

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Черкаський національний університет**  
**імені Богдана Хмельницького**  
**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**  
**Bohdan Khmelnytsky**  
**National University of Cherkasy**

**ISSN 2076-5886 (Print)**

**ВІСНИК**  
**ЧЕРКАСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**ІМЕНІ БОГДАНА ХМЕЛЬНИЦЬКОГО**

Серія  
**ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА. ІНФОРМАТИКА**

**BULLETIN**  
**OF THE CHERKASY**  
**BOHDAN KHMELNYTSKY**  
**NATIONAL UNIVERSITY**

**APPLIED MATHEMATICS. INFORMATICS**

**ВИПУСК 1**  
**ISSUE 1**

Черкаси, 2022  
Cherkasy, 2022

**Засновник, редакція, видавець і виготовлювач –**  
**Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького.**  
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 16161-4633 ПР від 11.12.2009.  
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23973-13813 Р від 21.05.2019.

Журнал розрахований на математиків, спеціалістів у галузі ІТ, викладачів, науковців,  
аспірантів, студентів.

**Випуск № 1 наукового журналу «Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія «Прикладна математика. Інформатика» рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького (протокол № 6 від 13.12.2022 року).**

*Журнал індексується Google Scholar.*

**Редакційна колегія серії:**

Пасічний М.О., к.ф.-м.н., доц., ЧНУ ім. Б. Хмельницького (головний редактор);  
Головня Б.П., д.т.н., доц., ЧНУ ім. Б. Хмельницького (заступник головного редактора);  
Сердюк О.А., к.е.н., ЧНУ ім. Б. Хмельницького (відповідальний секретар);  
Соловійов В.М., д.ф.-м.н., проф., КДПУ; Запорожець Т.В., д.ф.-м.н., проф., ЧНУ ім. Б. Хмельницького; Шквар Є.О., д.т.н., проф., Zhejiang Normal University (Zhejiang, China);  
Ляшенко Ю.О., д.ф.-м.н., проф., ЧНУ ім. Б. Хмельницького; Дідковський Р.М., д.т.н., доц., провідний інженер, програміст (м. Черкаси, Україна); Гаєв Є.О., д.т.н., проф., НАУ;  
Сторожук Н.В., к.ф.-м.н., ЧНУ ім. Б. Хмельницького; Лиля Д.М., к.ф.-м.н., ЧНУ ім. Б. Хмельницького; Бабенко С.В., к.ф.-м.н., ЧНУ ім. Б. Хмельницького.

*За дотримання права інтелектуальної власності, достовірність матеріалів та обґрунтування висновків відповідають автори.*

**Адреса редакційної колегії:**

18031, Черкаси, бул. Шевченка, 79  
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, корпус № 3, к. 307  
e-mail: ami.cdu@ukr.net

З електронною версією журналу можна ознайомитися за адресою: <http://ami-ejournal.cdu.edu.ua/>

**Founder, editorial, publisher and manufacturer –**  
**Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy.**  
State registration certificate: KV No. 16161-4633 PR dated 11.12.2009.  
State registration certificate: KV No. 23973-13813 R dated 21.05.2019.

This journal is meant for mathematicians, IT specialists, teachers, researchers, postgraduates and students.

**Issue № 1 of the scientific journal «Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky national university. Applied mathematics. Informatics» is recommended for publication and dissemination through the Internet by the Academic Council of Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy (protocol number 6 dated 13.12.2022).**

*The journal is indexed in Google Scholar.*

**Editorial board of the series:**

Pasichnyy M.O., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Editor in Chief); Golovnya B.P., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Deputy Chief Editor); Serdiuk O.A., Candidate of Economic Sciences (executive secretar); Soloviev V. M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Zaporozhets T.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Shkvar Ye.O., Doctor of Technical Sciences, Professor; Lyashenko Y.O., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Didkovsky R.M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Gayev Ye.A., Doctor of Technical Sciences, Professor; Storozhuk N.V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Lila D.M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Babenko S.V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

*The authors are responsible for the observance of the intellectual property right, for the reliability of the materials and for the substantiation of the conclusions.*

**Editorial office address:**  
18031, Cherkasy, Shevchenko Blvd., 79  
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, building 3, ap. 307  
e-mail: [ami.cdu@ukr.net](mailto:ami.cdu@ukr.net)

All electronic versions of articles are available on the website edition <http://ami-ejournal.cdu.edu.ua/>

© Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, 2022  
© Copyright by the contributors

**СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА»**

UDC 534.23

PACS 43.28-g.

**LUKIANOV Petro Volodymyrovych**  
PhD in physics&mathematics, Senior  
Researcher, Associate Professor, Department  
of Aviation and Rocket Engineering,  
Institute of Aerospace Engineering, NTU  
“KPI”  
e-mail: p.lukianov@kpi.ua

**NUMERICAL METHODS FOR THE INVESTIGATION OF THE AERODYNAMIC NOISE OF A HELICOPTER ROTOR**

***Abstract.** In this paper, the main numerical methods for modeling the aerodynamically generated rotor noise of helicopter are considered. In particular, finite difference schemes for steady and unsteady 2-dimensional potential flows are given, on the basis of which a model of sound generation of aerodynamic origin of a helicopter rotor blade is built. Examples of the solution of the problem for 3-dimensional potential unsteady flow are considered. It should be noted that until recently there was no general finite difference scheme for solving problems of helicopter rotor acoustics. The numerical-analytical method developed by the author of this paper showed the ability to solve problems of aeroacoustics of a helicopter blade for different types of flow models, both potential and non-potential. The paper gives examples of the solution of similar problems, analyses the application of the numerical-analytical method and compares it with existing finite difference methods. In particular, the calculation schemes for the application of the method for a 2D steady flow and a 3D unsteady flow are presented and the peculiarities of the selection of the number of points in the calculation molecule are explained. Depending on the characteristics of a problem, the number of computational grid points can vary both along the span and across the blade. This makes it possible to adapt the numerical-analytical method for each of the problems to be solved. At the same time, a stable calculation is performed based on the idea of the numerical analytical method itself, and the convergence of the method is performed automatically each time.*

**Keywords:** Helicopter rotor noise, numerical methods, numerical analytical method

**Introduction**

The study of the noise of aerodynamic origin is an important task in the direction of improving modern rotorcraft, in particular helicopters. To successfully solve the problem of noise reduction of aerodynamic origin, it is necessary to find out which of the existing numerical methods are suitable for studying this or that type of flow in which aerodynamic noise is generated. This work is devoted to the analysis of existing numerical schemes for solving problems of noise generation of the aerodynamic origin of a helicopter rotor.

First of all, it should be noted that initially the noise of aerodynamic origin was studied on simple theoretical models, the purpose of which was to establish the dependence of the noise of the rotor rotation on the kinematics of the rotor rotation and the geometry of the blade. But then the range of questions significantly expanded after it was found out that the noise of aerodynamic origin has different components, and types: rotation noise, high-speed impulse noise, as well as the noise of the interaction of vortices and blades.

Mathematical models, equations that simulate various types of noise, differ among themselves. Accordingly, the methods of numerical calculation of rotation noise and blade-vortex interaction noise, for example, are also different. Therefore, we present a detailed analysis of the numerical approaches used to describe various types of the noise of aerodynamic origin.

*The purpose* of this work is to analyze the existing numerical schemes for calculating the noise of the aerodynamic origin of the helicopter rotor and as a result, show the method of helicopter noise simulation depending on the flow regime.

## 1. Analysis of potential flow calculation schemes

The first type of noise that attracted the attention of scientists was the helicopter rotational noise. The first theoretical model that investigated rotational noise was proposed by Gutin [1]. It clearly states that the noise of rotation depends on the generated harmonics and the size of the blade. But this model is only one-dimensional and unfortunately does not reveal the nature of noise as it occurs directly inside the medium.

The next step in the study of the noise of aerodynamic origin is a model of the generation and propagation of small disturbances from a thin wing, which is described by the Kármán-Guderley equation [2], [3], [4]

$$(K - (\gamma + 1)\phi_x)\phi_{xx} + \phi_{yy} = 0 \quad (1)$$

where  $K = (1 - M_\infty^2)\delta^{\frac{2}{3}}$  is the transonic similarity parameter,  $\gamma = c_p / c_v$  is the ratio of specific heat capacities. Since this equation is a nonlinear differential equation, the boundary value problems based on it require a numerical solution. Let's consider the existing numerical schemes and perform their analysis

It is known that equation (1), depending on the values of the parameters included in it, allows the simultaneous existence of flow regions with subsonic and supersonic velocities in the flow. This became the reason for selecting the calculation scheme for the numerical solution of the problem based on the equation of (1) it turned out not easy.

The first successful attempt to numerically solve the Kármán -Guderley equation was the Murman-Cole scheme [5]. For the numerical implementation of the scheme, the authors choose equation (1) in a conservative form, which allows using a fully conservative scheme:

$$\left(\frac{w^2}{2}\right)_x - v_{\bar{y}} = 0 \quad (2)$$

where  $w = \phi_x = (\gamma + 1)\phi_x - K$ ,  $v = \phi_{\bar{y}} = (\gamma + 1)\phi_{\bar{y}}$ .

Let  $(x, y)$  is an arbitrary element with a uniform step of the difference grid in the plane  $(x, y)$ , and the nodal points have indices  $(i, j)$ . Equation (2) can be written in a conservative form for a cell that centered at a point  $(i, j)$  (Fig. 1). As a result, we have:

$$\left[\left(\frac{w^2}{2}\right)_{i+1/2,j} - \left(\frac{w^2}{2}\right)_{i-1/2,j}\right]\Delta\bar{y} - (v_{i,j+1/2} - v_{i,j-1/2})\Delta x = 0 \quad (3)$$

Otherwise, relation (3) can be written as:

$$\frac{1}{2}(w_{i+1/2,j} - w_{i-1/2,j})(w_{i+1/2,j} + w_{i-1/2,j})\Delta\bar{y} - (v_{i,j+1/2} - v_{i,j-1/2})\Delta x = 0 \quad (4)$$

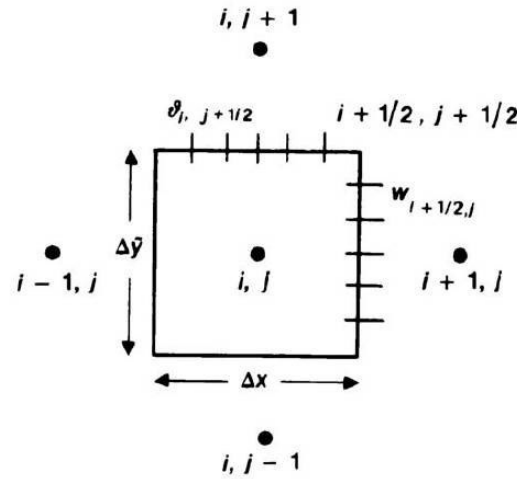


Fig.1 Control cell

Now, if we solve the equation in a domain where it is an equation of elliptic type, that is, an equation of the Laplace type, then central finite differences are used to approximate both  $w$  and  $v$ :

$$v_{i,j+1/2} \equiv (\varphi_{\bar{y}})_{i,j+1/2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{\Delta \bar{y}}, v_{i,j-1/2} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta \bar{y}}$$

$$w_{i,j+1/2}^c \equiv (\varphi_x)_{i+1/2,j} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta \bar{y}}, w_{i,j-1/2} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta \bar{y}}$$

$$\left(\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2\Delta x}\right)\left(\frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{(\Delta x)^2}\right) - \left(\frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{(\Delta \bar{y})^2}\right) = 0 \quad (5)$$

Equation (5) is a central difference scheme of the second order of accuracy, which is an approximation of the equation for the elliptical (subsonic) region. The issue of the stability of this scheme and fulfillment of the Courant-Friedrichs-Levy criterion is discussed in detail in the monograph of one of the authors of this scheme [4]:

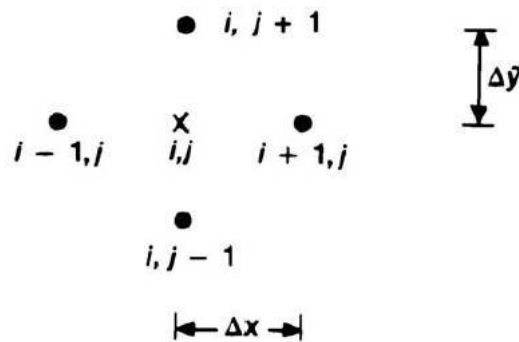


Fig. 2. Calculation template in the elliptic domain

Such a template is not suitable for the hyperbolic (sonic) flow region, since it contains points upstream. To avoid this effect, the calculation template shifts downstream by one point by index  $i + 1 \rightarrow i$  for the first (nonlinear) term of equation (2), which  $i$  is responsible for the formation of shock waves that transform into a sound wave:

$$\left(\frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-2,j}}{2\Delta x}\right)\left(\frac{\varphi_{i,j} - 2\varphi_{i-1,j} + \varphi_{i-2,j}}{(\Delta x)^2}\right) - \left(\frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{(\Delta y)^2}\right) = 0 \quad (6)$$

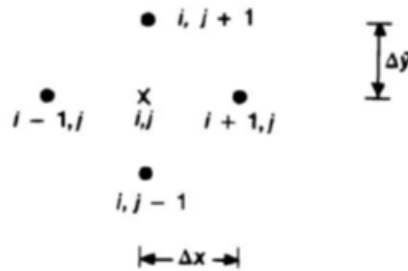


Fig.3 Calculation template in the hyperbolic domain

What happens in the region of sound points: points where the flow accelerates or decelerates to the speed of sound? A different pattern is used here, which does not coincide with either the hyperbolic or elliptical patterns:

$$\left(\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i-2,j}}{2\Delta x}\right)\left(\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i-2,j}}{(\Delta x)^2}\right) - \left(\frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{(\Delta y)^2}\right) = 0 \quad (7)$$

As can be seen from the above example of solving the problem, it is impossible to use only one numerical template for different flow regions. The finite-difference scheme considered above is a scheme of the first order of accuracy in the hyperbolic flow region [5]. In the elliptical flow region, it has the second order of accuracy.

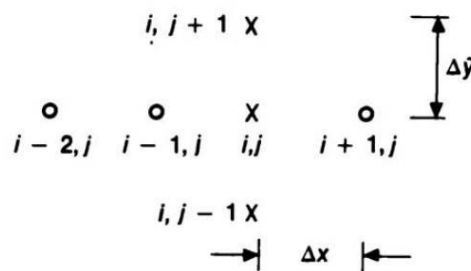


Fig. 4 Calculation template of the operator at a point on the shock wave

The second-order accuracy difference schemes for the hyperbolic domain are given in [5], and the methods for obtaining them are described in the monograph [6]. Analysis of coupled shock waves, in terms of using numerical schemes, was carried out in [7]. After it, there have already appeared works using this calculation procedure [8], but for equations in full potentials, without separation of small perturbations from the flow. In [8] calculation of plane unsteady flow has been carried out. Both central and mixed finite differences were used for mixed time and coordinate derivatives.

So far, we have not talked about the characteristics of the flow during study we are interested in shock waves. For the analysis of the solution of the Kármán -Guderley equation, which describes the propagation of small disturbances from a thin wing, the pressure coefficient  $C_p$  is of interest. The pressure coefficient is defined as a ratio  $C_p = 2(p - p_\infty) / \rho_\infty U^2$ . The above numerical schemes calculate the pressure coefficient in the form of a parabola if there is no shock wave in the flow. If a gap appears on the pressure curve, that is, a shock wave is realized, then the profile has the form of a deformed, "torn" parabola [4]:

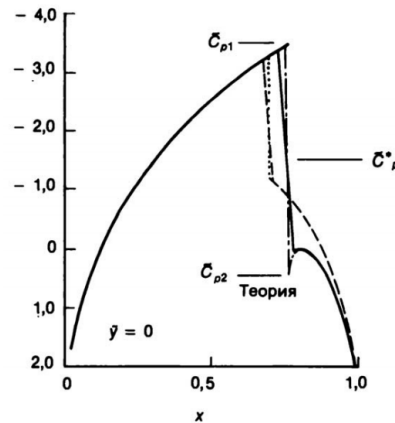


Fig. 5 Pressure distribution,  $K = 1.8$

The experience of later studies of the unsteady plane transonic flow showed that the pressure coefficient of propagation of small disturbances in the unsteady flow has a different shape than a parabola. Such a discrepancy can be explained by the fact that the numerical schemes considered in reality do not reveal the non-stationarity of the flow: in them, the shock wave is, as it were, stopped in relation to time. Therefore, it makes sense to further consider non-stationary schemes for solving the Kármán-Guderley equation.

In the second half of the 70s of the last century, to solve a two-dimensional non-stationary problem for the equation of propagation of small disturbances from thin wings, a number of authors resorted to an implicit ADI (alternating direction implicit). This method was used in [9] for the case of low-frequency unsteady two-dimensional flows. In this case, the Kármán-Guderley equation is solved in the following form:

$$A\phi_{tt} + 2B\phi_{xt} = C\phi_{xx} + \phi_{yy} \quad (8)$$

where

$$A = k^2 M_\infty^2 / \delta^{2/3}, B = k M_\infty^2 / \delta^{2/3}, C = (1 - M_\infty^2) / \delta^{2/3} - (\gamma + 1) M_\infty^m \phi_x$$

The parameter  $m$  of this expression is a function of  $M_\infty$ . This parameter is an adjustment parameter for the critical value of the pressure coefficient [10]. The time parameter  $k = \omega c / U_\infty$  is the Strouhal number. According to the coordinates  $x, y$  in (8), the double-sweep method was used:

by coordinate  $x$ :

$$2B(\Delta t)^{-1} \delta_x (\bar{\phi}_{j,k}^{n+1} - \phi_{j,k}^n) = D_x f_{j,k} + \delta_{yy} \phi_{j,k}^n$$

by coordinate  $y$ :

$$2B(\Delta t)^{-1} \delta_x(\phi_{j,k}^{n+1} - \bar{\phi}_{j,k}^n) = \frac{1}{2} \delta_{yy}(\phi_{j,k}^{n+1} - \phi_{j,k}^n), B = kM_\infty^2 / \delta^{2/3},$$

$$\delta_x \phi_{j,k} = 2(\phi_{j,k} - \phi_{j-1,k})(x_{j+1} - x_{j-1})^{-1} = (3\phi_{j,k} - 4\phi_{j-1,k} + \phi_{j-2,k})(x_{j+1} - x_{j-1})^{-1},$$

$$\delta_x \phi_{j,k} = 2(\phi_{j,k} - \phi_{j-1,k})(x_{j+1} - x_{j-1})^{-1} = (3\phi_{j,k} - 4\phi_{j-1,k} + \phi_{j-2,k})(x_{j+1} - x_{j-1})^{-1},$$

$$\delta_{yy} \phi_{j,k} = 2[(\phi_{j,k+1} - \phi_{j,k})(y_{k+1} - y_{k-1})^{-1} - (\phi_{j,k} - \phi_{j,k-1})(y_k - y_{k-1})^{-1}](y_{k+1} - y_{k-1})^{-1}. \quad (9).$$

$$f_{j,k} = \frac{1}{2} [C_{j,k}^n \phi_{x_j,k}^{n+1} + (1 - M_\infty^2) \phi_{x_j,k}^n / \delta^{2/3}],$$

$$\phi_{x_{j+1/2},k} = (\phi_{x_{j+1},k} - \phi_{x_j,k})(x_{j+1} - x_{j-1}),$$

$$Df_{j,k} = 2(x_{j+1} - x_{j-1})^{-1} [(1 - \varepsilon_j)(f_{j+1/2,k} - f_{j-1/2,k}) + \varepsilon_{j-1}(f_{j-1/2,k} - f_{j-3/2,k})] \quad (10)$$

Here

$$\varepsilon_j = 0, \text{ if } C_{j+1/2,k}^n + C_{j-1/2,k}^n > 0, \varepsilon_j = 1, \text{ if } C_{j+1/2,k}^n + C_{j-1/2,k}^n < 0.$$

This work was followed by more publications in which the method of modeling the flow at the shock wave is being improved. Thus, in works [61], [54], the method of separation of jumps and stretching of grid coordinates is used. Shock waves are considered as gaps perpendicular to the flow direction. A little later [13] the authors develop their approach for three-dimensional flow, but not for Kármán-Guderley, and for the equation of the full flow potential. At the beginning of the 80s [14] the inverse problem is solved: according to the given pressure is the flow field and the shape of the wing profile.

## 2. Numerical analytical method

The author of this work proposed a numerical-analytical method [15], [16], which has been successfully tested on a number of solved problems of helicopter blade noise generation. The main idea of the method is that finite-difference representations of derivatives in the equations to be solved are not used explicitly. The reason is simple: it is not always known in advance which of the known decompositions, with what accuracy, will prove to be the most convenient.

Therefore, according to the idea of the method, we have the following: at the  $n-1$  points of the calculated "molecule" we perform a standard Taylor series expansion and at the  $n$  point we assume that the small perturbation propagation equation is automatically fulfilled. In fact, we forcibly require that the small unsteady perturbation generation equation is satisfied at the  $n$ -th point. From such condition we actually have automatic fulfillment of convergence condition of required numerical solution.

At the same time, the expansion coefficients in the Taylor series are expressed implicitly from the system of  $n$  equations. Such a scheme of the method is used for separate boundary value problems, where the boundary condition allows integration, therefore it is not added to the calculation system of equations. But this happens only in simple cases.

If it is additionally necessary to fulfill a boundary condition, which occurs in most problems, then this boundary condition is also added to the calculation system of equations. In this case, we have the following: at the  $n-2$  points of the calculated "molecule" we perform

expansion into a multidimensional Taylor series, and we also require satisfying of the equation being solved and the boundary condition. Thus, the number of points of the calculated molecule, for which expansion in the Taylor series is required, is reduced by 2.

Below we will consider the implementation of the numerical analytical method for the two-dimensional stationary and three-dimensional non-stationary Kármán-Guderley equations.

### 3. 2-dimensionals case

Equation (1) of Kármán-Guderley in dimensionless variables  $\xi = x/c, \eta = \lambda y$  looks like :

$$\left[1 - \frac{1}{M_1^2} + \varepsilon \cdot (\gamma + 1) f_\xi\right] f_{\xi\xi} - \frac{\lambda^2}{M_1^2} f_{\eta\eta} = 0, \quad (11)$$

For the two-dimensional case [17], we have a 6-point scheme: at five points we expand the function  $f(\xi_i, \eta_i), f \in C^2([0;1] \times [0;1])$ , into a Taylor series:

$$\begin{aligned} f(\xi_i, \eta_i) &= f(\xi_0, \eta_0) + f_\xi(\xi_0, \eta_0)(\xi_i - \xi_0) + f_\eta(\xi_0, \eta_0)(\eta_i - \eta_0) + \\ &+ \frac{1}{2} [f_{\xi\xi}(\xi_0, \eta_0)(\xi_i - \xi_0)^2 + 2f_{\xi\eta}(\xi_0, \eta_0)(\xi_i - \xi_0)(\eta_i - \eta_0) + f_{\eta\eta}(\xi_0, \eta_0)(\eta_i - \eta_0)^2] + \\ &+ o(\max\{(\xi_i - \xi_0)^2, (\xi_i - \xi_0)(\eta_i - \eta_0), (\eta_i - \eta_0)^2\}), \quad i = 1, \dots, 5. \end{aligned}$$

In the 6th point  $(\xi_0, \eta_0)$ , we require automatic execution of the equation:

$$\left[1 - \frac{1}{M^2} + \varepsilon(\gamma + 1) f_\xi(\xi_0, \eta_0)\right] f_{\xi\xi}(\xi_0, \eta_0) - \frac{\lambda^2}{M_1^2} f_{\eta\eta}(\xi_0, \eta_0) = 0. \quad (13)$$

The non-penetrating boundary condition  $f_\eta = \delta g_\xi, 0 < \xi < 1$  in this problem is fulfilled automatically.

This numerical scheme allowed direct satisfaction of the convergence of the proposed method, and its implicit type ensured the stability of the calculation. The curves of pressure coefficients given in Fig.6 at Mach number values  $M \approx 1$  (the range of the problem calculation zone) indicate that the numerical analytical method successfully coped with the task of calculating the sound flow in a physically unstable region. At the same time, the numerical scheme did not "fall apart", as happened with most known finite-difference representations.

Note that in the case where function  $f(\xi_i, \eta_i, \tau_i)$  depends on time, 4 more derivatives  $f_\tau, f_{\tau\tau}, f_{\xi\tau}, f_{\eta\tau}$  are added to the Taylor series in the expansion, so the scheme becomes an 8-points scheme if we take into account the fulfillment of the boundary condition.

### 4. 3-dimensionals case

The author of this paper previously derived a complete three-dimensional equation for the propagation of small disturbances from a thin wing [18], and performed an analysis of its

partial cases. To solve the boundary problem of studying the generation and propagation of small non-stationary disturbances from a helicopter blade, a numerical analytical method was used [19]. In this case of its application, we have a 3-dimensional equation for the propagation of small disturbances:

$$\left(\frac{kc}{U}\right)^2 f_{\tau\tau} + \left[1 - \frac{1}{M_1^2} + (1 + \gamma)\varepsilon f_{\xi}\right] f_{\xi\xi} + \frac{2kc}{U} f_{\xi\tau} - \frac{(\lambda c)^2}{M_1^2} f_{\eta\eta} - \left(\frac{c}{R}\right)^2 \frac{1}{M_1^2} f_{\zeta\zeta} = 0 \quad (14)$$

where  $\xi = x/c, \eta = \lambda y, \zeta = z/R, \tau = kt$ .

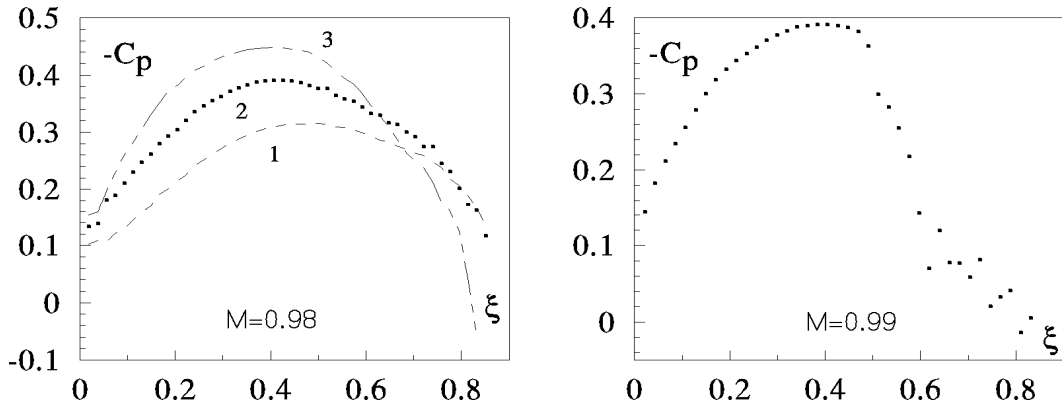


Fig. 6 Calculation of the pressure coefficient in the transonic flow range

Boundary condition is:

$$\delta \left[ \frac{kc}{U} g_{\tau} + g_{\xi} \right] = \varepsilon \lambda c f_{\eta}, 0 < \xi < 1, \eta = \eta(\xi), \quad (15)$$

Next, by the analogy given above for the two-dimensional case, we choose the number of calculation points of the template by the number of unknown derivatives in the function represented in the Taylor series expansion, but by 2 less, since we also have the boundary condition (14) and equation (15), which is solved.

$$\begin{aligned} f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i, \tau_i) &= f(\xi_o, \eta_o, \zeta_o, \tau_o) + f_{\xi}(\xi_i - \xi_o) + f_{\eta}(\eta_i - \eta_o) + f_{\zeta}(\zeta_i - \zeta_o) + f_{\tau}(\tau_i - \tau_o) + \\ &+ \frac{1}{2} [f_{\xi\xi}(\xi_i - \xi_o)^2 + f_{\eta\eta}(\eta_i - \eta_o)^2 + f_{\zeta\zeta}(\zeta_i - \zeta_o)^2 + f_{\tau\tau}(\tau_i - \tau_o)^2] + f_{\xi\eta}(\xi_i - \xi_o)(\eta_i - \eta_o) + \\ &+ f_{\xi\zeta}(\xi_i - \xi_o)(\zeta_i - \zeta_o) + f_{\eta\zeta}(\zeta_i - \zeta_o)(\eta_i - \eta_o) + f_{\xi\tau}(\xi_i - \xi_o)(\tau_i - \tau_o) + f_{\eta\tau}(\eta_i - \eta_o)(\tau_i - \tau_o) + \\ &+ f_{\zeta\tau}(\zeta_i - \zeta_o)(\tau_i - \tau_o) + R(\Delta^3), i = 1, n-2 \end{aligned} \quad (16)$$

So, in the three-dimensional non-stationary case, we have shown the calculation of the pressure coefficient (Fig.7) in the cross-section of the blade. As can be seen from Fig.7, the pressure distribution according to the non-stationary model is significantly different from the pressure distribution according to the stationary model (Fig.6).

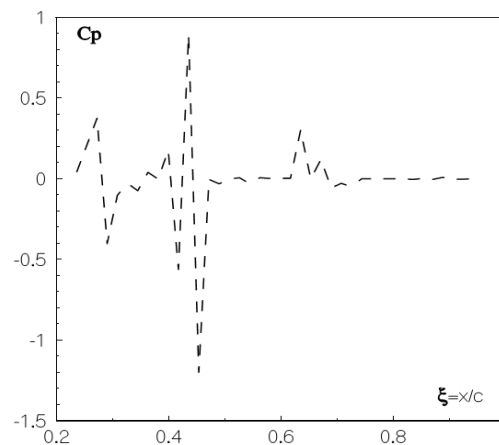


Fig. 7 Pressure coefficient along the blade chord

### 5. Calculation schemes of non-potential flow

The existing schemes for calculating sound disturbances in the potential approximation were considered above. These models are usually used for relatively large values of Mach numbers,  $M > 0,5$ , when rotational noise is dominant, rather than vortex noise. In the case of  $M < 0,5$ , the vortex component of the noise is significantly activated, and therefore the potential approximation is no longer appropriate. In this case, full equations for simulating the generation of sound of aerodynamic origin, which take into account the vortex component of the flow, are used for calculation.

To date, a sufficient number of theoretical non-potential models [20], [21] are known which, according to the authors, are capable of describing the generation of the sound of aerodynamic origin. However, these models are somewhat physically inaccurate. That is why the majority of researchers choose the currently most popular models of Fowkes-Williams-Hawkings [22] and Forsyth's 1A formulation [23] for the calculation of helicopter noise, and Lighthill's acoustic analogy is used only in some cases. But this does not mean that these models are physically more accurate: Lighthill's acoustic analogy and its application in the form of the Ffowkes-Williams-Hawkings model leave the question of the physicality of these approaches [21].

Consider the Ffowkes-Williams-Hawkings equation:

$$4\pi^2(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{V_0} \left[ \frac{T_{ij}}{r|1-M_r|} \right] d\eta - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \left[ \frac{P_{ij} n_j}{r|1-M_r|} \right] dS(\eta) - \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{V_0} \left[ \frac{\rho_0 v_i v_j}{r|1-M_r|} \right] d\eta + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{V_0} \left[ \frac{\rho_0 v_i v_j}{r|1-M_r|} \right] d\eta \quad (17)$$

Equation (17) contains the Lighthill equation inside, which was obtained artificially: by adding a certain term to the left and right sides, which formally led it externally to a wave equation that seems to describe the generation of sound. The question arises: if we add other derivatives to the left and right sides, what will we get formally? I mean that the approach used by Lighthill is not physically correct, because by physically unexplained addition and subtraction of certain derivatives in the equation, we thereby actually add certain physical

components, and get equations that describe a completely different physical process. This is the main physical drawback of this approach.

### Formulation 1 of Farassat:

According to the formula obtained by Farassat [23], the sound pressure is determined through the thickness source  $p'_T(x, t)$  and the load source  $p'_L(x, t)$ :

$$4\pi p'(x, t) = 4\pi(p'_T(x, t) + p'_L(x, t)) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{f=0} \left[ \frac{\rho_0 v_n}{r(1-M_r)} + \frac{p \cos \theta}{cr(1-M_r)} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[ \frac{p \cos \theta}{r^2(1-M_r)} \right]_{ret} dS \quad (18)$$

where  $\cos \theta = n_i \hat{r}_i$  is the local angle between the normal to the surface and the radiation direction.

If you look carefully at equations (17) and (18), you can make sure that nothing is said about the definition of the near sound field in these approaches. What methods are used to find the potential of the sound field, or the density in the sound wave - they do not write about it.

The main disadvantage of using Farassat's approach is that the source of sound is non-existent fictitious sources, which are placed inside a solid surface. The question arises: why is such a strange approach used? The answer is simple: in classical acoustics, Green's function is used as an auxiliary solution to represent the far sound field. This makes it possible to record the specified representation of the far field based on second Green's formula for real sound sources.

Farassat used the next approach: he said that these sources do not have to be real sound sources, let them be imaginary ones. Moreover, they are placed inside a hard surface that does not emit sound. And this is actually the main obstacle to a physically accurate determination of aerodynamically generated sound: in fact, such an approach lacks real sound sources. And this was discussed in the work of Fedorchenko [24], as well as in the work [18].

In addition to the above-mentioned models, there are several models that describe the sound of aerodynamic origin [21], but there is no numerical implementation of them. An exception is a theoretical model proposed by the author of this paper [21]. The closed system of equations obtained based on this model makes it possible to describe the problems of aeroacoustics with accuracy to the values of the second order of smallness:

$$\frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \tau^2} - \frac{1}{M_\infty^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \xi^2} - a^2 (\lambda^2 c^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \eta^2} + \frac{1}{AR^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \zeta^2}) + R(\bar{\rho}', \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \xi}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \eta}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \zeta}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \xi^2}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \eta \partial \xi}, \dots, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \zeta^2}) =$$

$$\gamma \left( \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \xi}, \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \eta}, \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \zeta}, \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \xi^2}, \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \eta \partial \xi}, \dots, \frac{\partial^3 \bar{\varphi}}{\partial \zeta^3} \right), \quad (19)$$

$$\bar{\rho} \left( \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \xi^2} + c^2 \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{AR^2} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \zeta^2} \right) + c \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \xi} + c^2 \lambda^2 \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \eta} + \frac{1}{AR^2} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \zeta} = - \left[ c \frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \right.$$

$$\left. \bar{\rho}' \left( c \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \lambda c^2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{c^2}{R} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \right) + \bar{c} \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \xi} + \lambda c^2 \bar{v} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \eta} + \frac{c^2}{R} \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \zeta} \right] \quad (20)$$

In equations (19)-(20),  $\bar{\varphi}, \bar{\rho}'$  - are acoustical density and sound potential correspondingly.

Despite the mathematical complexity of this system of equations, the author managed to numerically solve a number of interesting problems using the numerical analytical method [25]-[28]. An interesting feature of the application of the numerical analytical method, which was noticed, is the use of an unstructured calculation grid around the blade. So, for example, along the chord, the step of the calculated grid is smaller (Fig. 8, Fig. 9) than along the span of the blade. This is necessary for stable calculation according to the numerical analytical method.

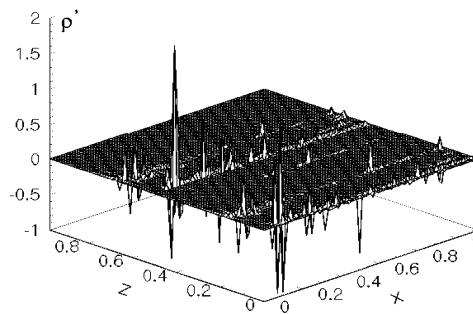


Fig.8 Distribution of acoustic density on the surface of a helicopter blade [25]

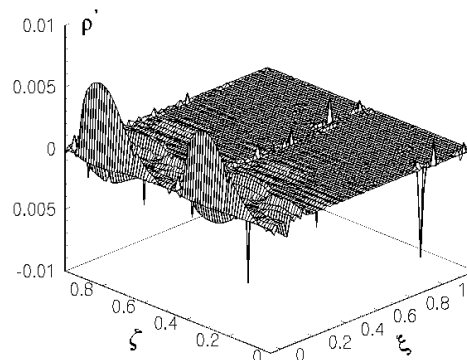


Fig. 9 Distribution of acoustic density on the surface of a helicopter blade [26]

And in conclusion, we will indicate that the near-field calculation data obtained with the application numerical-analytical approach is easy to use to calculate the integral representation of the far field. For this, there is no need to use any specific numerical approaches: standard methods of calculating definite integrals are used.

## Conclusions

1. In this work, a study of the methods of numerical calculation of the near sound field of a helicopter is carried out.
2. The conducted analysis showed that there was still no single method, a finite-difference scheme, for various flow models: each of the given numerical schemes solved a certain problem.
3. It is shown that the numerical analytical method is capable of solving the problems of helicopter noise generation for various types of flow, both potential and non-potential. This

feature of the method allows it to be used for various tasks of modeling noise of aerodynamic origin.

#### References:

1. Gutin , L.Ya. (1937). O zvukovom pole vraschuschehosya vinta. [About the sound field of a rotating propeller]. Zhurnal Tehnicheskoi Fiziki . Journal Technical Phys.–№6(5),p.899-909. [In Russian].
2. Kármán, T. von. (1947). The similarity law of transonic flow. Journal of Math. and Physics–V.26,N 3–182-190.
3. Guderley,G. (1947). Considerations of the Structure of Mixed Subsonic and Supersonic Flow Patterns .Wright Field Report, F-TR-2168-ND
4. Cole, J. D. ,Cook, L. P. (1986). Transonic Aerodynamics. North-Holland, Amsterdam. pp. 473.
5. Murman E.M., Cole,J.D. (1971). Calculation of Plane Steady Transonic Flows. AIAA Journal. V.9, N1–pp.114-121.
6. Hirsch, Ch. (2007). Numerical computation of Internal and External Flows.Volume1.Fundamentals of Computational Fluid Dynamics.Second Edition, Elsevier–Burlington.USA.pp.675.
7. Murman, E.M. (1974). Analysis of Embedded Shock Waves Calculated by Relaxation Methods. AIAA Journal.V.12,N.5,pp.626-633.
8. Caradonna, F.X. , Isom, M.P. (1972). Subsonic and Transonic Potential Flow over Helicopter Rotor Blades.AIAA Journal.V.10,N.12,P.1606-1612.
9. Ballhaus, W.R., Goorjian, P.M. (1977). Implicit finite-Difference Computations of Unsteady Transonic Flows about Airfoils Including the Effect of Irregular Shock Motions. AIAA Journal.V.15,N.12.pp.1728-1735.
10. Ballhaus, W.F. (1976). Some Recent Progress in Transonic Flow Computations. VKL Lecture Series:Computational Fluid Dynamics,von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-SAT-Genese, Belgium.–March 15-19.
11. J. Yun, J., Seabass A.R., Balhaus, V.F. (1978). Implicit method for extracting jumps for calculation unsteady transonic. RTK.Vol.16, No.7-pp.43-50.
12. Fang, K.-Y. ,Yu.,N. J. , and Seabass, R. (1978). Small Unsteady Perturbations in Transonic Flows. AIAA Journal.V.16, N8–p.815-822.
13. Sobieczky, H. Yu., Yu N.J., Fung K.-Y., and Seebass A.R. (1979). New Method for Designing Shock-Free Transonic Configurations. AIAA Journal.V.17, N.7, pp.722-729.
14. Fang, K.I.m Chang A.V. (1983). Computation of Unsteady Transonic Aerodynamics Using Prescribed Steady Pressures. Journal of Aircraft.V.20, N12, pp1058-1061.
15. Lukianov, P.V. (2005). Using of numerical-analytical method for acoustic problems solution. Acoustical symposium “Consonant 2005”, Kiev, Inst. Hydromechanics, 27-29 September,pp.225-230.
16. Lukianov, P.V. (2011). On one numerically-analytical approach to solving of a problem on sound generation by a thin wing. Part I. General schematic of application to planer stationary problem.Acoustic bulletin.V.14,N3,p.46-52.
17. Lukianov, Petro. (2021). Numerical-analytical method for the problem of environmental safety.// Bulletin of the Cherkassy Bohdan Khmelnytsky National University. Series:Applied mathematics and Informatics.Issue 1,pp.13-22.
18. Lukianov, P.V. (2009). Unsteady propagation of small disturbances from a thin wing: The near and a far fields. Acoustic bulletin,V.12(3),pp.41-55.
19. Lukianov, P.V. (2012). On one numerical-analytical approach to solving of a problem on sound generation by a thin wing. Acoustic bulletin.V.15(3),pp.45-52.
20. Lukianov, P.V. (2007). The system of equations of aeroacoustics for a medium with vorticity: general case// Acoustic Symposium "Consonance-2007".September 25-27,pp.163-168.
21. Lukianov, P.V. (2013-2014). On one model for aeroacoustics of viscous compressible gas. Part I. Analysis of existing models, deducing of resolving system of equations. Acoustic bulletin.№2(16),pp.18-30.
22. Ffowes Willams, J.E., Hawkings D.L. (1969). Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Philosophical Transactions of the Royal Society.A264, N1151,pp.321-342.
23. Farassat, F. (2007).Derivation of Formulations 1 and 1A of Farassat. NASA/TM 214853, 25p.
24. Fedorchenko, A.T. (2000). On some fundamental flaws in present aeroacoustic theory. Journal of Sound and Vibration. 232, N.4,pp.719-782.
25. Lukianov, P.V. (2013-2014). On one model for aeroacoustics of viscous compressible gas. Part II. Noise of the near blade-vortex interaction. Acoustic bulletin, №3(16),pp.31-40.
26. Lukianov, Petro V. (2017). Helicopter Rotor BVI-Noise Reduction by Twice-Bent Blade. Bulletin of the Cherkassy Bohdan Khmelnytsky National University. Series:Applied mathematics and Informatics.Issue 1-2,p.50-64.

27. Lukianov, P.V. (2018). Peculiarities of BVI-noise generation at helicopter's airplane landing.// Bulletin of Zaporozhsky National University, Ser.:Phys. & Math. Sciences, N2,p.73-88.
28. Lukianov , P.V. (2019). BVI-noise simulation of two-blade helicopter's rotor sin-shape. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. "Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics".Vol.89, p.59-75.

#### Список використаної літератури:

1. 1. Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта / Л.Я. Гутин // ЖТФ.–1936.–№6(5).С.899-909.
2. 2. Karman T. von.The similarity low of transonic flow / T. von Karman //Journal of Math. and Phisics–1947–V.26,N 3–182-190.
3. Guderley G. Considerations of the Structure of Mixed Subsonic and Supersonic Flow Patterns / G. Guderley // Wright Field Report,F-TR-2168-ND,October–1947.
4. Коул Дж. Трансзвуковая аэродинамика / Дж.Коул, Л.Кук.–М.:Мир.1989.–360с.
5. Murman E.M. Calculation of Plane Steady Transonic Flows / E.M. Murman, J.D. Cole // AIAA Journal–1971–V.9, N.1–P.114-121.
6. Hirsch Ch. Numerical computation of Internal and External Flows.Volumel.Fundamentals of Computational Fluid Dynamics / Ch. Hirsch // Second Edition,Elsevier–Burlington.USA–2007–675.
7. Murman E.M.Analysis of Embeded Shock Waves Calculated by Relaxation Methods /E.M. Murman //AIAA Journal–1974–V.12,N.5–626-633.
8. Caradonna F.X. Subsonic and Transonic Potential Flow over Helicopter Rotor Blades / F.X. Caradonna, M.P. Isom // AIAA Journal–1972–V.10,N.12,P.1606-1612.
9. Ballhaus W.R.Implicit finite-Difference Computations of Unsteady Transonic Flows about Airfoils Including the Effect of Irregular Shock Motions / W.R. Ballhaus, P.M. Goorjian // AIAA Journal–1977–V.15,N.12–P.1728-1735.
10. Ballhaus W.F. Some Recent Progress in Transonic Flow Computations / W.F. Ballhaus //VKL Lecture Series:Computational Fluid Dynamics,von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Sat-Genese, Belgium.–March 15-19,1976.
11. Юн.Дж. Неявный метод выделения скачков для расчёта нестационарных трансзвуковых течений / Дж. Юн, А.,Р. Сибасс, В., Ф. Бальхауз // РТК–1978–т.16,№7-с.43-50.
12. 12. Фанг К.И. Малые нестационарные возмущения в околосзвуковых течениях / К.И. Фанг, Дж.Ю.Р. Сибасс //РТК–1978–т.16,N8–С.60-69.
13. Sobieczky H. Yu. New Method for Designing Shock-Free Transonic Configurations / H. Yu. Sobieczky, N.J. Yu, К.-Y. Fung, A.R. Seebass, // AIAA Journal–1979–V.17,N.7–P.722-729.
14. Фанг К.И. Решение нестационарных задач трансзвуковой аэродинамики с использованием заданных стационарных распределений давления / К.И. Фанг, А.В. Чанг //Аэрокосмическая техника–1984–т.2,N10–55-60с.
15. Лукьянов Пётр.В.Применение численно-аналитического метода для решения задач акустики / Пётр.В. Лукьянов // Акустический симпозиум Консонанс–2005–27-29 вересня-С.225-230.
16. Лукьянов П.В. Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть I. Общая схема применения для плоской стационарной задачи //Акустичний вісник–2011–Т.14(3)–С.46-52.
17. Petro Lukianov. Numerical-analytical method for the problem of environmental safety.// Bulletin of the Cherkassy Bohdan Khmelnytsky National University. Series:Applied mathematics and Informatics.Issue 1.2021,p.13-22.
18. Лукьянов Пётр.В. Нестационарное распространение малых возмущений от тонкого крыла: ближнее и дальнее поле//Акустичний вісник–2009–Т.12,(3)–С.41-55.
19. Лукьянов П.В. Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть II. Схема применения для нестационарных задач / П.В. Лукьянов // Акустичний вісник–2012–3(15)–С.46-52.
20. Лукьянов Пётр.В. Система уравнений аэроакустики для среды с завихренностью: общий случай // Акустический симпозиум «Консонанс–2007»–25-27 вересня-С.163-168.
21. Лукьянов П.В. Об одной модели аэроакустики вязкого сжимаемого газа. Часть I. Анализ существующих моделей, вывод разрешающей системы уравнений//Акустичний вісник–2013-2014–№2(16)–С.18-30.
22. Ffowes Willams J.E. Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Aritrany Motion / J.E. Ffowes Willams and D.L. Hawkings // Philosophical Transactions of the Royal Socicety–1969–A264,N 1151–P.321-342.
23. Farassat, F. Derivation of Formulations 1 and 1A of Farassat. NASA/TM-2007-214853, March-2007, 25p.
24. Fedorchenko A.T. On some fundamental flaws in present aeroacoustic theory / A.T. Fedorchenko // Journal of Sound and Vibration –2000–232, N.4–P.719-782.

25. Лукьянов П.В. Об одной модели аэроакустики сжимаемого газа. Часть II. Шум близкого взаимодействия вихря-лопасти вертолёта // П.В.Лукьянов // Акустичний вісник–2013-2014-№3(16)–С.31-40.
26. Лукьянов Пётр В. Снижение BVI-шума ротора вертолёта с помощью лопасти с двойным изгибом / Пётр В. Лукьянов // Вісник Черкаського університету. Серія: Прикладна математика. Інформатика.– 2017, №1-2–с.50-64.
27. P.V. Lukianov. Peculiarities of BVI-noise generation at helicopter's airplane landing.// Bulletin of Zaporozhsky National University, ser.:phys. & math. Sciences, N2,2018,p.73-88.
28. Lukianov P.V. BVI-noise simulation of two-blade helicopter's rotor sin-shape. // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. "Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics".Vol.89, 2019, p.59-75.

**ЛУК'ЯНОВ Петро Володимирович,**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент АРБ, ННІАТ, НТТУ "КПІ"

## **ЧИСЕЛЬНІ СХЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ШУМУ РОТОРА ГЕЛІКОПТЕРА**

***Анотація.** В даній роботі розглянуто основні чисельні схеми моделювання шуму ротора гелікоптера аеродинамічного походження. Зокрема, наведено кінцево-різницеві схеми для стаціонарної, нестаціонарної 2-вимірної потенціальної течії, на основі якої будується модель генерації звуку аеродинамічного походження лопаті ротора гелікоптера. Наведено приклади розв'язання задачі для 3-вимірної потенціальної нестаціонарної течії. Для кожної з перелічених задач пропонується власна кінцево-різницева схема. Ці схеми суттєво відрізняються одна від одної. Отже єдиної кінцево-різницевої схеми для розв'язання задач акустики ротора гелікоптера фактично не існувало до недавніх пір. Це ускладнювало практичне застосування вказаних схем, оскільки під час розв'язання конкретної задачі можлива реалізація різних типів течії, що потребує постійної зміни розрахункового шаблону. Вирішення даної проблеми вдалось досягнути завдяки використанню чисельно-аналітичного методу. Чисельно-аналітичний метод, розроблений автором даної роботи, показав спроможність розв'язувати задачі аероакустики лопаті гелікоптера для різних типів течії, як потенціальних так і не потенціальних. В роботі наводяться приклади розв'язання подібних задач, виконано аналіз застосування чисельно-аналітичного методу, порівняння з існуючими кінцево-різницевими схемами. Зокрема, представлені розрахункові шаблони застосування методу для 2-вимірної стаціонарної течії, 3-вимірної нестаціонарної течії, пояснена специфіка вибору кількості точок у розрахунковій молекулі. В залежності від особливості конкретної задачі, кількість точок розрахункової сітки може варіюватись як уздовж розмаху, так і поперек лопаті. Це дає змогу налаштувати чисельно-аналітичний метод під кожну з задач, що розв'язується. При цьому виконується стійкий розрахунок, а збіжність методу щоразу виконується автоматично на підставі ідеї самого чисельно-аналітичного методу. Розроблений автором метод дозволяє виконувати чисельний розрахунок шуму ротора гелікоптера для різних режимів його роботи.*

***Мета статті.** Метою даної роботи є аналіз існуючих чисельних схем розрахунку шуму аеродинамічного походження ротора гелікоптера.*

***Методи дослідження.** Теоретичний аналіз існуючих чисельних схем.*

***Результати дослідження.** Виявлено відсутність єдиного чисельного підходу до розв'язання задач генерації шуму аеродинамічного походження ротора гелікоптера. У якості розв'язання даної проблеми пропонується чисельно-аналітичний метод, розроблений автором даної роботи.*

***Висновки.***

*У даній роботі виконано дослідження методів чисельного розрахунку ближнього звукового поля гелікоптера, котрі використовуються для різних фізичних моделей: потенціальна течія та не потенціальна течія.*

*Проведений аналіз показав, що єдиного методу, кінцево-різничевої схеми, для різних моделей течії до сих пір не було: кожна з наведених чисельних схем розв'язувала лише певну задачу.*

*Показано, що чисельно-аналітичний метод здатен розв'язувати задачі генерації шуму гелікоптера для різних типів течії, як потенціальної, так і не потенціальної. Ця особливість методу дозволяє використовувати його для різних задач з моделювання шуму аеродинамічного походження.*

**Ключові слова:** шум ротора гелікоптера, чисельні методи, чисельно-аналітичний метод.

Одержано редакцією 20.01.2022 р.  
Прийнято до публікації 23.06.2022 р.

УДК 519.688

PACS 02.60.-x, 02.60.Pn

**ГУР'ЄВ Ярослав Ігорович**  
студент спеціальності «Прикладна математика» Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького  
e-mail: yaroslavhuriev@gmail.com

**СЕРДЮК Олександр Анатолійович,**  
кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри прикладної математики та інформатики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького  
e-mail: serdyuk@ukr.net  
ORCID 0000-0002-3919-4661

**ДІДКОВСЬКИЙ Руслан Михайлович,**  
доктор технічних наук, доцент, доцент  
кафедри прикладної математики та інформатики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького  
e-mail: didkovskyirm@vu.cdu.edu.ua  
ORCID 0000-0002-5166-7564

## **РОЗРОБКА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОГО ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОЗКЛАДОМ ЗАНЯТЬ**

*У даній статті представлено розробку веб-орієнтованого інструментального середовища для ефективного керування розкладом занять в навчальних закладах. Зростання кількості учнів та викладачів у сучасних освітніх установах ставить перед керівництвом виклик в ефективному плануванні та уникненні конфліктів у графіку навчальних занять. Програмний інструмент, що пропонується, надає зручний інтерфейс для складання та оновлення розкладу, дозволяючи враховувати різноманітні обмеження, наявність різних груп студентів, викладачів та аудиторій. Призначений інструмент допомагає автоматизувати процес планування, забезпечує оптимальне розподілення ресурсів та допомагає уникнути помилок, що можуть виникати при складанні розкладу вручну. Результати експериментів підтверджують ефективність запропонованого інструменту та переваги використання веб-технологій для керування розкладом навчальних занять.*

**Ключові слова:** розклад, автоматична генерація розкладу, генетичний алгоритм, веб-додаток.

## Вступ

Сучасні навчальні заклади стикаються з глобальною проблемою управління та автоматизованого створення розкладу навчальних занять. Зараз кількість учнів та викладачів швидко зростає, що призводить до збільшення зусиль, необхідних для створення розкладу, який задовольнить всіх учасників навчального процесу і уникне конфліктів. Нерідкі ситуації, коли одного викладача призначають на заняття в двох різних аудиторіях одночасно, призводять до поспіху та виправлень, що вже на етапі проведення занять може спричинити проблеми. Тому майбутнє управління розкладами належить веб-додаткам, які допоможуть укладачам розкладу зекономити час та уникнути грубих помилок, подібних згаданій. Такі веб-додатки будуть не тільки зручним інструментом для планування навчального процесу, але й допоможуть підвищити його ефективність та організованість, забезпечуючи зручний та оптимальний розклад для всіх учасників.

**Мета статті** – провівши аналіз аналогічних додатків розробити архітектуру та створити веб-орієнтоване інструментальне середовище для керування розкладом занять.

**Практичне значення одержаних результатів.** Додаток розроблений у ході написання статті можна використовувати для керування розкладом занять у навчальних закладах.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Концепція додатку та огляд предметної області

#### 1.1 Огляд веб-додатків схожої тематики

У сфері генерації розкладів навчальних занять існує значна кількість програм, проте більшість з них є платними. У цьому розділі ми розглянемо безкоштовні альтернативи, зокрема FET, Timetable-Plus Spring Lite та College Schedule Maker.

FET є безкоштовним програмним забезпеченням, призначеним для генерації розкладів у школах та університетах. Він використовує швидкий та ефективний алгоритм для складання розкладів, і може вирішувати складні задачі за дуже короткий час - від 5 до 20 хвилин. У простіших випадках цей процес може займати менше 5 хвилин, а іноді навіть всього декілька секунд. Але для дуже складних задач, може знадобитись кілька годин.

Основні переваги FET включають:

- Широкий вибір локалізацій, включаючи українську.
- Повністю автоматизований алгоритм генерації розкладу, який при цьому дозволяє коригування результатів вручну.
- Кросплатформена реалізація програми, що означає, що вона доступна для різних операційних систем.
- Згенеровані розклади можна експортувати у формати CSV, XML або HTML.
- Підтримка великої кількості можливих часових та просторових обмежень, що дозволяє враховувати специфічні вимоги та обмеження для кожного розкладу.

Іншим інструментом для генерації розкладу занять є Timetable-Plus Spring Lite - це безкоштовне програмне забезпечення, яке дозволяє створювати розклади занять без конфліктів між ресурсами. Цей інструмент володіє гнучкістю вхідних даних та надає численні налаштування обмежень ресурсів, що дозволяє генерувати розклади як для звичайних шкіл, так і для коледжів і університетів.

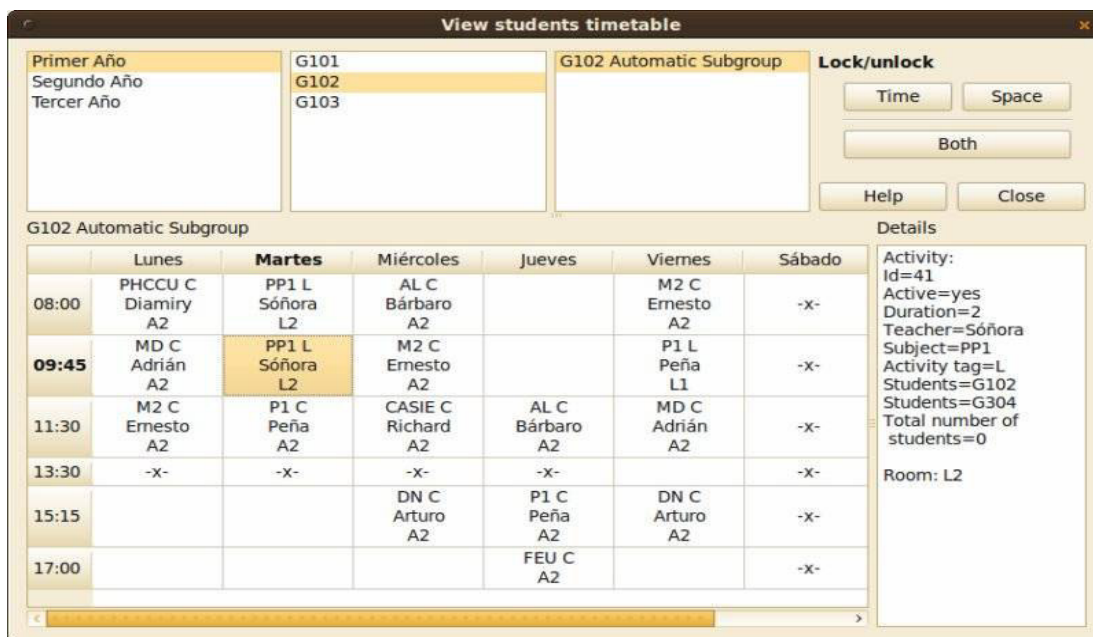


Рис 1. Загальний вигляд застосунку FET

No	Code	Course Name	Section	Room Type	Lecturer	Class Size	Class Duration	Slot
1	CBB1013	Principle of Accounting	1	Tutorial Room	Sharifah Faeziah	40	2 H 0 M	-
2	CBB1023	Principle of Microeconomics	1	Tutorial Room	Sharifah Faeziah	40	2 H 0 M	-
3	CBB2013	Statistical Methods	1	Tutorial Room	Sharon Natasha Pious	40	2 H 0 M	39
4	CBM5023	Management of IT Resources	1	Tutorial Room	Gurvinder Kaur a/p Gurchar...	40	2 H 0 M	238
5	CBM5033	IT & Business process Reengineering	1	Tutorial Room	Wan Raihanah Hashim	40	2 H 0 M	224
6	CEB1014	Programming Principles & Technique	1	Tutorial Room	Au Yong Geok Lian	40	2 H 0 M	51
7	CEB1114	Algorithms & Data Structures	1 Lab	Computer Lab	Au Yong Geok Lian	40	2 H 0 M	62
8	CEB2104	Systems Analysis & Design	1	Tutorial Room	Azlina Shaikh Awadz	40	2 H 0 M	120
9	CEB2114	Object Oriented Programming	1 Lab	Computer Lab	Azlina Shaikh Awadz	40	2 H 0 M	-
10	CEB3014	Human Computer Interaction	1	Tutorial Room	Bokkasam Sasidhar	40	2 H 0 M	151
11	CEB3124	Software Engineering for IS	1	Tutorial Room	John Smith	40	2 H 0 M	108
12	CEB4124	Software Project Management	1 Lab	Computer Lab	John Smith	40	2 H 0 M	131
13	CEB4134	Software Quality	1	Tutorial Room	Gurvinder Kaur a/p Gurchar...	40	2 H 0 M	125
14	CEM5013	Object Oriented Programming Princi...	1	Tutorial Room	Hanita Sarah Saad	40	2 H 0 M	68
					Ramana Rajalingam	40	2 H 0 M	11
					Chong Kim Loy	40	2 H 0 M	27
					Sofia Elias	40	2 H 0 M	211

No	Lecturer Name	Subject Taught	Section	Time	Venue	Workload
1	Au Yong Geok Lian	CEB1014 - Programming Principles & T...	1	Thursday: 08:30 AM - 10:30 AM	TR 3	2 H 0 M
		CEB1014 - Programming Principles & T...	1 Lab	Thursday: 10:30 AM - 12:30 PM	LAB 2	2 H 0 M
		CEM5023 - Systems Analysis and Design	1	Saturday: 08:30 AM - 10:30 AM	CGS 2	2 H 0 M
		CNM5023 - Computer Networking	1	Saturday: 01:30 PM - 03:30 PM	CGS 2	2 H 0 M
		<b>Total</b>				<b>8 H 0 M</b>
2	Azlina Shaikh Awadz	CEB1114 - Algorithms & Data Structures	1	Tuesday: 08:30 AM - 10:30 AM	TR 4	2 H 0 M
		CEB1114 - Algorithms & Data Structures	1 Lab	Tuesday: 10:30 AM - 12:30 PM	LAB 1	2 H 0 M
		CSB3043 - Principles of Artificial Intellig...	1	Thursday: 01:30 PM - 03:30 PM	TR 1	2 H 0 M
		<b>Total</b>				<b>6 H 0 M</b>
3	Bokkasam Sasidhar	CEB2104 - Systems Analysis & Design	1	Friday: 08:30 AM - 10:30 AM	TR 6	2 H 0 M
		CNB1014 - Computer Systems & Organi...	1	Tuesday: 01:30 PM - 03:30 PM	TR 5	2 H 0 M
		<b>Total</b>				<b>4 H 0 M</b>
4	Chong Kim Loy	CEB4134 - Software Quality	1	Thursday: 10:30 AM - 12:30 PM	TR 4	2 H 0 M
		CNB1024 - Discrete Mathematics	1	Monday: 01:30 PM - 03:30 PM	TR 5	2 H 0 M
		<b>Total</b>				<b>4 H 0 M</b>

Рис 2. Загальний вигляд застосунку Timetable Plus Spring Lite

Основними особливостями Timetable-Plus Spring Lite є:

- Відсутність обмежень на розмір бази даних та вхідних даних, що робить його дуже гнучким і здатним працювати з великими обсягами інформації.
- Використання ієрархії при введенні даних та обмежень, що дозволяє структурувати інформацію за батьківськими та дочірніми елементами.
- Велика кількість налаштувань для обмежень по ресурсах, що дозволяє точно визначати параметри розкладу.

- Можливість ручного дозаповнення розкладу після генерації, що дозволяє виправити дрібні недоліки або врахувати специфічні потреби.
- Гнучкі налаштування для друку розкладів, що дозволяє вибрати оптимальний формат виведення інформації.
- Програма призначена для використання лише одним користувачем, що робить його зручним і ефективним інструментом для індивідуального використання.

Іншим інструментом для генерації розкладу є College Schedule Maker, який є веб-додатком. College Schedule Maker має простий функціонал, який дозволяє створювати розклад на тиждень для шкіл та коледжів. Відмінністю цього додатка від попередніх є його веб-орієнтованість та відсутність автоматичної генерації розкладу, користувач самостійно вносить заняття.

Основні можливості даного додатка включають:

- Друк розкладу, що дозволяє зручно матеріалізувати розклад та використовувати його офлайн.
- Можливість створення необмеженої кількості розкладів, що дозволяє використовувати додаток для різних навчальних закладів чи періодів.
- Збереження розкладу у якості зображення, що дозволяє зручно ділитися розкладом з іншими користувачами або друкувати його у зручному форматі.
- Імпорт та експорт розкладу, що дозволяє легко переміщувати розклад між різними пристроями або програмами, а також ділитися розкладом з іншими користувачами.

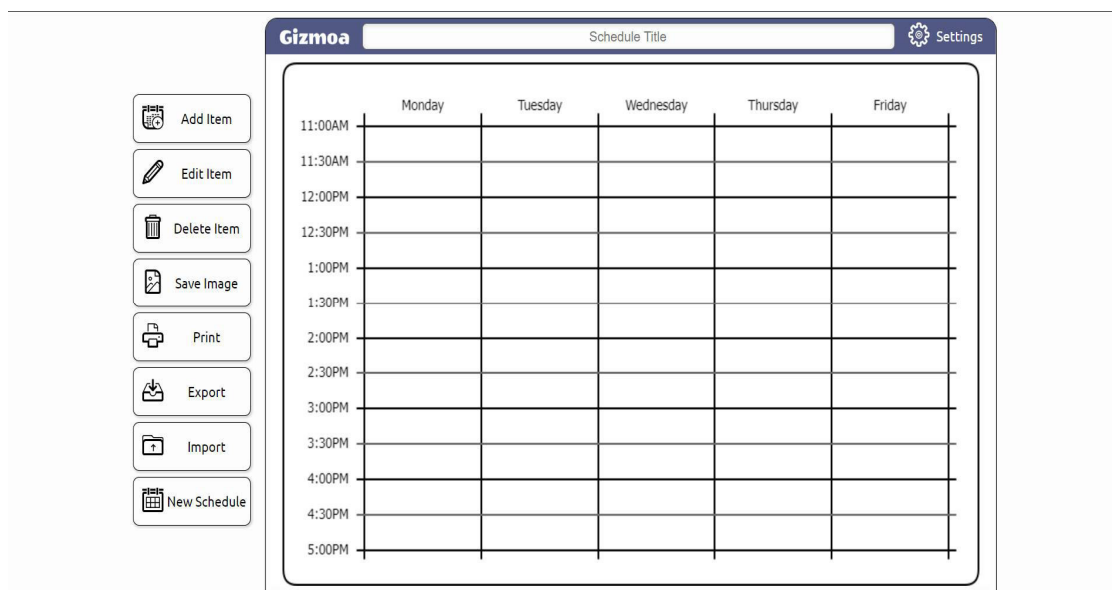


Рис 3. Загальний вигляд додатка College Schedule Maker

## 1.2 Опис концепції веб-додатку

Метою розробленого веб-додатка є максимальна спрощення процесу створення розкладу занять та економія часу для адміністраторів, які зазвичай створюють розклади вручну. Для досягнення цієї мети використовується генетичний алгоритм [1,2], що забезпечує автоматичну генерацію розкладів. Веб-орієнтованість додатка дозволяє адміністраторам легко поділитися створеним розкладом з користувачами, які просто мають авторизуватися в системі для доступу до актуального розкладу занять.

В системі виділяються два типи користувачів: адміністратори та звичайні користувачі. Адміністраторам доступний повний функціонал системи, зокрема, вони можуть редагувати та видаляти академічні групи та викладачів, створювати вхідні дані,

генерувати, переглядати та видаляти розклади, налаштовувати параметри генетичного алгоритму та обирати активний розклад.

Звичайні користувачі мають лише доступ до перегляду поточного розкладу, забезпечуючи синхронізацію між усіма користувачами системи. Надмірний пошук не потрібен, оскільки вся інформація про розклад знаходиться в одному місці, що робить його зручним у використанні.

Окрім того, велику увагу приділено можливості повторного використання вхідних даних, що дозволяє адміністраторам швидко створювати нові розклади, внесенням змін до існуючих даних, а не повторним вводом всієї інформації. Такий підхід мінімізує затрати часу на генерацію нових розкладів.

Останньою важливою особливістю додатка є його простота та інтуїтивність. Завдяки навігаційній панелі, яка містить всі можливі шляхи в додатку, користувачам легко орієнтуватися та не загубитися серед функцій програми.

## 2. Розробка веб-додатку та використані технології

У процесі створення серверної частини додатку було використано наступні технології: в якості фреймворку для web API частини був використаний .NET 6 мови програмування C#, за базу даних було обрано PostgreSQL. У клієнтській частині були використані бібліотеки React та Material UI мови JavaScript.

### 2.1 .NET

.NET є безкоштовною крос-платформеною програмною платформою з відкритим кодом, призначеною для розробки різноманітних застосунків. Вона побудована на основі високопродуктивного середовища виконання, яке успішно застосовується в багатьох великих масштабованих проєктах [3].

За результатами опитування серед українських розробників у 2022 році, мова програмування C# займає друге місце за популярністю в комерційних проєктах, поступаючись лише JavaScript. У розробці back-end додатків C# займає третє місце [4]. Головний конкурент C# - мова програмування Java.

Основні переваги C# та .NET, що сприяли їх вибору для розробки системи генерації та керування розкладом, включають:

- Використання Language Integrated Query (LINQ) - простої та високорівневої мови запитів до джерела даних, що інтегрована в C# [5].
- Використання auto-properties та зручного синтаксису, наприклад, null-conditional операторів.
- Проста та зрозуміла модель асинхронного програмування.
- Велика кількість сторонніх пакетів, зокрема, можливість використання менеджера пакетів NuGet.

З метою об'єктивності варто також зазначити деякі недоліки .NET:

- JIT компіляція може призводити до "підвисань" при першому запуску додатку, оскільки вона відбувається під час роботи програми.
- Відносно проста можливість декомпіляції коду, через використання JIT компіляції.
- Складність структури .csproj файлів.

### 2.2 PostgreSQL

PostgreSQL є потужною системою керування об'єктно-реляційними базами даних з відкритим кодом. Вона розширює мову запитів SQL та пропонує багато можливостей, які дозволяють безпечно зберігати та масштабувати найбільш складні об'єкти даних [6]. Початково при розробці системи для керування та генерації розкладу, планувалось використовувати нереляційну базу даних. Проте, згодом виявилось, що з урахуванням

архітектури програмного продукту, такий підхід буде складно реалізувати, оскільки більша частина об'єктів у базі даних мають між собою зв'язки. Тому було прийнято рішення замінити нереляційну базу даних на PostgreSQL.

Основні переваги PostgreSQL включають:

- Відкритий код.
- Висока сумісність із стандартом SQL.
- Можливість роботи зі складними типами даних.
- Гнучкий повнотекстовий пошук.
- Підтримка великої кількості мов програмування.
- Кросплатформеність.

Серед недоліків PostgreSQL можна виділити:

- Порівняно низька швидкість читання даних (порівняно з MySQL).
- Деякі застосунки з відкритим кодом можуть підтримувати лише MySQL, але не підтримувати PostgreSQL.
- Розширена документація доступна лише англійською мовою.

### 2.3 React

React - це безкоштовна фронтенд-бібліотека мови JavaScript з відкритим кодом, яка призначена для створення користувацьких інтерфейсів на основі UI компонентів [7].

Серед позитивних особливостей React можна відзначити наступне:

- React оновлює лише ті частини DOM браузера, стан яких змінився, завдяки використанню віртуального DOM.
- Використання JSX для написання React-компонентів, що спрощує код та надає синтаксичний цукор для швидшої розробки.
- Використання об'єкта props для передачі даних від батьківського до дочірнього компонента та подій для зворотної передачі даних.
- Можливість перевикористання React-компонентів.

Однак є також деякі недоліки React:

- React-компоненти містять як представлення, так і логіку, що може створювати проблеми при читанні та розумінні коду.
- Відсутність підтримки деякого ключового функціоналу для фронтенду, такого як роутинг та HTTP запити, що потребує підключення сторонніх бібліотек.
- Застосунки на основі React часто вимагають велику кількість сторонніх бібліотек, що може призводити до конфліктів між React та цими бібліотеками.

### 2.4 Material UI

Material UI - це бібліотека React компонентів з відкритим кодом, яка пропонує реалізацію дизайну Material Design від Google. Вона містить готовий набір компонентів, які можуть бути використані "з коробки" [8]. Використання цієї бібліотеки дозволяє уникнути ручної розмітки з використанням CSS та HTML, дозволяючи розробникам зосередитись на бізнес-логіці своїх застосунків. Завдяки великому розмаїттю компонентів, Material UI відповідає типовим потребам фронтенд розробників. Компоненти Material UI поділені на категорії, такі як введення даних, відображення даних, засоби зворотного зв'язку з користувачем, елементи поверхні, елементи навігації та макети. Кожну з цих категорій складають компоненти, які можна легко налаштувати під вимоги конкретного застосунку.

### 3. Реалізація веб-додатку

#### 3.1 Реалізація серверної частини

Для реалізації інтерфейсу застосунку було створено REST API [9]. Цей підхід дозволяє розробляти кілька клієнтських додатків, які використовують одне і те саме API, оскільки REST працює з ресурсами, а не з представленнями. В конкретному випадку ресурси, з якими взаємодіє API, включають Groups, Lessons, Login, Schedules, Schedule Inputs, Teachers та Users.

Генерацію розкладу здійснює метод POST ресурсу /schedules. При виклику цього методу, контролер отримує id вхідних даних, для яких потрібно згенерувати розклад. За допомогою цього id з бази даних отримуються відповідні вхідні дані та передаються до методу Solve в класі Solver. Саме цей метод містить в собі всю логіку генетичного алгоритму.

На початку алгоритму створюються розклади, в яких заняття випадковим чином розміщені у часі (день та номер пари). Потім алгоритм переходить у цикл, в якому спочатку обчислюються значення фітнес-функцій для кожного елемента популяції, з урахуванням штрафів. Штрафи включають такі категорії: штраф за вільні проміжки часу між парами викладачів або груп, штраф за пізні пари, які не відповідають вказаним параметрам, а також штраф за одноманітні дисципліни в групі (якщо в один день з'являється більше ніж  $n$  занять з однієї дисципліни, де  $n$  - параметр фітнес-функції). Значення штрафів та параметри, що визначають, коли штраф застосовується, можуть бути налаштовані окремо.

Далі популяція сортується в порядку спадання, і якщо елемент з індексом 0 має значення фітнес-функції 0, це означає, що знайдено ідеальний розв'язок, і його повертають. В іншому випадку відбувається відбір хромосом: з найкращим фітнесом обираються 1/4 популяції, і з кожної хромосоми створюються три нові мутовані хромосоми, переміщуючи два випадкові заняття в розкладі.

Цикл продовжується або до закінчення заданої кількості ітерацій, або поки не знайдено ідеальний розклад. Якщо цикл завершився, а ідеальний розклад досі не знайдений, то буде повернуто найкращий розклад популяції. Код алгоритму можна переглянути в додатку А.

Для більшості ресурсів (з винятком Login та POST методу Users) доступ вимагає авторизації з метою запобігання незаконному доступу користувачів ззовні умовної корпоративної мережі університету, який використовує цей застосунок для складання розкладу. Авторизація здійснюється на основі ролей, і в системі існують дві ролі: Admin та User. Операції, які користувачі можуть виконувати, розділено на ці ролі. Користувач з роллю Admin має доступ до всіх ресурсів у системі, тоді як користувачі з роллю User обмежені у можливості та мають лише право перегляду поточного розкладу. При реєстрації нового користувача в системі за замовчуванням встановлюється роль User, і в системі існує тільки один користувач з роллю Admin.

З програмної точки зору, авторизація реалізована за допомогою JWT (JSON Web Token). JWT - це відкритий стандарт, який забезпечує компактний і самодостатній метод безпечної передачі даних у форматі JSON між сторонами. Інформація у токени може бути перевірена та підтверджена завдяки підпису [10]. JWT складається з трьох частин: заголовка (header), вмісту (payload) та підпису (signature). Заголовок зазвичай містить тип токена та алгоритм підпису. Вміст містить інформацію, яку токен повинен передавати. Як видно з рис. 4, для токена з роллю Admin, який був згенерований у застосунку, вміст містить дані про ім'я користувача "admin", його роль "Admin", а також інформацію про те, коли токен стане недійсним та видавця токена.

```

{

"http://schemas.xmlsoap.org/ws/2005/05/identity/claims/
name": "admin",

"http://schemas.microsoft.com/ws/2008/06/identity/claim
s/role": "Admin",
  "exp": 1671115818,
  "iss": "ScheduleSystemIDP",
  "aud": "http://localhost:44485/"
}
    
```

Рис 4. Вміст JWT токена із роллю Admin

Токен у розробленому застосунку генерується за допомогою вбудованого сервісу TokenService. Згенерований токен дійсний протягом 2 годин, після чого користувач знову повинен буде авторизуватися для отримання нового токена.

Серверна частина програмного продукту побудована відповідно до принципів "Чистої архітектури" [11]. Основним принципом цієї архітектури є розділення застосунку на чотири окремі шари, як показано на рисунку 5.

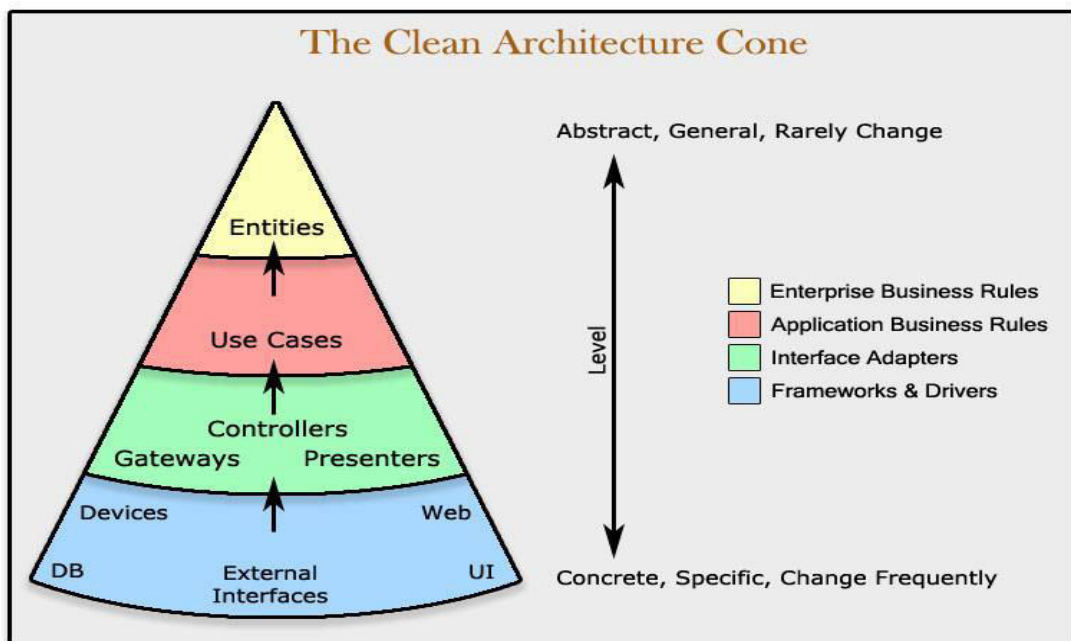


Рис 5. Схема шарів застосунку з чистою архітектурою

На рисунку 5 представлені чотири шари чистої архітектури. Синім позначено шар інфраструктури, який включає конкретні фреймворки, драйвери та інші технічні

компоненти. Зеленим позначений шар адаптерів інтерфейсів, до якого належать контролери (в даному застосунку). Червоним позначено шар "Use Cases", який містить специфічну для застосунку бізнес-логіку. Останній жовтий шар - це шар сутностей, які представляють загальні бізнес-правила, незалежні від конкретного застосунку і майже ніколи не змінюються, якщо не потрібно оновлення цих бізнес-правил. Чим вище розташований шар, тим більш абстрактним і загальним є його функціонал, тоді як чим нижче - тим більш специфічним і часто змінним.

Однією з численних переваг чистої архітектури є ізоляція шарів. Це означає, що зміни в одному шарі не впливають на інші шари. Наприклад, коли у випадку розробки використовувалась нереляційна база даних, яка стала недоліком, перехід на PostgreSQL відбувся без жодних змін у шарах контролерів, юз кейсів та сутностей, завдяки використанню чистої архітектури.

На рисунку 6 зображена структура проекту ScheduleSystem, де директорії Application, Controllers, Infrastructure та Domain відповідають різним шарам бізнес-логіки застосунку, адаптерів інтерфейсів, фреймворків і драйверів, а також загальній бізнес-логіці застосунку відповідно.

Як зазначено у розділі 2, для бази даних було використано PostgreSQL. Структура бази даних представлена на рисунку 7.

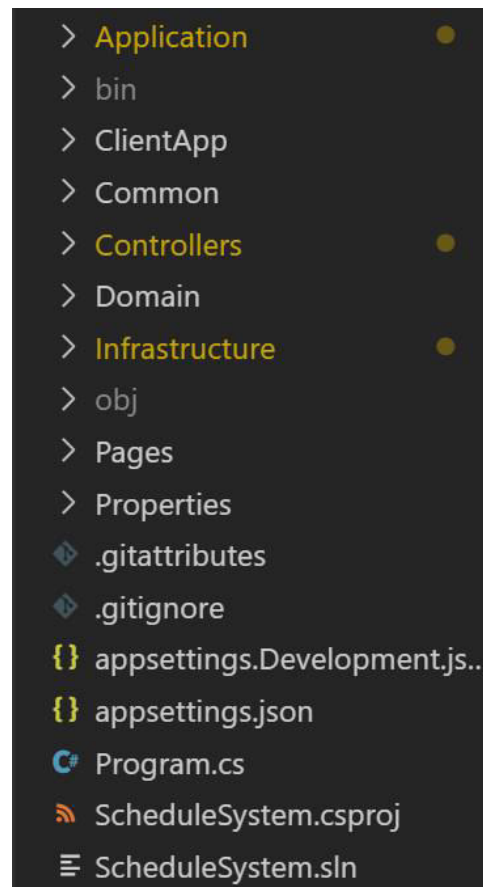


Рис 6. Структура папок в проекті застосунку ScheduleSystem

Таблиця InputData містить вхідні дані для розкладу, який потрібно згенерувати. Для зручності, InputData має поле з назвою (Name). Кожному запису в InputData відповідає один або декілька об'єктів з таблиці Lessons. Кожен об'єкт з Lessons представляє вхідні дані для одного заняття і містить інформацію про академічну групу (таблиця Group), викладача (таблиця Teacher), предмет та аудиторію. Після генерації

розкладу, буде створено новий запис у таблиці Schedule, а також для кожного об'єкту Lessons буде встановлено відповідний запис з таблиці LessonTime, який визначає день тижня та номер пари для проведення заняття. Таким чином, з одних і тих самих вхідних даних можна згенерувати декілька розкладів. Таблиці User та Role використовуються для автентифікації та авторизації користувачів.



Рис 7. Діаграма відношень бази даних

У базі даних використано зовнішні ключі для зв'язку між батьківськими та дочірніми таблицями з метою підтримки каскадного видалення. Це означає, що якщо об'єкт у батьківській таблиці був видалений, то автоматично видаляться всі зв'язані з ним об'єкти у дочірніх таблицях.

### 3.2 Реалізація клієнтської частини

Клієнтська частина застосунку базується на односторінковому додатку (SPA) з використанням React. Застосунок має різні шляхи доступу. Шлях `/scheduleinputdata` (вкладка "Вхідні дані" на панелі навігації, як показано на рис. 8) містить таблицю для керування вхідними даними розкладів. При натисканні на один із рядків таблиці, користувач переходить на екран `/scheduleinputdata/:id`, де може змінювати об'єкти вхідних даних, такі як група, викладач, аудиторія та предмет.

Після введення необхідних вхідних даних на цьому ж екрані, користувач може згенерувати розклад, натиснувши кнопку "Згенерувати розклад". Доступні також шляхи `/group` (вкладка "Групи" на рис. 8) та `/teacher` (вкладка "Викладачі" на рис. 8) для керування академічними групами та викладачами відповідно. Шлях `/settings` (вкладка "Налаштування" на рис. 8) дозволяє користувачу налаштувати параметри генетичного алгоритму для генерації розкладу. Перейшовши на екран `/schedule` (вкладка "Згенеровані розклади" на рис. 8), користувач може переглянути список раніше згенерованих розкладів і вибрати конкретний розклад для перегляду, натиснувши на нього у списку. Після цього відбудеться перехід на екран `/schedule/:id`, де користувач може переглянути розклад занять на конкретний день.

Всі вищезазначені шляхи доступні користувачам з роллю Admin. Користувач із роллю User має доступ лише до екрану /schedule, де він може переглядати поточний розклад. Адміністратор (користувач із роллю Admin) може встановлювати, який із згенерованих розкладів є поточним.

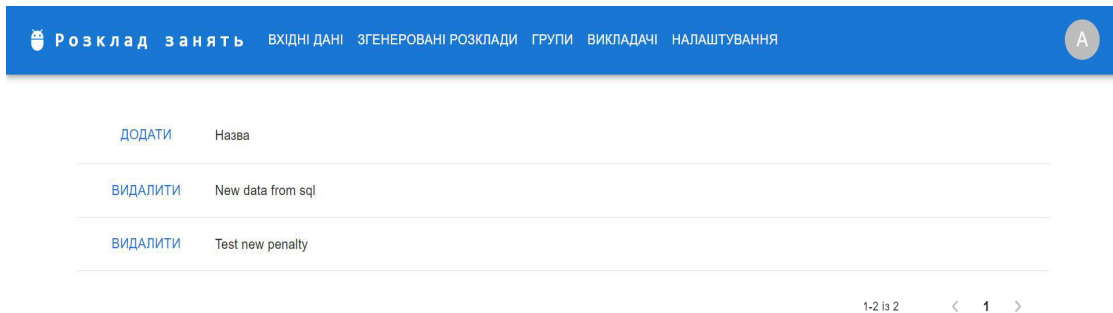


Рис 8. Загальний вигляд клієнтської частини

Для здійснення HTTP-запитів з клієнта на сервер використовується бібліотека Axios. Axios є HTTP клієнтом для node.js та браузера і має корисні можливості, такі як перехоплення запитів за допомогою перехоплювачів. В даному застосунку було застосовано перехоплювач запиту для підстановки заголовку авторизації, а також перехоплювач відповіді для перенаправлення користувача на сторінку логіну, якщо сервер поверне статус-код 401.

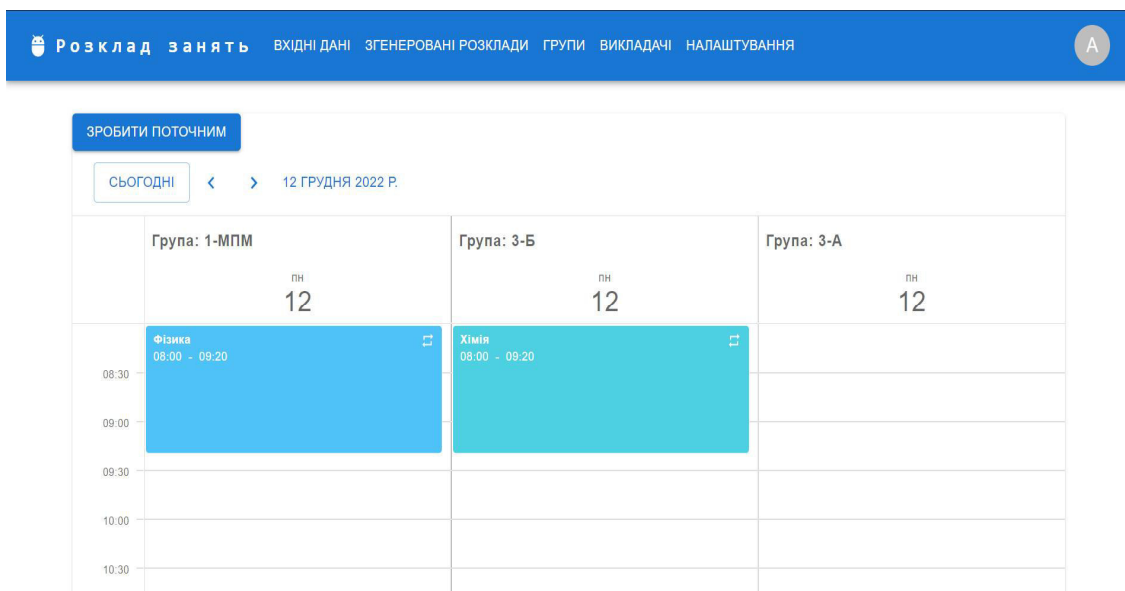


Рис 9. Загальний вигляд екрану /schedule/:id, для користувача із роллю Admin

Для відображення згенерованого розкладу використовувався готовий компонент DevExtreme React Scheduler. Цей компонент дозволяє відображати дані планувальника

та забезпечує можливість керування розкладом користувачем. Залежно від потреб користувача, компонент може відображати розклад поденно, потижнево або помісячно [12]. Загальний вигляд екрану з розкладом можна побачити на рис. 9.

На рисунку 9 видно, що розклад на день включає час початку та час закінчення заняття, а також академічну групу, для якої призначено дане заняття. Користувач може вибирати дату, на якій потрібно переглянути розклад. При натисканні на картку заняття з'являється додаткова інформація про аудиторію та викладача, який проводить це заняття.

Цей готовий компонент спрощує відображення розкладу та забезпечує зручні можливості для його перегляду та інтерактивної роботи з ним користувачем.

### Висновки

У статті було успішно реалізовано кілька важливих аспектів, спрямованих на вдосконалення генетичного алгоритму для автоматизованої генерації розкладу навчальних занять. Окрім цього, було розроблено веб-орієнтований додаток, який дозволяє зручно керувати та адмініструвати розклад занять. Нарешті, були проаналізовані існуючі рішення для подібних проблем.

Основні результати, отримані під час проведення дослідження, можна узагальнити таким чином:

1. Було розроблено веб-додаток, що забезпечує зручне керування та автоматизовану генерацію розкладу навчальних занять.

2. Генетичний алгоритм генерації розкладу було удосконалено, що дозволило здійснювати більш точну та ефективну оптимізацію розкладу навчальних занять.

Ці досягнення представляють значний прогрес у вирішенні проблеми генерації розкладу та розширюють можливості для ефективного управління навчальним процесом.

### Список використаної літератури:

1. Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, 4(2), 65-85.
2. Mirjalili, S., & Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications*, 43-55.
3. Troelsen, A., & Japikse, P. (2017). *Pro C# 7: With .net and .net Core* (Vol. 1328). Apress.
4. Рейтинг мов програмування 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-2022/>.
5. Language Integrated Query (LINQ) (C#) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/linq>.
6. Obe, R. O., & Hsu, L. S. (2017). *PostgreSQL: up and running: a practical guide to the advanced open source database*. " O'Reilly Media, Inc."
7. Boduch, A., & Derks, R. (2020). *React and React Native: A complete hands-on guide to modern web and mobile development with React. js*. Packt Publishing Ltd.
8. Boduch, A. (2019). *React Material-UI Cookbook: Build captivating user experiences using React and Material-UI*. Packt Publishing Ltd.
9. Masse, M. (2011). *REST API design rulebook: designing consistent RESTful web service interfaces*. " O'Reilly Media, Inc."
10. Jones, M., Bradley, J., & Sakimura, N. (2015). *Json web token (jwt)* (No. rfc7519).
11. Martin, R. C., Grenning, J., Brown, S., Henney, K., & Gorman, J. (2018). *Clean architecture: a craftsman's guide to software structure and design* (No. s 31, pp. 57-91). Prentice Hall.
12. *React Scheduler - Getting Started*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://devexpress.github.io/devextreme-reactive/react/scheduler/docs/guides/getting-started/>.

### References:

1. Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, 4(2), 65-85.
2. Mirjalili, S., & Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications*, 43-55.
3. Troelsen, A., & Japikse, P. (2017). *Pro C# 7: With .net and .net Core* (Vol. 1328). Apress.

4. Reitynh mov prohramuvannia 2022 [Programming Language Rankings 2022]. (2022). dou.ua. Retrieved from <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-2022/> [in Ukrainian]
5. Language Integrated Query (LINQ) (C#). learn.microsoft.com Retrieved from <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/linq>.
6. Obe, R. O., & Hsu, L. S. (2017). PostgreSQL: up and running: a practical guide to the advanced open source database. " O'Reilly Media, Inc."
7. Boduch, A., & Derks, R. (2020). React and React Native: A complete hands-on guide to modern web and mobile development with React. js. Packt Publishing Ltd.
8. Boduch, A. (2019). React Material-UI Cookbook: Build captivating user experiences using React and Material-UI. Packt Publishing Ltd.
9. Masse, M. (2011). REST API design rulebook: designing consistent RESTful web service interfaces. " O'Reilly Media, Inc."
10. Jones, M., Bradley, J., & Sakimura, N. (2015). Json web token (jwt) (No. rfc7519).
11. Martin, R. C., Grenning, J., Brown, S., Henney, K., & Gorman, J. (2018). Clean architecture: a craftsman's guide to software structure and design (No. s 31, pp. 57-91). Prentice Hall.
12. React Scheduler - Getting Started. devexpress.github.io Retrieved from <https://devexpress.github.io/devextreme-reactive/react/scheduler/docs/guides/getting-started/>.

**HURIEV Yaroslav,**

Student, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**SERDIUK Oleksandr,**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**DIDKOWSKY Ruslan,**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**DEVELOPMENT OF A WEB-BASED SCHEDULING MANAGEMENT TOOL**

**Summary. Introduction.** *Modern educational institutions face a global problem of managing and automating the creation of class schedules. Currently, the number of students and teachers is rapidly increasing, which leads to an escalation in efforts required to create a schedule that satisfies all participants in the educational process and avoids conflicts. Situations where one teacher is assigned to classes in two different classrooms simultaneously are not uncommon, resulting in haste and adjustments that can cause issues during the actual classes. Therefore, the future of schedule management lies in web applications that help schedule creators save time and avoid critical errors such as the one mentioned. Such web applications will not only be a convenient tool for planning the educational process but also contribute to its efficiency and organization, providing a user-friendly and optimal schedule for all participants..*

**Purpose.** *The aim of the article is to analyze similar application, develop an architecture and create a web-based tool for managing class schedules.*

**Results.** *A web application has been developed, providing convenient management and automated generation of class schedules. Also, the genetic algorithm for schedule generation has been improved, enabling more accurate and efficient optimization of class schedules. These achievements represent significant progress in solving the scheduling problem and expand the possibilities for effective management of the educational process.*

**Conclusion.** *The article successfully implemented several important aspects aimed at improving the genetic algorithm for automated generation of class schedules. In addition, a web-based application was developed, which allows convenient management and administration of class schedules. Finally, existing solutions for similar problems were analyzed.*

**Keywords:** *schedule, automated schedule generation, genetic algorithm, web application.*

*Одержано редакцією 17.12.2021 р.  
Прийнято до публікації 23.06.2022 р.*

УДК 519.688

PACS 02.60.-x, 02.60.Pn

**ЮХИМЕЦЬ Максим Вячеславович**  
студент спеціальності «Прикладна  
математика» Черкаського національного  
університету імені Богдана  
Хмельницького  
e-mail:  
yukhymets.maksym1617@vu.cdu.edu.ua

**КРАСНОШЛИК Наталія  
Олександрівна**  
кандидат технічних наук, доцент, доцент  
кафедри прикладної математики та  
інформатики Черкаського національного  
університету імені Богдана  
Хмельницького  
e-mail: wlik007@ukr.net  
ORCID 0000-0003-4661-6997

## РОЗРОБКА ПРОГРЕСИВНИХ СТРАТЕГІЙ ГРИ У ШАХИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ШАХОВОГО ДВИГУНА

*У роботі розглянуті алгоритми для програмування моделей ігор для двох осіб з нульовою сумою та повною інформацією. Такі алгоритми беруть свій початок в теорії ігор та широко використовуються для розробки шахових двигунів. З розвитком галузі шахового програмування безліч вдосколень було запропоновано для класичних алгоритмів *minimax* та *alpha-beta*. Використання найбільш оптимального стеку вдосколень під час розробки власного двигуна стало однією з цілей даної роботи. Порівняльний аналіз був виконаний та відповідні таблиці наведені в роботі. Різні комбінації алгоритмів та їх вдосколень були протестовані у власному середовищі представленою шаховим двигуном.*

**Ключові слова:** шаховий двигун, *minimax*, *alpha-beta*..

### Вступ.

Шахи це гра для двох осіб з нульовою сумою та повною інформацією. Окрім цього шахи – найпопулярніша стратегічно-інтелектуальна гра в світі зі століттями історії та масивним корпусом теоретичних знань. Імовірно, шахи являються найбільш задокументованою грою з найбільшою кількістю спеціалізованої літератури присвяченої тому як в них грати. Зі стрімким розвитком комп'ютерних технологій впродовж останнього століття момент коли дослідники звернуть свою увагу на проблему шахів залишався питанням часу. Перша наукова робота яка піднімала це питання була опублікована в 1950 році Клодом Шенномом. У статті [1] Шеннон обговорював потенціал використання комп'ютерів для гри в шахи і запропонував ідею створення комп'ютерної програми, яка могла б симулювати й оцінювати можливі ходи в шаховій грі. Робота Шеннона поклала початок дослідженням можливостей автоматизації гри в шахи. На сьогоднішній день ця галузь досягла значних успіхів в поставлених завданнях і сформулювала об'ємний теоретичних базис.

Історично цей процес протікав в декілька етапів: 1950 – 1980 робота велася вченими-академіками які публікували свої розробки в наукових журналах; з появою інтернету в 1980-х тематичні спільноти присвячені шахам і розробкам двигунів почали з'являтися, вільний обмін ідей в значній мірі стимулював розвиток галузі; 1990-2010 конференції і змагання серед авторських двигунів набирали оберти, вчені, професійні

розробники і дослідники-ентузіасти конкурували один з одним, шахове програмування було комерційно вигідним, автори призових двигунів могли продавати ліцензійні копії свого програмного продукту; 2010 – наш час, спільнота в значній мірі сформулювала найкращі практики і методики, рівень складності двигунів перевищів можливості індивідуальних розробників, найсильніші двигуни підтримуються групами програмістів, подальший ріст рейтингу двигунів сильно залежить від наявності процесорного ресурсу для тестування нових ідей і вдосконалень.

Незважаючи на те, що сучасні шахові двигуни знаходяться на абсолютно іншому рівні гри ніж навіть найсильніший гравець-гросмейстер, повне вирішення шахової проблеми все ще не досягне, адже навіть найсильніший шаховий двигун сьогодення запущений на найкращому комп'ютері не здатний повністю прорахувати всю шахову партію з позиції не в ендшпілі.

### Мета статті.

Продемонструвати результати роботи класичних алгоритмів з домену розробки шахових двигунів з різними варіантами їх вдосконалень. Навести короткий опис отриманих результатів та використаних вдосконалень.

### Виклад основного матеріалу.

#### 1. Основний опис

Для досягнення поставлених задач було розроблено відповідне середовище – шаховий двигун, мова програмування була обрана Java [6]. Повний опис реалізації всіх складових компонентів двигуна виходить за рамки данної статті, наведемо лише ключові деталі. Шаховий двигун складається з генератора кроків, функції оцінки і механізму пошуку. Кожен компонент може бути реалізований абсолютно відокремлено, настільки що може стати окремим проектом і використовуватися як змінний модуль в інших двигунах. Можлива і протилежна ситуація, коли компоненти двигуна тісно сполучені між собою. Це часто обумовлено оптимізаційними міркуваннями. Так наприклад генератор кроків може виконувати внутрішнє сортування [3], так як безпосередньо в момент генерації доступна корисна інформація яка буде коштувати час при повторному отриманні в компоненті пошуку.

Робота двигуна виглядає наступним чином:

1. Шахова позиція представлена в одному із компактних форматів запису шахових позицій *FEN* передається з інтерфейсу в двигун;
2. Інформація про стан дошки декодується і зберігається, викликається функція пошуку;
3. Пошук, в основі якого лежить алгоритм *minimax*, створює дерево гри, яке представляє всі можливі ходи та їхні наслідки. Він починається з поточної позиції та досліджує можливі ходи для обох сторін, створюючи розгалужене дерево позицій.

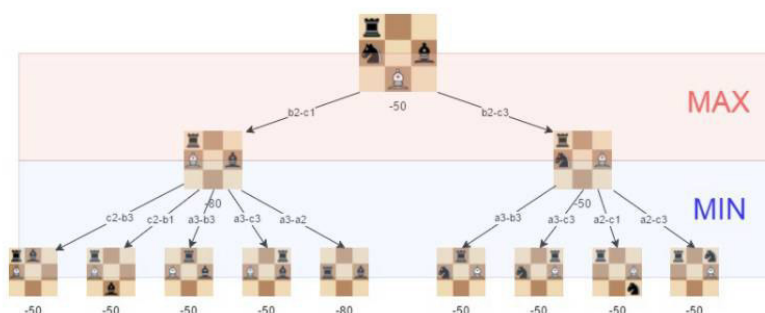


Рис. 1. Схема дерева пошуку [4]

4. В кожному вузлі дерева викликається генератор кроків в який передається стан дошки на даний момент. Генератор повертає список легальних кроків для стороною яка ходить відносно цього вузла дерева [7]. Генератор може повертати один крок, запам'ятовуючи його, таким чином якщо відбудеться відсікання цієї гілки на даному кроці, час на генерацію повного списку буде зекономлений. Такий підхід буде вигідним тільки якщо генератор виконує сортування кроку в середині себе інакше цей підхід буде контр ефективним.
5. Список кроків повертається в вузол дерева де сортується за певними евристиками. Це необхідно для того щоб імовірно кращі кроки шукалися першими так як вони мають більший шанс викликати відсікання. Сортування може базуватися на багатьох евристичних і враховувати захищені і атаковані клітини обох сторін, проте в більшості випадків сортування відбувається за такими критеріями: pv-крок – кращий хід з попередньої ітерації ітераційного заглиблення / крок з таблиці транспонування - структура даних для зберігання інформації про попередньо оцінені позиції в пошуковому дереві гри; атакуючі виграшні кроки відсортовані по SEE [4] або MVV-LVA [4]; евристика вбивці - ідея запам'ятовувати хороші не атакуючі ходи які спричиняють бета відсікання; евристика історії – менш ефективна хеш-таблиця не атакуючих кроків які викликали відсікання раніше в дереві; програвні атакуючі ходи; всі інші не атакуючі ходи, можуть бути відсортовані по статичним Piece-Square Tables – таблиці значень що характеризують доцільність знаходження певної фігури на певній клітинці дошки. Стандартний набір евристик може бути доповнений або замінений менш популярними ідеями і цілком залежить від результатів тестування.
6. Обраний припустимо найкращий хід виконується, змінюючи стан дошки, пошук рекурсивно викликається знову, потім виконання переходить в наступний вузол дерева.
7. Коли пошук досяг зазначеної глибини відбувається виклик функції оцінки стану дошки. Функція оцінки повертає чисельні значення які інтерпретуються як додатне значення – позиція на дошці на користь сторони для якої функція оцінює, від'ємне – позиція не на користь сторони для якої викликана оцінка і нуль – позиція ні в чию користь. Робота функції оцінки може бути скільки завгодно складною і враховувати найтонші теоретично-стратегічні прийоми гри. Цей аспект розробки шахового двигуна заслуговує окремого розгляду так як сучасний консенсус передбачає використання нейронних мереж [5].
8. Значення функції оцінки повертається на попередній рівень виклику де використовується для зміни діапазону alpha-beta вікна. Alpha-beta вікно – це фундаментальна оптимізація пошуку яка дає можливість безпечно відсікати безперспективні гілки, економлячи тим самим величезну кількість часу. Alpha-beta – це два значення які змінюються на протязі всього пошуку, представляючи тим самим нижню і верхню границю допустимого значення кроку який реально може бути зіграний. Alpha – це максимальна нижня границя, а beta – це мінімальна верхня, разом вони утворюють вікно пошуку. Якщо повернуте значення функції оцінки більше ніж beta то це значить, що протилежна сторона ніколи не зіграє цей крок і вся гілка відсікається, якщо значення менше beta і більше alpha то воно стає новим alpha, звужуючи вікно пошуку, якщо значення менше alpha то пошук в вузлі продовжується.
9. Продовжуючи пошук по дереву, найбільше значення alpha піднімається в корень дерева і відповідний йому крок повертається як найкращий в даній позиції для даної сторони.

```

score alphabeta(position, alpha, beta, depth)
{
    if (isTerminal(position))
        return valueOf(position);

    if (depth == 0)
        return evaluate(position);

    children = getChildren(position);
    while (not children.empty())
    {
        child = children.removeOne();

        value = -alphabeta(child, -beta, -alpha, depth - 1);

        if (value > alpha)
        {
            if (value >= beta)
                return beta;
            alpha = value;
        }
    }
    return alpha;
}

```

Рис. 2. Псевдокод алгоритму пошуку з alpha-beta [4]

Більшість вдосконалень пошуку пов'язані з прискоренням відсікання через різний вплив на alpha-beta вікно шляхом штучного звуження вікна а також зменшення глибини пошуку для не перспективних гілок. Такі методи хоч і пришвидшують роботу пошуку однак являються не повністю безпечними так як залишають імовірність відкинути потенційно найкращий крок. Детальне тестування у вигляді реальних партій проти набору тестових двигунів-опонентів повинно бути проведено для підтвердження ефективності того чи іншого вдосконалення.

## 2. Опис специфічних компонентів

Так як опис всіх складових розробленого шахового двигуна виходить за межі даної статті означимо лише те що важливо для отримання представлених результатів.

### 2.1 Quiescence Search

Коли ми виконуємо альфа-бета пошук з фіксованою глибиною у нас немає гарантії того, що вузол дерева на якому ми зупинили пошук і викликали функцію оцінки не являється небезпечною позицією. Якщо ми рухаємося по дереву пошуку і на кінцевому вузлу наш ферзь бере ворожого пішака, функція оцінки поверне нам додатне значення, так як це змінить матеріальний баланс в нашу користь. Проте в такій ситуації не враховується що може статися з нашою фігурою на наступній глибині, а може відбутися так, що нашу фігуру заберуть фігури які були зв'язані з пішаком.

Ми цього не бачимо під час пошуку так як він обривається на глибині на якій здається що перевага в нашу користь. Щоб уникнути цього нам потрібно продовжувати пошук для всіх вузлів які закінчуються атаками. Тобто якщо ми шукаємо на глибину 5, доходимо до цієї глибини в одній з гілок дерева і останній вузол в ній це атака, то ми продовжуємо пошук для цього вузла до тих пір поки не опинимося в безпечній або тихій позиції. Такий підхід буде розширювати дерево пошуку за межі заданої глибини проте не настільки сильно щоб це було проблемою, так як послідовності атак в шахах не бувають сильно довгими. Критерієм для виконання quiescence search може бути не тільки ситуація коли пошук гілки закінчується вузлом з атакою, а і взагалі будь яка ігрова ситуація яка на думку розробника варта більшої уваги. Наприклад просування пішака часто призводить до мату. Таким чином якщо пошук по гілці закінчується позицією де піша стоїть на передостанньому для свого руху рангу, варто продовжити пошук щоб побачити чи призведе просування до чогось важливого. Чим більш

специфічні ситуації покриваються таким чином, там більш стратегічно сильної становиться гра шахового двигуна. Зрозуміло також що такі додатки розширюють дерево пошуку, що сповільнює його роботу.

```
int Quiesce( int alpha, int beta ) {
    int stand_pat = Evaluate();
    if( stand_pat >= beta )
        return beta;
    if( alpha < stand_pat )
        alpha = stand_pat;

    until( every_capture_has_been_examined ) {
        MakeCapture();
        score = -Quiesce( -beta, -alpha );
        TakeBackMove();

        if( score >= beta )
            return beta;
        if( score > alpha )
            alpha = score;
    }
    return alpha;
}
```

Рис. 3. Псевдокод quiescence search [4]

## 2.2 Сортування кроків

Як описано раніше, правильне впорядкування ходів є важливим для ефективності альфа-бета алгоритму. Так як чим раніше відбудеться бета відсікання тим менше вузлів доведеться пройти. Кроки сортуються в порядку їх імовірної важливості. Першим розташовують крок з хеш-таблиці, якщо вона існує. Після нього розташовуються потенційно виграшні атаки, відсортовані по потенційні перевазі в матеріальному балансі яку вони можуть здобути. Виграшні атаки – це атаки які залишають сторону яка ходить в плюсі по матеріальному балансі [9]. Такі кроки можуть варіюватися між собою як більш цінні або менш в залежності від того яка фігура атакує яку. Це так звана MVA-LVV “Most Valuable Victim - Least Valuable Aggressor” евристика. Так як фігури в шахах несуть в собі різну цінність, ми можемо відсортувати всі атаки по наступному критерію, якщо атакуюча фігура менша по цінності за фігуру яку атакують, то такий хід вважається більш переважним ніж якщо відбувається навпаки. Тобто хід де пішак бере ферзя буде стояти раніше ніж хід де ферзь бере пішака. Ця евристика легка в реалізації проте не сильно акуратна в оцінці. В заміну їй часто використовують більш складний підхід під назвою SEE “Static Exchange Evaluation”. В нашому проекті ми використовуємо його. Ідея полягає в тому щоб оцінити атакуючий хід урахувавши те що після атаки атакуюча фігура може бути взята фігурою противника, а та в свою чергу нашою фігурою і так до тих пір поки послідовність взяття фігур на конкретній клітинці не закінчиться. Таким чином ми можемо точно оцінити атаку. Приклад на рис. 4 демонструє положення демонструє положення при якому атака конем для білих краща ніж атака слоном.

Дана позиція дай білим виконати дві атаки, c3d5 і f3d5. Виходячи з того, що пішак в нашій програмі оцінений в 100 балів, кінь в 300, а слон в 350, виконуючи c3d5 хід ми отримаємо + 100 за пішака, -300 за нашого коня який буде взятий у відповідь і +300 за взяття слоном коня. Таким чином чистий приріст в матеріальному балансі для білої сторони буде 100 балів. Походивши f3d5, розрахуємо таким же чином і побачимо, що приріст 50 балів. Така логіка за SEE евристикою.

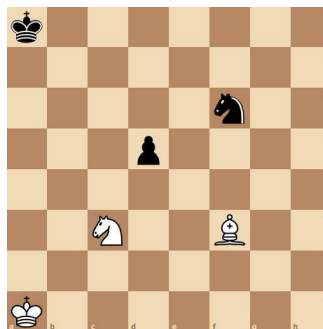


Рис. 4. Приклад позиції

Після того як ми відсортували атакуючі кроки по одній з евристик, ми переходимо до звичайних кроків і використовуємо так звану евристику вбивці. Евристика вбивці – це ідея запам'ятовувати хороші не атакуючі ходи які спричиняють бета відсікання і шукати їх першими після ходів з хеш-таблиці і виграшних атакуючих ходів. Якщо сторона має надзвичайно хороший не атакуючий хід в одній позиції, то часто цей хід буде хорошим і в інших позиціях на цьому ж шарі пошуку. Тобто коли ми будемо генерувати кроки в інших вузлах на цьому ж шарі пошуку, при сортуванні цих кроків ми будемо перевіряти чи містять вони вбивчі ходів збережених раніше і якщо так то ми перемістимо їх в позицію після виграшних атак. В типових реалізаціях ми зберігаємо декілька вбивчих ходів на кожному шарі.

Далі застосовується так звана евристика історії, також до ходів без захоплення. Це загальний і менш ефективний спосіб запам'ятовування хороших рухів. Кожного разу, коли відбувається відсікання, запис таблиці, індексований вихідним і кінцевим квадратами ходу, збільшується на деяку величину. Коли всі інші евристики були застосовані до списку кроків на вузлі, інші рухи без захоплення сортуються за значеннями в цій таблиці історії. Таким чином, ходи, які часто були хорошими в інших частинах дерева, будуть шукатися перед ходами, про які ми менше знаємо.

### 2.3 Iterative Deepening

Очевидний спосіб використання альфа-бета алгоритму є виклик його з заданою глибиною [8]. Це породжує деякі проблеми. По-перше, ми не знаємо, наскільки мілкий пошук ми можемо зробити, щоб «вирішити» позицію, тобто знайти фактичний найкращий хід. Крім того, ми не знаємо, скільки часу триватиме пошук, перш ніж він завершиться або перш ніж він принаймні знайде хороший хід. Це може бути проблемою якщо існує часове обмеження, а так як для сучасних двигунів це де факто стандарт, ми будемо використовувати цю техніку також. Ідея ітераційного заглиблення в тому щоб запускати альфа-бета пошук в циклі, кожен раз збільшуючи глибину. Таким чином у нас завжди буде хоча б якийсь хід для повернення і він не буде абсолютно випадковим. З першого погляду здається, що це суттєво сповільнить роботу пошуку, але насправді це не зовсім так. Якщо двигун використовує хеш-таблицю в якій зберігаються найкращі ходи з попередніх пошуків, то ітераційне заглиблення майже не сповільнює пошук, так як кожна наступна ітерація пошуку використовує інформацію із попередньої ітерації. Також данні про вбивчі кроки і евристика історії будуть пришвидшувати пошук на наступних ітераціях.

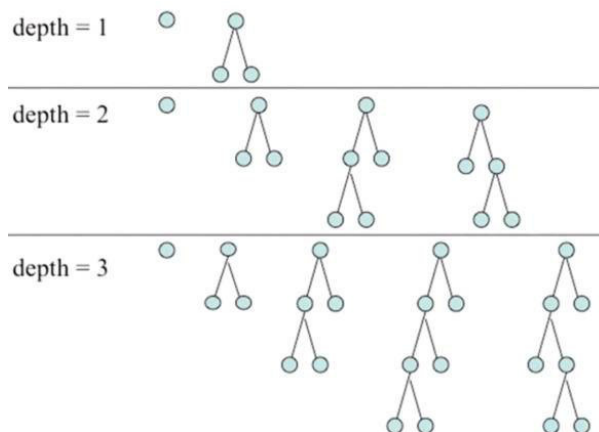


Рис. 5. Візуалізація iterative deepening [2]

### 3. Опис результатів

Після створення власного двигуна можна переходити до тестування відповідних стеків вдосконалень. Тестування шахового двигуна можна проводити декількома способами: запускати пошук з певної позиції і дивитися кількість пройдених вузлів і час затрачений на досягнення заданої глибини; запускати ігрові партії проти інших двигунів приблизно рівної сили. В нашому випадку був обраний перший варіант. Дві позиції розглядається в якості тестових, початкова позиція і складна позиція після розіграшу фігур.



Рис. 6.1 Початкова позиція



Рис. 6.2 Складна позиція

Для зручності позначимо позицію на рис. 6.1 позиція А, а на рис. 6.2 позиція В. Таблиця 1 містить результати пошуку для стандартного альфа-бета пошуку без інших вдосконалень.

Таблиця 1.1 Результати alpha-beta пошук позиція А

Глибина	Час мс	Вузли
5	221	5395
6	582	87127
7	1072	386050
8	6510	5324402

9	44626	33006491
10	366010	316084543

Таблиця 1.2 Результати alpha-beta пошук позиція В

Глибина	Час мс	Вузли
5	150	13686
6	630	150471
7	1621	518908
8	5581	4394516
9	36528	14868399
10	187636	175741641

Як бачимо, значення часу для В позиції виявилися навіть меншими. Скоріше за все, так відбувається тому що коли пошук починається з позиції В в дереві пошуку відбувається більше бета відсікань, так як з позиції В генерується більше атак. Також ми бачимо, що навіть не значна глибина, по міркам сильних шахових двигунів займає значний час для пошуку. Слід зазначити, що в світі шахового програмування сильні двигуни обраховують глибину 11-12 менш ніж за секунду.

Розглянемо як зміняться результати якщо додати quiescence search.

Таблиця 2.1 Результати alpha-beta + quiescence search пошук позиція А

Глибина	Час мс	Вузли
5	60	36836
6	741	371141
7	2113	3041757
8	10560	24701472
9	72653	197224184
10	775851	1793110479

Таблиця 2.2 Результати alpha-beta + quiescence search пошук позиція В

Глибина	Час мс	Вузли
5	929	782742
6	3417	5162845
7	6593	13438137
8	66173	116746648
9	141150	352460245

Як і очікувалося додання quiescence search значно збільшує час пошуку і кількість пройдених вузлів. Для позиції А на 10 глибині ми шукаємо близько 12 хвилин і проходимо більше мільярда вузлів, для десятої глибини позиції В запускати пошук не має сенсу так як відбудеться так званий “search explosion”, тобто так як кількість атак з цієї позиції велика, багато гілок буде продовжувати пошук викликаючи quiescence

search з останнього вузла. Quiescence search являється невід'ємною частиною двигуна, тому доведеться пришвидшувати пошук наступними методами.

Таблиця 3.1 Результати alpha-beta + quiescence search + SEE пошук позиція А

Глибина	Час мс	Вузли
5	76	36774
6	984	364629
7	2292	2987920
8	11033	23870509
9	76019	190871949
10	883899	1704353808

Таблиця 3.2 Результати alpha-beta + quiescence search + SEE пошук позиція В

Глибина	Час мс	Вузли
5	408	165098
6	1497	1058014
7	2567	3756300
8	16070	23200460
9	52700	110385254
10	338943	511747895

При додаванні сортування кроків десята глибина для позиції В стає досяжною.

Таблиця 4.1 Результати alpha-beta + quiescence search + SEE + killer heuristic пошук позиція А

Глибина	Час мс	Вузли
5	50	18114
6	388	107399
7	1343	823801
8	4138	5832305
9	14268	37273156
10	107610	212638983

Таблиця 4.2 Результати alpha-beta + quiescence search + SEE + killer heuristic пошук позиція В

Глибина	Час мс	Вузли
5	490	164464
6	1167	1056752
7	2599	3735366
8	13734	23134067
9	44589	109121751
10	293616	508046187

Як бачимо alpha-beta + quiescence search + SEE + killer heuristic дає найкращий результат. Слід зазначити, що певну частину швидкодії забезпечує ефективно сортування кроків і оптимізований генератор кроків. Взагалі кожен блок програмного коду в шаховому двигуні займає певний час при виконанні, відповідно максимальна оптимізація всього проекту бажана задля досягнення максимальної швидкості пошуку. В данній роботі ми виносимо за дужки цей нюанс і зосереджуємося тільки на коді який відноситься до функції пошуку.

### Висновки.

У статті розглянуто принцип роботи шахового двигуна, описана робота його ключових компонентів та деяких основних методів. Задля перевірки припущень стосовно ефективності тих чи інших модифікацій пошуку було розроблено власне середовище – шаховий двигун в якому відбувалося тестування. Була проведена низка тестів на зазначених позиціях і отримані результати. Результати були приведені в таблицях вище. З результатів можна зробити висновок, що варіант alpha-beta + quiescence search + SEE + killer heuristic є найкращим з точки зору часу виконання. Наступний крок в тестуванні може бути запуск  $n$  кількості ігор між нашим двигуном і двигуном подібної сили або навіть набором таких двигунів. Такий спосіб тестування дає точніший результат проте потребує набагато більше часу на виконання.

Отримані результати додатково підтверджують спостереження розробників шахових двигунів стосовно ефективності тих чи інших методів, дають можливість додатково переконатися в доцільності їх використання. На сьогоднішній день в галузі шахового програмування налічується десятки методів-модифікацій класичних алгоритмів пошуку, серед них є й такі що використовуються лише в конкретних авторських двигунах. Деякі з них поєднуються з іншими або навпаки перешкоджають роботі один одного тому важливо вносити якомога більше ясності в це питання.

### Список використаної літератури:

1. Клод Шеннон; «Програмування комп'ютера для гри в шахи» (англ. «Programming a Computer for Playing Chess»), опублікований в Philosophical Magazine, 1950 р.
2. Lecture 9 | Search 6: Iterative Deepening (IDS) and IDA\* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.youtube.com/watch?v=5LMXQ1NGHwU&ab\\_channel=AlanMackworth](https://www.youtube.com/watch?v=5LMXQ1NGHwU&ab_channel=AlanMackworth)
3. "FIDE Laws of Chess taking effect from 1 January 2018". FIDE. Retrieved 12 July 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://handbook.fide.com/chapter/E012018>
4. Сайт, присвячений шаховому програмуванню [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.chessprogramming.org>
5. Форум присвячений шаховому програмуванню [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.talkchess.com>
6. Paul Dailly, Dominik Gotojuch, Neil Henning, Keir Lawson, Alec Macdonald, Tamerlan Tajaddinov. "A Chess Engine" University of Glasgow Department of Computing Science Sir Alwyn Williams Building Lilybank Gardens Glasgow G12 8QQ March 18, 2008 – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/268426213\\_A\\_Chess\\_Engine](https://www.researchgate.net/publication/268426213_A_Chess_Engine)
7. Авторський блог присвячений шаховому програмуванню [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/channel/UCB9-prLkPwgvIKKqDgXhsMQ>
8. Серія статей на інтернет ресурсі gamedev.net [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.gamedev.net/tutorials/\\_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-i-getting-started-r1014/](https://www.gamedev.net/tutorials/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-i-getting-started-r1014/)
9. Авторський блог Computer Chess Programming Theory by Colin Frayn [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.frayn.net/beowulf/theory.html>

### References:

1. Shannon, C. (1949). Programming a Computer for Playing Chess. In: Philosophical Magazine, Nov. 8, pp. 256-275. Murray Hill, N.J. [in USA]. <https://doi.org/10.1080/14786445008521796>
2. Lecture 9 | Search 6: Iterative Deepening (IDS) and IDA\* Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=5LMXQ1NGHwU&ab\\_channel=AlanMackworth](https://www.youtube.com/watch?v=5LMXQ1NGHwU&ab_channel=AlanMackworth)

3. "FIDE Laws of Chess taking effect from 1 January 2018". FIDE. Retrieved 12 July 2020. Retrieved from <https://handbook.fide.com/chapter/E012018>
4. Repository of information «Chess Programming Wiki» Retrieved from <https://www.chessprogramming.org>
5. Online forum «Computer Chess Club » Retrieved from: <https://www.talkchess.com>
6. Paul Dailly, Dominik Gotojuch, Neil Henning, Keir Lawson, Alec Macdonald, Tamerlan Tajaddinov. "A Chess Engine" University of Glasgow Department of Computing Science Sir Alwyn Williams Building Lilybank Gardens Glasgow G12 8QQ March 18, 2008 Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/268426213\\_A\\_Chess\\_Engine](https://www.researchgate.net/publication/268426213_A_Chess_Engine)
7. Author blog devoted to chess programming Retrieved from <https://www.youtube.com/channel/UCB9-prLkPwgvIKKqDgXhsMQ>
8. Series of articles «Chess Programming» Retrieved from [https://www.gamedev.net/tutorials/\\_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-i-getting-started-r1014/](https://www.gamedev.net/tutorials/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-i-getting-started-r1014/)
9. Frayn, C. Computer Chess Programming Theory Retrieved from <http://www.frayn.net/beowulf/theory.html>

**YUKHYMETS Maxim,**

Student, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**KRASNOSHYLYK Natalia,**

candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**DEVELOPMENT OF ADVANCED CHESS STRATEGIES AND THEIR APPLICATION IN THE IMPLEMENTATION OF A CHESS ENGINE**

**Summary. Introduction.** Algorithms for programming models of games for two people with zero sum and complete information are considered in the paper. Such algorithms originate in game theory and are widely used to develop chess engines.

As the field of chess programming has developed, many improvements have been proposed to the classic minimax and alpha-beta algorithms. Using the most optimal stack of improvements during the development of one's own engine became one of the goals of this work.

A comparative analysis was performed and the corresponding tables are given in the work. Different combinations of algorithms and their improvements were tested in their own environment represented by the chess engine.

**Purpose.** To demonstrate the results of classical algorithms from the domain of development of chess engines with various variants of their improvements. Provide a brief description of the results obtained and the improvements used.

**Results.** In order to check the assumptions about the effectiveness of certain search modifications, an own environment was developed - a chess engine in which testing took place. A number of tests were conducted on the specified positions and the results were obtained. The results were given in the tables above. From the results, we can conclude that the option alpha-beta + quiescence search + SEE + killer heuristic is the best in terms of execution time. The next step in testing could be to run n number of games between our engine and an engine of similar strength, or even a set of such engines. This method of testing gives a more accurate result, but takes much more time to perform.

**Conclusion.** The obtained results further confirm the observations of chess engine developers regarding the effectiveness of certain methods, and provide an opportunity to further verify the feasibility of their use. Today, in the field of chess programming, there are dozens of methods-modifications of classic search algorithms, among them there are those that are used only in specific author's engines. Some of them combine with others or, on the contrary, interfere with each other's work, so it is important to bring as much clarity as possible to this issue.

**Keywords:** chess engine, minimax, alpha-beta.

Одержано редакцією 06.12.2021 р.  
Прийнято до публікації 23.06.2022 р.

УДК 378:517

**СЕРДЮК Зоя Олексіївна,**

кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач  
кафедри математики та методики навчання  
математики,  
Черкаський національний університет імені  
Богдана Хмельницького  
e-mail: serdyuk\_z@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-9376-4346

**БОСОВСЬКИЙ Микола Васильович,**

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент  
кафедри математики та методики навчання  
математики,  
Черкаський національний університет імені  
Богдана Хмельницького  
e-mail: bosovskyu@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-1187-5550

**ТРЕТЯК Микола Васильович,**

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент  
кафедри математики та методики навчання  
математики,  
Черкаський національний університет імені  
Богдана Хмельницького  
e-mail: tretiak@gmail.com

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ

*У статті розглянуто чотири рівні сформованості математичних понять, які варто пропрацювати зі студентами природничих, технічних та ІТ-спеціальностей під час вивчення курсів «Диференціальні рівняння», «Математичний аналіз», «Вища математика»; запропоновано приклади відповідних завдань.*

**Ключові слова:** диференціальні рівняння, методи розв'язування, диференціальне та інтегральне числення, студенти природничих та технічних спеціальностей ЗВО.

**Постановка проблеми.** Курси математичного аналізу та диференціальних рівнянь є одними із основних базових курсів математичного циклу дисциплін, які вивчають як студенти математичних, так і фізичних, технічних, ІТ спеціальностей ЗВО тощо. Ці курси насичені великою кількістю досить складних математичних понять та фактів (теорем, формул тощо). Як показали наші дослідження [7, 8], засвоєння та, що найголовніше, застосування сукупності великої кількості різних математичних фактів та понять у процесі розв'язування задач часто зумовлюють появу труднощів у здобувачів. Тому методика їх вивчення має будуватися як специфічна для такої категорії студентів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питанням підвищення ефективності викладання курсів диференціальних рівнянь та математичного аналізу, вдосконалення методики їх навчання студентів ЗВО присвячені роботи багатьох сучасних методистів та математиків, зокрема М. Бородіна, Л. Васяк, К. Власенко,

М. Жалдака [1], Т. Крилової [2], О. Кондратьєвої [3], В. Клочка [4], Д. Лили [5], І. Лов'янової, Т. Максимової, І. Михайлової, І. Михайленко, О. Потапової [6], С. Федорової, С. Федосєєва, В. Швеця, Є. Ягової та ін.

**Мета статті** – розглянути особливості застосування теорії диференціальних рівнянь та методів знаходження різних типів інтегралів до розв'язування задач геометричного та механічного змісту та врахувати їх під час навчання студентів спеціальностей галузей 01 Освіта/ Педагогіка, зокрема 014 Середня освіта, 11 Математика та Статистика, 10 Природничі науки, 12 Інформаційні технології, сформулювати відповідні рекомендації.

**Виклад основного матеріалу.** У Черкаському національному університеті імені Богдана Хмельницького навчальні дисципліни «Математичний аналіз» та «Диференціальні рівняння» входять до циклу професійної підготовки більшості спеціальностей природничого спрямування, як обов'язкові, або як розділи курсу «Вища математика» зокрема студентів таких спеціальностей, як 014.04 Середня освіта (Математика), 014.08 Середня освіта (Фізика), 014.09 Середня освіта (Інформатика), 104 «Фізика та астрономія», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 111 Математика, 113 «Прикладна математика», 126 «Інформаційні системи та технології». Ці дисципліни вивчаються у досить великому обсязі, як видно на рисунках 1-4 (представлено фрагменти деяких навчальних планів). Крім того, ці предмети є важливим підґрунтям для подальшого вивчення дисциплін професійного спрямування за вказаними спеціальностями. Тому ґрунтовне вивчення саме даних дисципліни, та їх практичне спрямування, є важливим елементом подальшої професійної підготовки майбутніх фахівців з математичних, фізичних, технічних та ІТ-спеціальностей.

1. ОБОВ'ЯЗКОВІ КОМПОНЕНТИ ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ										
1.1. Цикл професійної підготовки										
ОК 01	Інформатика	1			6	180	60	30	30	120
ОК 02	Програмування	1;2			12	360	120	60	60	240
ОК 03	Дискретна математика		2		5	150	50	24		100
ОК 04	Алгебра та геометрія	1;2			11	330	110	54		220
ОК 05	Програмне забезпечення та інформаційно-комунікаційні технології		2		5	150	50	20	30	100
ОК 06	Алгоритми та структури даних	3;4			12	360	120	60	60	240
ОК 07	Мови програмування	3;4			10	300	100	40	60	200
ОК 08	Математичний аналіз	4	3		10	300	100	48		200
ОК 09	Теорія ймовірностей та математична статистика		3		4	120	40	20		80
ОК 10	Архітектура обчислювальних систем	3			4	120	40	14	26	80
ОК 11	Веб-програмування	4			5	150	50	20	30	100
ОК 12	Об'єктно-орієнтоване програмування	5			6	180	60	20	40	120
ОК 13	Бази даних та інформаційні системи	5			6	180	60	20	40	120
ОК 14	Методи обчислень	5			6	180	60	30	30	120

Рис. 1. Фрагмент навчального плану спеціальності 113 «Прикладна математика»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>1. ОБОВ'ЯЗКОВІ КОМПОНЕНТИ ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ</b>											
<b>1.1. Цикл професійної підготовки</b>											
OK01	Вступ до фаху		1		6	180	60	20	20	20	120
OK02	Вища математика	1;2;3			15	450	180	60			270
OK03	Математичний аналіз	1;2			9	270	120	40			150
OK04	Механіка	2			9	270	90	30	30	30	180
OK05	Молекулярна фізика	3			9	270	90	30	30	30	180
OK06	Електрика і магнетизм	4			9	270	90	30	30	30	180
OK07	Оптика	5			6	180	90	30	30	30	90
OK08	Фізика атома	6			6	180	90	30	30	30	90
OK09	Фізика ядра і елементарних частинок	7			6	180	60	30		30	120
OK10	Курсова робота з фаху			8	3	90					90
OK11	Класична механіка	4			6	180	60	30		30	120

**Рис. 2.** Фрагмент навчального плану спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

<b>1. ОБОВ'ЯЗКОВІ КОМПОНЕНТИ ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ</b>											
<b>1.1. Цикл професійної підготовки</b>											
OK.01	Аналітична геометрія	2			9	270	96	48		48	174
OK.02	Дискретна математика	1	2		10	300	100	48		52	200
OK.03	Лнійна алгебра	2;3			9	270	96	48		48	174
OK.04	Математичний аналіз: функції однієї змінної	1;2			13	390	148	72		76	242
OK.05	Математичний аналіз: функції кількох змінних	4	3		17	510	182	84		98	328
OK.06	Диференціальні рівняння	4	3		9	270	100	50		50	170
OK.07	Диференціальна геометрія і топологія	5	4		9	270	94	46		48	176
OK.08	Комплексний аналіз	6	5		9	270	96	48		48	174
OK.09	Теорія ймовірностей і математична статистика	7;8			12	360	120	60		60	240
OK.10	Актуальні проблеми шкільної математичної освіти		7		6	180	64	32		32	116
OK.11	Методика навчання математики	7			6	180	64	32	32		116
OK.12	Педагогіка	5	4		6	180	72	36		36	108
OK.13	Вікова та педагогічна психологія	3			4	120	48	24		24	72
OK.14	Практикум із розв'язування математичних задач		5		6	180	68	28		40	112
OK.15	Шкільний курс математики та його дидактика	5;6			13	390	140	70		70	250

**Рис. 3.** Фрагмент навчального плану спеціальності 014.04 «Середня освіта (Математика)»

Інструментарій математичного аналізу, що далі використовується у теорії диференціальних рівнянь, зокрема диференціального та інтегрального числення, дуже потужний, тому й використання його під час розв'язування різних фізичних, математичних задач, завдань математичного моделювання, програмування може бути надзвичайно важливим. Тому студенти мають вільно володіти даним матеріалом, зокрема обирати серед багатьох й застосовувати саме ті математичні формули, за допомогою яких задача буде розв'язана якнайпростіше або ж використовувати найбільш раціональні методи знаходження того чи того виду інтеграла тощо.

Слідом за відомими методистами виділимо чотири основні рівні сформованості того чи іншого математичного поняття: 1) розсіяне уявлення студента про явище, предмет тощо; 2) студент може відрізнити одне поняття чи явище від іншого, назвати ознаки поняття, але не відрізняє істотні властивості від неістотних; 3) студент засвоює істотні та неістотні властивості, але не може узагальнити поняття; 4) студент може узагальнити поняття, вільно оперує ним [9].

Щоб досягти четвертого рівня сформованості математичного поняття та вільно оперувати ним під час розв'язування різних задач, зокрема й практичного спрямування, студент має пройти всі етапи. Пропонуємо диференційовану систему вправ для фіксації кожного рівня засвоєння поняття у студентів під час вивчення курсів математичного аналізу та диференціальних рівнянь.

*Завдання 1 рівня засвоєння*

Тут ми пропонуємо досить прості завдання на розпізнавання того чи іншого виду диференціальних рівнянь за допомогою візуальної оболонки. Тобто студенти мають відтворити лише відтворити певний вид рівнянь, пригадавши його загальний вигляд.

**Завдання 1.** В готельному номері сейф має чотиризначний пароль. Щоб його відкрити необхідно розгадати цей шифр. Послідовно (не змінюючи порядку), треба набрати букви, які є правильними відповідями до наступних завдань. У кожному завданні лише одна правильна відповідь.

**1.** Серед наведених нижче диференціальних рівнянь оберіть рівняння з відокремленими змінними виключно за зовнішніми характеристиками.

A	B	C	D
$(x^2 + y)dx = (y + 1)dy$	$x^2 dx = (y + 1)dy$	$x^2 t dx = (y + t)dy$	$x^{3y} dx = (y + 1)dy$

**2.** Серед наведених нижче диференціальних рівнянь оберіть однорідне рівняння виключно за зовнішніми характеристиками.

A	B	C	D
$\frac{y}{x} + y' = \frac{y^2}{x^3}$	$y' - \frac{y^2}{x^2} = \frac{y^3}{x^2}$	$\frac{3y}{2x} + y' = \frac{y^2}{x^2}$	$-\frac{y}{x^2} + y' = \frac{y}{x^3}$

**3.** Серед наведених нижче диференціальних рівнянь оберіть лінійне рівняння виключно за зовнішніми характеристиками.

A	B	C	D
$y' + xy^2 = xy$	$y' + x^2 y = x^3 + 1$	$y' + (x + 1)y = x + y$	$y' + x^2 y^2 = xy$

**4.** Яке з наведених нижче рівнянь можна розв'язати без застосування підстановки?

A	B	C	D
$ydx + xdy = 0$	$y' + xy = 1$	$xy' + y = x$	$y'' + 5y' + 6 = 0$

*Завдання 2-3 рівня засвоєння*

Тут ми пропонуємо завдання трохи складніші, які спрямовані не лише на відтворення загальної картинки того чи іншого виду диференціального рівняння, а й вже треба пройти один чи кілька кроків у його розв'язанні.

**Завдання 2.** Студентам потрібно розв'язати чергове завдання квесту, у якому зашифровано чотири літери, які є правильними відповідями до наступного завдання. Послідовно (не змінюючи порядку), треба їх записати.

**1.** Яку заміну варто використати для розв'язання наступного диференціального рівняння  $x^2 y' - y = \sqrt{y^2 - x^2}$  ?

A	B	C	D
$y = uv, y' = u'v + uv'$	$y = ux, y' = u'x + u$	$y = ux, y' = u'x$	$y = u + x, y' = u' + 1$

**2.** Яку заміну варто використати для розв'язання наступного диференціального рівняння  $xy' - yx = \sqrt{1 - x^2}$  ?

A	B	C	D
$y = uv, y' = u'v + uv'$	$y = ux, y' = u'x + u$	$y = ux, y' = u'x$	$y = u + x, y' = u' + 1$

3. Яку заміну варто використати для розв'язання наступного диференціального рівняння  $y'' - 3y' + 2 = 0$ ?

A	B	C	D
$y = e^x$	$y = e^{3x}$	$y = e^{2x}$	$y = e^{kx}$

4. Дано рівняння;  $y'' + 2y' - 3 = 5e^x$ . Права спеціальна частина його частинного розв'язку буде мати вигляд ...

A	B	C	D
$y = e^x$	$y = 5e^x$	$y = Ae^x$	$y = Axe^x$

#### Завдання 4 рівня засвоєння

На цьому етапі доцільно вже ускладнити завдання, тобто студент не лише має відтворювати певний вид рівнянь та вказувати алгоритм його розв'язання, а застосовувати весь комплекс отриманих знань та навичок до розв'язування складніших задач – часто геометричного чи механічного змісту. Тут також на допомогу прийдуть і знання з диференціального та інтегрального числення. Робота над практичними задачами дозволяють студентам піднятися на новий вищий творчий рівень відтворення отриманих знань, вмій та навичок. Такі завдання наближають їх також до життєвих ситуацій. Перед виконанням такого завдання варто зробити певні узагальнення попереднього матеріалу.

**Завдання 3.** Знайти лінії, в яких піднормаль в будь-якій точці так відноситься до суми абсциси і ординати, як ордината цієї точки до її абсциси.

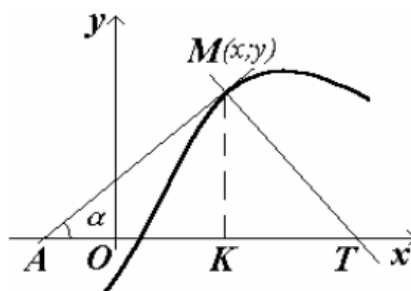


Рис. 4

**Розв'язання.** Спочатку виконаємо відповідний рисунок (рис. 4) та позначимо точку дотику ( $M$ ), нормаль ( $MT$ ) та під нормаль ( $KT$ ). Очевидно, що  $KT = -y \cdot y'$ . Далі відповідно до умови задачі складаємо рівняння:  $-\frac{yy'}{x+y} = \frac{y}{x}$  та розв'язуємо його:

$-\frac{y'}{\frac{x}{y}+1} = \frac{y}{x}$ . Отримали однорідне диференціальне рівняння першого порядку. Щоб

його розв'язати, виконаємо заміну:  $y = tx, y' = t'x + t$ . Далі маємо:  $-\frac{t'x+t}{\frac{1}{t}+1} = t$ ,

$$t'x + t = 1 + t, t'x = 1, \frac{dt}{dx} = \frac{1}{x}, dt = \frac{dx}{x}, t = \ln \frac{C}{x}, \text{ звідси } y = x \ln \frac{C}{x}.$$

$$\text{Відповідь: } y = x \ln \frac{C}{x}.$$

Під час розв'язування практичних задач геометричного чи фізичного змісту студенти узагальнюють як всі здобуті знання з курсу диференціальних рівнянь, математичного аналізу, а також елементарні знання з геометрії та фізики. Наприклад, що таке дотична і нормаль до кривої, під дотична і під нормаль, площі різних геометричних фігур, об'єми тіл тощо. Такі завдання доцільно пропонувати студентам і під час практичних занять і для індивідуальних розрахункових робіт.

**Висновки.** Подальші дослідження ми вбачаємо у розробці системи підготовчих диференційованих завдань для підготовки до розв'язування геометричних та фізичних задач за допомогою диференціальних рівнянь.

#### Список використаної літератури:

1. Жалдак М. І. Математичний аналіз з елементами інформаційних технологій: навчальний посібник / М. І. Жалдак, Г. О. Михалін, С. Я. Деканов. – К. : Редакції газет природничо-математичного циклу, 2012. – 128 с.
2. Клочко В. І. Формування знань майбутніх інженерів з інформаційних технологій розв'язування диференціальних рівнянь : монографія / В. І. Клочко, З. В. Бондаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 216 с.
3. Кондратьєва О. М. Методична система контролю і коригування знань та умінь студентів технічних спеціальностей у процесі навчання вищої математики : автореф. дис... канд. пед. наук : 13.00.02 – теорія та методика навчання математики / Оксана Марківна Кондратьєва ; Нац. пед. ун-т ім. М. П. Драгоманова. – К., 2007. – 20 с.
4. Крилова Т. В. Наукові основи навчання математики студентів нематематичних спеціальностей (на базі металургійних, енергетичних і електромеханічних спеціальностей вищого закладу технічної освіти) : автореф. дис... д-ра пед. наук: 13.00.02; Нац. пед. ун-т ім. М. П. Драгоманова. – К., 1999. – 36 с.
5. Диференціальні рівняння: Посібник. Розробники: В. К. Григоренко, Д.М. Лиля; Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького. – Черкаси: Вид. від. Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, 2011. – 232 с.
6. Потапова О. М. Аналіз дослідження труднощів студентів технічних спеціальностей при вивченні математичного аналізу / О. М. Потапова // Вісник Черкаського університету. Серія Педагогічні науки. – № 12 (265). – Черкаси, 2013. – С. 83–90.
7. Сердюк З. О. Реалізація компетентнісного підходу під час вивчення курсу математичного аналізу в ВНЗ. – Вісник Черкаського університету, Випуск № 8 (341): серія «Педагогічні науки». – Черкаси: Вид. від. ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2015. – С. 101-106.
8. Тарасенкова Н. А., Сердюк З. О. Особливості викладання курсу математичного аналізу для фахівців з аналізу даних. Вісник Черкаського університету. Серія “Прикладна математика. Інформатика”. 2020. № 1. Черкаси : Вид. від. ЧНУ ім. Б.Хмельницького. С. 57-73. Published: Mar 18, 2021. DOI 10.31651/2076-5886-2020-1-77-86
9. Тарасенкова Н. А. Використання знаково-символічних засобів у навчанні математики : [монографія] / Н. А. Тарасенкова. – Черкаси : Відлуння-плюс, 2002. – 400 с.

#### References:

1. Zhaldak, M., Mikhailin, G., Dekanov, S. (2012). Mathematical analysis with elements of information technology: [textbook] [in Ukrainian].

2. Klochko, V., Bondarenko, Z. (2010). Formation of knowledge of future engineers on information technologies for solving differential equations: [monograph] [in Ukrainian].
3. Kondratieva, O. (2007). Methodical system of control and correction of knowledge and skills of students of technical specialties in the process of learning higher mathematics: author. dis ... cand. ped. sciences: 13.00.02 - theory and methods of teaching mathematics [in Ukrainian].
4. Krylova, T. (1999). Scientific bases of teaching mathematics to students of non-mathematical specialties (based on metallurgical, energy and electromechanical specialties of higher technical education): author's ref. dis ... Dr. ped. Sciences: 13.00.02 [in Ukrainian].
5. Differential equations: Manual. Developers: Grigorenko, V., Lyla, D. (2011). Cherkassy: Ed. from. Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. 232 p. [in Ukrainian].
6. Potapova, O. (2013). Analysis of the study of difficulties of students of technical specialties in the study of mathematical analysis. Bulletin of Cherkasy University. Pedagogical Sciences Series, 12 (265), 83–90 [in Ukrainian].
7. Serdiuk, Z. (2015). Implementation of the competence approach during the study of the course of mathematical analysis in higher education. Bulletin of Cherkasy University, 8 (341): series "Pedagogical Sciences", 101-106 [in Ukrainian].
8. Tarasenkova, N., Serdiuk, Z. (2020). Features of teaching a course of mathematical analysis for data analysis specialists. Bulletin of Cherkasy University. Series "Applied Mathematics. Informatics", 1, 57-73. Published: Mar 18, 2021. DOI 10.31651/2076-5886-2020-1-77-86
9. Tarasenkova, N. (2002). The use of sign-symbolic means in teaching mathematics: [monograph] [in Ukrainian].

**SERDIUK Zoia,**

PhD (Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Mathematics and Methods of Learning of Mathematics, Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University

**BOSOVSKIY Mykola,**

PhD (Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Mathematics and Methods of Learning of Mathematics, Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University

**TRETIK Mykola,**

PhD (Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Mathematics and Methods of Learning of Mathematics, Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University

**APPLICATION OF THE THEORY OF DIFFERENTIAL EQUATIONS TO SOLVING MATHEMATICAL PROBLEMS**

**Abstract. Introduction.** *The courses of mathematical analysis and differential equations are one of the main basic courses of the mathematical cycle of disciplines, which are studied by students of mathematical, physical, technical, IT specialties of higher education institutions, etc. As our studies have shown, acquisition and, most importantly, the application of a set of a large number of different mathematical facts and concepts in the process of solving problems often lead to the appearance of difficulties in achievers. As shown by our studies, assimilation and, most importantly, the application of a set of a large number of different mathematical facts and concepts in the process of solving problems often lead to the appearance of difficulties in learners. Therefore, the method of their study should be built as specific for this category of students.*

*The purpose of the article is to consider the peculiarities of the application of the theory of differential equations and methods of finding different types of integrals for solving problems of geometric and mechanical content and to take them into account during the training of students in the fields of 01 Education/ Pedagogy, in particular 014 Secondary Education, 11 Mathematics and Statistics, 10 Natural Sciences sciences, 12 Information technologies, formulate appropriate recommendations.*

**Originality.** *in the article, we indicated the vectors that should be used with students to consolidate and reproduce the methods of solving differential equations when solving problems in geometry and physics. Exercises have been developed in accordance with four levels of the formation of a mathematical concept: 1) the student's scattered idea of a phenomenon, subject, etc.; 2) the student can distinguish one concept or phenomenon from another, name the features of the concept, but does not distinguish essential properties from non-essential ones; 3) the student learns essential and non-essential properties, but cannot generalize concepts; 4) the student can generalize concepts, freely operates with them.*

**Conclusion.** *We see further research in the development of a system of preparatory differential problems to prepare for solving geometric and physical problems using differential equations.*

**Keywords:** *differential equations, solution methods, differential and integral calculus, students of natural and technical specialties of the university*

Одержано редакцією 17.10.2022р.  
Прийнято до публікації 03.11.2022р.

**СЕКЦІЯ «ІНФОРМАТИКА»**

УДК 004.9 : 004.056

**РОЗЛОМІЙ Інна Олександрівна**

к. т. н., старший викладач,  
Черкаський національний університет  
імені Богдана Хмельницького  
ORCID: 0000-0001-5065-9004  
e-mail: inna-roz@ukr.net

**ЯРМІЛКО Андрій Васильович**

к. т. н., доцент, доцент,  
Черкаський національний університет  
імені Богдана Хмельницького  
ORCID: 0000-0003-2062-2694  
e-mail: a-ja@ukr.net

**ІНТЕГРОВАНІЙ КРИПТОГРАФІЧНО-СТЕГАНОГРАФІЧНИЙ ЗАХИСТ  
МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ І ДАНИХ В СИСТЕМАХ E-LEARNING**

У статті розглянуто загальну проблематику безпеки в системах e-learning. Проаналізовано сучасні дослідження та практику застосування інструментарію інформаційної безпеки у таких системах. Встановлено, що у більшості випадків системи e-learning надають користувачам засоби автентифікації та ідентифікації учасників сеансів навчання, забезпечують конфіденційність та адресність інформаційних процесів, захищеність навчальних матеріалів при використанні відкритих каналів зв'язку та інші функції захисту. Проте комплексний підхід до захисту систем e-learning залишається малодослідженим. З огляду на це було запропоновано підсилити захист даних та мультимедійного контенту в системах електронного навчання шляхом застосування інтегрованого криптографічно-стеганографічного підходу. Він застосовує алгоритм побудови цифрового водяного знаку, який базується на операціях матричного криптографічного перетворення. Комплексне застосування двох методів захисту має на меті підвищення стеганографічної стійкості алгоритму вбудовування міток цифрового водяного знаку за рахунок ускладнення завдання вибору параметру інверсії бітів у байтах, призначених для вбудовування ідентифікаційних ознак. Додатковий захисний ефект забезпечується неочевидністю вибору байтів у файлі-контейнері для вбудовування цифрового водяного знаку та можливістю їхньої ідентифікації лише за допомогою криптографічних процедур уповноваженими користувачами. Такий підхід є продуктивним щодо формування стратегії довіри до он-лайн матеріалів і дистанційної діяльності в освітній галузі, особливо – до мультимедійних ресурсів у системах e-learning. Інкорпорування запропонованих захисних механізмів в існуючі та розроблювані системи електронного навчання пропонується шляхом додавання відповідних фрагментів коду або незалежно скомпільованих програмних модулів-плагінів. Практичне впровадження відповідних програмних інструментів має сприяти підвищенню довіри між учасниками системи електронного навчання за рахунок можливості ідентифікації викрадених або скомпрометованих ідей та інновацій у контенті освітніх ресурсів, фіксації статусу скомпрометованих користувачів як серед здобувачів освіти, так і серед викладачів. Позитивний ефект очікується як у контексті ключових детермінант методів захисту даних в системах електронного навчання, так і щодо підтримки сталого розвитку цифрових індустрій, пов'язаних з книговидавництвом та поширенням мультимедійних творів.

**Ключові слова:** захист авторського права, цифровий водяний знак, електронне навчання, шифрування, стеганографія, криптографія.

**Постановка проблеми.** Цифрова інформаційна революція змінила комерційну та академічну поведінку, а Інтернет відіграв важливу роль у глобалізації цих процесів. Як зазначено L. Shahmoradi, V. Changizi, E. Mehraeen, A. Bashiri, B. Jannat та M. Hosseini, переваги від трансляції даних, легке редагування будь-якого цифрового вмісту та можливість його відтворення без будь-яких втрат якості зробили цифрову технологію набагато кращою за старі аналогові системи [1]. Це породило нові можливості для інновацій. Розвиток інформаційних технологій стимулював перехід до нових форм організації діяльності в освітній сфері. Її швидкий розвиток стимулюється впровадження електронного навчання, яке є прямим результатом інтеграції освіти та технологій і стало потужним засобом, орієнтованим, зокрема, на використання Інтернет-технологій.

Електронне навчання – це інтерактивний процес, у якому навчальний контент доступний в режимі он-лайн і забезпечує автоматичний зворотний зв'язок із навчальною діяльністю студента, а отже, використання Інтернету для покращення електронного навчання стало трендом сучасних закладів освіти (M. A. N. Masud, X. Huang, [2]). Електронне навчання швидко розширилося завдяки різноманітним технологіям і пристроям для доступу до навчальних ресурсів, таких як ноутбуки, комп'ютери, смартфони та планшети. Технології суттєво вплинули на освіту, навчання та методи викладання.

Беззаперечне значення електронного навчання в освіті призвело до масового зростання кількості курсів електронного навчання та систем, які пропонують різні види послуг. Сьогодні велика кількість навчальних ресурсів доступні через Інтернет в різних форматах (текст, зображення, аудіо, відео), що сприяє самостійному навчанню та виходу за межі географічних кордонів. Курси, призначені для електронного навчання, містять нові типи навчальних матеріалів, які використовують переваги мережевих, мультимедійних та інших інформаційних технологій. Крім того, відбулося розширення можливостей для співпраці із залученням інтерактивних функцій спілкування – форумів, чатів тощо.

Проте легкість та доступність методів і засобів виготовлення ідеальних цифрових копій та пов'язане з цим масштабне незаконне копіювання електронного контенту є значним викликом для нормального розвитку цифрових індустрій, пов'язаних з книговидавництвом, аудіовізуальними творами та навіть науковими публікаціями. Не оминає ця проблема і сферу електронного навчання.

Виникнення та розвиток систем e-learning безпосередньо пов'язані з поширення комп'ютерно-опосередкованої комунікації та розвитком нових інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Спілкування в комп'ютерному форматі впливає на багато різних аспектів притаманної освітньому процесу міжособистісної та групової комунікації. Серед них вартими пильної уваги є, зокрема, механізми формування вражень, групова динаміка та етичні питання, пов'язані з довірою до джерела і, власне, до самої інформації. Недоліки цього формату, які особливо проявляються при відсутності відеотрансляції, пов'язують з втратою значимої для правильної інтерпретації повідомлень невербальної інформації: тону, міміки та жестів. Таким чином, хоча комунікація за допомогою комп'ютера надає чимало переваг, технологічне посередництво може також гальмувати процес спілкування та відбиватися на його якості. Додаткові труднощі виникають також із захистом інформаційних ресурсів та персональних даних, що збираються та обробляються під час процедур електронного навчання.

Практичний досвід переходу до електронного навчання з використанням його дистанційних форм переконливо показав, що використання Інтернет-технологій в

організації навчання призводить до значного підвищення доступності та якості навчання і, як наслідок, сприяє підвищенню рентабельності системи навчання. Система електронного навчання забезпечує кожного студента інформаційними та освітніми можливостями в будь-який момент часу незалежно від їх місцезнаходження. Іншими словами, Інтернет-орієнтована модель освіти характеризується повнотою свободи від просторово-часових обмежень, що є її незаперечною перевагою. Водночас, розроблені комунікаційні рішення систем електронного навчання не забезпечують можливості абсолютного контролю над каналами спілкування. Переваги надання знань у цифровій формі можуть бути знівельовані можливістю їх незаконного копіювання, модифікації та розповсюдження без урахування авторських прав. Тому надання навчальних матеріалів через відкриті канали зв'язку, захист переданого мультимедійного вмісту навчальних курсів, так само як і пов'язаних з освітнім процесом даних, автентифікації та ідентифікації його учасників, конфіденційності та адресності сеансів навчання, питання захисту авторських прав, інтелектуальної власності, академічної доброчесності стають особливо актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Електронне навчання стало основним напрямком в освітньому секторі та було масово впроваджено у вищій освіті. Воно охоплює широкий набір програм і процесів, таких як веб-навчання, комп'ютерне навчання, віртуальні класи та цифрова співпраця. Причому, як показує практика, бурхливому зростанню попиту на такі інновації та, зокрема, на дистанційні освітні послуги, сприяє не лише технологічний прогрес, але й трансформація освітнього простору внаслідок глобальних і локальних катаклізмів, таких як епідемії, стихійні лиха та війни. Якість систем електронного навчання привертає значну увагу дослідників, котрі намагаються визначити фактори їхнього ефективного функціонування, щоб максимізувати ефективність цих систем. Одним з важливих показників їхньої якості є вирішення питань інформаційної безпеки і, зокрема, конфіденційності та безпеки користування.

Інформаційна безпека визначається, як комплекс заходів щодо виявлення та запобігання неавторизованому доступу користувачів, здійсненому за допомогою відповідного набору інструментів (V. I. Zuev, [3]). На важливості інформаційної безпеки для систем електронного навчання наголошує S. Aljawarneh у [4]. У дослідженні [5] S. H. Hasan, D. M. Alghazzawi та A. Zafar найважливіші вимоги щодо конфіденційності та безпеки, пов'язані з електронним навчанням, розділяють на три основні групи:

- конфіденційність користувача (визначення мети збору даних, знання політики конфіденційності, необхідності видалення даних після використання тощо);
- конфіденційність мережі (всі ресурси вразливі до мережових атак);
- механізми безпеки (автентифікація, створення профілю користувача, захист навчальних матеріалів, сертифікація, біометрична ідентифікація, ідентифікація за допомогою смарт-карт тощо).

Найчастіші випадки, пов'язані із заподіянням шкоди в контексті електронного навчання, підсумовано G. Riahi в [6] таким чином:

- 1) пошкоджені або втрачені повідомлення, оцінки, дані чи роботи;
- 2) ідентифікація скомпрометованих учнів або викладачів;
- 3) викрадені або скомпрометовані ідеї або інновації студентів;
- 4) порушена цілісність соціальних або технічних систем.

Огляд загроз безпеці систем електронного навчання зроблено в [7-9], де описано підхід до створення захищеної системи електронного навчання. Авторами A. R. Ghobadi, A. Boroujerdizadeh, A. H. Yaribakht та A. Abd Manaf описана загальна

концепція захисту систем електронного навчання за допомогою цифрових водяних знаків (ЦВЗ) [10]. У праці наведена класифікація методів накладання ЦВЗ для забезпечення цілісності контенту в системах електронного навчання. Інші напрямки досліджень стосувались методу вбудовування ЦВЗ за допомогою генетичних алгоритмів (Н. S. Heniedy, О. М. Ouda, М. О. Khozium, [11]) та методу вейвлет-перетворень (А. Zemtsov, [12]). Загалом, у більшості оглянутих досліджень вивчалися окремі частини ключових детермінант методів захисту даних в системах електронного навчання.

**Мета дослідження.** Огляд літератури виявив, що малодослідженим залишається комплексний підхід до захисту систем e-learning. Дана обставина вплинула на формування мети цієї статті: захист даних та мультимедійного контенту в системах електронного навчання шляхом застосування інтегрованого криптографічно-стеганографічного підходу. Такий підхід має підвищити довіру між учасниками системи електронного навчання.

### Виклад основного матеріалу.

**1. Загальні методи захисту мультимедійного контенту і даних у системах e-learning.** При всій багатоманітності технічної та технологічної підтримки комп'ютерно-опосередкованої комунікації у системах e-learning, ознакою часу є опора на хмарні технології. Електронне навчання на основі хмарних технологій – це спосіб зменшити вартість і складність доступу до даних, які контролюються сторонніми службами. Традиційні методи електронного навчання поєднуються з технологією хмарних обчислень, щоб надати переваги користувачам.

Хмарні технології та пов'язані з ними сервіси, крім очевидних переваг, мають і об'єктивні недоліки, які впливають з самої архітектури «хмари» як техніко-технологічного рішення і, відповідно, з її здатності гарантувати безпеку даних як таку, тобто принциповою здатністю сервісів гарантувати зберігання та обробку даних згідно з чинними правовими актами. Як показано на рис. 1, загрози безпеці у системах електронного навчання стосуються всіх типів хмарних послуг: дистанційного надання програмного забезпечення (SaaS), платформи (PaaS) чи інфраструктури (IaaS).

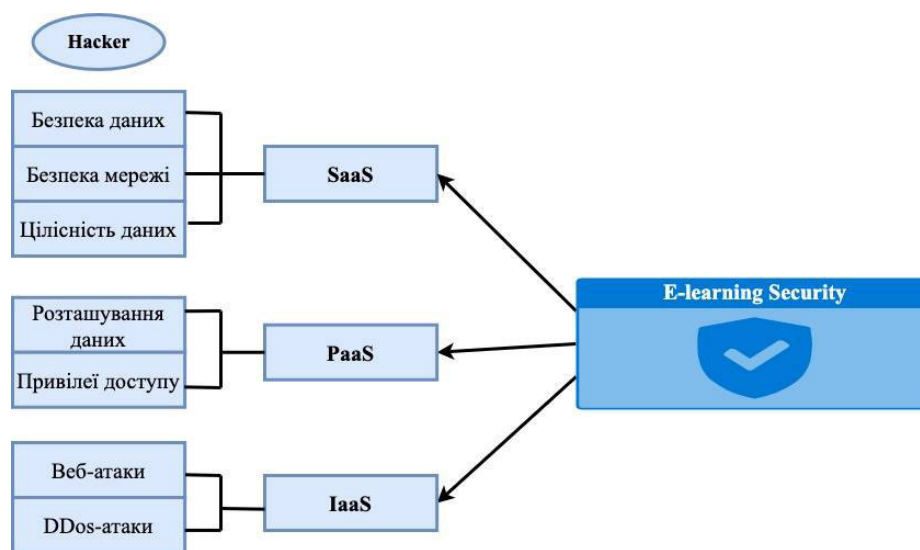


Рисунок 1 – Типи атак на системи e-learning

Дані відіграють важливу роль у хмарних службах, оскільки багато постачальників хмарних послуг зберігають дані клієнтів у великих центрах обробки даних (data centre). Під час перехідних операцій безпека даних клієнтів не гарантується. Коли один користувач синхронізує декілька пристроїв, дані можуть бути пошкоджені. Безпеку даних можна класифікувати двома способами. По-перше, власник даних має переконатися, що постачальник хмарних послуг оброблятиме дані лише згідно з інструкціями клієнта. По-друге, власник даних повинен бути впевнений, що постачальник хмарних послуг вжив відповідних дій у разі несанкціонованого доступу до даних, модифікації даних, знищення даних зловмисниками.

Постачальникам хмарних послуг мають надаватись гарантії щодо наведених нижче ключових проблем безпеки даних:

- застосування механізму запобігання несанкціонованого доступу до даних;
- можливість власникам даних часто створювати резервні копії;
- надання законних повноваження власникам даних на видалення, зміну даних і переміщення даних до іншого хмарного постачальника.

Клієнти зберігають свої конфіденційні дані на хмарному сервері, і постачальник SaaS може ними маніпулювати. Тому для захисту даних від витоку конфіденційної інформації застосовуються жорсткі методи шифрування мережевого трафіку для керування потоком даних у мережі, наприклад: Secure Socket Layer (SSL) і Transport Layer Security (TLS).

Цілісність даних передбачає правильність, доступність, високу якість і надійність збережених даних. Хмарою забезпечується цілісність сховищ даних для конфіденційності клієнтів. У розподіленому середовищі для досягнення цілісності даних у транзакціях бази даних беруть участь багато ресурсів даних. Додатку SaaS потрібно забезпечити середовище для обробки даних із кількома клієнтами та залучення більшої кількості сторонніх сторін. Як засоби досягнення цілісності даних розглядаються методи хешування, автентифікація повідомлень і цифрові підписи.

У випадку PaaS-послуг хмарні обчислення надають клієнтам обчислювальну платформу та системне програмне забезпечення. Користувачі хмари створюють програму, керуючи розгортанням програмного забезпечення та параметрами конфігурації від постачальників. З точки зору безпеки, вторгнення на основі хосту та мережі є складними факторами для постачальників PaaS. Основні загрози безпеки рівня PaaS стосуються розташування даних і привілеїв доступу.

Постачальники PaaS надають послуги з проектування додатків, розробки додатків, розгортання, командної співпраці, інтеграції веб-сервісів і тестування. На основі розташування даних модель PaaS забезпечує надійність своїм клієнтам. Хмарний постачальник має повні права доступу до даних, коли дані зберігаються в хмарному середовищі. У цьому хмарному середовищі немає конфіденційності даних. Таким чином, підтримувати привілейований доступ користувача можна за допомогою принаймні одного або двох підходів, доступних власникові даних. Перший – вибрати надійний метод шифрування для зберігання даних і використовувати інший метод шифрування для доступу до даних; другий – підтримувати високий стандарт конфіденційності даних, законодавчо встановлюючи вимоги постачальника хмарних послуг через договірні обов'язки та механізми забезпечення. Хмарний постачальник повинен мати перевірені політики контролю безпеки доступу, технічні рішення та частий аудит дій користувачів, щоб запобігти несанкціонованому доступу користувачів, і підтримувати принцип розподілу обов'язків для привілейованих користувачів, щоб запобігати та виявляти зловмисну внутрішню діяльність.

Інфраструктура як модель обслуговування у хмарних середовищах дозволяє клієнту використовувати різноманітні ресурси, такі як сервери, сховища, мережі та інші

обчислювальні ресурси, як віртуалізовані системи, які отримують доступ через Інтернет. Користувачі можуть запускати будь-яке програмне забезпечення з безпекою на виділених ресурсах, тому IaaS забезпечує повний контроль і керування ресурсами. Отже, хмарні провайдери несуть відповідальність лише за налаштування політик безпеки. Типовими проблемами безпеки, пов'язаними з IaaS, є атаки на веб-сервіс та DDoS-атаки.

Таким чином, питання безпеки є серйозною проблемою в хмарних ресурсах на всіх притаманних їм рівнях надання послуг. А найважливішою рушійною силою пошуку відповідних технічних і організаційних рішень є занепокоєння щодо захисту авторських прав на цифровий контент, регуляція доступу до сервісів та режимів їхнього функціонування. В контексті захисту навчального контенту рішення проблеми знаходять завдяки впровадженню програм мультимедійної системи безпеки (Multimedia Security Applications, MSA). За останні роки MSA продемонстрували значний прогрес і включають досить широкі функціональні можливості: захист авторських прав, конфіденційність, виявлення зловмисників, виявлення підробки, підтвердження доставки та підтвердження покупки. Для посилення захисту та забезпечення авторських прав на цифровий контент MSA використовують засоби криптографії та стеганографії і послуговуються такими інструментами як автентифікація, шифрування, позначення часу, хешування, цифровий електронний підпис та цифрові водяні знаки (рис. 2). Зараз найважливішим доступним інструментом захисту даних є шифрування. Цей інструмент захищає дані під час спілкування між відправником і одержувачем через Інтернет. Проте після отримання даних і їхньої розшифровки (дешифрування) вони більше не захищені.

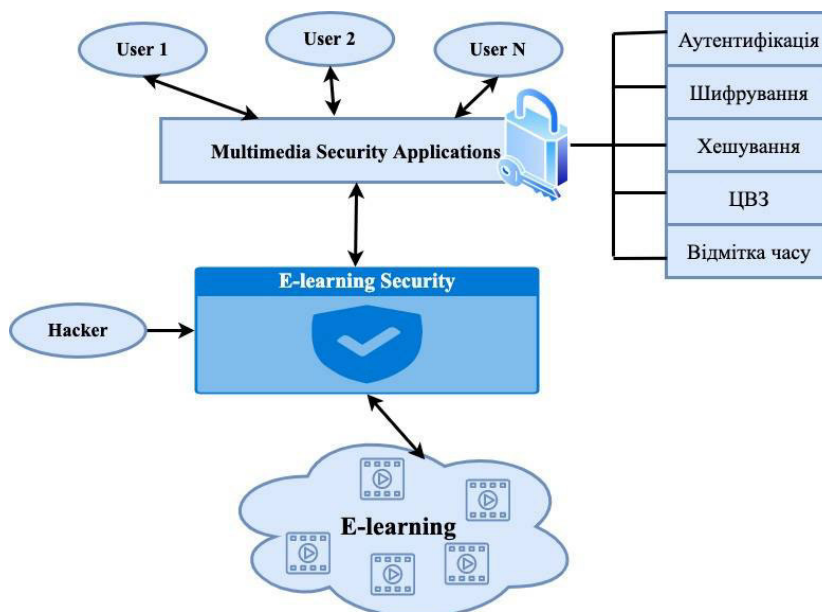


Рисунок 2 – Модель захищеної системи e-learning

**2. Технологія цифрового водяного знаку та її застосування.** Цифровий водяний знак (ЦВЗ) призначений для доповнення криптографічних процедур при вирішенні задачі захисту інтелектуальної власності в системах електронного навчання. Використання цієї технології спрямоване на створення додаткових ідентифікаційних ознак шляхом введення міток в оригінальний мультимедійний вміст для ідентифікації автору твору. Вона є одним із варіантів застосування методів стеганографії. За останні роки технологія ЦВЗ продемонструвала значний прогрес [13] і зараз широко

застосовується для захисту права власності на цифрові зображення, аудіофайли, відео та текст. Таким чином, ця технологія має потенціал вирішення питань управління цифровими правами, захисту інформації та забезпечення конфіденційності. В електронному навчанні стеганографічні методи дозволяють вирішити такі завдання:

1. Захист авторських прав шляхом запобігання можливості копіювання та дублювання мультимедійних ресурсів. Можливість запровадження цифрового водяного знаку дозволяє відтворювати заборону копіювання та редагування мультимедійної інформації.

2. Автентифікація та ідентифікація. Визначення достовірності інформації, отриманої через мережу, залишається важливою проблемою електронного навчання, в якій знання студента оцінюються за результатами виконаної індивідуальної роботи та за результатами дистанційного тестування.

Завдяки цим можливостям використання ЦВЗ в електронному навчанні стає все більш популярним як важлива частина стратегії довіри до цифрового контенту систем e-learning. Крім того, для електронного навчання, яке передбачає використання високоякісних зображень, pdf-файлів тощо, захищеність авторського контенту є одним з чинників підвищення ефективності навчальної діяльності.

За своєю суттю ЦВЗ – це спеціальна мітка, яка вбудовується в цифровий контент (контейнер) з метою підтвердження цілісності даних. Одночасно, це потужна технологія для ідентифікації даних про авторські права. ЦВЗ оперує оцифрованою інформацією у вигляді тексту, зображення, аудіо чи відео, які вбудовано в оригінальну інформацію та можуть бути правильно вилучені за допомогою методу видалення водяного знаку для підтвердження права власності. Важливо, що для людського ока відмінність оригінальної інформації від інформації з водяним знаком є непомітною [14]. Завдяки цьому ЦВЗ дозволяє уповноваженим особам додавати приховані повідомлення про авторські права на цифрове аудіо, відео, зображення та текст. Цей метод придатний для маркування наборів даних і внесення відмітки для реєстрації права власності на основі зорової системи людини.

Отже, ЦВЗ є одним з методів автентифікації, який дозволяє контролювати спотворення в цифрових мультимедійних даних (Digital Multimedia Data, DMD). Система ЦВЗ має дві основні фази: вбудовування та вилучення (рис. 3).

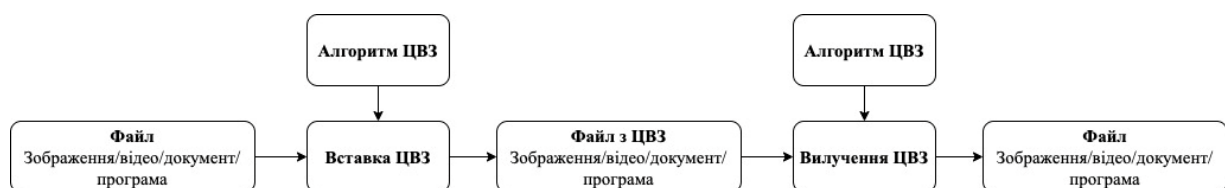


Рисунок 3 – Процес вставки/вилучення ЦВЗ

В практичних випадках ЦВЗ може бути логотипом установи, псевдовипадковою послідовністю або фоном зображення чи файлу pdf. Серед сукупності ознак, за якими класифікуються ЦВЗ, найбільш поширеною є ознака за ступенем сприйняття. Відповідно до цього класифікатора ЦВЗ поділяються на видимі (Visible Digital Watermark, VDW) та невидимі (Invisible Digital Watermark, IDW) [15]. Більшість досліджень присвячені вивченню IDW, оскільки вони частіше використовуються в ЦВЗ.

Видимий цифровий водяний знак – VDW – був початковим і, в основному, примітивним методом ЦВЗ, який є видимим для користувачів. Хоча VDW використовується протягом тривалого часу, він не є захищеною формою водяного

знаку для DMD. Методика алгоритму VDW є недостатньою для захисту DMD. Водяний знак такого типу можна використовувати лише для ідентифікаційних цілей. Зокрема, в системах e-learning це доречно як один із заходів профілактики несанкціонованого втручання в цифрові мультимедійні дані.

Невидимий цифровий водяний знак – IDW – можна виконати за допомогою різних технік, і найпростіша з них – це приховати водяний знак у DMD. Переваги приховування полягають у тому, що навіть якщо частину зображення буде обрізано, одержувач може отримати потрібне повідомлення, оскільки водяний знак вставляється у нього багато разів. Якщо змінити найважливіші біти у повідомленні, то це матиме великий вплив на властивості початкового файлу (наприклад, може помітно змінитися колір зображення). Навпаки, якщо змінити найменш значущі біти, це матиме мінімальний ефект. У випадку захисту мультимедійних зображень, якщо змінити лише один або два молодших біта у даних, це супроводжуватиметься мінімальним візуальним ефектом, оскільки людське око може помітити лише близько шести частинок кольору. Наприклад, якщо ми маємо справу з кодовим записом 10001100 і змінюємо його на 10001101, він буде аналогічно сприйматись людським оком. Даний метод вбудовування ЦВЗ отримав назву метода вбудовування даних в молодші біти або метода LSB (найменш значущого біта), та є одним із найпростіших і одним із найшвидших методів ЦВЗ (рис. 4).

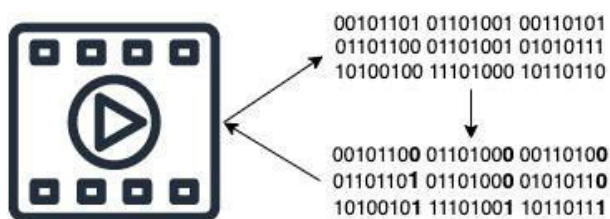


Рисунок 4 – Вставка ЦВЗ методом інвертування молодших бітів

Метод LSB є одним із найдавніших методів стеганографії та використовується для вбудовування захисних ознак у різні види мультимедійного контенту [16-17]. Для підвищення довговічності захисту, як правило, використовується секретний ключ, який визначає набір пікселів, доступних для вбудовування.

Більшість розроблених на сьогодні методів побудови цифрового водяного знаку, які можуть бути використані для задач захисту документів, побудовані на основі саме методу LSB. Проте, для більшості з них характерна вразливість, низька стеганографічна стійкість.

**3. Метод комбінованого застосування криптографії та стеганографії для захисту контенту у системах e-learning.** Враховуючи можливі ризики порушення захищеності складових системи e-learning, очевидно, що неможливо обійтися засобами лише криптографії чи стеганографії. В зв'язку з цим необхідний комплексний підхід до забезпечення інформаційної безпеки на всіх рівнях функціонування системи e-learning. Зокрема, з огляду на недоліки наявних методів вбудовування захисних (ідентифікаційних) компонентів, пропонується алгоритм побудови цифрового водяного знаку, який базується на операціях матричного криптографічного перетворення.

Мультимедійний файл, який підлягає захисту за допомогою накладання ЦВЗ, є контейнером для вбудовування ідентифікаційної інформації. Як вже зазначалось, при маркуванні контенту цифровим водяним знаком задіяні два процеси – вставка та вилучення. Вставка виконується безпосередньо власником контенту, щоб додати право власності на нього. Ці процеси протилежні один одному, але пов'язані між собою,

оскільки вставка ЦВЗ має виконуватись таким чином, щоб вилучити інформацію могли лише авторизовані користувачі. Розглянемо ці процеси детальніше.

*Етап 1.* Вставка водяного знаку. Спочатку ЦВЗ вбудовується в вихідний файл-контейнер за алгоритмом [18]:

- 1) задати послідовність чисел та матрицю, на основі якої здійснюватиметься перетворення значень з проміжку;
- 2) виконати операції матричного криптографічного перетворення послідовності чисел; отримані значення вкажуть на байти, в яких будуть інвертуватись біти;
- 3) визначити параметр інверсії – біт(біти), який буде інвертуватись;
- 4) після інвертування бітів у всіх байтах з результатів виконання матричних перетворень вважаємо, що ЦВЗ вбудований у файл.

Суть запропонованого алгоритму полягає в тому, що спочатку над заданими значеннями, з визначеного проміжку, виконується матричне перетворення (рис. 5).

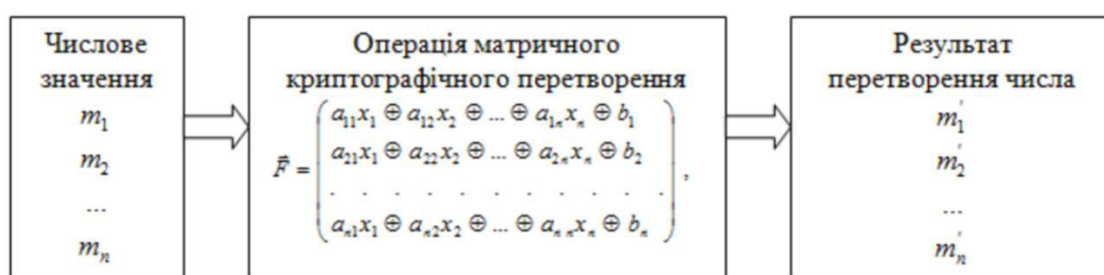


Рисунок 5 – Матричне криптографічне перетворення числових значень

З рис. 5 видно, що над кожним значенням  $m_1, m_2, \dots, m_n$  виконується матричне криптографічне перетворення, в результаті якого отримуємо нові значення  $m'_1, m'_2, \dots, m'_n$ , які вказують на байти, в яких будуть інвертуватися біти [19].

Інверсія може виконуватися над будь-яким бітом в байті чи кількома одразу. Найпростіший спосіб – інвертувати молодший біт у байті. Саме для ускладнення завдання вибору параметру інверсії й варто використовувати матричне криптографічне перетворення. Тобто, за допомогою матриці маємо перетворювати задане число, а отриманий таким чином результат перетворення вказуватиме на порядковий номер біта в байті, який буде інвертуватися.

В результаті матричних криптографічних перетворень будуть знайдені байти, в яких відбулася інверсія бітів. На перший сторонній погляд здається, що байти, в яких відбулася інверсія бітів, вибрані в хаотичному порядку. І цей ефект підвищує стеганографічну стійкість алгоритму вбудовування міток цифрового водяного знаку.

*Етап 2.* Вилучення ЦВЗ. Операції процесу видалення ЦВЗ аналогічні операціям його вставки: за допомогою матричного перетворення чисел з заданого діапазону визначаються потрібні байти та інвертуються відповідні біти у них.

Таким чином, з впровадженням додаткових криптооперацій переваги застосування ЦВЗ як ідентифікаційного засобу для позначення права власності або авторства на дані та мультимедійні об'єкти посилюються завдяки кращій захищеності ідентифікаційної інформації. В системах e-learning такі стійкі ідентифікатори можуть бути застосовані не лише для захисту навчального контенту, але й для створення індивідуальних прихованих міток для позначення робіт здобувачів освіти. Разом із засобами керування візуалізацією таких позначень з боку уповноважених користувачів, застосування таких інструментів має сприяти впровадженню принципів академічної доброчесності та спрощенню контролю щодо їхнього дотримання в межах конкретного сервісу e-learning в локальних освітніх групах. Особливо ефективною така функція

може бути у випадку оцінювання потоків робіт значного обсягу, виконаних за ідентичними або подібними завданнями.

Запропоновані захисні механізми можуть бути інкорпоровані в існуючі та розроблювані системи електронного навчання шляхом додавання відповідних фрагментів коду (snippets) чи незалежно скомпільованих програмних модулів (plugins).

**Висновки.** Забезпечення цілісності навчального контенту та конфіденційності мережі є важливим завданням в системах електронного навчання. Захист ресурсів мережі має бути забезпечено на різних рівнях: виявлення фактів пошкодження або втрати повідомлень, оцінок, даних, завдань, а також робіт, виконаних здобувачами освіти. Актуальною є й ідентифікація викрадених або скомпрометованих ідей та інновацій, фіксація статусу скомпрометованих користувачів (як здобувачів освіти, так і викладачів).

Оскільки використання традиційних методів захисту не забезпечує актуального рівня захищеності систем e-learning, доцільним є застосування комплексного використання кількох методів. Продуктивним напрямом є поєднання методів стеганографії та криптографії. Для підвищення ефективності захисту на першому етапі пропонується накладати ЦВЗ на контент, потім обчислювати хеш-функцію. Для обчислення хеш-функції придатні всі існуючі методи, зокрема, на основі операцій матричних криптографічних перетворень, які запропоновані в роботі [20]. В результаті інтеграції двох технологій досягається підвищення стеганографічної стійкості захисних ознак. Такий підхід дозволить створювати цифровий контент з гарантією авторства та автентичності вмісту. Практичне впровадження відповідних програмних інструментів підтримає стратегію довіри до он-лайн матеріалів і діяльності в освітній галузі, особливо – до мультимедійних ресурсів.

Більш потужну схему захисту контенту і даних у системах e-learning можна побудувати за допомогою композиціонування ЦВЗ разом із сучасними м'яким обчислювальними інструментами, притаманними методам штучного інтелекту. Зокрема, такі рішення можуть ґрунтуватися на застосуванні генетичних алгоритмів, нейронних мереж та нечіткої логіки.

#### Список використаних літератури та джерел:

1. Shahmoradi, L., Changizi, V., Mehraeen, E., Bashiri, A., Jannat, B., & Hosseini, M. (2018). The challenges of E-learning system: Higher educational institutions perspective. *Journal of education and health promotion*, 7.
2. Masud, M. A. H., & Huang, X. (2012). An e-learning system architecture based on cloud computing. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 6(2), 255-259.
3. Zuev, V. I. (2012). E-learning security models. *Management Information Systems*, 7(2), 024-028.
4. Aljawarneh, S. (2011). A web engineering security methodology for e-learning systems. *Network Security*, 2011(3), 12-15.
5. Hasan, S. H., Alghazzawi, D. M., & Zafar, A. (2014). E-Learning systems and their Security. *BRIS Journal of Adv. S & T (ISSN. 0971-9563) vol, 2*, 83-92.
6. Riahi, G. (2015). E-learning systems based on cloud computing: A review. *Procedia Computer Science*, 62, 352-359.
7. Banerjee, S., & Karforma, S. (2017). Object oriented modeling for authentication of certificate in e-learning using digital watermarking. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(8).
8. Al-Ajlan, A. S. (2014). E-Learning Certificate Using Digital Watermarking Technology. *IOSR J. Comput. Eng.*, 16(4), 81-93.
9. Banerjee, S., & Karforma, S. (2016). Authentication of certificate in e-learning using secret key digital watermarking. *International Journal of Information Science and Computing*, 3(2), 53-58.
10. Ghobadi, A. R., Boroujerdizadeh, A., Yaribakht, A. H., & Abd Manaf, A. (2012, September). How watermarking secures e-learning system. In *2012 International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education (ICEEE)* (pp. 99-104). IEEE.

11. Heniedy, H. S., Ouda, O. M., & Khozium, M. O. (2020). Securing the e-learning materials using digital watermarking approach. Vol.9, No, 11, pp.1559-1563, November, 2020.
12. Zemtsov, A. (2020, November). Data Protection of Multimedia Content for E-Learning Using Discrete Wavelet Transform. In *8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)* (pp. 268-273). Atlantis Press.
13. Evsutin, O., Melman, A., & Meshcheryakov, R. (2020). Digital steganography and watermarking for digital images: A review of current research directions. *IEEE Access*, 8, 166589-166611.
14. Saeed, F., & Dixit, A. (2018, September). Digital Watermarking Techniques for Content Integrity on E-Learning Systems. In *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)* (pp. 748-753). IEEE.
15. Rashid, A. (2016). Digital watermarking applications and techniques: a brief review. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 5(3), 147-150.
16. Thangadurai, K., & Devi, G. S. (2014, January). An analysis of LSB based image steganography techniques. In *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics* (pp. 1-4). IEEE.
17. Jung, K. H., & Yoo, K. Y. (2015). Steganographic method based on interpolation and LSB substitution of digital images. *Multimedia Tools and Applications*, 74(6), 2143-2155.
18. Розломій І.О., Косенюк Г.В. (2017) Спосіб формування цифрового водяного знаку для електронних документів на основі операцій матричного криптографічного перетворення. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 4(251), 229–233.
19. Кулик С.В., Люта М.В., Розломій І.О. (2017) Дослідження нанесення QR-коду для захисту графічних зображень. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 5(253), 244–248.
20. Розломій І.О. (2016) Методи обчислення хеш-функції електронного документу на основі матричних криптографічних перетворень. Вісник ЧДТУ. Технічні науки. 4. С. 88–94.

#### References:

1. Shahmoradi, L., Changizi, V., Mehraeen, E., Bashiri, A., Jannat, B., & Hosseini, M. (2018). The challenges of E-learning system: Higher educational institutions perspective. *Journal of education and health promotion*, 7.
2. Masud, M. A. H., & Huang, X. (2012). An e-learning system architecture based on cloud computing. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 6(2), 255-259.
3. Zuev, V. I. (2012). E-learning security models. *Management Information Systems*, 7(2), 024-028.
4. Aljawarneh, S. (2011). A web engineering security methodology for e-learning systems. *Network Security*, 2011(3), 12-15.
5. Hasan, S. H., Alghazzawi, D. M., & Zafar, A. (2014). E-Learning systems and their Security. *BRIS Journal of Adv. S & T (ISSN. 0971-9563) vol, 2*, 83-92.
6. Riahi, G. (2015). E-learning systems based on cloud computing: A review. *Procedia Computer Science*, 62, 352-359.
7. Banerjee, S., & Karforma, S. (2017). Object oriented modeling for authentication of certificate in e-learning using digital watermarking. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(8).
8. Al-Ajlan, A. S. (2014). E-Learning Certificate Using Digital Watermarking Technology. *IOSR J. Comput. Eng.*, 16(4), 81-93.
9. Banerjee, S., & Karforma, S. (2016). Authentication of certificate in e-learning using secret key digital watermarking. *International Journal of Information Science and Computing*, 3(2), 53-58.
10. Ghobadi, A. R., Boroujerdizadeh, A., Yaribakht, A. H., & Abd Manaf, A. (2012, September). How watermarking secures e-learning system. In *2012 International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education (ICEEE)* (pp. 99-104). IEEE.
11. Heniedy, H. S., Ouda, O. M., & Khozium, M. O. (2020). Securing the e-learning materials using digital watermarking approach. Vol.9, No, 11, pp.1559-1563, November, 2020.
12. Zemtsov, A. (2020, November). Data Protection of Multimedia Content for E-Learning Using Discrete Wavelet Transform. In *8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)* (pp. 268-273). Atlantis Press.
13. Evsutin, O., Melman, A., & Meshcheryakov, R. (2020). Digital steganography and watermarking for digital images: A review of current research directions. *IEEE Access*, 8, 166589-166611.
14. Saeed, F., & Dixit, A. (2018, September). Digital Watermarking Techniques for Content Integrity on E-Learning Systems. In *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)* (pp. 748-753). IEEE.

15. Rashid, A. (2016). Digital watermarking applications and techniques: a brief review. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 5(3), 147-150.
16. Thangadurai, K., & Devi, G. S. (2014, January). An analysis of LSB based image steganography techniques. In *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics* (pp. 1-4). IEEE.
17. Jung, K. H., & Yoo, K. Y. (2015). Steganographic method based on interpolation and LSB substitution of digital images. *Multimedia Tools and Applications*, 74(6), 2143-2155.
18. Rozlomii, I. O., Kosenyuk, H. V. (2017) Sposib formuvannya tsyfrovoho vodianoho znaku dlia elektronnykh dokumentiv na osnovi operatsii matrychnoho kryptohrafichnoho peretvorennia [Method of forming a digital watermark for electronic documents based on operations of matrix cryptographic transformation]. *Visnyk Khelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 4(251), 229–233 [In Ukrainian].
19. Kulyk, S. V., Lyuta, M. V., & Rozlomii, I. O. (2017) Doslidzhennia nanesennia QR-kodu dlia zakhystu hrafichnykh zobrazhen [Studying of the techniques of a QR-code using to protect graphic images]. *Visnyk Khelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 5(253), 244–248 [in Ukrainian].
20. Rozlomii I.O. (2016) Metody obchyslennia klesh-funktsii elektronnoho dokumentu na osnovi matrychnykh kryptohrafichnykh peretvoren [Methods for calculating the hash function of electronic document on the basis of matrix cryptographic transformations]. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 4. 88–94 [in Ukrainian].

**ROZLOMII Inna,**

Ph. D., Senior Lecturer, Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

**YARMILKO Andrii,**

Ph. D., Ass. Prof., Docent, Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

**INTEGRATED ENCRYPTION-STEAGANOGRAPHY PROTECTION OF MULTIMEDIA CONTENT AND DATA IN E-LEARNING SYSTEMS**

**Abstract. Introduction.** *The article focuses on the modern research and the practice of using information security tools in e-learning systems. It has been noted that, in most cases, e-learning systems ensure the confidentiality and addressability of information processes and the security of educational materials when using open communication channels. However, a comprehensive approach to e-learning systems protection needs to be better researched.*

**Purpose.** *Developing a data and multimedia content protection method in e-learning systems using an integrated cryptographic-steganographic approach.*

**Methods.** *Steganography, cryptography.*

**Results.** *The strengthening of data and multimedia content protection in e-learning systems was proposed using an integrated cryptographic-steganographic approach. This method applies the digital watermark construction algorithm based on matrix cryptographic transformation operations. The complex application of two protection methods is aimed at increasing the steganographic stability of the digital watermark embedding algorithm by complicating the task of selecting the bit inversion parameter in the bytes intended for embedding identification features. An additional protective effect is provided by the non-obviousness of the choice of the byte in the file container for embedding a digital watermark and the possibility of their identification only using cryptographic procedures by authorized users. This approach is productive in forming a trust strategy in online materials and remote activities in the educational field. Incorporating the proposed security mechanisms into existing and developing e-learning systems is offered by snippets or plugins adding.*

**Conclusion.** *The practical implementation of software tools according to the developed method should contribute to the increase of trust between the participants of the e-learning system due to the possibility of identifying stolen or compromised ideas and innovations in the content of the educational resources, fixing the status of compromised users among both students and teachers.*

**Keywords:** *e-learning, digital watermark, encryption, steganography, cryptography, copyright protection.*

Одержано редакцією 22.12.2021 р.  
Прийнято до публікації 23.06.2022 р.

УДК 004.652

PACS 07.05.Kf

**КУЦЕНКО Олександр Анатолійович**  
аспірант спеціальності «Прикладна  
математика», Черкаський національний  
університет ім. Б. Хмельницького  
e-mail: alexkutsenko1995@gmail.com  
ORCID 0000-0002-6220-6034

**ПІСКУН Олександр Варфоломійович**  
кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри прикладної математики  
та інформатики, Черкаський національний  
університет ім. Б. Хмельницького  
e-mail: piskun@ukr.net  
ORCID 0000-0001-5334-6337

## МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ ДАНИХ ТА ЇХ ОПТИМІЗАЦІЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ СЕМАНТИЧНОГО АНАЛІЗУ КОНТЕНТУ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ

*У роботі досліджено фундаментальні підходи до організації даних в інформаційних системах та їх застосування для оптимізації семантичного аналізу контенту соціальних мереж. Проаналізовано класичні моделі даних – ієрархічну, мережеву та реляційну, визначено їх переваги та обмеження у контексті обробки великих обсягів текстової інформації. Розглянуто методологію контент-аналізу як інструменту дослідження соціальних комунікацій та семантичний аналіз тексту як етап автоматичного розуміння природної мови. Встановлено взаємозв'язок між вибором моделі організації даних та ефективністю алгоритмів семантичної обробки контенту соціальних мереж.*

**Ключові слова:** моделі даних, організація даних, контент-аналіз, семантичний аналіз тексту, соціальні мережі, оптимізація.

### Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується експоненційним зростанням обсягів цифрової інформації, що циркулює в мережі Інтернет [1]. Особливо інтенсивно цей процес відбувається у соціальних мережах, які стали основним каналом комунікації для мільярдів користувачів. За оцінками дослідників, щодня у соціальних мережах генерується понад 500 мільйонів повідомлень, що створює як нові можливості, так і виклики для аналізу цієї інформації [2].

Ефективна обробка таких масивів даних потребує не лише потужних обчислювальних ресурсів, але й оптимальної організації самих даних. Вибір моделі організації даних безпосередньо впливає на швидкість доступу до інформації, складність алгоритмів обробки та якість кінцевих результатів аналізу [3]. Водночас зростає потреба у автоматизованих системах аналізу контенту, здатних виявляти приховані закономірності, тенденції та смислові зв'язки у великих масивах текстових даних.

Контент-аналіз як метод дослідження зародився у соціології та журналістиці, але з розвитком обчислювальної техніки трансформувався у потужний інструмент автоматичної обробки текстів [4]. Семантичний аналіз, що є складовою контент-аналізу, дозволяє виявляти не лише явний, але й прихований зміст повідомлень, що

особливо важливо для розуміння суспільних настроїв, виявлення тенденцій та прогнозування поведінки користувачів соціальних мереж [5].

**Метою** даного дослідження є аналіз класичних моделей організації даних та визначення їх оптимальності для задач семантичного аналізу контенту соціальних мереж.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки ефективних підходів до обробки великих обсягів неструктурованої текстової інформації у режимі реального часу.

## **Виклад основного матеріалу**

### **1. Моделі організації даних: теоретичні основи**

#### **1.1. Поняття даних в інформаційних системах**

У контексті інформаційних систем дані розуміються як формалізоване представлення інформації, придатне для зберігання, передачі та автоматизованої обробки [6]. На відміну від інформації, яка має семантичне значення для користувача, дані є нейтральною формою представлення фактів, що може піддаватися багаторазовій інтерпретації залежно від контексту використання [7].

Модель даних визначає логічну структуру організації інформації у базі даних, специфікує операції над даними та обмеження цілісності. Історично склалися три класичні моделі організації даних, кожна з яких відображає певний рівень абстракції та підходів до структурування інформації [8]. Ієрархічна модель виникла першою у 1960-х роках, за нею послідували мережева та реляційна моделі. Вибір конкретної моделі залежить від специфіки предметної області, характеру зв'язків між даними та вимог до швидкодії системи.

#### **1.2. Ієрархічна модель даних**

Ієрархічна модель представляє дані у вигляді деревоподібної структури, де кожен елемент має не більше одного батьківського вузла [9]. Така організація природно відображає відносини підпорядкування та успадкування, що робить модель інтуїтивно зрозумілою для користувачів. Основними поняттями ієрархічної моделі є рівень, вузол та зв'язок. Кореневий вузол розташований на найвищому рівні і не має батьківських елементів, тоді як усі інші вузли мають рівно один батьківський вузол і можуть мати довільну кількість дочірніх елементів.

Кожен вузол ієрархічної структури представляє собою сегмент даних, що містить набір атрибутів конкретного об'єкта предметної області. Доступ до даних здійснюється шляхом проходження ієрархічного шляху від кореневого вузла до цільового елемента, що забезпечує передбачувану швидкість операцій читання [10]. Ієрархічна модель характеризується ефективним використанням пам'яті та високою швидкістю завдяки фізичній близькості пов'язаних даних на носії інформації.

Проте ієрархічна модель має суттєві обмеження. По-перше, вона не підходить для представлення складних зв'язків типу "багато-до-багатьох", що часто зустрічаються у реальних задачах [11]. По-друге, будь-яка зміна структури даних вимагає повної перебудови бази даних, що робить систему негнучкою. По-третє, для доступу до даних необхідно знати повний ієрархічний шлях, що ускладнює формування довільних запитів. Ці недоліки обмежують застосування ієрархічної моделі для аналізу контенту соціальних мереж, де зв'язки між об'єктами мають складний та динамічний характер.

### 1.3. Мережева модель даних

Мережева модель виникла як розширення ієрархічної і дозволяє представляти складніші структури даних шляхом допущення множинних батьківських зв'язків [12]. У мережевій моделі дані організовані у вигляді графа, де вузли представляють об'єкти, а ребра відображають зв'язки між ними. Така організація дозволяє природно моделювати відносини типу “багато-до-багатьох” без дублювання інформації.

Основними конструкціями мережевої моделі є запис та набір. Запис являє собою іменовану сукупність атрибутів, що описують деякий об'єкт предметної області. Набір визначає зв'язок типу “один-до-багатьох” між двома типами записів, де один запис виступає власником, а інші є членами набору [13]. Фізична реалізація зв'язків здійснюється за допомогою покажчиків, що забезпечує ефективну навігацію по структурі даних. Важливою особливістю мережевої моделі є можливість переміщення як від власника до членів набору, так і у зворотному напрямку.

Мережева модель забезпечує більшу гнучкість порівняно з ієрархічною, дозволяючи представляти довільні зв'язки між об'єктами. Швидкодія мережевих баз даних залишається високою завдяки прямому доступу через покажчики [14]. Однак складність структури призводить до того, що розробка та супровід мережевих баз даних вимагає високої кваліфікації. Крім того, як і в ієрархічній моделі, для доступу до даних необхідно знати структуру зв'язків, що робить систему менш зручною для кінцевих користувачів. Зміна структури бази даних залишається складною задачею, що обмежує адаптивність системи до змінних вимог.

### 1.4. Реляційна модель даних

Реляційна модель, запропонована Едгаром Коддом у 1970 році, здійснила революцію в організації баз даних завдяки простоті концепції та потужному математичному апарату [15]. У реляційній моделі дані представлені у вигляді таблиць, де рядки відповідають записам, а стовпці атрибутам об'єктів. Така форма представлення інтуїтивно зрозуміла користувачам і не вимагає знання складних ієрархічних чи мережевих структур.

Математичною основою реляційної моделі є теорія множин та реляційна алгебра, що дозволяє формально визначити операції над даними [16]. Кожна таблиця представляє відношення, яке є підмножиною декартового добутку доменів її атрибутів. Основними поняттями моделі є атрибут як іменованій стовпець відношення, кортеж як рядок таблиці, первинний ключ як унікальний ідентифікатор запису, та зовнішній ключ для встановлення зв'язків між таблицями. Реляційна модель вводить строгі обмеження цілісності, зокрема цілісність сутностей та посиальну цілісність, що гарантує коректність даних.

Перевагами реляційної моделі є незалежність даних від прикладних програм, що полегшує модифікацію структури бази без зміни програмного коду [17]. Декларативна мова запитів SQL дозволяє формулювати довільні запити без необхідності специфікації процедури доступу до даних. Реляційна модель забезпечує високий рівень захисту даних та підтримку паралельного доступу багатьох користувачів. Проте реляційні системи поступаються ієрархічним та мережевим за швидкістю операцій читання, що критично для деяких застосувань. Крім того, відображення складних об'єктів з множинними зв'язками може вимагати багатьох таблиць та операцій з'єднання, що знижує ефективність.

## **1.5. Сучасні моделі даних**

Розвиток інформаційних технологій призвів до появи нових моделей даних, орієнтованих на специфічні застосування. Об'єктно-орієнтована модель інтегрує концепції об'єктно-орієнтованого програмування з організацією даних, дозволяючи зберігати складні об'єкти з методами та успадкуванням [18]. Багатовимірні моделі оптимізовані для аналітичної обробки великих масивів агрегованих даних у системах підтримки прийняття рішень. Документно-орієнтовані бази даних, що набули популярності з появою NoSQL руху, зберігають дані у вигляді самоописуваних документів без жорсткої схеми, що забезпечує гнучкість та горизонтальну масштабованість [19].

Для обробки даних соціальних мереж особливий інтерес представляють графові бази даних, які природно моделюють зв'язки між користувачами та контентом [20]. У графовій моделі вузли представляють сутності, а ребра зв'язки між ними, причому як вузли, так і ребра можуть мати довільні атрибути. Такий підхід оптимізує операції обходу графа та пошуку шляхів, що критично для аналізу соціальних структур. Гібридні підходи поєднують переваги різних моделей, використовуючи реляційні бази для структурованих даних та NoSQL рішення для неструктурованого контенту.

## **2. Контент-аналіз як метод дослідження**

### **2.1. Методологічні основи контент-аналізу**

Контент-аналіз визначається як систематичний, об'єктивний та кількісний метод аналізу змісту комунікацій [21]. Виникнувши у соціології для вивчення засобів масової інформації, цей метод згодом знайшов застосування у психології, політології, маркетингу та інших галузях. Сутність контент-аналізу полягає у перетворенні якісної текстової інформації у кількісні показники шляхом виявлення та підрахунку частоти появи певних елементів змісту [22].

Об'єктивність контент-аналізу досягається завдяки чітко визначеним процедурам та критеріям класифікації матеріалу. Дослідник формулює категорії аналізу, що відображають предмет дослідження, та одиниці аналізу, тобто елементи тексту, які підлягають ідентифікації та підрахунку [23]. Систематичність означає, що аналіз охоплює весь досліджуваний матеріал згідно з певними правилами вибірки. Кількісний характер аналізу дозволяє застосовувати статистичні методи обробки результатів та перевіряти гіпотези про зв'язки між характеристиками контенту та іншими змінними.

### **2.2. Етапи проведення контент-аналізу**

Реалізація контент-аналізу передбачає послідовне виконання кількох етапів, кожен з яких має методологічне значення. На першому етапі визначається сукупність джерел інформації згідно з критеріями релевантності дослідженню [24]. Для аналізу соціальних мереж це можуть бути публічні профілі користувачів, групи за інтересами, коментарі до публікацій тощо. Важливо забезпечити репрезентативність вибірки, що може вимагати стратифікації за часовими періодами, географічним розташуванням або демографічними характеристиками авторів.

Другий етап передбачає формування вибіркової сукупності повідомлень, якщо повний аналіз генеральної сукупності неможливий або недоцільний. На третьому етапі виявляються одиниці аналізу, якими можуть бути окремі слова, словосполучення, тематичні блоки або цілі документи залежно від мети дослідження [25]. Четвертий етап

полягає у визначенні одиниць підрахунку, наприклад частоти появи категорії, обсягу тексту, присвяченого темі, або інтенсивності вираження певної оцінки. П'ятий етап безпосередня процедура підрахунку з використанням спеціалізованого програмного забезпечення або експертного кодування. Завершальний шостий етап інтерпретація отриманих результатів у контексті дослідницьких питань та теоретичних рамок.

### **2.3. Застосування контент-аналізу до соціальних мереж**

Соціальні мережі як об'єкт контент-аналізу мають специфічні характеристики, що впливають на методологію дослідження. По-перше, обсяг даних у соціальних мережах набагато перевищує традиційні джерела, що робить ручну обробку практично неможливою та вимагає автоматизації [26]. По-друге, динамічний характер контенту соціальних мереж потребує майже реального часу обробки для виявлення актуальних тенденцій. По-третє, неформальний стиль комунікації, наявність жаргону, емодзі та специфічних скорочень ускладнює автоматичний аналіз.

Сучасні підходи до контент-аналізу соціальних мереж поєднують традиційні методи з технологіями машинного навчання та обробки природної мови [27]. Автоматична класифікація повідомлень за темами, аналіз тональності висловлювань, виявлення впливових користувачів та прогнозування поширення інформації є типовими задачами. Важливою складовою стає візуалізація результатів аналізу у формі графів соціальних зв'язків, хмар тегів, часових діаграм активності тощо. Етичні аспекти аналізу даних соціальних мереж включають питання конфіденційності користувачів та правомірності використання публічно доступної інформації у дослідницьких цілях.

## **3. Семантичний аналіз тексту**

### **3.1. Поняття та рівні семантичного аналізу**

Семантичний аналіз тексту є ключовим компонентом систем розуміння природної мови, спрямованим на виявлення змісту та значення текстових фрагментів [28]. На відміну від синтаксичного аналізу, який встановлює граматичну структуру речення, семантичний аналіз визначає смислові зв'язки між словами та інтерпретує текст у контексті предметної області. Семантика мови включає лексичну семантику, що визначає значення окремих слів, та композиційну семантику, яка пояснює, як значення складних виразів формується з значень їх частин.

У обробці природної мови виділяють кілька рівнів семантичного аналізу залежно від глибини інтерпретації [29]. Поверхневий семантичний аналіз ідентифікує основні семантичні ролі учасників ситуації, описаної у реченні, такі як агент дії, пацієнс, інструмент, місце та час. Глибинний семантичний аналіз будує формальне представлення змісту тексту у вигляді логічних форм або семантичних мереж, що дозволяє здійснювати логічний висновок та перевірку несуперечності. Прагматичний аналіз враховує контекст комунікації та наміри автора тексту, інтерпретуючи іронію, метафори та інші непрямі способи вираження думки.

### **3.2. Методи автоматичного семантичного аналізу**

Автоматичний семантичний аналіз тексту базується на комбінації лінгвістичних знань та статистичних методів обробки даних. Традиційні підходи використовують семантичні словники та онтології, які формалізують знання про предметну область у вигляді концептів та відношень між ними [30]. Відомі ресурси такого типу включають

WordNet для англійської мови, який організує слова у синонімічні ряди та встановлює семантичні відношення між ними. Для морфологічно складних мов, включаючи українську, створення повноцінних семантичних ресурсів залишається актуальною задачею.

Статистичні методи семантичного аналізу базуються на гіпотезі дистрибутивності, згідно з якою слова зі схожими значеннями зустрічаються у схожих контекстах [31]. Векторні представлення слів, отримані за допомогою моделей Word2Vec, GloVe або FastText, кодують семантичну близькість у вигляді косинусної відстані між векторами. Такі представлення дозволяють здійснювати семантичний пошук, кластеризацію текстів за темами та виявлення семантичних аналогій. Нейромережеві моделі на основі трансформерів, зокрема BERT та його варіанти, досягають найвищої якості у задачах семантичного аналізу завдяки здатності враховувати контекст слова у реченні.

### **3.3. Аналіз тональності та виявлення емоцій**

Аналіз тональності є окремим напрямком семантичного аналізу, спрямованим на визначення емоційного забарвлення тексту [32]. У найпростішому випадку тональність класифікується на позитивну, негативну та нейтральну, але існують більш деталізовані шкали, що враховують інтенсивність емоцій. Аналіз тональності широко застосовується у маркетингу для моніторингу відгуків про продукти та бренди, у політичній аналітиці для оцінки суспільних настроїв, та у фінансах для прогнозування коливань ринків на основі новинних потоків.

Методи аналізу тональності поділяються на підходи на основі словників та машинного навчання [33]. Словникові методи використовують заздалегідь підготовлені списки слів з позитивною та негативною конотацією, підраховуючи їх частоту у тексті. Проте такі методи не враховують контекст та граматичні конструкції, що можуть змінювати полярність висловлювання, наприклад заперечення або умовні конструкції. Методи машинного навчання тренуються на розмічених корпусах текстів і здатні виявляти складні патерни вираження тональності. Глибокі нейронні мережі демонструють найкращі результати, особливо у поєднанні з механізмами уваги, що дозволяють фокусуватися на найбільш значущих фрагментах тексту.

## **4. Оптимізація моделей даних для семантичного аналізу**

### **4.1. Вимоги до організації даних**

Ефективність систем семантичного аналізу контенту соціальних мереж критично залежить від способу організації вхідних даних та проміжних результатів обробки. Основними вимогами є швидкість доступу до даних, масштабованість системи при зростанні обсягів інформації, гнучкість схеми даних для адаптації до нових типів контенту та підтримка складних запитів для багатоаспектного аналізу [34]. Класичні реляційні бази даних забезпечують транзакційну цілісність та підтримку SQL запитів, але можуть не справлятися з навантаженням при обробці мільйонів повідомлень у реальному часі.

Для зберігання сирих даних соціальних мереж доцільно використовувати документо-орієнтовані бази даних, які дозволяють зберігати повідомлення у нативному JSON форматі без необхідності визначення жорсткої схеми [35]. Це забезпечує гнучкість при роботі з різномірними даними з різних соціальних платформ, кожна з

яких має специфічну структуру метаданих. Для зберігання результатів семантичного аналізу, таких як виявлені сутності, тональність та теми, може застосовуватися реляційна модель, що полегшує агрегацію та аналітичні запити. Графові бази даних оптимальні для представлення соціального графа та зв'язків між користувачами, темами та контентом.

#### **4.2. Індексування та пошук**

Швидкий пошук за змістом повідомлень є фундаментальною вимогою систем аналізу контенту. Традиційні індекси баз даних на основі В-дерев ефективні для точного пошуку за ключами, але не підходять для повнотекстового пошуку з урахуванням морфології та синонімії [36]. Спеціалізовані пошукові системи, такі як Elasticsearch або Apache Solr, будують інвертовані індекси, що відображають кожне слово на список документів, у яких воно зустрічається, з додатковою інформацією про позицію та частоту.

Для семантичного пошуку застосовуються векторні індекси, що зберігають щільні представлення документів у багатовимірному просторі [37]. Пошук найближчих сусідів у векторному просторі дозволяє знаходити семантично подібні тексти навіть при відсутності спільних ключових слів. Апроксимаційні алгоритми пошуку найближчих сусідів, такі як HNSW або FAISS, забезпечують сублінійну складність запитів при прийнятній точності результатів. Гібридні підходи поєднують лексичний та семантичний пошук, ранжуючи результати з урахуванням обох факторів.

#### **4.3. Паралелізм та розподілена обробка**

Обробка великих обсягів текстових даних вимагає паралелізації обчислень та розподіленої архітектури системи. Фреймворки розподіленої обробки даних, такі як Apache Spark або Apache Flink, дозволяють виконувати семантичний аналіз на кластерах серверів з автоматичним балансуванням навантаження та відмовостійкістю [38]. Дані розбиваються на партиції, кожна з яких обробляється незалежно, після чого результати агрегуються. Така архітектура забезпечує лінійну масштабованість продуктивності при додаванні нових вузлів до кластеру.

Для задач потокової обробки, коли необхідно аналізувати дані у реальному часі по мірі їх надходження зі соціальних мереж, застосовуються системи потокової обробки [39]. Вони підтримують віконні операції для обчислення агрегатів за часовими інтервалами та стейтфул обробку з можливістю накопичення проміжних результатів. Критичним аспектом є забезпечення семантики обробки exactly-once для запобігання дублюванню або втраті повідомлень. Інтеграція потокової та пакетної обробки у lambda-архітектурі дозволяє поєднувати швидкість реагування з точністю результатів.

#### **Висновки**

У роботі проведено систематичний аналіз моделей організації даних та їх застосування для задач семантичного аналізу контенту соціальних мереж. Встановлено, що вибір моделі даних суттєво впливає на ефективність системи та повинен враховувати специфіку предметної області. Класичні ієрархічна та мережева моделі забезпечують високу швидкодію, але недостатньо гнучкі для роботи зі складними та динамічними структурами соціальних даних. Реляційна модель пропонує

універсальність та потужні засоби запитів, але може мати обмеження масштабованості при дуже великих обсягах даних.

Сучасні NoSQL рішення, зокрема документо-орієнтовані та графові бази даних, краще відповідають вимогам обробки контенту соціальних мереж завдяки гнучкості схеми та оптимізації для розподілених систем. Гібридні архітектури, що поєднують різні типи сховищ залежно від характеру даних та операцій, є найбільш перспективним напрямком. Для ефективного семантичного аналізу критичне значення має організація індексів, що забезпечують швидкий пошук як за лексичними, так і за семантичними ознаками.

Контент-аналіз та семантичний аналіз тексту є потужними інструментами вивчення соціальних комунікацій, але їх практичне застосування вимагає значних обчислювальних ресурсів та ретельного проектування архітектури системи. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку спеціалізованих моделей даних, оптимізованих для конкретних задач семантичного аналізу, та на інтеграцію нових методів машинного навчання з традиційними підходами організації даних.

#### Список використаної літератури:

1. Manyika J. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity / J. Manyika, M. Chui, B. Brown // McKinsey Global Institute. – 2011. – 156 p.
2. Стадник А. В. Аналіз великих даних соціальних мереж / А. В. Стадник, О. І. Пеньковський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Інформаційні системи та мережі. – 2016. – № 854. – С. 357–367.
3. Connolly T. Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation and Management / T. Connolly, C. Begg. – 6th ed. – Pearson, 2015. – 1440 p.
4. Neuendorf K. A. The Content Analysis Guidebook / K. A. Neuendorf. – 2nd ed. – SAGE Publications, 2017. – 472 p.
5. Pang B. Opinion mining and sentiment analysis / B. Pang, L. Lee // Foundations and Trends in Information Retrieval. – 2008. – Vol. 2, № 1-2. – P. 1–135.
6. Date C. J. An Introduction to Database Systems / C. J. Date. – 8th ed. – Pearson, 2004. – 1024 p.
7. Elmasri R. Fundamentals of Database Systems / R. Elmasri, S. B. Navathe. – 7th ed. – Pearson, 2016. – 1272 p.
8. Garcia-Molina H. Database Systems: The Complete Book / H. Garcia-Molina, J. D. Ullman, J. Widom. – 2nd ed. – Pearson, 2009. – 1248 p.
9. Tsichritzis D. C. The ANSI/X3/SPARC DBMS Framework / D. C. Tsichritzis, A. Klug // Information Systems. – 1978. – Vol. 3, № 3. – P. 173–191.
10. Silberschatz A. Database System Concepts / A. Silberschatz, H. F. Korth, S. Sudarshan. – 7th ed. – McGraw-Hill, 2020. – 1376 p.
11. Ramakrishnan R. Database Management Systems / R. Ramakrishnan, J. Gehrke. – 3rd ed. – McGraw-Hill, 2003. – 1065 p.
12. Bachman C. W. The programmer as navigator / C. W. Bachman // Communications of the ACM. – 1973. – Vol. 16, № 11. – P. 653–658.
13. Taylor R. W. A comparison of the CODASYL and relational approaches to data-base management / R. W. Taylor, R. L. Frank // Proceedings of the 1976 Conference on Data: Abstraction, Definition and Structure. – ACM, 1976. – P. 52–67.
14. Ozsoyoglu G. A summary of the redesign of the CODASYL sets / G. Ozsoyoglu, H. Wang // Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. – 1993. – P. 503–504.
15. Codd E. F. A relational model of data for large shared data banks / E. F. Codd // Communications of the ACM. – 1970. – Vol. 13, № 6. – P. 377–387.
16. Maier D. The Theory of Relational Databases / D. Maier. – Computer Science Press, 1983. – 637 p.
17. Stonebraker M. The design of POSTGRES / M. Stonebraker, L. A. Rowe // Proceedings of the 1986 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. – 1986. – P. 340–355.
18. Atkinson M. The object-oriented database system manifesto / M. Atkinson, F. Bancilhon, D. DeWitt // Proceedings of the First International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases. – 1989. – P. 223–240.

19. Cattell R. Scalable SQL and NoSQL data stores / R. Cattell // ACM SIGMOD Record. – 2011. – Vol. 39, № 4. – P. 12–27.
20. Robinson I. Graph Databases: New Opportunities for Connected Data / I. Robinson, J. Webber, E. Eifrem. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2015. – 238 p.
21. Krippendorff K. Content Analysis: An Introduction to Its Methodology / K. Krippendorff. – 4th ed. – SAGE Publications, 2019. – 472 p.
22. Berelson B. Content Analysis in Communication Research / B. Berelson. – Free Press, 1952. – 220 p.
23. Holsti O. R. Content Analysis for the Social Sciences and Humanities / O. R. Holsti. – Addison-Wesley, 1969. – 235 p.
24. Riffe D. Analyzing Media Messages: Using Quantitative Content Analysis in Research / D. Riffe, S. Lacy, F. Fico. – 3rd ed. – Routledge, 2014. – 280 p.
25. Манаєв О. Т. Контент-аналіз матеріалів засобів масової інформації / О. Т. Манаєв. – К.: Центр вільної преси, 1998. – 200 с.
26. Stieglitz S. Social media analytics / S. Stieglitz, M. Dang-Xuan, A. Bruns // Business & Information Systems Engineering. – 2014. – Vol. 6, № 2. – P. 89–96.
27. Nguyen T. H. Social media analytics for enterprises / T. H. Nguyen, K. Shirai, J. Velcin // ACM Computing Surveys. – 2015. – Vol. 48, № 1. – P. 1–37.
28. Jurafsky D. Speech and Language Processing / D. Jurafsky, J. H. Martin. – 3rd ed. – Pearson, 2021. – 600 p.
29. Allen J. Natural Language Understanding / J. Allen. – 2nd ed. – Benjamin Cummings, 1995. – 654 p.
30. Navigli R. Word sense disambiguation: A survey / R. Navigli // ACM Computing Surveys. – 2009. – Vol. 41, № 2. – P. 1–69.
31. Turney P. D. From frequency to meaning: Vector space models of semantics / P. D. Turney, P. Pantel // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2010. – Vol. 37. – P. 141–188.
32. Liu B. Sentiment Analysis: Mining Opinions, Sentiments, and Emotions / B. Liu. – 2nd ed. – Cambridge University Press, 2020. – 492 p.
33. Mohammad S. M. Sentiment analysis: Detecting valence, emotions, and other affectual states from text / S. M. Mohammad // Emotion Measurement. – Elsevier, 2016. – P. 201–237.
34. Stonebraker M. What goes around comes around / M. Stonebraker, J. M. Hellerstein // Readings in Database Systems. – 4th ed. – MIT Press, 2005. – P. 2–41.
35. Strauch C. NoSQL Databases / C. Strauch, U. L. S. Sites, W. Kriha. – Stuttgart Media University, 2011. – 149 p.
36. Zobel J. Inverted files for text search engines / J. Zobel, A. Moffat // ACM Computing Surveys. – 2006. – Vol. 38, № 2. – P. 1–56.
37. Johnson J. Billion-scale similarity search with GPUs / J. Johnson, M. Douze, H. Jégou // IEEE Transactions on Big Data. – 2021. – Vol. 7, № 3. – P. 535–547.
38. Zaharia M. Apache Spark: A unified engine for big data processing / M. Zaharia, R. S. Xin, P. Wendell // Communications of the ACM. – 2016. – Vol. 59, № 11. – P. 56–65.
39. Carbone P. Apache Flink: Stream and batch processing in a single engine / P. Carbone, A. Katsifodimos, S. Ewen // Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering. – 2015. – Vol. 38, № 4. – P. 28–38.

#### References:

1. Manyika J., Chui M., Brown B. (2011). Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. McKinsey Global Institute.
2. Stadnyk A. V., Penkovskiy O. I. (2016). Analysis of big data in social networks. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Information Systems and Networks*, 854, 357–367 [in Ukrainian].
3. Connolly T., Begg C. (2015), Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation and Management, 6th ed. Pearson.
4. Neuendorf K. A. (2017). The Content Analysis Guidebook, 2nd ed. AGE Publications.
5. Pang B., Lee L. (2008) Opinion mining and sentiment analysis. *Foundations and Trends in Information Retrieval*, 2, 1–135.
6. Date C. J. (2004). An Introduction to Database Systems, 8th ed. Pearson.
7. Elmasri R., Navathe S. B. (2016). Fundamentals of Database Systems, 7th ed. Pearson.
8. Garcia-Molina H., Garcia-Molina H., Ullman J. D., Widom J. (2009). Database Systems: The Complete Book, 2nd ed. Pearson.
9. Tsichritzis D. C., Klug A. (1978). The ANSI/X3/SPARC DBMS Framework. *Information Systems*, 3(3), 173–191.
10. Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. (2020). Database System Concepts, 7th ed. McGraw-Hill.

11. Ramakrishnan R., Gehrke J. (2003). Database Management Systems, 3rd ed. McGraw-Hill.
12. Bachman C. W. (1973). The programmer as navigator. *Communications of the ACM*, 16, 11, 653–658.
13. Taylor R. W., Frank R. L. (1976) A comparison of the CODASYL and relational approaches to data-base management. *Proceedings of the 1976 Conference on Data: Abstraction, Definition and Structure*, ACM, 52–67.
14. Ozsoyoglu G., Wang H. (1993). A summary of the redesign of the CODASYL sets. *Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 503–504.
15. Codd E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13(6), 377–387.
16. Maier D. (1983). The Theory of Relational Databases. Computer Science Press.
17. Stonebraker M., Rowe L. A. (1986). The design of POSTGRES. *Proceedings of the 1986 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 340–355.
18. Atkinson M., Bancilhon F., De Witt. (1989). The object-oriented database system manifesto. *Proceedings of the First International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases*, 223–240.
19. Cattell R. (2011). Scalable SQL and NoSQL data stores. *ACM SIGMOD Record*, 39(4), 12–27.
20. Robinson I., Webber J., Eifrem E. (2015) Graph Databases: New Opportunities for Connected Data, 2nd ed. O'Reilly Media.
21. Krippendorff K. (2019) Content Analysis: An Introduction to Its Methodology, 4th ed. SAGE Publications.
22. Berelson B. (1952). Content Analysis in Communication Research. Free Press.
23. Holsti O. R. (1969). Content Analysis for the Social Sciences and Humanities. Addison-Wesley.
24. Riffe D., Lacy S., Fico F. (2014). Analyzing Media Messages: Using Quantitative Content Analysis in Research, 3rd ed. Routledge.
25. Manaiev O. T. (1998). Content Analysis of Mass Media Materials. Kyiv: Free Press Center. [in Ukrainian].
26. Stieglitz S., Dang-Xuan M., Bruns A. (2014). Social media analytics. *Business & Information Systems Engineering*, 6(2), 89–96.
27. Nguyen T. H., Shirai K., Velcin J. (2015). Social media analytics for enterprises. *ACM Computing Surveys*, 48(1), 1–37.
28. Jurafsky D., Martin J. H. (2021). Speech and Language Processing, 3rd ed. Pearson.
29. Allen J. (1995). Natural Language Understanding, 2nd ed. Benjamin Cummings.
30. Navigli R. (2009). Word sense disambiguation: A survey. *ACM Computing Surveys*, 41(2), 1–69.
31. Turney P. D. Pantel P. (2010). From frequency to meaning: Vector space models of semantics. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 37, 141–188.
32. Liu B. (2020). Sentiment Analysis: Mining Opinions, Sentiments, and Emotions, 2nd ed. Cambridge University Press
33. Mohammad S. M. (2016). Sentiment analysis: Detecting valence, emotions, and other affectual states from text. *Emotion Measurement*. Elsevier, 201–237.
34. Stonebraker M., Hellerstein J. M. (2005). What goes around comes around. *Readings in Database Systems*, 4th ed. MIT Press, 2–41.
35. Strauch C., Sites U. L. S., Kriha W. (2011). NoSQL Databases. Stuttgart Media University.
36. Zobel J. Inverted files for text search engines / J. Zobel, A. Moffat // *ACM Computing Surveys*. – 2006. – Vol. 38, № 2. – P. 1–56.
37. Johnson J., Douze M., Jégou H. (2021). Billion-scale similarity search with GPUs. *IEEE Transactions on Big Data*, 7(3), 535–547.
38. Zaharia M., Xin R. S., Wendell P. (2016). Apache Spark: A unified engine for big data processing. *Communications of the ACM*, 59(11), 56–65.
39. Carbone P., Katsifodimos A., Ewen S. (2015). Apache Flink: Stream and batch processing in a single engine. *Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering*, 38(4), 28–38.

**KUTSENKO Oleksandr,**

Postgraduate, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**PISKUN Oleksandr,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Applied Mathematics and Informatics, Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

**DATA ORGANIZATION MODELS AND THEIR OPTIMIZATION FOR SEMANTIC ANALYSIS OF SOCIAL MEDIA CONTENT**

**Abstract. Introduction.** This paper investigates fundamental approaches to data organization in information systems and their application for optimizing semantic analysis of social media content. Classical data models – hierarchical, network, and relational – are analyzed, and their advantages and limitations in the context of processing large volumes of textual information are identified. The methodology of content analysis as a tool for studying social communications and semantic text analysis as a stage of automatic natural language understanding are examined. The relationship between the choice of data organization model and the efficiency of semantic processing algorithms for social media content is established.

The exponential growth of digital information, particularly in social networks, creates both new opportunities and challenges for data analysis. Effective processing of such data arrays requires not only powerful computing resources but also optimal data organization. The choice of data organization model directly affects the speed of information access, the complexity of processing algorithms, and the quality of final analysis results. Meanwhile, there is a growing need for automated content analysis systems capable of identifying hidden patterns, trends, and semantic connections in large arrays of textual data.

Content analysis as a research method originated in sociology and journalism but has transformed into a powerful tool for automatic text processing with the development of computing technology. Semantic analysis, which is a component of content analysis, allows identifying not only explicit but also hidden content of messages, which is especially important for understanding public sentiments, identifying trends, and predicting user behavior in social networks.

**Purpose.** The aim of this article is to analyze classical data organization models and determine their optimality for the tasks of semantic analysis of social network content.

**Results.** The hierarchical model represents data in a tree-like structure with strict subordination relationships but has limited flexibility for representing complex many-to-many connections. The network model extends the hierarchical approach by allowing multiple parent relationships but increases system complexity. The relational model, based on set theory and relational algebra, provides data independence and declarative query language but may have performance limitations for certain operations.

Modern data models, including document-oriented and graph databases, better meet the requirements of social media content processing due to schema flexibility and optimization for distributed systems. Hybrid architectures combining different types of storage depending on data nature and operations are identified as the most promising direction. For effective semantic analysis, the organization of indexes that provide fast search by both lexical and semantic features is critically important.

**Conclusion.** The paper examines content analysis stages including source selection, sampling, unit of analysis identification, and results interpretation. Semantic analysis methods are reviewed, including sentiment analysis, entity recognition, and topic modeling. The relationship between data organization model choice and semantic analysis algorithm efficiency is established. Recommendations for optimizing data structures for processing large volumes of social media content are provided.

The research demonstrates that no single data model is universally optimal for all aspects of social media content analysis. Document-oriented databases are suitable for storing raw heterogeneous data, relational databases for storing structured analysis results, and graph databases for representing social connections. Distributed processing and stream processing technologies are essential for real-time analysis of large-scale social media data.

**Keywords:** data models, data organization, content analysis, semantic text analysis, social networks, optimization, hierarchical model, network model, relational model, NoSQL databases.

*Одержано редакцією 28.10.2022 р.  
Прийнято до публікації 17.11.2022 р.*

УДК 519.688

PACS 02.60.-x, 02.60.Pn

**ІГНАТЕНКО Ігор Олександрович**  
Студент Черкаського національного  
університету ім. Б. Хмельницького  
e-mail: igitn@gmail.com

**СЕРДЮК Олександр Анатолійович,**  
кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри прикладної математики та  
інформатики Черкаського національного  
університету імені Богдана Хмельницького  
e-mail: serdyuk@ukr.net  
ORCID 0000-0002-3919-4661

**ДІДКОВСЬКИЙ Руслан Михайлович,**  
доктор технічних наук, доцент, доцент  
кафедри прикладної математики та  
інформатики Черкаського національного  
університету імені Богдана  
Хмельницького  
e-mail: didkovskyirm@vu.cdu.edu.ua  
ORCID 0000-0002-5166-7564

## РОЗРОБКА ОСВІТНЬОГО ПОРТАЛУ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ, НАПИСАНИХ СТУДЕНТАМИ

*У роботі розглянуто методи та засоби створення повноцінного вебсайту з базою даних, клієнтською та серверною частиною. Наразі онлайн навчання широко використовується в навчальних закладах та у сфері ІТ. Coursera, EDX, Udemy, Udacity є провідними ресурсами онлайн навчання у світі. Варто також згадати український проект масових відкритих онлайн курсів Prometheus та освітню платформу Stepik, які є дуже популярними в Україні. На даних платформах використовують різні засоби перевірки домашнього завдання. Для контролю теоретичних знань застосовують традиційні методи, переважно тестові задачі. Якщо це стосується коду, то перевірка, а саме реалізація цього процесу є складним, ресурсомістким процесом та водночас цікавим.*

*Метою роботи є створення вебсервісу для розміщення та перевірки практичних завдань, а саме завдань, де потрібно реалізувати певну програму. Також метою мого проекту є розробка алгоритму перевірки коду, який буде реалізовано шляхом прогону деяких вхідних даних та порівняння їх з попередньо заданими вихідними даними.*

*Отримане програмне забезпечення може бути використане будь-де, тому що створене воно у вигляді програмного пакета, який можна з легкістю розгорнути на сервері чи персональній машині. Безпосередньо програма може бути використана для перевірки робіт студентів в мого навчальному закладі.*

**Ключові слова:** веб додаток, мова розмітки сайтів html, стилі css, фреймворк flask, мова програмування python, база даних.

### Вступ

Що, взагалі таке тестування? Тестування - це дослідження, призначений для виявлення інформації про якість роботи продукту відносно контексту, в якому він має використовуватись. Техніка тестування також включає як процес пошуку помилок або інших дефектів, так і випробування програмних складових з метою оцінки. [1]

Моя задача полягає в тому, щоб написати додаток, що буде перевіряти невеликі програми на правильність їх роботи. Що полягає під словом “правильність”? В моєму випадку, це позитивне проходження тестів та коректне завершення роботи програми. Сам тест реалізує прогін деяких вхідних даних через програму, та порівняння вихідних даних з попередньо підготовленими правильними вихідними даними.

Реалізувати у вигляді графічного інтерфейсу чи вебсайту? На мою думку, краще використати другий варіант. Ось декілька причин чому:

- легкий доступ до вебдодатку. В цьому випадку користувачу потрібен лише комп'ютер з браузером і з'єднання з інтернетом;
- оновлення додатку. Для того, щоб оновити вебдодаток, його необхідно оновити його тільки на сервері та всі користувачі відразу можуть працювати з новою версією;
- вебдодатки більш універсальні та практичні для кінцевого користувача. Вам достатньо буде встановити вебдодаток на сервер, що працює під будь-якою сучасної ОС, і ви зможете користуватися ним через інтернет на будь-якому комп'ютері або мобільному пристрої;

Дивлячись на ринок, можна сказати, що вебдодатки давно обігнали звичайні графічні програми. Вони легші в розробці, розгортанні на сервері, вони гнучкіші, та більш доступні. Тому я не бачу сенсу в GUI, принаймні при реалізації мого програмного забезпечення.

### **Стек технологій**

Перше що потрібно обрати для створення будь-якого додатку, це мова програмування. Я зупинився на Python 3.8, тому що вона має досить цікаві фреймворки для створення веб сервісів, які варто дослідити. Основні характеристики:

- інтерпретована мова програмування високого рівня;
- динамічна типізація;
- лаконічний синтаксис;
- мобільність програм;
- популярність, і як наслідок - велика спільнота розробників.

Недоліки:

- низька швидкодія, що характерно для всіх інтерпретованих мов;
- відсутність статичної типізації, що також уповільнює роботу програм.

Наступним завданням є обрання фреймворку для створення серверної частини. Існує два найпопулярніших кандидати: Flask та Django. Перший - легкий і гнучкий фреймворк, в якому не встановлено нічого зайвого. Це дозволяє вибирати модулі для вирішення конкретних завдань і встановлювати їх за потреби. Django - надає пакет «все включено»: у вас є панель адміністратора, інтерфейси баз даних, ORM, і структура каталогів для ваших додатків і проектів.

Flask частіше використовують коли потрібно більше контролю над компонентами додатку, або створення чогось нетипового. Django, якщо вас цікавить кінцевий продукт. Особливо якщо потрібно працювати з прямолінійним додатком, таким як сайт з новинами, онлайн магазин чи блог. [2] Тому я зупинився на першому варіанті - Flask.

Надалі при безпосередній розробці програмного продукту знадобляться ще декілька модулів та бібліотек для реалізації необхідних можливостей додатку. Серед яких:

- wtforms - для реалізації функціонування вебформ;
- subprocess - для запуску зовнішніх програм;
- flask\_sqlalchemy - для роботи з базою даних;

- flask\_admin - для управління базою даних;
- flask\_bootstrap - для інтеграції з Bootstrap4;
- os, shutil - модулі для системних команд та налаштувань.

Для розробки клієнтської частини програми використаю мову розмітки HTML 5 та мову таблицю стилів CSS, та набір інструментів Bootstrap4, що містить HTML і CSS-шаблони оформлення для типографій, вебформ, кнопок, міток, блоків навігації та інших компонентів вебінтерфейсу, включаючи JavaScript-розширення.

При створенні розмітки буду використовувати шаблонизатор Jinja2. Це рушій шаблонів для мови програмування Python створений Арміном Ронакером з ліцензією BSD. На відміну від схожого рушія шаблонів у Django, Jinja використовує вирази у стилі мови Python, тому процес розмітки документу стає подібним до написання звичайного коду.

### Засоби реалізації

Для розгортання та створення проекту я використаю нову розробку Microsoft - WSL. Windows Subsystem for Linux - це прошарок між ядром Windows і додатками для Linux, який дозволяє перетворювати системні виклики до ядра Linux в виклики до ядра Windows. [3] Завдяки тому, що віртуалізація практично відсутня, таке рішення працює швидше традиційної віртуалізації, де повністю емулюється комп'ютер, як це відбувається в Oracle VirtualBox і VMWare Player.

Для розробника WSL - це зручне середовище розробки. Все ж встановлення багатьох мов, компіляторів та інтерпретаторів, утиліт в Linux відбувається куди простіше.

Також при створенні я буду використовувати VS Code - зручний редактор коду з безліч розширеннями, Git система контролю версій, та Github для збереження мого додатку.

Свою програму буду писати у вигляді пакету. Це дозволяє надалі спрости запуск програми, її повторне використання, та розгортання на сервері. Файл з розширенням '.py' - це модуль. В ньому можна створити в ньому класи, функції та змінні. Якщо в директорію покласти кілька модулів і створити файл '\_\_init\_\_.py', створиться пакет з ім'ям даної директорії.

В наступних розділах я повністю опишу процес реалізації цього додатку та протестую його на певних даних.

### Макет проекту

Файлова ієрархія проекту буде виглядати наступним чином (рис. 1).

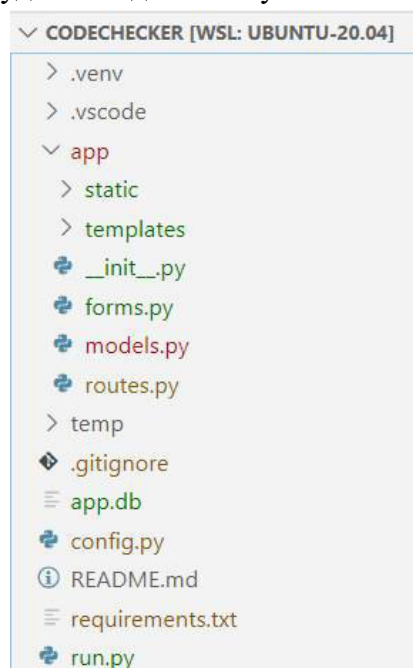


Рис. 1

- CodeChecker/ - основна директорія додатку
- .venv/ - директорія в якій знаходяться файли віртуального середовища Python.
- app/ - безпосередньо пакет нашого додатку
- static/ - директорія для статичних файлів, зокрема файлів стилю css
- templates/ - директорія для файлів розмітки html
- temp/ - директорія тимчасових файлів
- app.db - база даних
- config.py – код налаштувань
- run.py – програма запуску сервісу

### Створення та стилізація вебсторінки

Наступним кроком є створення HTML сторінок та їх CSS оформлення за допомогою BootStrap4. Створю в теці templates/ 4 файли:

- base.html - базовий шаблон, що містить заголовок, навігацію, та так званий “підвал” сайту;
- main.html – головна сторінка, що містить список задач. Наслідується від сторінки base за допомогою можливостей Jinja;
- result.html - сторінка, на яку будуть передаватися результати тестування;
- task.html – сторінка з формою для вводу розв'язання певної задачі.

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="utf-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-
scale=1, shrink-to-fit=no">
  <link rel="shortcut icon" href="../static/code.ico">
  {{ bootstrap.load_css() }}
  <title>CodeChecker</title>
</head>
```

В лістингу вище наведено “голову” сторінки base.html, де вказано основну інформацію: версія HTML, кодування, розташування файлу стилів, титулка.

```
<body>
  <div class="container">
    <header>
      <nav class="navbar navbar-default navbar-dark bg-
primary rounded mt-3 mb-3">
        <div>
          <a class="navbar-
brand" href="{{ url_for('mainPage') }}">
            
            <strong class="text-light align-
middle">Cody</strong>
          </a>
        </div>
        <div>
          <a class="text-
light" href="https://github.com/Ihoriam">Github</a>
```

```

</div>

</nav>
</header>
{% block content %}
{% endblock %}

```

В цій частині HTML розмітки файлу base.html наведена одна з цікавих можливостей Jinja - наслідування. `{% block content %}{% endblock %}`

Я використав оператор управління блоком, щоб визначити місце, де можна ставити похідні шаблони. Блокам присвоюється унікальне ім'я, на яке похідні шаблони можуть посилатися.

Тепер я можу написати main.html, наслідуючи його від base.html, що є хорошою практикою в програмуванні.

```

{% extends "base.html" %}
{% block content %}
<main role="main">
  <section class="jumbotron text-center mb-3">
    <div class="container">
      <h1 class="jumbotron-heading">Вітаю!</h1>
      <p class="lead text-
muted">Ви піймались! Даний сервіс створено для перевірки Вашого
домашнього завдання з програмування!</p>
      <p class="text-black-
50">Тепер не вийде аби як скинути пусту папку з домашкою на пошт
у!</p>
      <p>
        <a href="#" class="btn btn-primary my-2">До роботи</a>
      </p>
    </div>
  </section>
  ...
{% endblock %}

```

Цікавість цього коду полягає в використанні готових html класів, реалізованих в наборі інструментів Bootstrap4. [4] Це дозволяє економити час на створення CSS стилів власноруч.

Далі я створи ще два html документа task.html та result.html. Шаблони також підтримують керуючі оператори, їх задають в `{% ...%}`. [2] В даному сценарії я використав оператор умовного блока `{% if flag %}`.

```

<div class="row bg mt-3 mb-3 rounded">
  <div class="col text-center">
    {% if flag %}
      <h3 class="text-success">Успішно виконано</h3>
    {% else %}
      <h3 class="text-danger">Ой, десь помилка</h3>
    {% endif %}
  </div>
</div>

```

Ось так виглядає основна сторінка сайту (рис. 2).

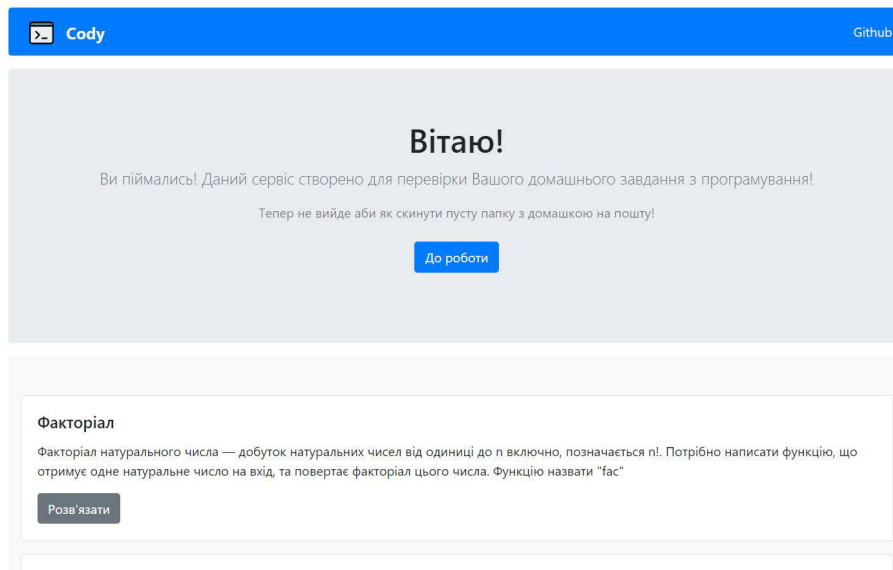


Рис. 2

### Ініціалізація пакету

В директорії `app` розміщений файл з іменем `__init__.py`, в якому записано наступний код:

```
from flask import Flask
from config import Config
from flask_sqlalchemy import SQLAlchemy
from flask_admin import Admin
from flask_bootstrap import Bootstrap
app = Flask(__name__)
app.config.from_object(Config)
bootstrap = Bootstrap(app)
db = SQLAlchemy(app)
admin = Admin(app, name='cody', template_mode='bootstrap3')
from app import routes, models
app.run(debug=True)
```

Сценарій вище імпортує основні модулі для функціонування додатку. Серед яких модулі для роботи з базою даних, з формами та безпосередньо модуль Flask. А також створює екземпляр класу Flask.

### Реалізація вебформ

Щоб отримувати певні дані від користувача, на сторінках використовують форми, а саме тег `<form>`. Щоб зв'язати HTML форму та Python код, я використаю розширення `flask-wtf`, яке я встановив раніше.

Створю в директорії `checky/` файл з назвою `forms.py`:

```
from flask_wtf import FlaskForm
from wtforms import TextAreaField, SubmitField, SelectField
from flask_codemirror.fields import CodeMirrorField
from wtforms.validators import DataRequired
class CheckerForm(FlaskForm):
    codeField = TextAreaField("Ваш код", render_kw={"rows": 15,
"cols": 10}, validators=[DataRequired()])
```

```

selectLang = SelectField('', choices=[('gcc', 'C'), ('g++',
'C++'), ('py', 'Python'),
('java', 'Java'), ('js', 'JavaScript')])
submit = SubmitField('Перевірити')

```

В перших рядках я імпортую клас FlaskForm, та декілька функцій. Далі створюю екземпляр класу, в полях якого ініціалізую змінні, як один з типів форм. В моєму випадку це TextAreaField, тобто текстове поле, в яке користувач буде вводити дані (рис. 3).

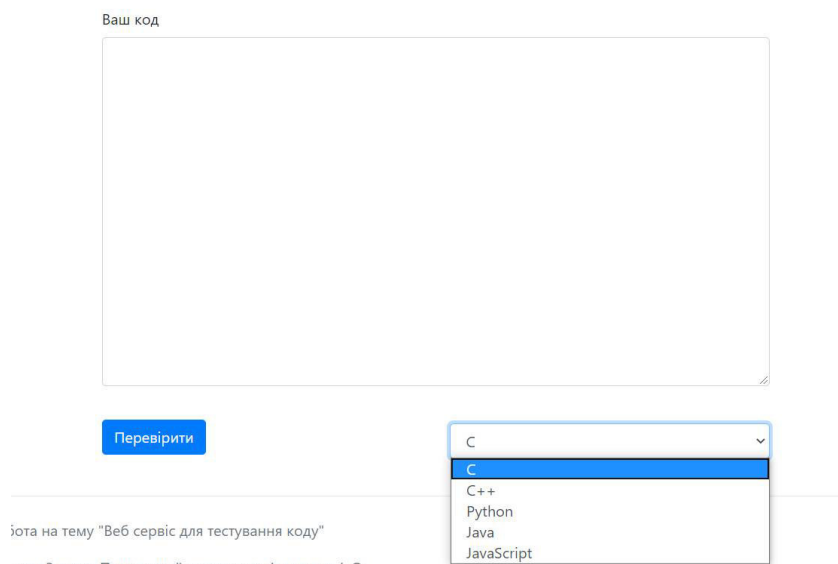


Рис. 3

Для роботи розширення flask-wtf необхідно задати секретний ключ. Для цього створюю файл з налаштуваннями в теці CodeChecker/ :

```

import os
class Config(object):
SECRET_KEY = os.environ.get('SECRET_KEY') or 'you-will-never-
guess

```

Flask і деякі його розширення використовують значення SECRET\_KEY як криптографічний ключ для генерації підписів або токенів. Розширення Flask-WTF використовує його для захисту форм від вебатаки під назвою Cross-Site Request Forgery або CSRF (вимовляється як «seasurf»). [2]

#### База даних

Для повноцінного функціонування сайту необхідна база даних, де будуть зберігатися задачі, частини коду, тести, та ще певна інформація. Для цього створюю скрипт models.py.

```

from app import db
from app import admin
from flask_admin.contrib.sqla import ModelView

class Code (db.Model):
    id = db.Column(db.Integer(), primary_key=True)
    id_task = db.Column(db.Integer(), db.ForeignKey('task.id'))

```

```

    id_lang = db.Column(db.Integer(), db.ForeignKey('language.id
    '))
    pre_code = db.Column(db.Text())
    main_code = db.Column(db.Text(), nullable=False)
    post_code = db.Column(db.Text())
    tests = db.relationship('Test', backref='code', lazy=True)

```

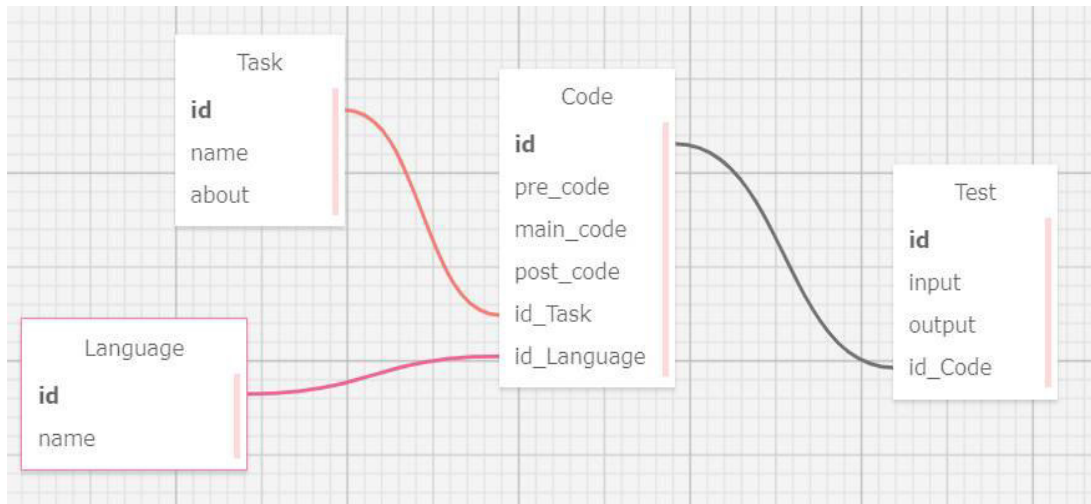


Рис. 4

В даній частині коду наведеної вище реалізована одна з таблиць бази даних. На малюнку вище продемонстрована діаграма всієї бази даних (рис. 4).

#### Алгоритм перевірки

В цьому розділі я буду працювати з файлом routes.py. Це основний скрипт мого вебдодатку, що містить в собі логіку URL сторінок, та алгоритм тестування коду, введеного користувачем. Алгоритм працює на таких мовах як Python, C, C++, Java та JavaScript. Нижче я наведу алгоритм перевірки для мови Python, для інших мов він схожий.

```

@app.route('/task/<int:id_task>', methods=['GET', 'POST'])
def taskPage(id_task):
    form = CheckerForm()
    task = Task.query.filter_by(id = id_task).first()
    if request.method == 'POST' and form.validate_on_submit():
        # print(form.selectLang.data)
        if form.selectLang.data == 'py':
            code = Code.query.filter_by(id_task=id_task, id_lang
            =3).first()
            tests = Test.query.filter_by(id_code=code.id).all()
            num_tests = len(tests)
            count = 0
            with open("temp/py/sub.py", "w") as sub:
                sub.writelines([code.pre_code, '\n', form.codeFi
                eld.data, '\n', code.post_code])
                for test in tests:
                    # print(test.input_data)
                    process = subprocess.run(['python3', 'temp/py/su
                    b.py', *test.input_data.split()],
                    check=False,
                    capture_output=True,
                    universal_newlines=True)

```

```
        if (process.stdout) and process.stdout.strip() =  
= test.output_data.strip():  
            count += 1  
            # print(count)  
        else:  
            break
```

- 1) програма отримує з бази даних інформацію та тести на конкретно вибрану задачу;
- 2) оброблює форму з кодом, що заповнив користувач;
- 3) в циклі, програма проганяє тести через `subprocess.run()` [5], що запускає на фоні програму користувача з різними вхідними даними;
- 4) потім додаток отримує вихідні дані та звіряє їх з правильними.

```
if 'post_process' in locals():  
    error = post_process.stderr  
else:  
    error = process.stderr  
  
if count == num_tests:  
    flag_valid=True  
else:  
    flag_valid=False  
  
return render_template('result.html',  
                        code=form.codeField.data,  
                        propose_code = code.main_code,  
                        error=error,  
                        flag=flag_valid,  
                        count=count,  
                        num_tests=num_tests  
                        )
```

Далі програма перевіряє кількість коректно пройдених тестів, та використовує функцію `render_template`, що генерує сторінку `result.html` та передає дані до неї.

#### **Адміністрування даних**

В проекті також створена сторінка адміністратора за допомогою додатку `flask-admin`. В ній реалізовані 4 базові функції управління даними «створення, зчитування, зміна і видалення» CRUD [6] (рис. 5).

<input type="checkbox"/>		id	Name	About
<input type="checkbox"/>		1	Факторіал	Факторіал натурального числа – добуток натуральних чисел від одиниці до n включно, позначається n!. Потрібно написати функцію, що отримує одне натуральне число на вхід, та повертає факторіал цього числа. Функцію назвати "fac"
<input type="checkbox"/>		2	Два списки	Дано два списки "a" і "b". Наприклад: a = [1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89] b = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] Напишіть функцію "same_list", що приймає два списки, та повертає список спільних елементів.
<input type="checkbox"/>		3	Паліндром	Написати функцію "is_pal" яка отримує строку як аргумент функції, та перевіряє чи є вона паліндромом. Якщо так, повертає число 1, якщо ні - число 0.

Рис. 5

### Висновок

В результаті завершення цього комплексного проекту, я використав такі технології як: мова Python 3.8, фреймворк Flask, форми, база даних, wsl, шаблонизатор Jinja2, мову розмітки HTML, таблицю стилів CSS, Bootstrap4 та ще декілька модулів Python.

Поєднавши цей стек технологій, я створив цікавий додаток, з серверною та клієнтською частиною. Також я покращив свої навички в роботі з базою даних та у використанні командного терміналу Linux.

На мою думку, проект цікавий як з теоретичної, так і з практичної точки зору. В майбутньому його можна використати, як основу чи як мікросервіс для більш масштабного проекту. Наприклад – для нашого кафедрального сайту, де студенти можуть дистанційно опрацювати матеріал. Можу сказати, що вже маю декілька ідей для його вдосконалення:

- особистий кабінет;
- підсвітка синтаксису;
- більше мов для проходження завдань;
- підвищення швидкодії за допомогою паралельного програмування;
- більш детальна система сповіщення про помилки.

### Список використаної літератури:

1. Криспін Л., Грегори Д. / Гибкое тестирование. Практическое руководство для тестировщиков ПО и гибких команд - М.: Вильямс, 2010. - 464 с.
2. Miguel Grinberg / Flask Web Development: Developing Web Applications with Python 2nd Edition - Publisher(s): O'Reilly Media, Inc.
3. Microsoft blog [Електронний ресурс] // Learn About Windows Console & Windows Subsystem For Linux (WSL) - Режим доступу: <https://devblogs.microsoft.com/commandline/learn-about-windows-console-and-windows-subsystem-for-linux-wsl/>
4. w3schools.com // Bootstrap 4 Tutorial - Режим доступу: <https://www.w3schools.com/bootstrap4/>
5. Python 3 documentation // subprocess - Subprocess management - Режим доступу: <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>
6. Осипов Д. Л. / Технологии проектирования баз данных. - М.: ДМК Пресс, 2019. – 498 с.

### References:

1. Crispin L., Gregory D. / Flexible testing. A practical guide for software testers and flexible teams - M.: Williams, 2010. - 464 p.
2. Miguel Grinberg / Flask Web Development: Developing Web Applications with Python 2nd Edition - Publisher(s): O'Reilly Media, Inc.

3. Microsoft blog [Електронний ресурс] // Learn About Windows Console & Windows Subsystem For Linux (WSL) - Access mode: <https://devblogs.microsoft.com/commandline/learn-about-windows-console-and-windows-subsystem-for-linux-wsl/>
4. w3schools.com // Bootstrap 4 Tutorial - Access mode: <https://www.w3schools.com/bootstrap4/>
5. Python 3 documentation // subprocess - Subprocess management - Access mode: <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>
6. Osipov DL / Database design technologies. - М.: DMK Press, 2019. - 498 p.

**IHNATENKO Ihor,**

Student, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**SERDIUK Oleksandr,**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**DIDKOWSKY Ruslan,**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Informatics and Applied Mathematics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine

**DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL PORTAL FOR VERIFICATION OF COMPUTER PROGRAMS WRITTEN BY STUDENTS**

The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, student

**Summary. Introduction.** Currently, online learning is widely used in schools and in the field of IT. Coursera, EDX, Udemy, Udacity are the world's leading online learning resources. It is also worth mentioning the Ukrainian project of mass open online courses Prometheus and the educational platform Stepik, which are very popular in Ukraine. These platforms use various way to check homework. Traditional methods are used to control theoretical knowledge. But when we need to verify code, this process becomes complex, resource-intensive and at the same time interesting to solve.

**Purpose.** The purpose of the course work is to create a web service for posting and testing practical tasks, namely tasks where you want to implement a program. Also, the goal of my project is to develop a method of verifying the code, which will be implemented by running some input data and comparing them with predefined output data.

**Results.** The resulting software can be used anywhere, because it is created in the form of a software package that can be easily deployed on a server or personal machine. The program can be used directly to check the work of students in my university.

**Conclusion.** As a result of completing this complex project, I used technologies such as Python, Flask framework, forms, database, wsl, Jinja2 template, HTML markup language, CSS stylesheet, Bootstrap4 and several other Python modules.

Combining this technology stack, I created an interesting application, with a server and client part. I also improved my skills in working with the database and using the Linux command terminal.

In my opinion, the project is interesting both from a theoretical and a practical point of view. In the future, it can be used as a basis or as a micro-service for a larger project. For example - for our cathedral site, where students can remotely process the material.

**Keywords:** web application, html site markup language, css styles, flask framework, python programming language, database.

Одержано редакцією 17.12.2022 р.  
Прийнято до публікації 23.06.2022 р.

**ЗМІСТ****СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА»**

P. V. Lukianov

NUMERICAL METHODS FOR THE INVESTIGATION OF THE  
AERODYNAMIC NOISE OF A HELICOPTER ROTOR 4

Я. І. Гур'єв, О. А. Сердюк, Р. М. Дідковський

РОЗРОБКА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОГО ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО  
СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОЗКЛАДОМ ЗАНЯТЬ 18

М. В. Юхимець, Н. О. Красношлик

РОЗРОБКА ПРОГРЕСИВНИХ СТРАТЕГІЙ ГРИ У ШАХИ ТА ЇХ  
ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ШАХОВОГО ДВИГУНА 31

З. О. Сердюк, М. В. Босовський, М. В. Третяк

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДО  
РОЗВ'ЯЗУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ 42

**СЕКЦІЯ «ІНФОРМАТИКА»**

І. О. Розломій, А. В. Ярмілко

ІНТЕГРОВАНІЙ КРИПТОГРАФІЧНО-СТЕГАНОГРАФІЧНИЙ ЗАХИСТ  
МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ І ДАНИХ В СИСТЕМАХ E-LEARNING 50

О. А. Куценко, О. В. Піскун

МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ СЕМАНТИЧНОГО  
АНАЛІЗУ КОНТЕНТУ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ 62

І. О. Ігнатенко, О. А. Сердюк, Р. М. Дідковський

РОЗРОБКА ОСВІТНЬОГО ПОРТАЛУ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ КОМП'ЮТЕРНИХ  
ПРОГРАМ, НАПИСАНИХ СТУДЕНТАМИ 73

## **CONTENTS**

### **APPLIED MATHEMATICS SECTION**

P. V. Lukianov

NUMERICAL METHODS FOR THE INVESTIGATION OF THE  
AERODYNAMIC NOISE OF A HELICOPTER ROTOR 4

Y. I. Huriev, O. A. Serdiuk, R. M. Didkowsky

DEVELOPMENT OF A WEB-BASED SCHEDULING MANAGEMENT TOOL 18

M. V. Yukhymets, N. O. Krasnoshlyk

DEVELOPMENT OF ADVANCED CHESS STRATEGIES AND THEIR  
APPLICATION IN THE IMPLEMENTATION OF A CHESS ENGINE 31

Z. O. Serdiuk, M. V. Bosovskiy, M. V. Tretiak

APPLICATION OF THE THEORY OF DIFFERENTIAL EQUATIONS TO  
SOLVING MATHEMATICAL PROBLEMS 42

### **INFORMATICS SECTION**

I. O. Rozlomii, A. V. Yarmilko

INTEGRATED ENCRYPTION-STEGANOGRAPHY PROTECTION OF  
MULTIMEDIA CONTENT AND DATA IN E-LEARNING SYSTEMS 50

O. A. Kutsenko, O. V. Piskun

DATA ORGANIZATION MODELS AND THEIR OPTIMIZATION FOR  
SEMANTIC ANALYSIS OF SOCIAL MEDIA CONTENT 62

I. O. Ihnatenko, O. A. Serdiuk, R. M. Didkowsky

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL PORTAL FOR VERIFICATION OF  
COMPUTER PROGRAMS WRITTEN BY STUDENTS 73

**ВІСНИК  
ЧЕРКАСЬКОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ**

Серія Прикладна математика. Інформатика  
№1.2022

Відповідальний за випуск  
*Пасічний М.О., Головня Б.П.*

Відповідальний секретар  
*Сердюк О.А.*

Комп'ютерне верстання  
*Сердюк О.А.*

Підписано до друку 14.12.2022.  
Формат 60x84/в. Папір офсет. Друк офсет. Гарнітура Times.  
Ум. друк. арк. 10,1. Наклад 100 прим.