залежності від числа блоків БПР, БПР₁, ..., БПР_n подачі коригувальних розчинів, підсилювачі ПП1, ..., ПП4, ..., ППm. Мікро ЕОМ мЕОМ складається з пристрою ПВВ введення-виведення, постійного запам'ятовуючого ПЗП, оперативного запам'ятовуючого пристрою ОЗП, адресного селектора АС, центрального процесорного пристрою ЦПП, з'єднаного шиною управління з пристроєм ПВВ введення-виведення, шиною адреси з постійним запам'ятовуючим пристроєм ПЗП, оперативним запам'ятовуючим пристроєм ОЗП і через адресний селектор АС з пристроєм ПВВ введення-виведення, а шиною даних - з ПЗП, ОЗП і з пристроєм ПВВ введення-виведення.

Перед початком роботи пристрою ванну ВПР заповнюють промивним розчином. В якості промивного розчину в залежності від необхідної точності регулювання може бути використана водопровідна вода, дистильована вода, електроліт зі стабільним значенням рН і т.д. Додаткова вимога до промивних розчинів – не агресивні по відношенню до чутливих електродів.

Датчик ДК кислотності заповнюють промивним розчином з ванни ВПР (через відкритий клапан ЕК3).

Розглянемо роботу пристрою при двопозиційний регулювання кислотності і одному коректує розчині.

Ванну ВКР заповнюють коригуючим розчином. У ПЗП записують алгоритм роботи пристрою і постійні величини; рНр – задане значення кислотності промивного розчину; рНmax, рНmin – відповідно верхнє і нижнє значення меж регулювання кислотності електроліту в ванні ВЕ; ΔрНmax – допустиме задане значення похибки вимірювання кислотності промивного розчину; Т₁ – час, необхідний для зміни промивної

рідини в датчику ДК кислотності електролітом, що відраховується від моменту включення клапана ЕК1 до моменту встановлення стабільного значення вимірювання рН електроліту; T_2 - час, необхідний для зміни електроліту в датчику ДК кислотності промивним розчином, що відраховується від моменту включення розподільника потоку РП до моменту встановлення стабільного значення вимірювання рН промивного розчину.

Тимчасові інтервали T_1 і T_2 визначаються експериментально при налаштуванні пристрою.

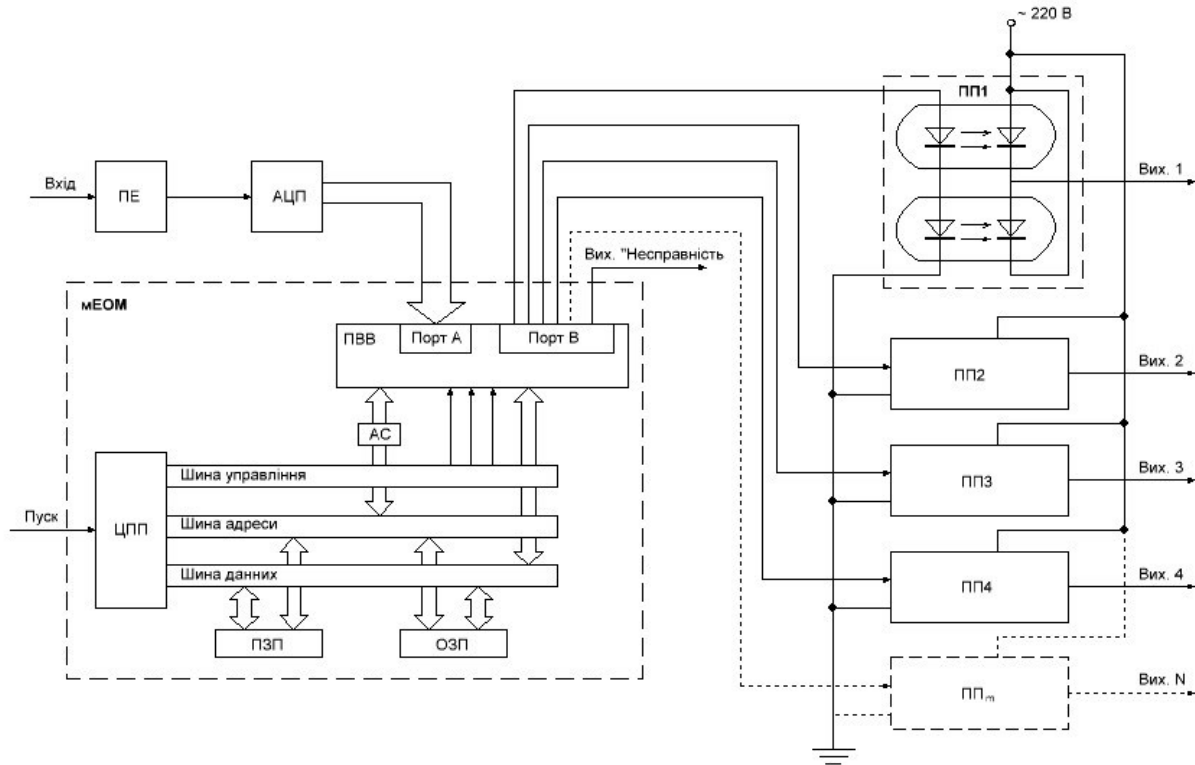


Рис. 2. Структурна схема блока управління пристрою регулювання концентрації іонів водню

За командою "Пуск" блок БУ управління формує команду вимірювання кислотності. Виміряне перетворювачем ПЕ значення кислотності промивного розчину рН надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача АЦП і з його виходу у вигляді двійкового коду через порт А пристрої ПВВ введення-виведення і шину даних – в процесор ЦПП. Процесор ЦПП обчислює значення ΔpH , рівне $\Delta pH_p = pH_p - pH$.

Якщо $\Delta pH / \Delta pH_{\max} \geq 1$, блок БУ управління формує сигнал "Несправність".

Якщо $\Delta pH / \Delta pH_{\max} \leq 1$, то значення рН з урахуванням знака заноситься в комірку ОЗП, а блок БУ управління формує команди включення насоса НР ("Вих.1"), клапана ЕК1 ("Вих.2") і перемикачів розподільника РП ("Вих. 3"). Електроліт, що нагнітається насосом НР, через включений клапан ЕК1 і трубу НТ1 надходить в ежектор Е1, де створюється розрідження, а електроліт з ванни ВЕ по трубі ТЕ через розподільник РП (відкритий клапан ЕК2), по трубі ВТД поступає в датчик ДК кислотності і далі через всмоктувальну трубу ВТЕ1 в ежектор Е1, де захоплюється потоком робочого електроліту, і через сифон СЗ, ванну ВЕ і насос НР замикається потік робочого електроліту. У датчику ДК кислотності відбувається заміна промивної рідини електролітом.

Після закінчення часу T_1 коли промивної розчин в датчику ДК кислотності повністю заміниться електролітом, код виміряного значення кислотності електроліту рН через порт А пристрої ПВВ введення-виведення надходить в процесор ЦПП, який обчислює значення $pH_{\text{вим}} = pH \pm \Delta pH$, де $\Delta pH_{\text{вим}}$ – виміряне з урахуванням поправки $\pm \Delta pH$ значення концентрації електроліту, і порівнює його з $pH_{\min}$.

Якщо $pH_{\text{вим}} < pH_{\min}$, то блок БУ управління формує команду "Вих.4" включення клапана ЕК блоку БПР подачі коригуючого розчину.

Робочий електроліт через відкритий клапан ЕК і через трубу НТ2 надходить в ежектор Е2, де створюється розрідження. Коригувальний розчин з ванни ВКР через всмоктувальну трубу ВТЕ2, ежектор Е2 і трубу НТ2 зливу надходить в ванну ВЕ з електролітом. Величина рН електроліту підвищується.

При досягненні $pH_{\text{вим}} \geq pH_{\min}$ блок БУ управління знімає команди включення "Вих.3" і "Вих. 4", тобто розподільник РП потоку і клапан ЕК блоку БПР подачі коригуючого розчину відключаються. Подача коригуючого розчину з ванни ВКР припиняється, а в датчик ДК кислотності з ванни ВПР з промивним

розчином через трубу ТР, клапан ЕКЗ і трубу ВТД надходить промивний розчин, який далі через всмоктувальну трубу ВТЕ1, ежектор Е1 і сифон СЗ зливається в ванну ВЕ з електролітом.

Після закінчення часу T_2 , коли електроліт в датчику ДК кислотності повністю заміниться на промивний розчин, цикл вимірювання і регулювання повторюється з моменту вимірювання рН промивного розчину і обчислення $\Delta pH = pH_p - pH_n$.

При трьохпозиційному регулюванні кислотності електроліту, при $pH_{нвм} < pH_{min}$, включається блок подачі коригуючого розчину, що підвищує рН електроліту, наприклад блок БПР.

При $pH_{нвм} \geq pH_{max}$ включається інший блок подачі коригуючого розчину, наприклад блок БПР₁, що знижує рН електроліту. Необхідний алгоритм функціонування пристрою записується в ПЗП мікро ЕОМ МЕОМ.

При необхідності коригування електроліту двома або кількома коректуючими розчинами блоки БПР₁, ..., БПР_n подачі коригувальних розчинів включаються по черзі або разом залежно від заданого алгоритму коригування по виходах 5, ..., N блоку БУ управління.

Використання насоса НР і потоку робочого електроліту для створення розрідження в ежекторах Е1 і Е2 дозволяє застосовувати пропонований пристрій в виробничих приміщеннях, що не мають магістралі стиснутого повітря. Крім того, насос НР забезпечує більш інтенсивне перемішування електроліту в ванні ВЕ, тобто однорідність електроліту по всьому об'єму ванни, за рахунок чого забезпечується зменшення постійної часу регулювання.

Висновки. Таким чином застосування автоматизованої системи регулювання концентрації іонів водню за рахунок введення корегування результату виміру підвищується точність регулювання кислотності, а за рахунок того, що чутливий елемент датчика більшу частину часу, в тому числі і не робочий час, знаходиться в промивному розчині, підвищується надійність пристрою. Підвищення точності регулювання кислотності забезпечує зниження витрат корегуючих розчинів; підвищення продуктивності обладнання та якості виробів.

Література

1. К.А. Плясова, В.С. Коваленко, В.І. Ткач, Л.В. Петренко, Лабораторний практикум з фізичної хімії та електрохімії, Міністерство освіти і науки України, Дніпропетровський національний університет, м. Дніпропетровськ, 2001.
2. Авторское свидетельство СССР №1462271, 01.11.1988.
3. Авторское свидетельство СССР №1485213, 08.02.1989.

Reference

1. K.A. Plyasova, V.S. Kovalenko, V.I. Tkach, L.V. Petrenko, Laboratory workshop on physical chemistry and electrochemistry, Ministry of education and science of Ukraine, Dnipropetrovsk national university, Dnipropetrovsk, 2001.
2. USSR copyright certificate №1462271, 01.11.1988.
3. USSR copyright certificate №1485213, 08.02.1989.

Надійшла / Paper received: 22.03.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

УДК 621.391.26
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-20

ФЕДУЛА М. В., КЛЮЦЮ Ю. П., ФОРКУН Ю. В.
Хмельницький національний університет

ПРОЕКТУВАННЯ СЕНСОРНИХ ЛЮДИНО-МАШИНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Розвиток автоматизованих систем керування протягом останніх десятиліть вимагає значних змін та вдосконалення людино-машинних інтерфейсів. Відомі кнопочні панелі керування не відповідають умовам, необхідним для реалізації ефективної людино-машинної взаємодії. Протягом останнього десятиліття відбувається активний розвиток маніпуляторів і сенсорних панелей, що забезпечують більш ефективну взаємодію людини із складними автоматизованими системами.

Основна задача, яка вирішується в процесі проектування ефективних людино-машинних інтерфейсів, полягає у досягненні високої ефективності подання людині інформації про роботу пристрою та високої ефективності передачі команд від людини до пристрою, з мінімальними часовими затримками.

У роботі розглянуто особливості проектування сенсорних людино-машинних інтерфейсів з фільтрацією механічних коливань. Фільтрація коливань дозволяє значно підвищити точність ідентифікації дій оператора. Збільшення точності ідентифікації дозволяє знизити ймовірність помилок при інтерпретації та подальшому виконанні команд оператора автоматизованою системою.

Ключові слова: людино-машинний інтерфейс, сенсорна панель, механічні коливання, обробка сигналів, фільтрація.

FEDULA M., KLYOTS Yu., FORKUN Yu.
Khmelnitskyi National University

DESIGN OF SENSOR HUMAN-MACHINE INTERFACES WITH MECHANICAL OSCILLATION FILTERING

The development of automated control systems in recent decades requires significant changes and improvements in human-machine interfaces. Known push-button control panels do not meet the conditions necessary for the implementation of effective human-machine interaction. Over the last decade, there has been an active development of manipulators and touch panels that provide more efficient human interaction with complex automated systems.

The main task, which is solved in the process of designing efficient human-machine interfaces, is to achieve high efficiency of providing human information about the operation of the device and high efficiency of command transmission from human to device, with minimal time delays.

The peculiarities of designing sensory human-machine interfaces with filtering of mechanical oscillations are considered in the work. Vibration waveform filtering can significantly increase the accuracy of identification of operator actions. Increasing the identification accuracy reduces the probability of errors in the interpretation and subsequent execution of operator commands by the automated system.

Keywords: human-machine interface, touch panel, mechanical oscillations, signal processing, filtering.

Вступ. Постановка задачі. Активний розвиток автоматизованих систем керування протягом останніх десятиліть вимагає значних змін та вдосконалення людино-машинних інтерфейсів. На даний час кнопочні панелі керування не відповідають умовам, необхідним для реалізації ефективної людино-машинної взаємодії. Відбувається активний розвиток різних типів маніпуляторів та сенсорних панелей, які забезпечують більш ефективну взаємодію людини із складними автоматизованими системами.

Задача проектування ефективного людино-машинного інтерфейсу полягає в досягненні високої ефективності подання людині інформації про роботу пристрою та високої ефективності передачі команд від людини до пристрою, з мінімальними часовими затримками.

Проте, слід зазначити, що разом із зростанням ефективності людино-машинного інтерфейсу, зростають також затрати на його реалізацію. Наприклад, виготовлення спеціалізованих сенсорних панелей вимагає реалізації механічних давачів малих розмірів та відповідних цифрових інтерфейсів для взаємодії із електронно-обчислювальними пристроями.

Таким чином, завдання спрощення будови сенсорних панелей при збереженні високої ефективності людино-машинної взаємодії є актуальним і вимагає проведення подальших досліджень.

Попередні роботи. Сенсорні людино-машинні інтерфейси відомі з другої половини XX століття. Відомі реалізації сенсорних інтерфейсів на основі сітки інфрачервоних променів [1, 2], резистивних електричних кіл [3, 4] та механічних давачів [5]. Сенсорні людино-машинні інтерфейси на основі сітки інфрачервоних променів характеризуються достатньо високою точністю та швидкістю реакції на дії оператора [6]. Проте такі інтерфейси характеризуються достатньо високими показниками енергоспоживання, і вимагають значних затрат у випадках необхідності реалізації високої роздільної здатності. Тому значно більшого поширення набули сенсорні панелі на базі резистивних електричних кіл. У таких інтерфейсах людино-машинна взаємодія відбувається шляхом замикання контактів резистивної

матриці. Сенсорні панелі на базі резистивних матриць характеризуються високою роздільною здатністю, реалізація якої не вимагає значних затрат [7]. Проте, слід зазначити, що резистивні матриці характеризуються вищими значеннями похибок внаслідок паразитних параметрів електричних кіл (переважно паразитний опір та ємність), які виникають через забруднення та механічну деградацію сенсорних панелей. Сенсорні людино-машинні інтерфейси на базі механічних давачів дозволяють уникнути більшості вказаних недоліків [5]. При використанні цифрових давачів забруднення та механічна деградація поверхні не призводять до значного збільшення похибок інтерфейсу. Сучасні механічні давачі характеризуються надзвичайно високою чутливістю, що дозволяє отримати високу точність реакції людино-машинного інтерфейсу на дії оператора. Проте висока чутливість таких давачів призводить до зростання рівня прийому завад. На практиці як правило сигнали від давачів до пристрою обробки надходять в умовах дії відносно потужних завад різної природи. Такі завади можуть бути викликані механічною вібрацією, зовнішніми електромагнітними коливаннями, тепловими та іншими шумами електричних елементів, ефектами квантування та дискретизації, а також можуть виникати внаслідок індивідуальних особливостей дій оператора. Тому для реалізації ефективної взаємодії людини з автоматизованою системою необхідно мінімізувати рівень завад у складі сигналів механічних давачів з метою коректної ідентифікації, інтерпретації та виконання команд оператора.

У сучасних людино-машинних інтерфейсах з метою боротьби із завадами використовують велику кількість різних засобів. Серед них вдосконалення механічних властивостей матеріалу поверхні, підвищення завадостійкості давачів, екранування провідників та розвиток методів і алгоритмів обробки сигналів давачів.

Покращення властивостей матеріалів та характеристик електричних елементів давачів вимагає значних матеріальних витрат і, відповідно, може призводити до значного збільшення вартості обладнання. Підвищення ефективності методів та алгоритмів обробки сигналів давачів у поєднанні із забезпеченням електромагнітної сумісності пристроїв може забезпечувати значно вищу економічну ефективність.

У статті розглянуто особливості застосування методів обробки сигналів механічних давачів в процесі проектування сенсорного людино-машинного інтерфейсу, що дозволяє знизити ймовірність помилок ідентифікації команд оператора.

Основна частина. Розглянемо структуру сенсорного людино-машинного інтерфейсу (рис. 1), основними елементами якого є механічні давачі (на базі акселерометрів), інтерфейси давачів та цифровий пристрій обробки сигналів давачів, який може бути з'єднаний із мережею електронно-обчислювальних машин або з іншим обладнанням.

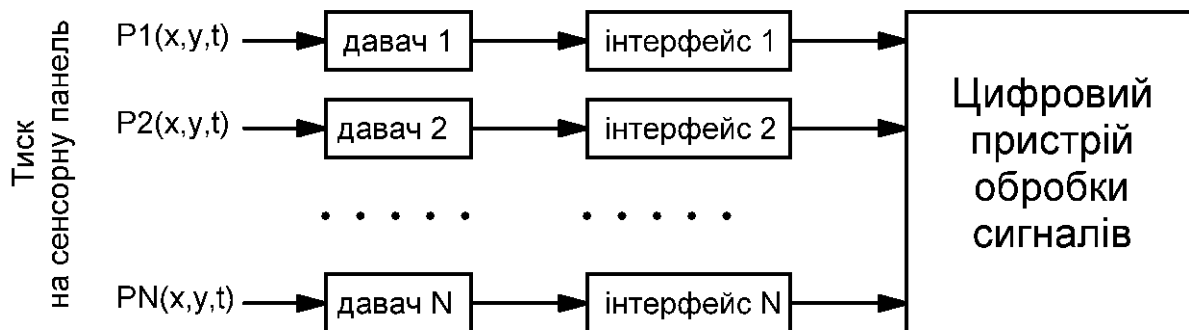


Рис. 1. Структурна схема інтерфейсу

Механічні давачі (акселерометри) вимірюють прискорення у точках свого розташування, і передають сигнали до інтерфейсів, які виконують підсилення сигналів та перетворення їх у формат двійкового коду, який приймається цифровим пристроєм обробки сигналів. Розташування механічних давачів визначається вимогами до роздільної здатності сенсорного інтерфейсу та ефективністю методів і алгоритмів обробки сигналів, які надходять від давачів.

Механічні коливання поверхні, які виникають внаслідок дотику оператора при відсутності сторонніх впливів, описуються математичною моделлю виду (1):

$$P(x, y, t) = D \left(\frac{\partial^4 s}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 s}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 s}{\partial y^4} \right) + \mu \frac{ds}{dt} + \rho H \frac{d^2 s}{dt^2}, \quad (1)$$

де $P(x, y, t)$ – тиск на сенсорну поверхню в точці (x, y) в момент часу t , s – вертикальне зміщення сенсорної поверхні, H – вертикальне зміщення поверхні, ρ – густина, μ – коефіцієнт поглинання, $D = EH^3 / (1 - \nu^2)$, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона [5].

На практиці, крім реакції на дотик оператора, на поверхні завжди присутні коливання, викликані іншими зовнішніми механічними впливами. Особливо сильно такі завади проявляються на виробничому обладнанні, до складу якого входять механічні приводи великої потужності. Таким чином математична модель зовнішнього впливу описується сумою тиску дотику людини $P_0(x, y, t)$ та випадкової складової $\xi_1(x, y, t)$, яка визначається сторонніми механічними впливами:

$$P(x, y, t) = P_0(x, y, t) + \xi_1(x, y, t). \quad (2)$$

На вході пристрою обробки сигналів від давачів присутній спотворений сигнал $G(t)$, який є функціоналом від реакції поверхні на дотик людини $s_0(x, y, t)$, яка є розв'язком рівняння (1) при умові $P(x, y, t) = P_0(x, y, t)$, та вектора завад $\varepsilon(x, y, t) = \{\xi_1(x, y, t), \xi_2(x, y, t), \xi_3(x, y, t), \dots, \xi_K(x, y, t)\}$, де $\xi_1(x, y, t)$ - вплив сторонніх механічних коливань на сенсорну поверхню, $\xi_2(x, y, t), \dots, \xi_K(x, y, t)$ - завади різної природи, які виникають в каналі передачі сигналу від давача до приймача (середніх власні шуми електричних елементів, шуми квантування, наведені електричні коливання та ін.).

Процес цифрової фільтрації прийнятого сигналу $G(t)$ описується функціоналом:

$$S(m) = F[G(t)], \quad (3)$$

де $S(m)$ – m -й відлік цифрового сигналу, який є оцінкою реальної реакції сенсорної поверхні на механічний вплив людини-оператора.

Процес лінійної цифрової фільтрації сигналу описується виразом:

$$S(m) = \sum_{k=1}^m a(k)G(m-k), \quad (4)$$

де $G(k)$ – дискретизований вхідний сигнал, $a(m)$ – імпульсна характеристика цифрового фільтра,

У випадку складних нелінійних спотворень та малої кількості давачів слід використовувати багатовимірну фільтрацію, яка описується рядами Вольтерра:

$$S(m) = \sum_{k_1=1}^m \sum_{k_2=1}^m \dots \sum_{k_n=1}^m a(k_1, k_2, \dots, k_n) \prod_{q=1}^n G(m-k_q) \quad (5)$$

У такому випадку імпульсна характеристика фільтра $a(k_1, k_2, \dots, k_n)$ n -вимірною. Таким чином, фільтрація механічних коливань сенсорного людино-машинного інтерфейсу дозволяє значно підвищити точність приймання команд оператора автоматизованою системою.

Висновки. У статті розглянуто сенсорний людино-машинний інтерфейс з фільтрацією механічних коливань. Фільтрація коливань дозволяє значно підвищити точність ідентифікації дій оператора. Збільшення точності дій команд оператора дозволяє знизити ймовірність помилок при інтерпретації та подальшому виконанні команд автоматизованою системою.

При високих значеннях відношення сигнал/шум у сенсорних людино-машинних інтерфейсах достатньо використовувати лінійну фільтрацію (4). Якщо присутня складна нелінійна взаємодія коливань сенсорної поверхні із завадами різної природи (наприклад, в умовах виробництва з використанням потужних електромеханічних приводів), то доцільно використовувати багатовимірну нелінійну фільтрацію (5) на основі рядів Вольтерра.

Розвиток методів та алгоритми аналізу нестабільних режимів коливань механічних давачів сенсорних людино-машинних інтерфейсів є перспективним напрямом та вимагає подальших досліджень.

Література

1. Chiang WJ, Kung CP, Chen SW, Chang CC, Wu CW. Flexible in-cell infrared a-si sensor. Dig. Tech. Pap. - SID Int. Symp., 2012. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05784.x>.
2. Han SY, Jeon KS, Seo MS, Kim D, Cho B, Jeong K, et al. Characteristics of infrared photosensor using amorphous sige for in-cell touch panel. Dig. Tech. Pap. - SID Int. Symp., 2012. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05782.x>.
3. Drewniak EI, Crisco JJ, Spenciner DB, Fleming BC. Accuracy of circular contact area measurements with thin-film pressure sensors. J Biomech 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.12.002>.
4. Roh JS. Textile touch sensors for wearable and ubiquitous interfaces. Text Res J 2014. <https://doi.org/10.1177/0040517513503733>.
5. Poletkin K, Yap XX, Khong AWH. A touch interface exploiting the use of vibration theories and infinite impulse response filter modeling based localization algorithm. 2010 IEEE Int. Conf. Multimed. Expo, ICME 2010, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICME.2010.5582570>.
6. Enns NRN, MacKenzie IS. Touchpad-based remote control devices, 1998. <https://doi.org/10.1145/286498.286717>.
7. Knite M, Teteris V, Kiploka A, Kaupuzs J. Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials. Sensors Actuators, A Phys., 2004. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.08.006>.

References

1. Chiang WJ, Kung CP, Chen SW, Chang CC, Wu CW. Flexible in-cell infrared a-si sensor. Dig. Tech. Pap. - SID Int. Symp., 2012. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05784.x>.

2. Han SY, Jeon KS, Seo MS, Kim D, Cho B, Jeong K, et al. Characteristics of infrared photosensor using amorphous sige for in-cell touch panel. Dig. Tech. Pap. - SID Int. Symp., 2012. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05782.x>.
3. Drewniak EI, Crisco JJ, Spenciner DB, Fleming BC. Accuracy of circular contact area measurements with thin-film pressure sensors. J Biomech 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.12.002>.
4. Roh JS. Textile touch sensors for wearable and ubiquitous interfaces. Text Res J 2014. <https://doi.org/10.1177/0040517513503733>.
5. Poletkin K, Yap XX, Khong AWH. A touch interface exploiting the use of vibration theories and infinite impulse response filter modeling based localization algorithm. 2010 IEEE Int. Conf. Multimed. Expo, ICME 2010, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICME.2010.5582570>.
6. Enns NRN, MacKenzie IS. Touchpad-based remote control devices, 1998. <https://doi.org/10.1145/286498.286717>.
7. Knite M, Teteris V, Kiploka A, Kaupuzs J. Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials. Sensors Actuators, A Phys., 2004. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.08.006>.

Надійшла / Paper received: 30.02.2020

Надрукована / Paper Printed : 05.06.2020

УДК 621.396.12

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-21

ЛУЖАНСЬКИЙ В. І., КАШТАЛЬЯН А. С., КЛЮЦЬ Ю. П.
Хмельницький національний університет

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОНОГО МОДУЛЯ КАСЕТНОГО ТИПУ З МІКРОСХЕМАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ

Наукова стаття присвячена комп'ютерним технологіям автоматизації розрахунків теплофізичного конструювання радіоелектронних модулів касетного типу з мікросхемами в умовах природнього повітряного охолодження для забезпечення заданого теплового режиму проведені розрахунки коефіцієнтів випромінювання, теплопередачі, теплової провідності допустимого значення значення температури перегріву корпусу блоку радіоелектронного засобу (РЕС).

Автоматизація створення нових радіоелектронних засобів залежить від рівня застосування комп'ютерних технологій на всіх етапах їх проектування, які відрізняються умовами експлуатації та складністю зовнішніх теплофізичних, механічних та інших впливів. Ключові слова: комп'ютерні технології, автоматизація, радіоелектронні засоби, радіоелектронний модуль касетного типу, заданий тепловий режим РЕС, природнє повітряне охолодження, коефіцієнти теплопередачі та теплової провідності, коефіцієнти випромінювання.

LUZHANSKY V., KASHTALYAN A., KLYOTS Y.
Khmelnytsky National University

COMPUTER TECHNOLOGIES OF AUTOMATION OF THERMOPHYSICAL DESIGN OF RADIOELECTRONIC MODULE OF CASSETTE TYPE WITH MICROCIRCUITS FOR PROVIDING OF THE SET THERMAL MODE

Automation of the creation of new electronic devices depends on the level of application of computer technology at all stages of their design, which differ in operating conditions and the complexity of external thermophysical, mechanical and other influences. In units of equipment built on the cassette principle, the specific heat output is very high, forcing developers to use forced air cooling.

The scientific article is devoted to computer technologies of automation for calculations of thermophysical design of radio electronic modules of cassette type with chips in the conditions of natural air cooling. The use of radio networks with moving objects makes it possible to repeatedly use the same dedicated frequency band to increase the speed of digital information transmission and economical use of the frequency range. This method has a significant disadvantage, which is the presence of mutual internal system interference between base and mobile stations that use the same frequency range (RES).

Automation of creation of new radio electronic facilities depends on the level of application of computer technologies on all stages of their planning, that differ in external environments and complication of external thermophysical, mechanical and other influences.

Keywords: computer technologies, automation, radio electronic means, radio electronic module of cassette type, set thermal regime of RES, natural air cooling, coefficients of heat transfer and thermal conductivity, radiation coefficients.

Вступ. Автоматизація створення нових радіоелектронних засобів залежить від рівня застосування комп'ютерних технологій на всіх етапах їх проектування, які відрізняються умовами експлуатації та складністю зовнішніх теплофізичних, механічних та інших впливів.

У блоках апаратури, побудованих по касетному принципу, питома потужність тепловиділення виявляється вельми великою, що змушує розробників використовувати повітряне примусове охолодження.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Аналіз літературних джерел показує недостатню глибину проведених досліджень у даному напрямку.

Формування мети. Комп'ютерні технології автоматизації теплофізичного конструювання радіоелектронного модуля касетного типу з мікросхемами в умовах природнього повітряного охолодження для забезпечення заданого теплового режиму.

Результати дослідження.

Проведемо розрахунок для одиночного блоку, побудованого по касетному принципу. Для проектування візьмемо розміри блоку $L_1 = 0,272\text{м}$; $L_2 = 0,193\text{м}$; $L_3 = 0,182\text{м}$. Розміри нагрітої зони $I_1 = 0,25\text{м}$; $I_2 = 0,18\text{м}$; $I_3 = 0,17\text{м}$.

Температура навколишнього середовища $t_c = 19^\circ\text{C}$; потужність що розсіюється блоком у вигляді теплоти $P_0 = 11\text{Вт}$. Величини повітряних зазорів між нагрітою зоною і нижньою поверхнею корпусу $h_H = 0,016\text{м}$, нагрітою зоною і верхньою поверхнею корпусу $h_B = 0,016\text{м}$, нагрітою зоною і бічною поверхнею корпусу $h_G = 0,021\text{м}$.

Знаходимо площі поверхонь нагрітої зони:

$$S_B = S_H = I_1 I_2; S_{\bar{\sigma}} = 2I_3(I_1 + I_2);$$

$$S_B = S_H = 0,045 \text{ м}^2; S_{\bar{\sigma}} = 0,1462 \text{ м}^2.$$

Розраховуємо приведені ступеня чорноти нагрітої зони в різних областях поверхонь нагрітої зони:

$$\varepsilon_{\Pi} = \left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \left(\frac{1}{\varepsilon_K} - 1 \right) \frac{S_3}{S_K} \right)^{-1},$$

де $\varepsilon_{\Pi H}$, $\varepsilon_{\Pi B}$, $\varepsilon_{\Pi \bar{\sigma}}$ – відповідно ε поверхонь нагрітої зони: нижньої, верхньої і бічної; S_3, S_K – площі нагрітої зони і корпусу.

$$\varepsilon_{\Pi H} = \varepsilon_{\Pi B} = 0,137; \varepsilon_{\Pi \bar{\sigma}} = 0,108.$$

Розраховуємо питому поверхневу потужність корпусу блоку q_K :

$$q_K = P_0 / S_K = 11 / 0,2362 = 46,57 \text{ Вт/м}^2.$$

Відповідно до знайденої q_K задаємося перегрівом корпусу блоку $\Delta t_K = 5^\circ \text{C}$.

Коефіцієнт випромінювання визначається за формулою:

$$\alpha_L = \varepsilon_{\Pi} \varphi_{12} f(t_1, t_2);$$

де $f(t_1, t_2)$ – значення функції температури; φ_{12} – коефіцієнт взаємного опромінення (для одиночного блоку $\varphi_{12} = 1$) відповідно виводимо формули:

$$\alpha_{\Pi H} = 0,137 \cdot \frac{\left(\frac{24 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{19 + 273}{100} \right)^4}{24 - 19} = 0,139 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

$$\alpha_{\Pi \bar{\sigma}} = 0,108 \cdot \frac{\left(\frac{24 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{19 + 273}{100} \right)^4}{24 - 19} = 0,11 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі α_K для всіх зовнішніх поверхонь кожуха блоку:

$$\alpha_K = A_1 \left(\frac{t_1 - t_2}{L} \right)^{1/4} N,$$

де t_1 – температура кожуха, К; t_2 – температура середовища, К; A_1 – коефіцієнт, що залежить від температури, введений для спрощення розрахунків; N – коефіцієнт орієнтації нагрітої поверхні: для вертикальної стінки $N = 1$; для нагрітої поверхні, зверненої вниз; $N = 0,7$ і вгору $N = 1,3$; L – визначальний розмір, м: для вертикально орієнтованої поверхні – висота, для горизонтально орієнтованої поверхні – менша сторона.

Коефіцієнти тепловіддачі нижньої і бічних поверхонь кожуха блоку:

$$\alpha_{KH} = 1,38 \cdot \left(\frac{24 - 19}{0,016} \right)^{1/4} = 9,94 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

$$\alpha_{K\bar{\sigma}} = 1,38 \cdot \left(\frac{24 - 19}{0,021} \right)^{1/4} = 9,28 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Розраховуємо повні коефіцієнти тепловіддачі з поверхні кожуха блоку:

$$\alpha_B = \alpha_{KB} + \alpha_L, \alpha_H = \alpha_{KH} + \alpha_L, \alpha_{\bar{\sigma}} = \alpha_{K\bar{\sigma}} + \alpha_L;$$

$$\alpha_B = \alpha_H = 9,94 + 0,139 = 10,08;$$

$$\alpha_{\bar{\sigma}} = 9,28 + 0,11 = 9,39.$$

Визначаємо теплову провідність кожуха блоку в навколишнє середовище:

$$\sigma_K = \alpha_B S_B + \alpha_H S_H + \alpha_{\bar{\sigma}} S_{\bar{\sigma}};$$

$$\begin{aligned} S_B &= 0,045 \text{ м}^2; \\ S_{\bar{\sigma}} &= 0,1462 \text{ м}^2; \\ S_H &= 0,045 \text{ м}^2; \\ \sigma_K &= 2,28 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}), \end{aligned}$$

де σ_K – теплова провідність кожуха блоку в навколишньому середовищі.

Визначаємо температуру нагрітої зони в першому наближенні:

$$t_c^I = t_c + (t_K - t_c) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_K}{\sigma_3} \right),$$

де t_K і t_c – температури корпусу і середовища відповідно.

$$t_c = 19 + (24 - 19) \cdot \left(1 + \frac{2,28}{1,109} \right) = 34,279^\circ \text{C}.$$

Визначаємо розрахункову потужність нагрітої зони:

$$\begin{aligned} P &= \sigma_K (t_K - t_c), \\ P &= 2,28(24 - 19) = 11,4 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Розрахуємо конвективно-кондуктивні коефіцієнти верхньої і бічної повітряних прошарок між нагрітою зоною і внутрішньою поверхнею кожуха блоку:

$$k_i = Nf \left(\frac{h_i}{I} \right) A_2^4 \sqrt{\frac{t_3^1 - t_k}{h_i}},$$

де h_i – товщина повітряного прошарку між нагрітою зоною і кожухом блоку у відповідній області, м; A_2 – коефіцієнт, що залежить від температури, введений для спрощення розрахунків; $I = \sqrt{I_1 I_2}$ – для верхньої області; $I = \sqrt{I_2 I_3}$ і $I = \sqrt{I_3 I_1}$ – для бічних областей нагрітої зони і кожуха блоку:

$$k_H = 0,7 \cdot 0,21 \cdot 1,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{34,279 - 24}{0,016}} = 1,184.$$

$$k_B = 1,3 \cdot 0,17 \cdot 1,6 \cdot \sqrt[4]{\frac{34,279 - 24}{0,016}} = 1,78.$$

$$k_{\bar{\sigma}} = 1 \cdot 0,2 \cdot 1,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{34,279 - 24}{0,021}} = 1,599.$$

Визначимо коефіцієнти випромінювання для різних поверхонь корпусу:

$$\alpha_{\text{ЛН}2} = 0,137 \cdot 0,139 \cdot \frac{\left[\left(\frac{34,279 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{19 + 273}{100} \right)^4 \right]}{34,279 - 19} = 0,02,$$

де $\alpha_{\text{ЛН}2}$ – коефіцієнт випромінювання в другому наближенні:

$$\alpha_{\text{ЛБ}2} = 0,108 \cdot 0,11 \cdot \frac{\left[\left(\frac{34,279 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{19 + 273}{100} \right)^4 \right]}{34,279 - 19} = 0,012.$$

Визначаємо коефіцієнти теплопередачі і теплову провідність між нагрітою зоною і корпусом:

$$\alpha_{B2} = \alpha_{H2} = \alpha_{KH} + \alpha_{\text{ЛН}} = 9,94 + 0,02 = 9,96.$$

$$\alpha_{\delta 2} = \alpha_{K\delta} + \alpha_{Л\delta} = 9,28 + 0,012 = 9,292.$$

$$\sigma_{K2} = 9,96 \cdot 0,045 + 9,96 \cdot 0,045 + 9,292 \cdot 0,1462 = 1,057 \text{ Вт/К}^2.$$

Визначаємо температуру нагрітої зони в другому наближенні:

$$t_3'' = t_c + P \left(\frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_K} \right),$$

де P – потужність, отримана при розрахунку в першому наближенні, Вт; σ_3 – теплова провідність від нагрітої зони до кожуха блоку, розрахована в другому наближенні, Вт/К^2 ; σ_K – теплова провідність від кожуха

блоку в навколишнє середовище, отримана при розрахунку в першому наближенні, Вт/К^2 .

$$t_2 = 19 + 11,4 \cdot \left(\frac{1}{1,109} + \frac{1}{2,28} \right) = 34,276^\circ\text{C}.$$

Порівнюємо температури нагрітої зони, які отримані при розрахунках в першому і в другому наближеннях. Якщо різниця буде становити більше 10%, то треба провести розрахунок температури нагрітої зони в третьому наближенні:

$$\delta = \frac{t_1 - t_2}{t_1} = \frac{34,779 - 34,276}{34,779} = 0,014.$$

$\delta = 1,4\%$, отже, немає необхідності проводити розрахунок температури нагрітої зони в третьому наближенні.

Висновок. Таким чином, корпус спроектованого блоку радіоелектронного засобу в цілому задовольняє допустимим значенням перегріву з урахуванням кліматичного виконання і для охолодження проектованого виробу система заснована на природному повітряному охолодженні є раціональною, не потребує примусового охолодження і може бути використаним в комп'ютерних технологіях автоматизації виробництва радіоелектронних засобів.

Література

1. Атаманова, І.В. Дослідження та розробка моделей і методів теплофізичного аналізу та оптимального синтезу РЕЗ з повітряним охолодженням [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.12.16 / Атаманова Ірина Володимирівна ; Державний ун-т "Львівська політехніка". - Львів, 1995. - 19 с.
2. Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий: учеб. издание / Д.Ю. Муромцев, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ» 392000, 2012. – 88с.
3. Проектирование и технология радиоэлектронных средств : учеб. пособие / З.М. Селиванова, Д.Ю. Муромцев, Т.И. Чернышова, О.А. Белоусов, В.Н. Митрофанова. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 164 с.

References

1. Atamanova, IV Research and development of models and methods of thermophysical analysis and optimal synthesis of RES with air cooling [Text]: author. dis ... cand. tech. Sciences: 05.12.16 / Atamanova Irina Vladimirovna; Lviv Polytechnic State University. - Lviv, 1995. - 19 s.
2. Computer technologies for calculation of thermal modes and mechanical influences: textbook. edition / D.Yu. Muromtsev, O.A. Belousov. - Tambov: Publishing house FGBOU VPO "TSTU" 392000, 2012. - 88s.
3. Design and technology of electronic means: textbook. allowance / Z.M. Selivanova, D.Yu. Muromtsev, TI Чернышова, O.A. Belousov, VN Митрофанова. - Tambov: Izd-vo GOU VPO TSTU, 2011. - 164 s.

Надійшла / Paper received: 29.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе



Підп. до друку 28.05.2019. Ум. друк. арк. – 15,41. Обл.-вид. арк. – 13,73.
Формат 30×42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 50, зам. № 48.20

Тиражування здійснено з оригінал-макета редакційно-видавничим відділом
Хмельницького національного університету.
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1, тел. (0382) 77-33-63.
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.