

Improving the Efficiency of Electric Rolling Stock Operation Through the Use of Adaptive Filtering Methods for High Harmonic Current Components in Traction Drive Systems

Goolak S.

State University of Infrastructure and Technologies
Kyiv, Ukraine

Abstract. The aim of this work is to investigate the efficiency of various adaptive filtering methods for higher harmonic components of stator currents in a vector-controlled traction drive system to improve the operation efficiency of electric rolling stock. The set goal was achieved by implementing an adaptive filtering block into the basic vector control system, which sequentially employs various adaptive filtering methods. The first harmonic component of stator currents was proposed to be used as the desired signal. An algorithm for determining the first harmonic component under conditions of varying supply voltage frequency was developed. Based on the simulation results, filtration efficiency metrics were established, indicating that the Wiener filter is the most effective for filtering higher harmonic components of stator currents. The most significant results include the algorithm for determining the first harmonic component of the stator phase current and the determination of an adaptive filtering algorithm with the highest convergence rate. The importance of these results lies in identifying the most effective adaptive filtering algorithm for traction drive operation, taking into account the operating modes of electric rolling stock. This will help reduce losses from higher harmonic components in the traction drive and, consequently, increase its energy efficiency.

Keywords: operational efficiency, energy efficiency, vector control, higher harmonic components, adaptive filtering, electric rolling stock.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.01>

UDC: 621.313.333.2

Creșterea eficienței de operare a transportului rulant electric prin utilizarea metodelor de filtrare adaptivă pentru componentele cu curent armonic mai mare în sistemele de tracțiune

Gulac S.A.

Universitatea de Stat de Infrastructură și Tehnologie
Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia eficiența diferitelor metode de filtrare adaptivă a componentelor armonice superioare ale curenților statorici într-un sistem de antrenare a tracțiunii cu control vectorial pentru a îmbunătăți eficiența de funcționare a materialului rulant electric. Scopul a fost atins prin utilizarea unei unități de filtrare adaptivă în sistemul de control vectorial de bază, care implementează pe rând diferite metode de filtrare adaptivă. Ca obiect de studiu a fost ales tracțiunea unei locomotive electrice din seria DS-3 (Ucraina). Se propune utilizarea primei componente armonice a curenților statorici ca semnal dorit al curenților statorici. A fost propus un algoritm pentru determinarea primei componente armonice în condiții de modificări constante ale frecvenței tensiunii de alimentare. Analiza rezultatelor obținute a arătat că pentru filtrarea componentelor armonice superioare ale curenților statorici, cea mai eficientă este utilizarea unui filtru Wiener. Cele mai importante rezultate sunt algoritmul de determinare a primei componente armonice a curentului de fază al statorului și determinarea algoritmului de filtrare adaptivă cu cea mai mare convergență. Semnificația rezultatelor obținute este de a determina cel mai eficient algoritm de filtrare adaptivă la operarea unui sistem de tracțiune, ținând cont de modurile de funcționare a materialului rulant electric. Acest lucru va reduce pierderile de la componentele armonice superioare din sistemul de tracțiune și, ca urmare, va crește eficiența energetică a acestuia.

Cuvinte-cheie: eficiență operațională, eficiență energetică, control vectorial, componente armonice superioare, filtrare adaptivă, transportul rulant electric.

**Повышение эффективности эксплуатации электроподвижного состава за счет применения методов адаптивной фильтрации высших гармонических составляющих тока в системах тягового привода
Гулак С.А.**

Государственный университет инфраструктуры и технологий
Киев, Украина

Аннотация. Целью работы является исследование эффективности методов адаптивной фильтрации высших гармонических составляющих статорных токов в системе тягового привода с векторным управлением для повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава. Поставленная цель была достигнута за счет применения в базовой системе векторного управления блока адаптивной фильтрации, реализующего поочередно следующие адаптивные алгоритмы: метода наименьших средних квадратов, нормализованного метода наименьших средних квадратов, разреженного метода наименьших средних квадратов, фильтра Калмана и фильтра Винера. В качестве объекта исследования был выбран тяговый привод электровоза серии ДС-3 (Украина) с векторной системой управления тяговыми асинхронными двигателями. В качестве желаемого сигнала статорных токов предложено использовать первую гармоническую составляющую статорных токов. Предложен алгоритм определения первой гармонической составляющей в условиях постоянного изменения частоты питающего напряжения. На имитационной модели для установившегося режима были получены временные диаграммы фазных токов статора, крутящего момента и были построены амплитудно-частотные спектры фазных токов статора. На основании полученных результатов, были рассчитаны коэффициент общего гармонического искажения тока статора, средние абсолютная и относительная ошибки за период, коэффициент пульсации крутящего момента. Анализ полученных результатов показал, что для фильтрации высших гармонических составляющих статорных токов наиболее эффективным является применение фильтра Винера. Наиболее важными результатами являются предложенный алгоритм определения первой гармонической составляющей фазного тока статора в условиях постоянно изменяющейся частоты напряжения питания асинхронного двигателя и определение алгоритма адаптивной фильтрации с наиболее высокой конвергенцией (сходимостью). Значимость полученных результатов состоит в определении наиболее эффективного алгоритма адаптивной фильтрации при работе тягового привода с учетом режимов работы электроподвижного состава. Это позволит уменьшить потери от высших гармонических составляющих в тяговом приводе и, как следствие, повысить его энергоэффективность.

Ключевые слова: эффективность эксплуатации, энергоэффективность, векторное управление, высшие гармонические составляющие, адаптивная фильтрация, электроподвижной состав.

INTRODUCTION

Increasing the efficiency of electric rolling stock is a relevant task both for the railways of the Ukraine and the railways of European Union countries. One of the components of operational efficiency of electric rolling stock is the energy efficiency of the traction drive. One way to improve the energy efficiency of the electric rolling stock is to reduce the consumption of electrical energy by electric rolling stock for train traction and to reduce the distortions it introduces into the traction power supply system [1].

Vector control systems for traction drives have become extensively used in the electric rolling stock with induction traction motors [2, 3]. In such systems, the induction traction motors are powered by autonomous voltage inverters. The keys of the autonomous voltage inverter are switched according to the pulse-width modulation (PWM) algorithm [4]. With this organization of the power system, the phase voltages of induction motors take the form of a sequence of rectangular pulses of different durations. The repetition period of the sequence of rectangular pulses is inversely proportional to the frequency, and the

amplitude of the pulses is the amplitude of the phase voltage supplying the induction motor. The minimum pulse duration is inversely proportional to the PWM sampling frequency. When such a system applies phase voltages to the stator windings of the induction motor, a constant charge-discharge of the stator winding inductances occurs. In this case, the charging time equals the pulse duration, and the discharge time equals the pause between pulses. This circumstance leads to the fact that the stator current of the motor has a non-sinusoidal shape, and higher harmonic components appear in its spectrum.

The presence of higher harmonic components in stator currents leads to the following negative consequences:

- an increase in losses in induction motors and, as a result, an increase in the power consumption of the traction drive [5];
- the appearance of torque pulsations on the motor shaft, which, in turn, leads to increased mechanical losses [6] and deterioration of the overall drive's dynamic properties [7, 8].

To compensate for the higher harmonic components of stator currents, the following methods are used:

- multilevel inverters;
- passive filtering;
- reactive power compensation;
- adaptive selective harmonic reduction.

In his researches, Onishchuk V.I. demonstrated the effectiveness of using multilevel inverters with specialized modulation and control strategies to solve the stated problem. However, the use of multilevel inverters in the railway electric rolling stock would lead to an increase in the overall dimensions of the traction drive, which is an unacceptable factor.

The passive filtering method effectively removes harmonic components with fixed frequencies, but each passive filter can be configured only for one harmonic. Applying a chain of passive filters will result in a significant loss of a transmitted power from the autonomous inverter to the traction motor and increase the overall dimensions of the traction drive. Furthermore, when the operating mode of the traction drive changes, the spectral composition of the stator currents changes as well, rendering the compensation of higher harmonic components ineffective [9].

The method of reactive power compensation employs so-called hybrid filters [10]. The active part of the hybrid filter eliminates the phase shift between phase voltages and the stator current of the induction motor, while the active filters remove the higher harmonic components of stator currents. For the task considered in this study, eliminating the phase shift between phase voltages and the stator current of the induction motor is not a relevant issue. This is because eliminating the phase shift between phase voltages and stator current would lead to a reduction in the reactive current of the motor (magnetic circuit current), which, in turn, would reduce the power factor and, in some cases, even cause the motor stoppage. The set of active filters in this method, like in the previous one, is also configured for fixed frequencies. When the operating mode changes, compensating for higher harmonic components using a set of active filters also becomes ineffective.

The most effective method of compensating for higher harmonic components is adaptive selective reduction (filtering) of harmonic components, which allows for the efficient removal of higher harmonic components even

when the operating modes of the electric rolling stock change [11, 12].

According to Parseval's theorem [13], adaptive filtering can be performed in both the frequency and time domains. Algorithms implementing adaptive filtering in the frequency domain are more precise, but their implementation is more complex. This complexity arises from the influence of the distortion magnitude of sinusoidal-shaped stator currents on the stability and convergence time of the algorithms [11]. Filtering in the time domain is less precise but easier to implement since it relies on coordinate transformations of stator currents, which are partially fulfilled in a vector control system [12].

This work is dedicated to investigating the effectiveness of methods for filtering higher harmonic components of stator currents in an induction motor when using vector control in the traction drive of the railway electric rolling stock.

Despite the numerous studies dedicated to filtering higher harmonic components of stator currents in vector control drive systems, most of them focus on the general industrial drives. Traction drives, on the other hand, have a unique characteristic of frequently changing their operating modes (start-up, transition to different motor shaft rotation frequencies, coasting, braking, etc.). This leads to the presence of constant transient processes in the traction drive system [14] and continuous changes in the frequency of stator currents. In contrast, general industrial drive systems use sampling frequencies for PWM ranging from several kHz to several tens of kHz. In traction drive systems, the sampling frequency is within the range of several hundred Hz to one kHz. This limitation in the sampling frequency is due to the switching frequency of power IGBT modules used in the autonomous voltage inverter [15]. A low sampling frequency leads to significant distortion in the sinusoidal shape of stator currents, making it challenging to filter out higher harmonic components.

The goal of this research is to select an adaptive filtering method to develop a compensator for higher harmonic components of stator currents in a vector control traction drive system. This selection is based on the study of the effectiveness of various adaptive filtering methods.

This work distinguishes itself from known studies in that it investigates adaptive filtering methods for higher harmonic components of stator currents of an induction motor in a vector control traction drive system for railway rolling

stock using a sampling frequency for PWM organization that is close to what is used in railway rolling stock. Furthermore, an algorithm for calculating desired stator current signals based on Fast Fourier Transform, taking into account changes in the supply voltage frequency, is proposed. These facts allowed for considering the impact of the distortion of the sinusoidal shape of stator currents on the stability and convergence time of various adaptive filtering methods under real operating conditions of railway rolling stock.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURAL SCHEME OF THE VECTOR CONTROL SYSTEM WITH A COMPENSATOR FOR HIGHER HARMONIC COMPONENTS OF STATOR CURRENTS OF THE INDUCTION MOTOR

The research focuses on the traction drive with vector control of induction motors of the locomotive DS-3 (Ukraine).

Due to the high cost associated with studying electromechanical processes in the traction drive system, mathematical and simulation modeling methods were employed in the research.

The following assumptions were made during the development of the mathematical and simulation model of the traction drive and the research process:

- the vector control system is classical.
- the constant voltage at the input of the inverter remains unchanged.
- there are no disturbances in the control system caused by factors such as temperature affecting the motor windings, IGBT modules of the autonomous inverter, etc.
- the load on the motor shaft remains constant.

The classical vector control system for the traction drive [14] is supplemented by the "Adaptive Filtering Block" (Fig. 1). The "Adaptive Filtering Block" implements a specific adaptive filtering algorithm and synthesizes the signals I_{xf} , I_{yf} , ε_{Ix} , ε_{Iy} . The signals ε_{Ix} , ε_{Iy} correct

the values of stator currents supplied to the inputs of the corresponding "Current Regulators," and the filtered signals I_{xf} , I_{yf} are fed to the input of the "Cross-Coupling Compensation Block." Since the presence of higher harmonic components in the stator currents of the induction motor leads to torque pulsations on the motor shaft, the system includes torque control on the motor shaft in addition to stator current control, as indicated by "Scope 2."

To implement adaptive filtering methods, it is necessary to have a desired signal for the controlled parameter. It is proposed to use the first harmonic component of the stator currents as the desired signal. For this purpose, the "Fast Fourier Transform Block" is used in the "Adaptive Filtering Block" (Fig 2), which extracts the first harmonic component from the spectrum of the stator current, taking into account the signal frequency proportional to the motor shaft rotation frequency. This is important because the motor shaft rotation frequency and, consequently, the voltage supply frequency change constantly when the operation modes of the rolling stock change. Additionally, frequent changes in the operation modes of the rolling stock induce transient processes in the traction drive system, resulting in the presence of quasi-asymmetric modes [14]. To account for these modes, it is proposed to filter the stator current for each phase ("Adaptive Filters Block"), after which the obtained values are transformed into the $\alpha\beta$ coordinate system and subsequently into the xy coordinates.

The frequency of the power supply voltages for the traction motor in the vector control system constantly changes depending on the operating modes of the electric rolling stock. Due to this circumstance, an algorithm of fast Fourier transform with a variable frequency (Fig. 3) is proposed for obtaining the desired signals of the stator phase currents. This algorithm is implemented in the "Fast Fourier Transform Block" (Fig. 2).

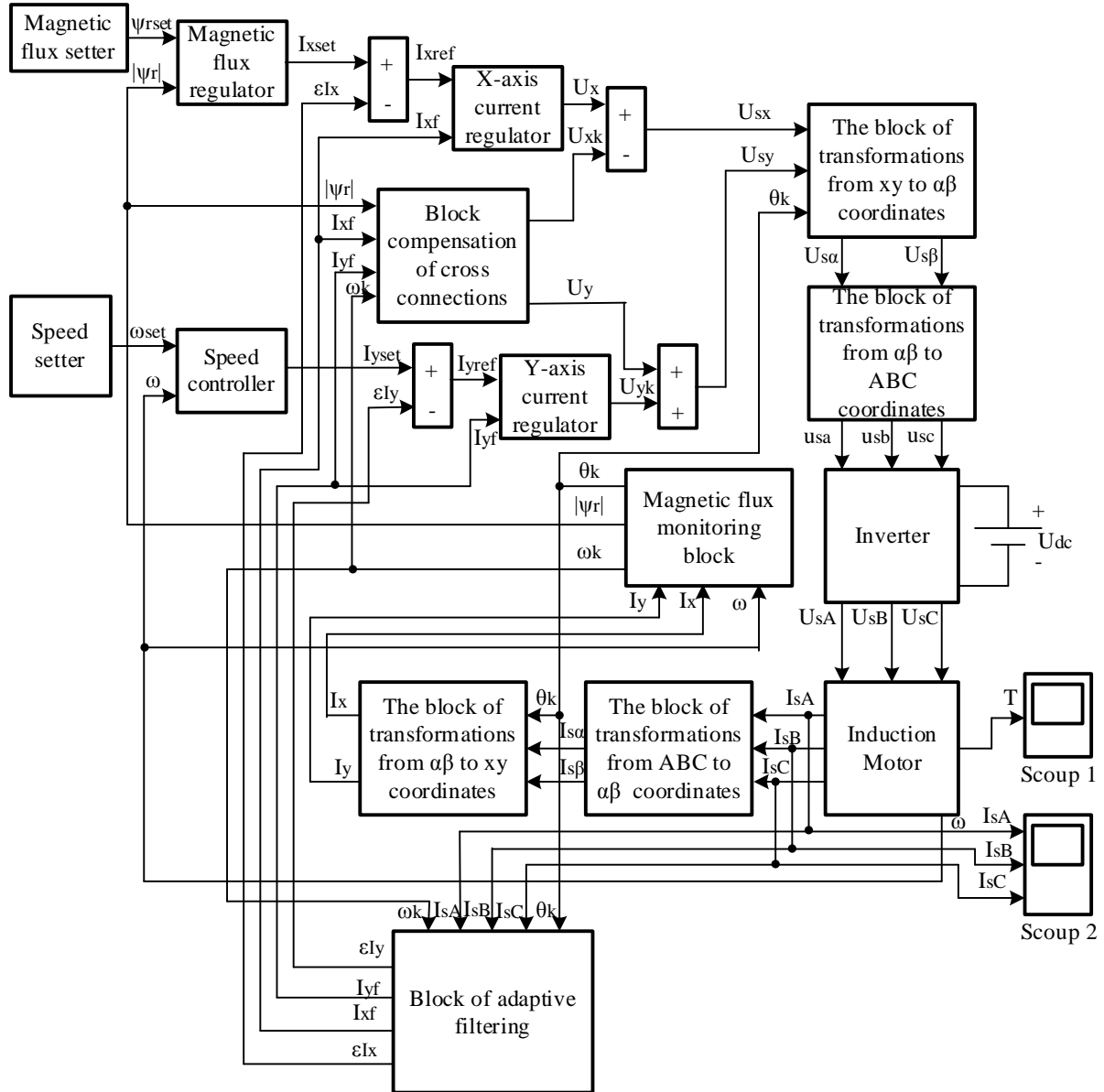


Fig. 1. Proposed Structural Diagram of the Vector Control System for Traction Drive

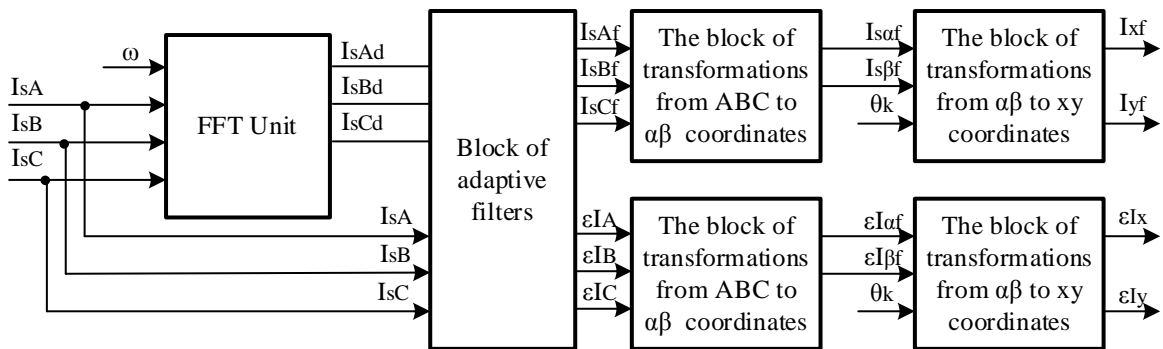


Fig. 2. Structural diagram of the "Adaptive Filtration Block"

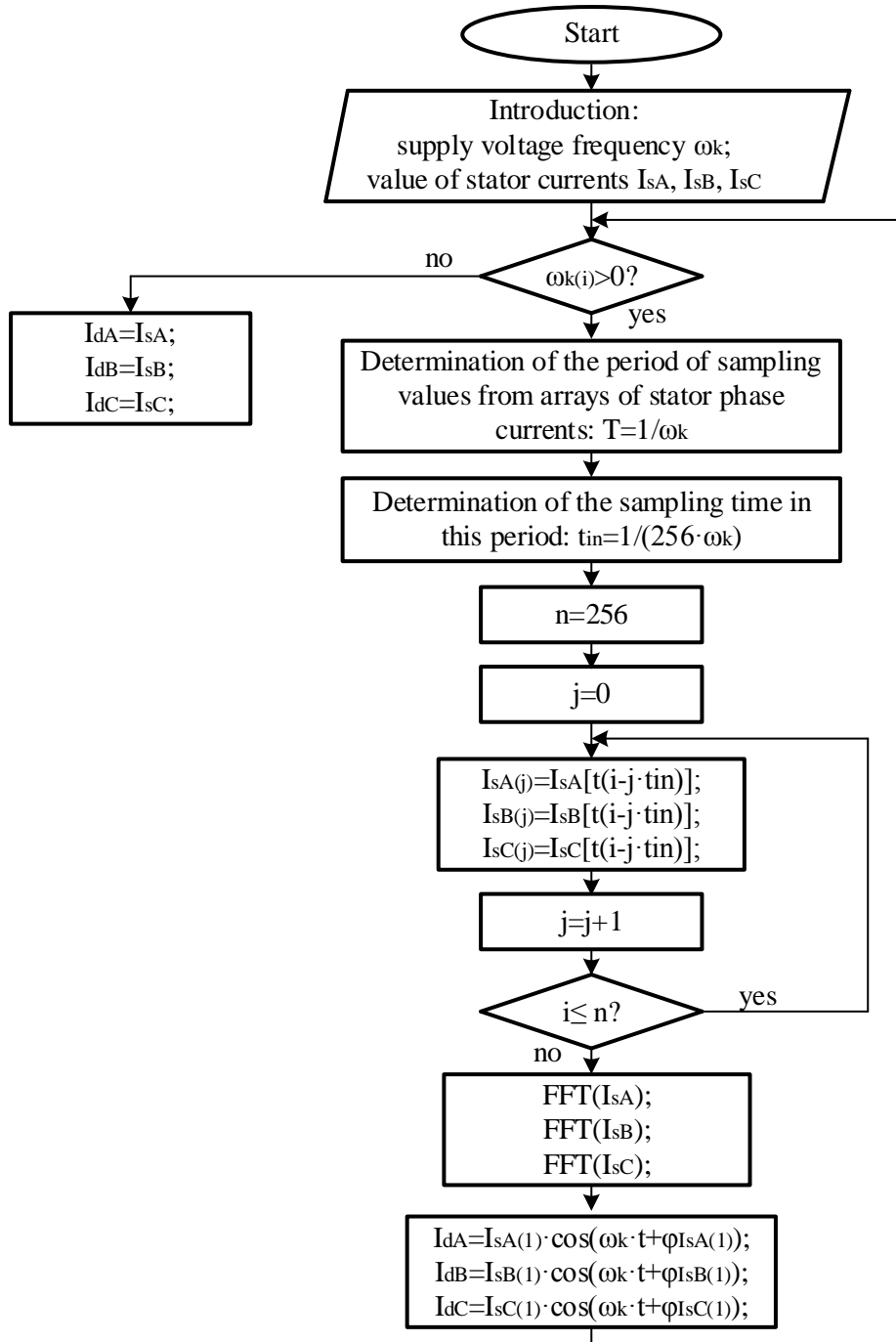


Fig. 3. Algorithm for determining the desired values of stator phase currents

The proposed structural diagram of the vector control system (Fig. 1) is implemented in the Matlab Simulink software environment with the sequential connection of the "Adaptive Filters Block," which implements the studied adaptive filtering algorithm.

MATHEMATICAL MODELS OF ADAPTIVE FILTERING ALGORITHMS

Adaptive filtering methods refer to methods based on the adaptive least mean squares

approach [16-18]. Methods of adaptive filtering also include methods that are built on predicting the values of the controlled variable (recursive least squares filters) [19], Wiener and Kalman filtering [20].

In this research, the following methods were considered: classic least mean squares (LMS) method [16], normalized least mean squares (NLMS) method, which has faster convergence compared to LMS [17], leaky least mean squares (LLMS) method, which has faster convergence and accuracy compared to LMS [17], Wiener and

Kalman filtering methods [20]. It was hypothesized during the research that there are no noises in the signal. Under such conditions, the Kalman filter degenerates into the recursive least squares (RLS) filter [19, 20]. Therefore, RLS was not considered separately.

The mathematical model of the least mean squares (LMS) adaptive method

The output signal of the filter is described by equation (16):

$$I_{sf}(n) = \sum_{i=1}^N w_i(n) \cdot I_s(n-1), \quad (1)$$

where I_{sf} – the value of the stator current at the filter's output;

I_s – the value of the stator current at the filter's input;

N – the filter order;

n – the current value of stator current;

w – the filter coefficients.

The filtering error is determined according to the expression:

$$\varepsilon(n) = I_{sf}(n) - I_{sd}(n), \quad (2)$$

where I_{sd} – the desired value of stator current.

The filter coefficients are determined by the equation:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon(n) \cdot \mathbf{I}_{sf}(n), \quad (3)$$

where $\mathbf{w}(n)$ – the vector of filter coefficients at the n -th iteration step;

$\mathbf{w}(n+1)$ – the vector of filter coefficients at the $n+1$ -th iteration step;

$\mathbf{I}_s(n)$ – the vector of input values of phase current of the stator;

μ – the step size parameter of the algorithm.

Mathematical model of the adaptive normalized least mean squares (NLSM) method

The output signal of the filter and the filtering error, as in the previous method, are determined by equations (1) and (2) respectively. The filter coefficients are determined by the equation [17]

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{\tilde{\mu}}{\mathbf{I}_{sf}^T \cdot \mathbf{I}_{sf}(n) + \psi} \cdot \varepsilon(n) \cdot \mathbf{I}_{sf}(n). \quad (4)$$

In this recursion $\tilde{\mu}$ и ψ are positive constants that should be appropriately selected. The introduction of the constant ψ is justified to prevent division by a small value when the square of the Euclidean norm $(\mathbf{I}_{sf}(n))^T \mathbf{I}_{sf}(n)$ is small. This leads to greater stability in the implementation of the NLMS algorithm. Constant $\tilde{\mu}$ can be considered as a step size parameter that controls the convergence speed of the algorithm.

Mathematical model of the adaptive sparse leaky mean square method (LLSM)

The output signal of the filter and the filtering error, as in the previous methods, are determined using equations (1) and (2), respectively. The filter coefficients are determined by the equation [18]

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(n+1) = & \left(\mathbf{I} - 2 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot \left[\mathbf{I}_{sf}^T(n) \cdot \mathbf{I}_{sf}(n) + \gamma \cdot \mathbf{I} \right] \right) \cdot \\ & \cdot \mathbf{w}(n) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon(n) \cdot \mathbf{I}_{sf}(n), \end{aligned} \quad (5)$$

where \mathbf{I} – a unit column vector.

Coefficient γ is within the range $0 < \gamma \ll 1$.

Mathematical model of the Kalman filter

As mentioned earlier, in the absence of noise at the filter input, the Kalman filter has the same structure and, therefore, the same mathematical model as the Adaptive Recursive Least Mean Square (RLS) filter [19]. Therefore, the mathematical model of the RLS filter is adopted as the mathematical model. The output signal of the filter is described by the equation [19]

$$\mathbf{I}_{sf(n-1)}(n) = \mathbf{w}^T(n-1) \cdot \mathbf{I}_s(n-1). \quad (6)$$

Filtering Error

$$\varepsilon_{(n-1)}(n) = I_{sd}(n) - I_{sf(n-1)}(n). \quad (7)$$

The vector of filter coefficients

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n) \cdot \varepsilon(n), \quad (8)$$

where the gain vector is determined as

$$\mathbf{k}(n) = \frac{1}{\lambda + \mathbf{I}_s^T(n) \cdot \mathbf{u}(n)} \cdot \mathbf{u}(n), \quad (9)$$

$$\mathbf{u}(n) = \psi_{\lambda}^{-1}(n-1) \cdot \mathbf{I}_s(n), \quad (10)$$

$$\psi_{\lambda}^{-1}(n) = \lambda^{-1} \cdot \left(\psi_{\lambda}^{-1}(n-1) - \mathbf{k}(n) \cdot [\mathbf{I}_s^T(n) \cdot \psi_{\lambda}^{-1}(n-1)] \right), \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{N-1}{N}. \quad (12)$$

Mathematical model of the Wiener filter

The output signal of the filter and the filtering error are determined by equations (1) and (2) respectively.

The filter coefficients are determined from the equation [20]

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}_{I_s}^{-1} \cdot \mathbf{p}_{I_{sd}}, \quad (13)$$

where \mathbf{R}_{I_s} - the autocorrelation matrix of the input signal I_s ;

$\mathbf{p}_{I_{sd}}$ - the cross-correlation matrix between the input signal I_s and the desired signal I_d .

RESEARCH RESULTS

During the modeling, it was taken into account that the nominal frequency of the power supply voltage for the traction motor of locomotive DS-3 is 55.8 Hz. On the other hand, the maximum frequency of the power IGBT modules is 1200 Hz. A sampling frequency of 1116 Hz was chosen for the studies. As a result of the simulation, temporal diagrams of the stator currents and desired stator currents of the induction motor were obtained in the absence of an adaptive filter. Since the case of symmetry of the motor windings and power supply voltages is considered, the analysis was carried out using the time diagrams of phase A stator current for steady-state operation. Figure 4 shows the temporal diagrams of phase A stator current and the desired current for phase A of the motor.

The total harmonic distortion factor (THD) of the stator current was calculated using the formula

$$THD = \frac{\sqrt{I_{sf(0)}^2 + I_{sf(2)}^2 + \dots + I_{sf(N)}^2}}{I_{sf(1)}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

The average absolute error over the period was calculated as

$$\varepsilon_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |\varepsilon_i| \quad (15)$$

and the root mean square error over the period was calculated as

$$\delta = \frac{\varepsilon_m}{I_{sd \max}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

where $I_{sd \max}$ is the instantaneous value of the desired stator current in a steady-state mode.

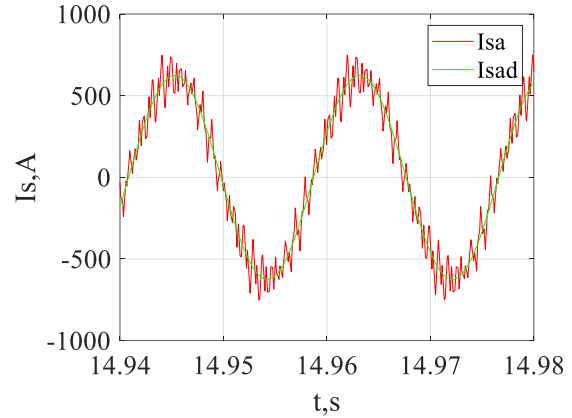


Fig. 4. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme without an adaptive filter: I_{sa} - stator current of phase A; I_{sd} - desired current of phase A stator

For the steady-state mode, the amplitude-frequency spectrum of phase A stator current was plotted (Fig. 5).

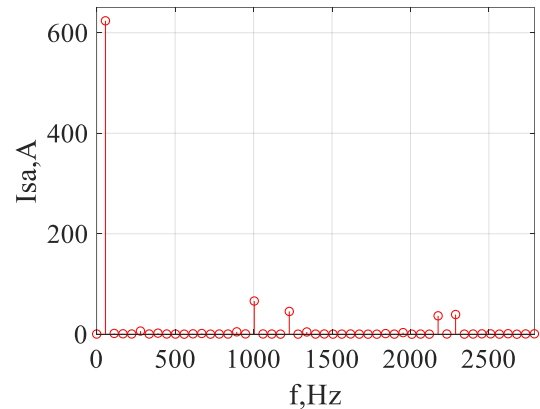


Fig. 5. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme without an adaptive filter

From the time diagrams of torque for the steady-state mode, the maximum (T_{max}) and minimum (T_{min}) torque values were determined.

From these values, the average torque value was calculated as

$$T_{midl} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (17)$$

and the torque ripple factor was determined [14] as

$$k_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{midl}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

The calculation results are presented in Table 1.

Table 1.

Research results

Method	Parameter						
	THD, %	ϵ_m , A	δ , %	T_{max} , N·m	T_{min} , N·m	T_{midl} , N·m	k_T , %
Base scheme	16.29	57.8	9.25	13268	7268	10268	29.22
LSM	10.07	36.2	5.8	11750	8516	10133	15.96
NLSM	16.11	56.58	9.07	13100	7270	10185	28.62
LLSM	10.66	36.21	5.8	11670	8560	10115	15.37
Kalman filter	9.62	32.72	5,26	11481	9055	10268	11.81
Wiener filter	0.38	2.46	0.4	10267	10263	10264	0.04

For the scheme with an adaptive filter implementing the least squares method (LSM), time diagrams of stator currents and desired stator currents of the induction motor were obtained. In this case, the filter order was selected as $M=31$. To ensure filter stability, the algorithm's step size parameter was chosen as $\mu=2.5 \cdot 10^{-5}$. Figure 6 shows the corresponding time diagrams for the steady-state mode of phase A of the induction motor.

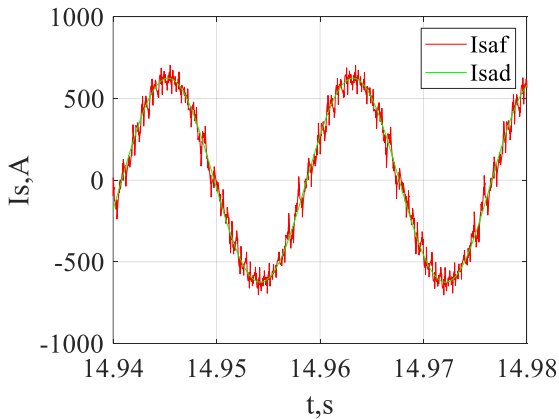


Fig. 6. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme with an adaptive filter implementing the LMS algorithm: Isaf - stator current of phase A; Isad - desired stator current of phase A.

For the steady-state mode, the amplitude-frequency spectrum of phase A stator current was plotted (Fig. 7).

The following parameters were calculated: the THD t of the stator current (14), the average absolute (15) and relative (16) errors over the period, the average torque value (17), and the torque ripple coefficient (18). The calculation results are recorded in Table 1.

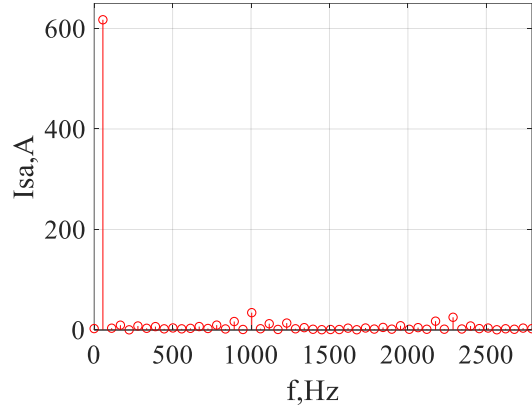


Fig. 7. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme with an adaptive filter implementing the LMS algorithm.

For the scheme with an adaptive filter implementing the Normalized Least Mean Squares (NLSM) algorithm, time diagrams of stator currents and desired stator currents of the induction motor were obtained. In this case, the filter order was chosen as $M=31$. To ensure filter stability, the algorithm's step size parameter was set to $\mu=2.5 \cdot 10^{-5}$. The coefficient preventing division by zero in formula (4) was chosen as $\psi=0.95$. Figure 8 shows the corresponding time

diagrams for the steady-state mode of phase A of the induction motor.

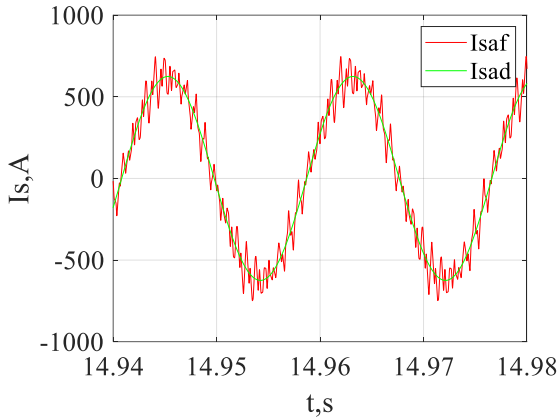


Fig. 8. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme with an adaptive filter implementing the NLMS algorithm: Isaf - stator current of phase A; Isad - desired stator current of phase A

An amplitude-frequency spectrum of the phase A stator current for the steady-state mode was generated (Fig. 9).

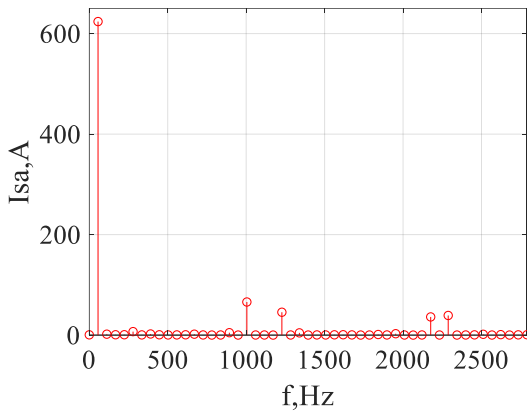


Fig. 9. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme with an adaptive filter implementing the NLMS algorithm

The following values were calculated: the THD of the stator current (14), the mean absolute error (15), the mean relative error (16) over the period, the average torque (17), and the torque ripple coefficient (18). The calculation results are presented in Table 1.

For the scheme with an adaptive filter implementing the leaky least mean squares (LLSM) algorithm, time diagrams of stator currents and desired stator currents of the

induction motor were obtained. In this case, the filter order was chosen as $M=31$. To ensure filter stability, the algorithm's step size parameter was set to $\mu=2.5 \cdot 10^{-5}$. The coefficient, which increases the convergence rate of algorithm γ , was selected as $\gamma=2.5 \cdot 10^{-4}$. Figure 10 shows the corresponding time diagrams for the steady-state mode of phase A of the induction motor.

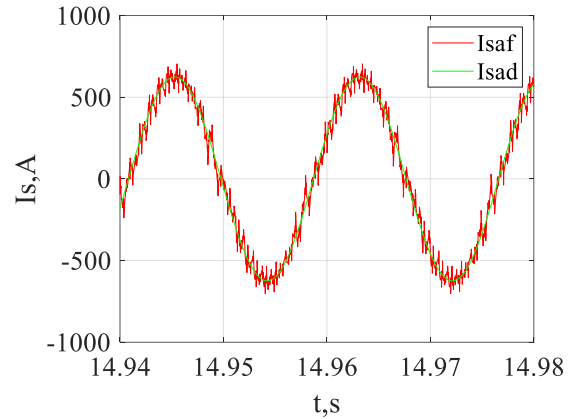


Fig. 10. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme with an adaptive filter implementing the LLMS algorithm: Isaf – stator current of phase A; Isad – desired stator current of phase A

For the steady-state mode, an amplitude-frequency spectrum of phase A stator current was plotted (Fig. 11).

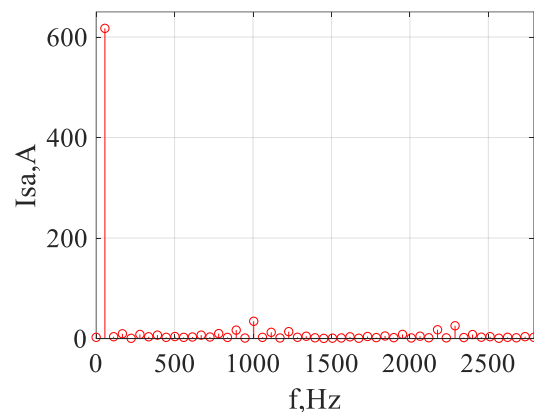


Fig. 11. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme with an adaptive filter implementing the LLMS algorithm

The following calculations were made: total THD of stator current (14), average absolute error (15), and average relative error (16) over a period, the mean value of the torque (17), and the torque

ripple coefficient (18). The calculation results have been listed in Table 1.

For the scheme with an adaptive filter implementing the Kalman filter, time diagrams of stator currents and desired stator currents of the induction motor were obtained. In this case, the filter order was chosen to be $M=11$. Figure 12 shows the corresponding time diagrams for the steady-state mode of phase A of the induction motor.

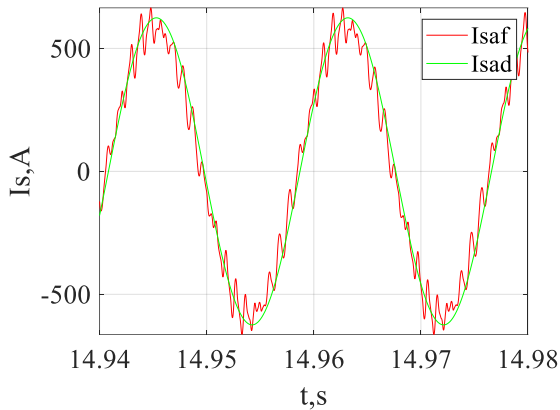


Fig. 12. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme with the Kalman filter: Isaf – stator current of phase A; Isad – desired stator current of phase A

For the steady-state mode, an amplitude-frequency spectrum of phase A stator current was plotted (Fig. 13).

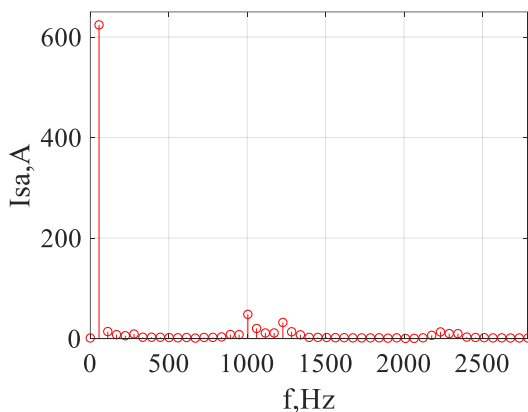


Fig. 13. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme with the Kalman filter

The following calculations were made: THD of stator current (14), average absolute error (15), and average relative error (16) over a period, the mean value of the torque (17), and the torque

ripple coefficient (18). The calculation results have been recorded in Table 1.

For the scheme with an adaptive filter implementing the Wiener filter, time diagrams of stator currents and desired stator currents of the induction motor were obtained. In this case, the filter order was chosen to be $M=11$. Figure 14 shows the corresponding time diagrams for the steady-state mode of phase A of the induction motor.

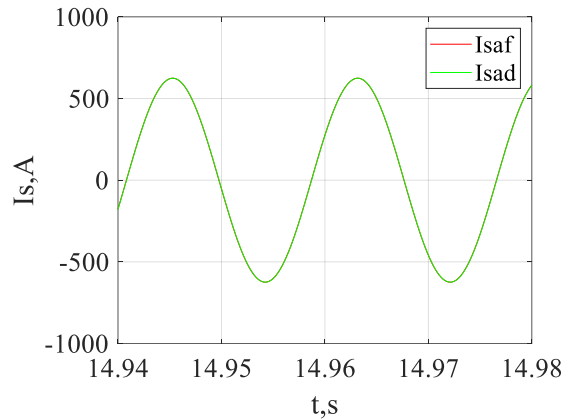


Fig. 14. Time diagrams of phase A stator current and desired current for phase A of the motor for the scheme with the Wiener filter: Isaf – stator current of phase A; Isad – desired stator current of phase A

For the steady-state mode, an amplitude-frequency spectrum of phase A stator current was plotted (Fig. 15).

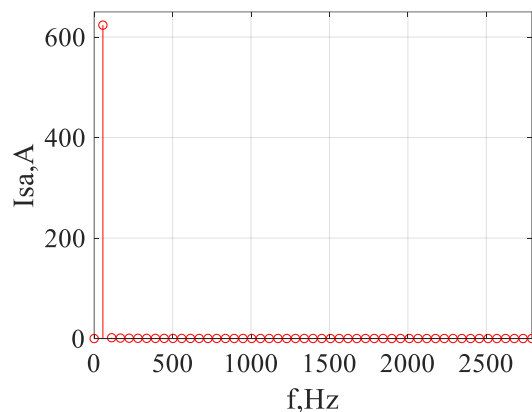


Fig. 15. Amplitude-frequency spectrum of phase A stator current for the scheme with the Wiener filter

The following calculations were made: THD of stator current (14), average absolute error (15), and average relative error (16) over a period, the mean value of the torque (17), and the torque

ripple coefficient (18). The calculation results have been recorded in Table 1.

CONCLUSIONS

In this work, it is proposed to enhance the efficiency of operation of electric rolling stock with a vector control system for traction induction motors. Specifically, to improve the energy efficiency of the traction drive and reduce the higher harmonic components of the stator currents of traction motors, adaptive filtration is applied. To solve this task, the following steps were taken:

- through analysis, it was determined that the presence of higher harmonic components in the stator currents leads to increased losses in induction motors and, as a result, increased electrical consumption by the traction drive. This also results in torque pulsations on the motor shaft, which in turn leads to increased mechanical losses and worsens the overall dynamic characteristics of the drive;

- it is proposed to use adaptive filtration in the basic scheme of the vector control system for the traction drive;

- a structural diagram of the adaptive filtration block was developed, which is based on the adjustment of filter coefficients to minimize the error between the motor's stator current and the desired stator current;

- to determine the desired stator current of the motor, it is proposed to use the first harmonic component of the motor's stator current;

- an algorithm for fast Fourier transform (FFT) is proposed to determine the first harmonic component of the stator current under conditions of continuously changing supply voltage frequency;

- modeling of the proposed vector control system for the traction induction motor was carried out in the MATLAB/Simulink software environment;

- on the simulation model of the vector control scheme, for cases of the basic control system, a control system with an adaptive LMS filter, an adaptive NLMS filter, an adaptive LLMS filter, a Kalman filter, and a Wiener filter, temporal diagrams of stator currents and torque were obtained, and amplitude-frequency spectra of stator currents were constructed;

- based on the simulation results, the following calculations were made: the THD of the stator current, the average absolute and average relative errors over a period, and the torque ripple coefficient;

- Upon analyzing the obtained results, it was determined that the most effective method for filtering out higher harmonic components of stator currents is the use of the Wiener filter. In this case, the THD of the stator current was 0.38%, the average absolute error over a period was 2.46%, the average relative error over a period was 0.4%, and the torque ripple coefficient was 0.04%. Other types of the adaptive filters showed significantly lower performance. This is because in traction drive systems, the sampling frequency for PWM implementation to control the inverter operation is low (from several hundred Hz to one kHz). Therefore, other types of filters exhibited slower convergence in this case. In the operation of electric rolling stock, high convergence of adaptive filters is crucial.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was made thanks to the funding from the National Research Fund of Ukraine for the research project "Development of Scientific Foundations for Comprehensive Improvement of Safety, Operational Efficiency, and Management of Critical Objects in Railway Transport under Post-War Development Conditions in Ukraine" (Registration No. 2022.01/0224).

References

- [1] Salles R. S., Rönnerberg S. K. 2023. Review of Waveform Distortion Interactions Assessment in Railway Power Systems. *Energies*, 2023, vol. 16, no 14, pp. 5411. Available at: doi: [10.3390/en16145411](https://doi.org/10.3390/en16145411)
- [2] Ma J., Luo C., Qiu L., Liu X., Xu B., Shou J., Fang Y. Recent advances in traction drive technology for rail transit. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2023, vol. 24, no 3, pp. 177-188. Available at: doi: [10.1631/jzus.A2200285](https://doi.org/10.1631/jzus.A2200285)
- [3] Szeląg A., Nikšić M. Advances in Electric Traction System. *Energies*, 2023, vol. 16, no 3, pp. 1346. Available at: doi: [10.3390/en16031346](https://doi.org/10.3390/en16031346)
- [4] Ha V. T., Giang P. T., Vu P. Multilevel inverter application for railway traction motor control. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2022, vol. 11, no 4, pp. 1855-1866. Available at: doi: [10.11591/eei.v11i4.3964](https://doi.org/10.11591/eei.v11i4.3964)
- [5] Holczer A., Freijedo F. D., Bojoi R. Overview of Sensorless Control Strategies for Electric Vehicle Traction IPMSM. In *2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2023, pp. 1-8. IEEE Available at: doi: [10.1109/WEMDCD55819.2023.10110929](https://doi.org/10.1109/WEMDCD55819.2023.10110929)
- [6] Lovskaya, A. Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway

- ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, vol. 3, no 4, pp. 36–41. Available at: doi: [10.15587/1729-4061.2014.24997](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997)
- [7] Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills. *Materials*, 2021, vol. 14, no 8, pp. 1915. Available at: doi: [10.3390/ma14081915](https://doi.org/10.3390/ma14081915).
- [8] Panchenko S., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Elyazov I., Huseynov I. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2022, vol. 6. pp. 45–55. Available at: doi: [10.21303/2461-4262.2022.002638](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002638)
- [9] Thentral T. M., Usha S., Palanisamy R., Geetha A., Alkhudaydi A. M., Sharma N. K., Bajaj M., Ghoneim S.S.M., Shouran M., Kamel S. (2022). An energy efficient modified passive power filter for power quality enhancement in electric drives. *Frontiers in Energy Research*, 2022, vol. 10, pp. 989857. Available at: doi: [10.3389/fenrg.2022.989857](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.989857)
- [10] Kebede A. B., Worku G. B. (2020). Power electronics converter application in traction power supply system. *Am. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2020, vol.9, no 4, pp. 67-73. Available at: doi: [10.11648/j.epes.20200904.12](https://doi.org/10.11648/j.epes.20200904.12)
- [11] Alhafadhi L., Asumadu J., Alsafi A. Total harmonics distortion reduction using adaptive, Weiner, and Kalman filters. In *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2017, pp. 1-8. IEEE. Available at: doi: [10.1109/CCWC.2017.7868353](https://doi.org/10.1109/CCWC.2017.7868353)
- [12] El Ghaly, A., Tarnini, M., Moubayed, N., & Chahine, K. (2022). A Filter-Less Time-Domain Method for Reference Signal Extraction in Shunt Active Power Filters. *Energies* 2022, 15, 5568. Available at: doi: [10.3390/en15155568](https://doi.org/10.3390/en15155568)
- [13] Hassanzadeh M., Shahrrava B. Linear version of Parseval's theorem. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 27230-27241. Available at: doi: [10.1109/ACCESS.2022.3157736](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157736)
- [14] Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Kilikevičius S. (2023). Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Locomotives with Asynchronous Traction Motors. *Energies*, 2023. vol. 16, no 9, pp. 3689. Available at: doi: [10.3390/en16093689](https://doi.org/10.3390/en16093689)
- [15] Chen K., Dong J., Ge X., Xu Z. A lifetime prediction method for IGBT modules considering the effects of multi-factors. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2023, vol. 99, pp. 1-13. Available at: doi: [10.24295/CPSSSTPEA.2023.00029](https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2023.00029)
- [16] Martinek R., Rzigky J., Jaros R., Bilik P., Ladrova M. Least mean squares and recursive least squares algorithms for total harmonic distortion reduction using shunt active power filter control. *Energies*, 2019, vol. 12, no 8, pp. 1545. Available at: doi: [10.3390/en12081545](https://doi.org/10.3390/en12081545)
- [17] Das S., Puchalapalli S., Singh B. Arctangent Function-Based Normalized Least Mean Squares Algorithm for a Battery Supported Wind Energy Conversion System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 10, no 4, pp. 3907-3916. Available at: doi: [10.1109/JESTPE.2021.3100859](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3100859)
- [18] Parida A., Subudhi B. A variable step size robust least mean logarithmic square-based control scheme for improved power quality of grid-interfaced PV system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, vol. 13, no 3, pp. 2086-2093. Available at: doi: [10.1109/TSG.2022.3145405](https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3145405)
- [19] Wu X., Huang S., Liu K., Lu K., Hu Y., Pan W., Peng X. Enhanced position sensorless control using bilinear recursive least squares adaptive filter for interior permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 35, no 1, pp. 681-698. Available at: doi: [10.1109/TPEL.2019.2912868](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2912868)
- [20] Wang R., Yu L., Wei C., Ma S., Zhang W., Chen Z., Yu L. Aerodynamic noise separation of helicopter main and tail rotors using a cascade filter with Vold-Kalman filter and cyclic Wiener filter. *Applied Acoustics*, 2022, vol. 192, pp. 108751. Available at: [10.1016/j.apacoust.2022.108751](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108751)

Author's Information



Goolak Sergey Oleksandrovykh, Ph.D., Kyiv Institute of Railway Transport of the State University of Infrastructure and Technologies. Research interests include mathematical modeling of traction drive control systems for electric locomotives. E-mail: sgoolak@gmail.com

Electromagnetic Shielding of Two-Circuit Overhead Power Lines Magnetic Field

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Chunikhin K.V.,
Dobrodeyev P.N.

Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of
Sciences of Ukraine
Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is to design an electromagnetic shield to reduce the level of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines to increase the shielding efficiency of the initial magnetic field in residential buildings to the level of sanitary standards and reduce the system's sensitivity to changes in system parameters. To achieve this goal, the structure of the electromagnetic shield is determined, which consists of a single-circuit active and multi-circuit passive parts and is characterized by an increased efficiency of reducing the magnetic field of industrial frequency. The design of an electromagnetic shield is reduced to solving a minimax vector optimization problem, in which the vector objective function is calculated based on solutions of Maxwell's equations in a quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software package. The solution of the minimax vector optimization problem is calculated on the basis of optimization algorithms by a multiswarm of particles from Pareto-optimal solutions. The most important results are theoretical and experimental studies of the effectiveness of the designed electromagnetic shield of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines. The significance of the results obtained lies in the fact that practical recommendations are given on the reasonable choice of the spatial arrangement of the contours of the multi-circuit passive screen and the shielding winding of the robust system of electromagnetic shielding of the magnetic field generated by double-circuit overhead power lines. The possibility of reducing the induction of the initial magnetic field to the level of sanitary standards has been shown as well.

Keywords: two-circuit overhead power lines, magnetic field, electromagnetic shielding, theoretical and experimental studies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.02>

UDC: 621.3.013

Ecranarea electromagnetică a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu circuit dublu

Kuznețov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloșko E.V., Ciunihin K.V., Dobrodeev P.N.

Institutul de Probleme de Inginerie Mecanică numit după A.N. Podgorny Academia Națională de Științe din
Ucraina, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a proiecta un ecran electromagnetic pentru a reduce nivelul câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit pentru a crește eficiența de ecranare a câmpului magnetic inițial din clădirile rezidențiale la nivelul standardelor sanitare și pentru a reduce sensibilitatea sistemului la modificările parametrilor sistemului. Pentru a atinge acest scop, se determină structura scutului electromagnetic, care constă dintr-un singur circuit activ și părți pasive cu mai multe circuite și se caracterizează printr-o eficiență crescută a reducerii câmpului magnetic al frecvenței industriale. Proiectarea unui scut electromagnetic se reduce la rezolvarea unei probleme de optimizare vectorială minimax, în care funcția obiectiv vectorială este calculată pe baza soluțiilor ecuațiilor lui Maxwell într-o aproximare cvasi-staționară folosind pachetul software COMSOL Multiphysics. Soluția problemei de optimizare vectorială minimax este calculată pe baza algoritmilor de optimizare printr-un multiroi de particule din soluții Pareto-optime. Cele mai importante rezultate sunt studiile teoretice și experimentale ale eficienței scutului electromagnetic proiectat al câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu dublu circuit. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că se dau recomandări practice privind alegerea rezonabilă a dispunerii spațiale a conturilor ecranului pasiv multicircuit și înfășurarea de ecranare a sistemului robust de ecranare electromagnetică a câmpului magnetic generat de liniile electrice aeriene cu circuit dublu. S-a demonstrat și posibilitatea reducerii inducției câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene cu două circuite, câmp magnetic, ecranare electromagnetică, studii teoretice și experimentale.

Электромагнитное экранирование магнитного поля двухцепных воздушных линий электропередачи

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко Е.В., Чунихин К.В., Добродеев П.Н.
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного национальной академии наук Украины
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является проектирование электромагнитного экрана предназначенного для снижения уровня магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи, для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля в жилых домах, до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Для достижения поставленной цели, определена структура электромагнитного экрана, состоящего из одноконтурной активной и многоконтурной пассивной части. Разработанный электромагнитный экран характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты. Проектирование электромагнитного экрана сводится к решению задачи минимаксной векторной оптимизации, в которой векторная целевая функция вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics. Решение задачи минимаксной векторной оптимизации вычисляется на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. В ходе проектирования электромагнитного экрана вычислены координаты пространственного расположения 11 контуров пассивного экрана и координаты компенсационной обмотки, а также величина тока и его фазы в обмотке активного экрана. Наиболее важными результатами являются теоретические и экспериментальные исследования эффективности спроектированного электромагнитного экрана магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи. Значимость полученных результатов состоит в том, что приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения контуров многоконтурного пассивного экрана и экранирующей обмотки робастной системы электромагнитного экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными линиями электропередачи. Показана возможность снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм.

Ключевые слова: двухцепные воздушные линии электропередачи, магнитное поле, электромагнитное экранирование, теоретические и экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Для электроснабжения современных городов наиболее часто применяют двухцепные линии электропередачи (ЛЭП). Эти ЛЭП часто проходят в непосредственной близости от жилых домов, как это показано на рис. 1.

Причем, в связи с постоянным ростом потребления электрической энергии, рядом с существующей ЛЭП часто строятся новые двухцепные ЛЭП с напряжением 330 кВ, как это показано на рис. 2.

Поэтому в современных городах двухцепные ЛЭП являются основным источником техногенного электромагнитного поля промышленной частоты. Воздействие электромагнитного поля промышленной частоты приводит к изменениям в гематологических параметрах крови, иммунном статусе человека, влияет на репродуктивную, центральную и нервно-сосудистую системы, биоэлектрическую деятельность головного мозга, а также может вызвать генетические мутации в организме человека и обладает канцерогенными свойствами [1]–[4].

Однако, основной причиной для беспокойства является вероятность того, что

непрерывное постоянное воздействие неионизирующих излучений низкого уровня может привести к долгосрочным последствиям, таким как раковые или дегенеративные заболевания иммунной и нервной систем. Оценкой подобных рисков длительного воздействия электромагнитного поля промышленной частоты на организм человека занимаются институты World Health Organization (WHO) Всемирной Организации Здоровья [1] и IARC (the International Agency for Research on Cancer) (Международное агентство по изучению рака) [2].

На основании проведенных исследований, в развитых странах мира разработаны жесткие государственные санитарные нормы по допустимым уровням электромагнитного поля промышленной частоты в среде длительного пребывания людей [5]–[6].

Для выполнения этих санитарных норм по допустимым уровням электромагнитного поля промышленной частоты в последнее время в развитых странах мира все больше внимания уделяется разработке методов и средств защиты населения от электромагнитного загрязнения [7]–[8], интенсивность которого из года в год постоянно растет. Для экранирования магнитного поля промышленной частоты

ты (МП) широко используются пассивные экраны, которые можно разделить на электромагнитные, контурные и магнитоэлектронные [7]–[9]. По расположению относительно ЛЭП или зоны экранирования, по ориентации экранов относительно земли, по количеству элементов экрана пассивные экраны можно классифицировать как экраны источника магнитного поля либо экраны области экранирования [9].

Однако, пассивные экраны, как правило, обладают малой эффективностью экранирования и с их помощью невозможно обеспечить санитарные нормы по уровню МП. Поэтому в последнее время в промышленно развитых странах широкое распространение получили системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты с помощью компенсирующих обмоток [7]–[8]. Количество и пространственное расположение компенсирующих обмоток системы активного экранирования в значительной степени определяется пространственно-временной характеристикой исходного МП, генерируемого воздушными ЛЭП в зоне экранирования.

Наиболее распространенным пространственным расположением проводов в двухцепных ЛЭП является форма «Бочка» и реже используются формы «Ёлка» или «Перевернутая ёлка». В зарубежной практике, в двухцепных ЛЭП чаще всего используются вертикальное расположение проводов. Все эти двухцепные ЛЭП генерируют МП, пространственно-временная характеристика которого представляет вытянутый эллипс. Более того, группа двухцепных ЛЭП генерируют МП, пространственно-временная характеристика которого также представляет вытянутый эллипс.

Для активного экранирования магнитного поля с такой пространственно-временной характеристикой достаточно применения одноконтурной системы активного экранирования (САЭ) с одной компенсационной обмоткой. Такие одноконтурные системы активного экранирования получили наибольшее распространение в зарубежной практике. Однако, при необходимости экранирования МП, генерируемого двухцепными ЛЭП в больших пространствах, одной обмотки может оказаться недостаточно. Для выполнения санитарных норм по уровню МП во всем объеме экранирования, к существующей одноконтурной системе активного экранирования с

одной компенсационной обмоткой экономически наиболее целесообразным является добавить многоконтурный экран пассивного экранирования, и система электромагнитного экранирования преобразуется в гибридную систему активно-пассивного экранирования [9].



Рис.1. Жилой дом, расположенный вблизи двухцепной ЛЭП. ¹



Рис.2. Жилой дом, расположенный вблизи двух двухцепных ЛЭП. ²

Если расстояние от точки наблюдения P до элемента тока удовлетворяет условию $R_0 > 2L_0$, где L_0 – линейные размеры элемента тока, напряженность магнитного поля $\vec{H}(P)$ с достаточной для инженерной оценки точностью 10 % может быть определена дипольной составляющей магнитного поля [9]

$$\vec{H}_\delta(P, t) = -\nabla \frac{(\vec{M}_\delta(t), \vec{R}_0)}{4\pi R_0^3}, \quad (2)$$

где $\vec{M}_\delta(t)$ – магнитный момент элемента тока.

Поскольку магнитное поле линии электропередачи, как правило, нормируется на значительных расстояниях от ее проводов [5], значение $\vec{M}_s(t)$ для контура с током $\vec{i}(t)$ и площадью \vec{S} равно [9]

$$\vec{M}_s(t) = \frac{\vec{i}(t)}{2} \oint_C \vec{R}_0 \times d\vec{l} = \vec{i}(t) \cdot \vec{S}. \quad (3)$$

При построении математической модели магнитного поля воздушных линий электропередачи влияние высоковольтных опор на распределение магнитного поля обычно не учитывается. Однако, если жилой дом расположен вблизи опоры, то влияние опоры на распределение индукции магнитного поля необходимо учитывать. В работах [7]–[8] показано, что уровень магнитного поля вблизи опоры ЛЭП может отличаться более чем на 20 % от распределения магнитного поля вдали от опоры.

В большинстве работ, посвященных расчету электромагнитного поля воздушных линий электропередачи, провисание проводов на распределение поля не учитывается. Считается, что провода являются бесконечными, прямолинейными и параллельными поверхности земли [9]–[10]. Преимущество такого подхода заключается в возможности рассмотрения задачи расчета магнитного поля в двумерной постановке.

В ряде работ при расчете магнитного поля воздушных линий электропередачи провисание проводов учитывается [7]–[8]. В этом случае задача расчета магнитного поля становится трехмерной. Пренебрежение эффектом провисания проводов при расчете магнитного поля воздушной ЛЭП может приводить к ошибкам до 45 % [7]–[8].

В зависимости от предположений, принятых при построении модели линии электропередачи, расчет магнитного поля может производиться аналитическими, полуаналитическими или численными методами. В частности, при моделировании магнитного поля воздушных ЛЭП с учетом влияния близкорасположенных опор ЛЭП необходимо использовать численные методы, в частности, с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, в основе работы которого лежат многочисленные конечно разностные методы.

К полуаналитическому методу расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи можно отнести представление маг-

нитного поля линии электропередачи в виде системы магнитных диполей и вычисление результирующего магнитного поля в виде суперпозиции полей, создаваемого каждым из диполей.

Для расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи наиболее широко используется аналитический метод, основывающийся на законе Био-Савара [7]–[9]. Мгновенное значение вектора элементарной индукции $d\vec{B}(Q_i, t)$ магнитного поля в рассматриваемой точке Q_i момент времени t , рассчитанное на основе закона Био-Савара [9]

$$d\vec{B}(Q_i, t) = \frac{\mu_0 I(t)}{4\pi} \frac{d\vec{L}_i \times \vec{R}_i}{|\vec{R}_i|^3} \quad (4)$$

где \vec{R}_i – вектор из общего поля элемента дифференциального тока в точке Q_i , $d\vec{L}_i$ – вектор элементарной длины элемента тока, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Знак \times обозначает векторное произведение векторов $d\vec{L}_i$ и \vec{R}_i .

Тогда вектор полного магнитного поля равен:

$$\vec{B}_i(Q_i, t) = \frac{\mu_0 \vec{i}(t)}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{R}_i}{R^3}. \quad (5)$$

Эта формула широко используется для расчета магнитного поля воздушных линий электропередачи. При построении модели магнитного поля воздушной линии электропередачи на основе аналитического метода традиционно для упрощения производят следующие предположения: провода считаются прямолинейными и бесконечно длинными, параллельными друг другу и земле; влияние опор на распределение магнитного поля линии электропередачи не учитывается. Тогда в силу принятых предположений данная модель позволяет решать задачу расчета магнитного поля линий электропередачи в двумерной постановке.

Токи в проводах линии электропередачи изменяется по гармоническому закону, поэтому все зависимые от времени параметры магнитного поля также изменяются по гармоническому закону. Следовательно, распределение магнитного поля линии электропередачи можно описывать в терминах комплекс-

ных амплитуд. Рассмотрим трехфазную двухпроводную линию электропередачи. Зададим комплексные амплитуды токов и фаз, протекающие в фазных проводах.

В работах [7]–[10] параметры токов ЛЭП (9) считаются известными и не меняются со временем. Однако токи ЛЭП изменяются в течение суток, недель и времен года. Поэтому, в отличие от работ [7]–[10], введем в задаче проектирования гибридной активно-пассивной системы экранирования вектор параметров исходных неопределенностей $\vec{\delta}$. Компонентами вектора $\vec{\delta}$ являются неопределенности значения токов и фаз в проводах ЛЭП, а также другие параметры неопределенностей электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, которые, во-первых, изначально известны неточно, и, во-вторых, могут меняться в процессе эксплуатации системы [11]–[13].

Тогда вектор $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$ мгновенного значения индукции исходного магнитного поля может быть рассчитан по закону Био-Савара на основании (5) в виде суммы векторов $\vec{B}_{Li}(Q_i, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемое всеми шестью проводами двухцепной ЛЭП в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Зададим вектор \vec{X}_a искомых геометрических значений размеров компенсационной обмотки системы активного экранирования, а также амплитуду и фазу тока в компенсационной обмотке. Тогда вектор $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенного значения индукции магнитного поля, генерируемого компенсационной обмоткой активного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, также может быть рассчитан на основании закона Био-Савара интегрированием выражения (5).

Заметим, что для эффективного активного экранирования магнитного поля, генерируемого двухцепными ЛЭП в многоэтажных домах, может потребоваться две или даже три компенсационные обмотки системы активного экранирования [14]–[16]. В этом случае, вектор $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенного значения индукции магнитного поля, генерируемого всеми компенсационными обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, также может быть рассчитан на основании зако-

на Био-Савара интегрированием выражения (5), в виде суммы векторов $\vec{B}_{ai}(Q_i, \vec{X}_a, t)$ мгновенных значений индукции магнитного поля, генерируемого всеми компенсационными обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Тогда вектор $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$ мгновенных значений индукции результирующего магнитного поля, генерируемого линией электропередачи и только обмотками системы активного экранирования в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования, рассчитывается в виде суммы

$$\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t) = \vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) + \vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t) \quad (6)$$

Зададим вектор \vec{X}_p искомых значений геометрических размеров, толщины и материала многоконтурного пассивного экрана. Тогда для вычисленного вектора $\vec{B}_{Ra}(Q_i, \vec{X}_a, \vec{\delta}, t)$ результирующего магнитного поля, которое создается токами в токопроводах ЛЭП, токами в обмотках системы активного экранирования, и пассивным контурным экраном, можно вычислить магнитные потоки, пронизывающие контуры многоконтурного пассивного экрана, и токи в контурах. А также, на основании закона Био-Савара интегрированием выражения (5) для всех контуров многоконтурного пассивного экрана можно вычислить вектор $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$, мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля, генерируемого всеми контурами многоконтурного пассивного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Тогда может быть вычислен вектор $\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$ мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля

$$\vec{B}_R(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) = \vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t) + \dots + \vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t) + \vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t) \quad (7)$$

в виде суммы вектора $\vec{B}_L(Q_i, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами линии электропередачи, и вектора $\vec{B}_a(Q_i, \vec{X}_a, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами компенсирующих обмоток активной части гибри-

ного экрана, и вектора $\vec{B}_p(Q_i, \vec{X}_a, \vec{X}_p, \vec{\delta}, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми контурами пассивной части гибридного экрана в момент времени t в точке Q_i пространства экранирования.

Рассмотрим теперь математическую постановку задачи проектирования электромагнитного экрана.

Введем вектор \vec{X} искомых параметров задачи проектирования комбинированного экрана, компонентами которого являются вектор \vec{X}_a искомых параметров активного экрана, включающего геометрических размеров компенсационных обмоток, а также токи и фазы в компенсационных обмотках, а также вектор \vec{X}_p искомых параметров пассивного экрана, включающего геометрические размеры контуров, толщины и материал многоконтурного пассивного экрана [17]–[18]. Тогда для заданных значений вектора \vec{X} искомых параметров и вектора $\vec{\delta}$ параметров неопределенности задачи проектирования электромагнитного экрана может быть вычислено эффективное значение $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i)$ магнитной индукции в точке P_i пространства экранирования на основе пакета программ COMSOL Muliphysics.

Тогда задача проектирования электромагнитного экрана сводится к вычислению решения векторной минимаксной задачи оптимизации [14]–[18]

$$\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}) = \langle \vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i) \rangle. \quad (8)$$

Компонентами векторной целевой функции $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta})$ являются эффективными значениями $\vec{B}_R(\vec{X}, \vec{\delta}, P_i)$ индукции результирующего магнитного поля во всех рассматриваемых точках P_i пространства экранирования.

В этой векторной минимаксной задаче оптимизации необходимо найти минимум вектора целевой функции (8) по вектору искомых параметров \vec{X} , и максимум этой же целевой функции по вектору параметров неопределенности $\vec{\delta}$ задачи проектирования комбинированного экрана.

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения на вектор искомых параметров \vec{X} комбинированного экрана в виде

векторного неравенства и, возможно, векторного равенства [11]–[13]

$$\vec{G}(\vec{X}) \leq \vec{G}_{\max}, \quad \vec{H}(\vec{X}) = 0. \quad (9)$$

Отметим, что компоненты векторной целевой функции (8) и векторных ограничений (9) являются нелинейными функциями вектора искомых параметров \vec{X} и вектора $\vec{\delta}$ параметров неопределенности задачи проектирования электромагнитного экрана и рассчитываются на основе пакета программ COMSOL Muliphysics.

I. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Особенностью решения рассматриваемой задачи векторной минимаксной оптимизации (8) является наличие нескольких противоречивых целей. Минимизация магнитного поля в одной точке пространства экранирования приводит к увеличению магнитного поля в других точках за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля.

Минимаксные задачи широко используются в робастном управлении [11]–[13]. В последнее время в синтезе систем управления получил распространение игровой подход, позволяющий сформулировать задачу синтеза системы для игры. В этом случае область изменения параметров делится на два набора – дружественных \vec{X} и вражеских $\vec{\delta}$. Задача игроков — выбрать такие значения \vec{X} параметров дружественного игрока, при которых значение оптимизируемого векторного критерия качества (8) минимизируется, а задача соперника — выбрать такие значения параметров $\vec{\delta}$, при которых значение это же критерия качества максимизируется.

При минимизации по одной переменной \vec{X} и максимизации по другой переменной $\vec{\delta}$ одной и той же векторной целевой функции (8), необходимым условием оптимальной минимаксной задачи является равенство нулю градиента целевой функции по всем переменным, независимо от того, является ли целевая функция минимизируемой или максимизируемой функцией [11]–[13].

При численном решении этой минимаксной задачи для нахождения направления движения необходимо использовать компоненты градиента целевой функции для тех переменных, по которым производится максимизация, и необходимо использовать ком-

поненты антиградиент (т.е. градиента, взятого с обратным знаком) для тех переменных, по которым проводится минимизация [11]–[13].

Для решения этой минимаксной задачи многокритериальной оптимизации (8) воспользуемся простейшей линейной схемой компромиссов [14]–[18], в которой исходная многокритериальная задача сводится к однокритериальной

$$f(\bar{X}, \bar{\delta}) = \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (10)$$

где α_i – весовые коэффициенты, характеризующие важность тех или иных критериев и определяющие предпочтение отдельных критериев.

Необходимым условием оптимальности решения (10) этой минимаксной задачи

$$\bar{X}^* = \mathbf{arg\,min}_X \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (11)$$

$$\bar{\delta}^* = \mathbf{arg\,max}_{\delta} \sum_{i=1}^J \alpha_i \bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta}, P_i) \quad (12)$$

является наличие седловой точки, в которой градиенты целевой функции равны нулю

$$\nabla_{\bar{X}} f /_{\bar{X}=\bar{X}^*} = 0, \quad \nabla_{\bar{\delta}} f /_{\bar{\delta}=\bar{\delta}^*} = 0. \quad (13)$$

Достаточным условием существования седловой точки является изменение знака градиента $\nabla_{\bar{X}} f$ целевой функции при переходе точки минимума от минуса к плюсу и изменение знаков градиента при переходе точки максимума от плюса к минусу [17]–[18]. Эти условия можно сформулировать в виде положительной определенности $\bar{H}_{\bar{X}} > 0$ матрицы вторых производных – матрицы Гессе по вектору параметров \bar{X} и отрицательной определенности $\bar{H}_{\bar{\delta}} \leq 0$ матрицы Гессе по вектору параметров $\bar{\delta}$, т.е. задача существенно усложняется, если критерий качества $\bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta})$ – вектор.

Отметим, что критерий качества $\bar{B}_R(\bar{X}, \bar{\delta})$ обычно включает в себя как переменные состояния системы, или их комбинацию, характеризующую точность системы, так и переменные состояния, которые необходимо

ограничить и обязательно включить в вектор управления. В противном случае исходная задача становится вырожденной и приводит к бесконечным управлениям. При этом выбор весовых матричных функций в качестве критерия качества при решении конкретных задач осуществляется итеративно путем многократного решения исходной оптимизационной задачи при различных значениях весовых функций до получения приемлемых результатов.

Фактически, смысловая постановка задачи сводится к синтезу такой системы, которая обеспечивает минимальные значения индукции результирующего магнитного поля (8), которые характеризуют точность системы, при выполнении ограничений (9) на компоненты вектора состояния и при ограничениях на вектор управления.

Рассмотрим использование штрафов (барьерных функций) для решения задачи математического программирования при наличии ограничений. Сначала рассмотрим применение метода внутренних точек для решения задачи математического программирования, не содержащей ограничений в виде равенств. Предположим, что вблизи оптимальной точки выполняются условия локального оптимума в следующем виде

$$\begin{cases} g_i(x) \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ \nabla f(x) - \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Откуда можно получить следующее равенство

$$\nabla f(x(r)) - \sum_{i=1}^m \frac{r}{g_i(x(r))} \nabla g_i(x(r)) = 0. \quad (15)$$

Это равенство можно интерпретировать как необходимое условие локального оптимума в виде нулевого градиента, при котором исходная целевая функция задачи нелинейного программирования принимает следующий вид

$$L(x, r) = f(x) - r \sum_{i=1}^m \ln g_i(x). \quad (16)$$

Аналогично можно получить и другую целевую функцию, если из выражения

$$\lambda_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m} \quad (17)$$

для градиента

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m \frac{r^2}{g_i^2[x(r)]} \nabla g_i[x(r)] = 0. \quad (18)$$

Целевая функция $L_1(x, r)$ примет следующий вид

$$L_1(x, r) = f(x) + r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(x)}. \quad (19)$$

Эти целевые функции позволяют свести исходную задачу нелинейного программирования при наличии ограничений к решению задачи безусловной оптимизации таким образом, что при подходе к границе ограничений изнутри штраф за нарушение ограничений стремится к бесконечности, что соответствует методу внутренних точек в алгоритме штрафных функций.

Таким образом, задача многокритериального синтеза (8) нелинейного робастного управления с использованием линейной схемы компромиссов (10) сводится к однокритериальной задаче математического программирования. Рассмотрим применение метода последовательного квадратичного программирования для решения этой задачи. Этот метод и его программная реализация были предложены Шиттковски первоначально для решения задачи минимизации методом наименьших квадратов. Этот метод представляет собой комбинацию метода Гаусса-Ньютона с определением направления движения с помощью квазиньютоновского алгоритма.

Рассмотрим минимизацию квадратичной нормы, обычно называемую задачей наименьших квадратов без ограничений.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l f_i(x)^2. \quad (20)$$

Градиент этой целевой функции может быть представлен следующим образом

$$\nabla f(x) = \nabla F(x) F(x). \quad (21)$$

Где $\nabla F(x) = (\nabla f_1(x), \dots, \nabla f_l(x))$ обозначен якобиан этой функции и предполагается, что компоненты целевой функции могут быть дважды продифференцированы. Тогда матрицу вторых производных целевой функции – матрицу Гессе можно записать в следующем виде

$$\nabla^2 f(x) = \nabla F(x) \nabla F(x)^T + B(x), \quad (22)$$

где

$$B(x) = \sum_{i=1}^l f_i(x) \nabla^2 f_i(x).$$

Тогда итерационная процедура выбора направления движения $d_k \in R^n$ по методу Ньютона может быть сведена к решению линейной системы

$$\nabla^2 f(x_k) d + \nabla f(x_k) = 0, \quad (23)$$

или к решению эквивалентной системы в следующем виде

$$\begin{aligned} \nabla F(x_k) \nabla F(x_k)^T d + B(x_k) d + \dots \\ \dots + \nabla F(x_k) F(x_k) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

В точке оптимального решения x^* выполняется условие

$$F(x^*) = (f_1(x^*), \dots, f_l(x^*))^T = 0, \quad (25)$$

поэтому нахождение шага движения d можно свести к решению нормального уравнения задачи наименьших квадратов

$$\min_{d \in R^n} \left\| \nabla F(x_k)^T d + F(x_k) \right\|, \quad (26)$$

из которого можно получить рекуррентное выражение

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (27)$$

для итерационного нахождения вектора искомых параметров, в котором d_k является решением задачи оптимизации (26), а α_k – экспериментально определяемый параметр.

Этот алгоритм использует метод Гаусса-Ньютона, который является традиционным

алгоритмом решения нелинейной задачи наименьших квадратов, для вычисления направления движения. В общем случае метод Гаусса-Ньютона позволяет получить решение задачи последовательного квадратичного программирования с использованием только производных первого порядка, но в реальных ситуациях получить решение часто не удается.

Поэтому для улучшения сходимости применяют методы второго порядка, в которых используется матрица вторых производных целевой функции — матрица Якоби при решении оптимизационных задач без ограничений. Алгоритмы второго порядка, по сравнению с методами первого порядка, позволяют эффективно получать решение в области, близкой к оптимальной точке, когда компоненты вектора градиента имеют достаточно малые значения.

В последнее время в квазиньютоновских методах получили распространение методы, использующие алгоритмы Левенберга-Марквардта. Идея этих методов состоит в замене матрицы Гессе некоторой матрицей $\lambda_k I$ с положительным коэффициентом λ_k . Тогда получим следующую систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} \nabla F(x_k) \nabla F(x_k)^T d + \lambda_k d + \dots \\ \dots + \nabla F(x_k) F(x_k) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Существует множество различных методов решения нелинейной задачи наименьших квадратов без ограничений. С другой стороны, существует простой подход для объединения свойств метода Гаусса-Ньютона с методом последовательного квадратичного программирования. Основной проблемой применения метода последовательного квадратичного программирования является необходимость использования специальных методов, обеспечивающих отрицательные собственные значения при аппроксимации матрицы Гесса в случае альтернативных подходов.

Детерминированные методы оптимизации, такие как линейное программирование и нелинейное программирование, широко используются для решения задач многокритериальной оптимизации.

Однако, эти методы используют одноточечный подход, и результатом этих классических методов оптимизации является единственное оптимальное решение. Например,

метод взвешенной суммы локальных критериев переводит задачу многокритериальной оптимизации в задачу однокритериальной оптимизации, что позволяет получить одну точку на фронте Парето-оптимальных решений.

Для нахождения глобального оптимума из оптимальных Парето решений, необходимо рассмотреть все возможные фронты Парето. В этом случае необходимо, чтобы алгоритмы поиска точки глобального оптимума выполнялись итеративно, чтобы гарантировать использование каждой комбинации весов.

Для выбора всех комбинаций весов необходимо многократно повторять алгоритмы такого локального поиска. Следовательно, алгоритмы должны иметь возможность «учиться» на полученных решениях, чтобы направлять правильный выбор веса в дальнейших эволюциях. При использовании классических методов поиска глобального оптимального решения возникают проблемы, если оптимальное решение находится в невыпуклых или несвязных областях функционального пространства.

В последнее время, все более популярными для решения задач оптимизации становятся метаэвристические методы, такие как эволюционные алгоритмы и технологии группового интеллекта [19]–[21]. Эволюционные методы благодаря своей эффективности и простоте успешно применяются для решения оптимизационных задач с одной целевой функцией. Эти методы имеют некоторые преимущества перед классическими методами оптимизации, так как позволяют рассчитывать оптимальные решения для нелинейных и невыпуклых задач [29]–[32]. В этих методах используется множество решений на каждой итерации и стохастический поиск, поэтому могут найти поиск в любом месте во всем пространстве поиска и способны преодолеть проблемы локальных оптимумов.

Методы стохастического поиска также больше подходят для решения задач многокритериальной оптимизации.

Среди метаэвристических методов, до недавнего времени, оптимизация роением частиц применялась только к однокритериальным задачам оптимизации. Высокая скорость сходимости алгоритмов оптимизации роением частиц для разработки многокритериального алгоритма оптимизации имеет некоторые преимущества с точки зрения лучшего исследования и использования, которые обеспечи-

вает возможность алгоритма для глобального поиска.

В стандартном алгоритме оптимизации роя частиц скорость частицы i роя j изменяется по линейным законам, в которых движение роя частиц описывается следующими выражениями [19]–[21]

$$v_{ij}(t+1) = c_1 r_{1j}(t) \dots \dots * [v_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t) \dots \dots * [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \quad (29)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (30)$$

где положение $x_{ij}(t)$ и скорость $v_{ij}(t)$ частицы i роя j ; c_1 и c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной составляющих скорости движения частицы; $r_{1j}(t)$ и $r_{2j}(t)$ – случайные числа из диапазона $[0,1]$, определяющие стохастическую составляющую компоненты скорости частицы. Здесь $y_{ij}(t)$ и y_j^* – наилучшие локальные – lbest и глобальные – gbest позиции этой частицы i находят соответственно только одна частица i и все частицы i этого роя j . Использование коэффициента инерции w_j позволяет повысить качество процесса оптимизации.

Для увеличения скорости нахождения глобального решения в последнее время получили распространение специальные нелинейные алгоритмы стохастической многоагентной оптимизации [33].

Естественно, что формализация решения многокритериальной задачи оптимизации (8) путем сведения ее к однокритериальной задаче (10) позволяет обоснованно выбрать из области компромиссов одну-единственную точку – область Парето [24]–[28].

Однако эта «единственная» точка может быть дополнительно проверена для дальнейшего улучшения схемы компромисса с точки зрения лица, принимающего решение [19]–[20].

В заключение заметим, что алгоритм вычисления скорости частиц (29)–(30) при минимизации по переменной \bar{X} параметров системы электромагнитного экранирования и максимизации по переменной $\bar{\delta}$ параметров неопределенностей проектируемой системы по одной и той же векторной целевой функции (8) описываются одними и теми же вы-

ражениями (29)–(30). Различие состоит лишь в том, что при вычислении переменной \bar{X} для минимизации целевой функции (8) – наилучшие локальные – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальные – gbest y_j^* положения частицы i , которые находятся соответственно только одной частицей i и всеми частицами i роя j считаются позиции, при которых целевая функция принимает минимальные значения. А при вычислении переменной $\bar{\delta}$ для максимизации этой же векторной целевой функции (8) наилучшими локальными – lbest $y_{ij}(t)$ и глобальными – gbest y_j^* положения частицы i считаются такие положения, при которых эта же целевая функция принимает максимальные значения. Такой выбор наилучших положений частиц соответствует движению частиц в направлении антиградиента при минимизации целевой функции по переменным \bar{X} и, соответственно, движению частиц в направлении градиента при максимизации целевой функции по переменным $\bar{\delta}$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проектировании электромагнитного экрана определены координаты пространственного расположения 11 проводников многоконтурного пассивного экрана.

Были так же определены координаты пространственного расположения компенсационной обмотки, а также, ток и фаза в этой обмотке системы активного экранирования.

В отличие от работ [16]–[19] координаты пространственного расположения 11 контуров многоконтурного пассивного экрана вычислены в ходе решения многокритериальной минимаксной задачи оптимизации (8) с ограничениями (9) и для экранирования исходного магнитного поля используется электромагнитный активно-пассивный экран.

Схема расположения двухцепной ЛЭП, компенсирующей обмотки активного экрана и 11 проводников многоконтурного пассивного экрана показаны на рис. 3.

На рис. 4 показано результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана. В центральной части пространства экранирования уровень магнитного поля составляет 2,1 мкТл, в то время как уровень индукции исходного МП в центральной части пространства экранирования составляет 2,4 мкТл. Расчетное значение факто-

ра экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 1,14. При этом наблюдаются характерные области концентрации напряжений в 11 точках расположения проводников контурного пассивного экрана, рассчитанных в процессе проектирования экрана.

На рис. 5 показано распределение индукции результирующего МП при работе только САЭ. В центральной части пространства экранирования уровень индукции результирующего МП составляет 0,43 мкТл так, что расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 5,58.

На рис. 6 показано результирующее МП при работе САЭ. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,29 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 8,2. Применение САЭ позволяет снизить уровень исходного магнитного поля до безопасного для проживания уровня в 0,5 мкТл в существенно большей области пространства экранирования (80,45 %) по сравнению с использованием только активного экрана.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим теперь результаты экспериментальных исследований электромагнитного активно-пассивного экрана. На рис. 7 показана компенсационная обмотка и многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного экрана. На рис. 8 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного активно-пассивного экранирования.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований электромагнитной системы активно-пассивного экранирования.

На рис. 9 вместе с расчетными значениями показаны и экспериментально измеренные значения индукции магнитного поля, генерируемого двухцепной ЛЭП, и индукции результирующего магнитного поля при включенной системе электромагнитного активно-пассивного экранирования.

Экспериментально измеренное минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной электромагнитной системе активно-пассивного экранирования составляет 0,35 мкТл.

Индукция исходного магнитного поля в рассматриваемом пространстве составляет 2,95 мкТл, а при включенной электромагнитной системе активно-пассивного экранирования уровень магнитного поля во всей зоне экранирования не превышает безопасного для проживания уровня индукции в 0,5 мкТл более чем в 70 % пространства экранирования.

Сравнение результатов расчетных и экспериментально измеренных значений индукции исходного и результирующего магнитного поля с включенной электромагнитной системой активно-пассивного экранирования, показанных на рис. 9, отличаются не более чем на 20 %.

Основное преимущество применения электромагнитного экрана заключается в том, что с его помощью можно снизить уровень исходного магнитного поля на значительно большей площади экранирующего пространства по сравнению с использованием только активного экрана.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика проектирования электромагнитного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной части, который характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты, которое создается двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах.

2. Задача проектирования электромагнитного экрана сведена к решению минимаксной векторной задачи оптимизации, в которой векторная целевая функция и ограничения вычисляется с помощью программных средств пакета COMSOL Multiphysics. Решение этой минимаксной векторной задачи оптимизации вычисляется на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений решений локальных критериев.

3. В ходе проектирования электромагнитного экрана для снижения уровня магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах, вычислено расположение 11 контурных пассивных экранов и координаты пространственного расположения компенсационной обмотки, а также ток и фаза в этой обмотке активного экрана.

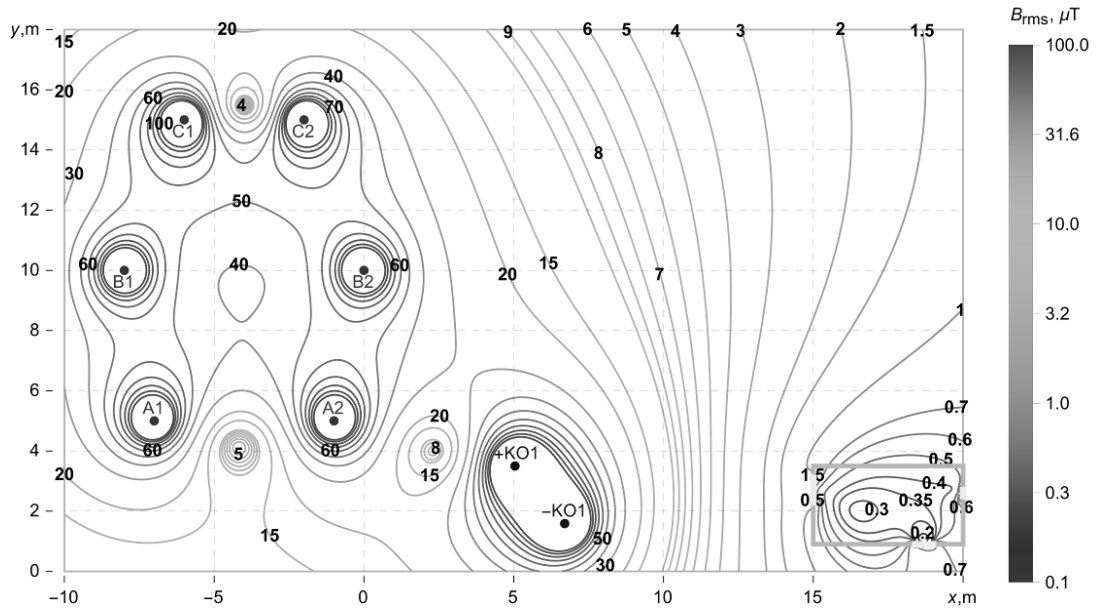


Рис.3. Схема расположения ЛЭП, обмоток активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.³

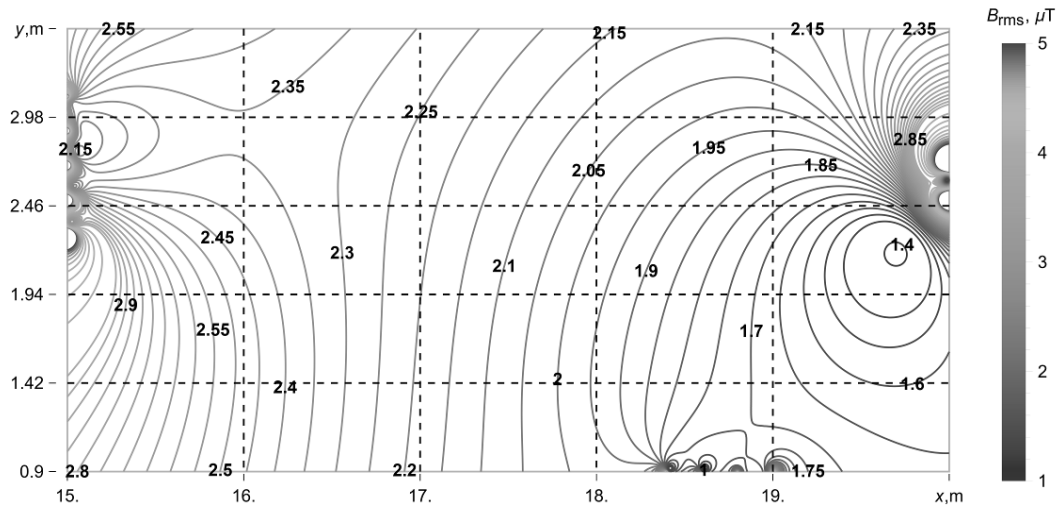


Рис.4. Результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана.⁴

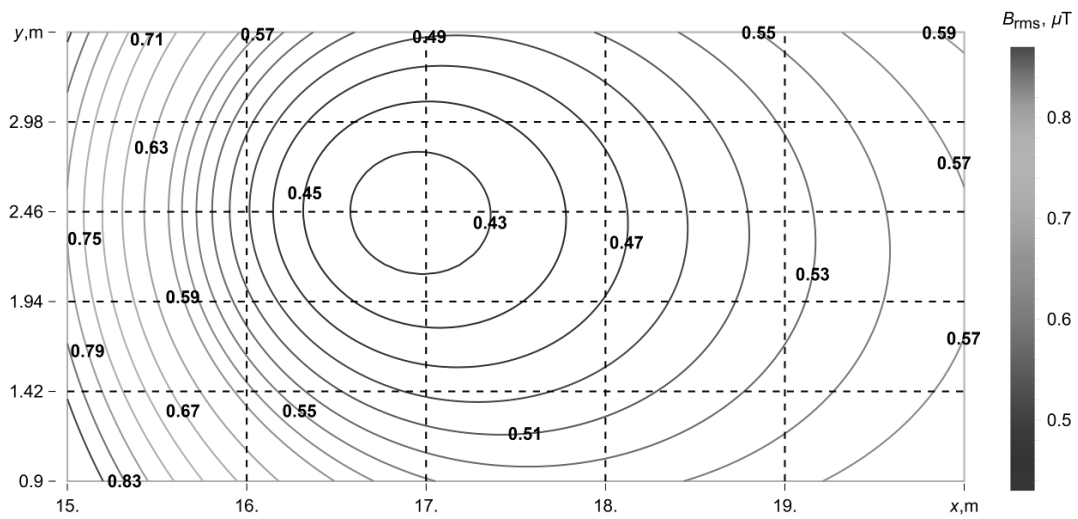


Рис.5. Результирующее магнитное поле при работе только активного экрана.⁵

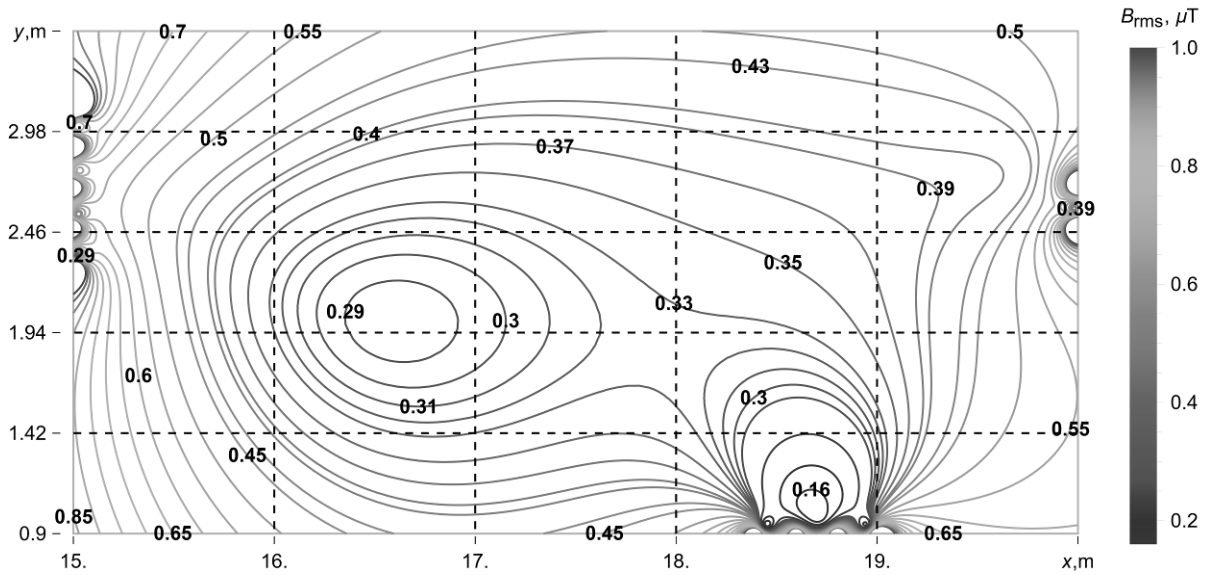


Рис.6. Результирующее магнитное поле при работе гибридного активно пассивного экрана.⁶



Рис.7. Схема расположения обмотки активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.⁷

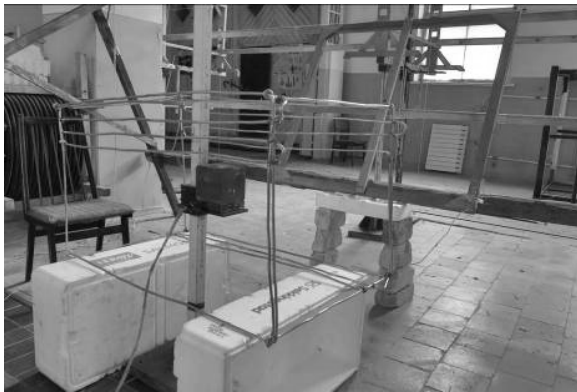


Рис.8. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки электромагнитного экрана.⁸

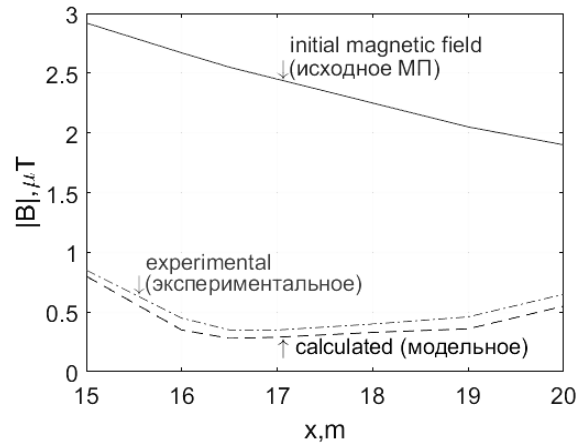


Рис. 9. Сравнение индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования.⁹

4. Основное преимущество применения электромагнитного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной части, заключается в снижении уровня индукции исходного магнитного поля в значительно большей области пространства экранирования, по сравнению с применением только активного экрана.

5. Практическое применение электромагнитного экрана позволяет снизить уровень магнитного поля, генерируемого двухцепными воздушными ЛЭП в жилых домах, до безопасного уровня для населения проживающего вблизи ЛЭП, на уровне до 0,5 мкТл.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

- ¹Fig. 1. An example of residential buildings located near a double-circuit power line.
²Fig. 2. Residential building located near two double-circuit power lines.
³Fig. 3. The relative position of the double-circuit overhead power transmission line, single compensation winding and a shielding space.
⁴Fig. 4. The resulting magnetic field when multi-loop passive shield only.
⁵Fig. 5. The resulting magnetic field when active shield only.
⁶Fig. 6. The resulting magnetic field during operation of the electromagnetic shield.
⁷Fig. 7. The layout of the single winding of the active shield and multiloop passive shield.
⁸Fig. 8. Multiloop passive shield of the experimental installation of electromagnetic shield.
⁹Fig. 9. Comparison of the induction of the initial magnetic field and the magnetic field with the electromagnetic shielding system switched on.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] *The World Health Organization, "The International EMF Project" / Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization // Geneva, Switzerland. – 1996. – 2 p. Available at: <http://www.who.int/emf/> (accessed 23.06.2023)).*
- [2] *Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader (2020). (accessed 28-02-2023).*
- [3] *International Agency for Research on Cancer. IARC Classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as Possibly Carcinogenic to Humans; Press Release No 2008; International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 2011.*
- [4] *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>. (accessed 23.06.2023).*
- [5] *IEEE Standards Coordinating Committee 28. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz. New York, NY, IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002 (IEEE Std C95.6-2002).*
- [6] Ghanim Thiab Hasan, Kamil Jadu Ali, Ali Hlal Mutlaq. The Influence of the Mixed Electric Line Poles on the Distribution of Magnetic Field. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. Vol. 10, No. 2, June 2022, pp. 292–301. ISSN: 2089-3272, doi: <https://doi.org/10.52549/ijeai.v10i2.3572>. (accessed 23.06.2023).
- [7] Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, vol. 56, pp. 97–106. doi: <https://doi.org/10.3233/jae-172286>. (accessed 23.06.2023).
- [8] Canova Aldo, Giaccone Luca. High performance magnetic shielding solution for elf sources. *24th International Conference On Electricity Distribution Glasgow, 12-15 June 2017*. Paper 1029. pp. 1–5.
- [9] Canova Aldo, Giaccone Luca, Cirimele Vincenzo. Active and passive shield for aerial power lines. *25th International Conference on Electricity Distribution*. Madrid, 3–6 June 2019. Paper n°1096, pp.1–5.
- [10] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002. (accessed 23.06.2023).
- [11] Popov, E. Tserne, S. Zhyla, V. Volosyuk, V. Pavlikov, and N. Ruzhentsev. “Invariant polarization signatures for recognition of hydrometeors by airborne weather radars,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13956, 2023, Springer, Cham, pp. 1–14.
- [12] Sushchenko O. “Algorithms for Design of Robust Stabilization Systems,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol.13375, 2022, Springer, Cham, pp. 198–213. doi: 10.1007/978-3-031-10522-7_15. (accessed 23.06.2023).
- [13] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Practical imaging algorithms in ultra-wideband radar systems using active aperture synthesis and stochastic probing signals,” in *Radioelectronic and computer systems*, vol.105, issue 1, 2023, pp.55–73. doi: 10.32620/reks.2023.1.05. (accessed 23.06.2023).
- [14] Havrylenko O., Dergachov K., Pavlikov V., Zhyla S., Shmatko O. “Decision Support System Based on the ELECTRE Method,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 295–304. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2211-4_26. (accessed 23.06.2023).
- [15] Solomentsev O. “Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 69–79. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2211-4_6. (accessed 23.06.2023).

- [16] Shmatko O., Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E. "Synthesis of the optimal algorithm and structure of contactless optical device for estimating the parameters of statistically uneven surfaces," in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 4, 2021, pp. 199–213. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.16>. (accessed 23.06.2023).
- [17] Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. "Optimal Method for Polarization Selection of Stationary Objects Against the Background of the Earth's Surface," in *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 68, issue. 1, 2022, pp. 83–89. doi: <https://doi.org/10.24425/ijet.2022.139852>. (accessed 23.06.2023).
- [18] Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Volosyuk V., Tserne E., Popov A. "Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz, and 94 GHz Frequencies," in *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol. 20, issue 2, 2022, pp. 163–173. doi: <https://doi.org/10.37936/ecti-ec.2022202.246878>. (accessed 23.06.2023).
- [19] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.
- [20] Ray T., Liew K.M. A swarm metaphor for multi-objective design optimization. *Engineering Optimization*, 2002, vol. 34, no. 2, pp. 141–153. doi: <https://doi.org/10.1080/03052150210915>. (accessed 23.06.2023).
- [21] Xiaohui Hu., Eberhart R.C., Yuhui Shi. Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03* (Cat. No. 03EX706). doi: <https://doi.org/10.1109/sis.2003.1202267>. (accessed 23.06.2023).
- [22] Dergachov K., Havrylenko O., Pavlikov V., Popov A., Zhyla S. "GPS Usage Analysis for Angular Orientation Practical Tasks Solving," 2022 *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications*. Science and Technology, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1–6.
- [23] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. "Statistical synthesis of aerospace radars structure with optimal spatio-temporal signal processing, extended observation area and high spatial resolution," in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 1, 2022, pp. 178–194. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.1.14>. (accessed 23.06.2023).
- [24] O.A. Sushchenko and A.A. Tunik, "Robust optimization of the inertially stabilized platforms," in *IEEE 2nd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Ukraine, Kyiv, 2012, pp. 101-105.
- [25] O.A. Sushchenko, "Robust control of platforms with instrumentation," in *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Ukraine, Lviv, 2019.
- [26] O. Sushchenko, F. Yanovsky, O. Solomentsev, N. Kuzmenko, Y. Averyanova, M. Zaliskyi, I. Ostroumov and O. Shcherbyna, "Design of robust control system for inertially stabilized platforms of ground vehicles," in *IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON)*, Ukraine, Lviv, 2021, pp. 6-10.
- [27] Gal'chenko V.Ya. Structural synthesis of attachable eddy-current probes with a given distribution of the probing field in the test zone / V.Ya. Gal'chenko, M.A. Vorob'ev // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2005. – vol. 41, Issue 1, pp. 29–33. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11181-005-0124-7>, doi: <https://doi.org/10.1007/s11181-005-0124-7>.
- [28] Halchenko V.Ya., Ostapushchenko D.L., Vorobyov M.A. Mathematical simulation of magnetization processes of arbitrarily shaped ferromagnetic test objects in fields of given spatial configurations. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2008. – vol. 44, Issue 9, pp. 589–600. <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS10.S1061830908090015>, doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830908090015>.
- [29] Maksymenko-Sheiko K.V., Sheiko T.I., Lisin D.O. Mathematical and computer modeling of the forms of multi-zone fuel elements with plates. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 31-38. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.032>.
- [30] Hontarovskiy P.P., Smetankina N.V, Ugrimov S.V. Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 14-21. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>.
- [31] Kostikov O.V, Zevin L.I., Krol H.H. The optimal correcting the power value of a nuclear power plant power unit reactor in the event of equipment failures. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 40-45. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.040>.
- [32] Rusanov A.V., Subotin V.N., Khoryev O.M. Effect of 3D shape of pump-turbine runner blade on flow characteristics in turbine mode. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 6-14. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.006>.
- [33] Hashim F.A., Hussain K., Houssein E.H., Mabrouk M.S., and Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic

algorithm for solving optimization problems.
Applied Intelligence, 2021, vol. 51, pp. 1531–

1551. doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>. (accessed 23.06.2023).

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез электродинамических систем автоматического управления высокой точности, системы активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0002-1100-095X
E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com



Никитина Татьяна Борисовна
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез систем автоматического управления повышенной точности.
ORCID: 0000-0002-0185-3078
E-mail: tatjana5555@gmail.com



Бовдуй Игорь Валентинович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез электромеханических систем автоматического управления высокой точности, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



Волошко Елена Владимировна
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: синтез автоматизированных систем управления высокой точности.
ORCID: 0000-0002-6931-998X
E-mail: vinichenko.e.5@gmail.com



Чунихин Константин Вадимович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: моделирование электромагнитных процессов, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0001-9822-5870
E-mail: kvchunikhin@gmail.com



Добродеев Павел Николаевич
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез систем автоматического управления высокой точности, синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0002-2648-0319
E-mail: Dobrodeyev@nas.gov.ua

Segmentation of Images Used in Unmanned Aerial Vehicles Navigation Systems

Yeromina N.¹, Udovenko S.², Tiurina V.³ Boychenko O.⁴, Breus P.⁵, Onishchenko Yu.⁶, Gnusov Yu.⁶, Svitlychnyi V.⁶

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

² Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

³ Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine

⁴ State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Cherkasy, Ukraine

⁵ Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

⁶ Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The paper presents the results of the study of a two-stage procedure for selecting a reference object in the current image formed by a correlation-extreme system used for autonomous navigation of unmanned aerial vehicles. The aim of this paper is to theoretically evaluate the probability of selecting low-dimensional low-contrast objects in the segmented current image according to the proposed two-stage procedure. To achieve this goal, the problem of segmentation of images of the sighting surface and subsequent selection of the reference object in the presence of heterogeneous objects differing in brightness and area characteristics is solved. The most significant result is the justification of application of two-stage procedure of selection of the reference object in the current image by brightness and area parameters using the set thresholds. The significance of the obtained results consists in establishing the dependence of the probability of correct selection of the reference object on the noise level of the current images. It is shown that the probability of correct selection of the object in the image is a function of the threshold value and can be maximised by choosing its value. This approach allows to consider the influence of various factors leading to image noise on the quality of images formed by the navigation system. It is shown that when noise distorts more than 31% of the image pixels, the proposed two-stage procedure allows to ensure the selection of the reference object in the image with a probability not lower than 0.9.

Keywords: correlation-extremal navigation system, unmanned aerial vehicles, information features, image segmentation method, decision function.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.03>

UDC: 62-758.381

Segmentarea imaginilor utilizate în sistemele de navigație de vehicule aeriene fără pilot

Eromina N.S.¹, Udovenko S.G.², Tiurina V.Yu.³, Boychenko O.I.⁴, Breus P.P.⁵, Oniscenko Yu.N.⁶, Gnusov Yu.V.⁶, Svetlicinai V.A.⁶

¹ Universitatea Națională de Radio Electronică din Harkiv, Harkiv, Ucraina

² Universitatea Economică Națională Semyon Kuznets Harkov, Harkiv, Ucraina

³ Universitatea Națională a Forțelor Aeriene din Kharkiv, numită după Ivan Kozhedub, Harkiv, Ucraina

⁴ Institutul de Cercetare de Stat pentru Testarea și Certificarea Armelor și Echipamentelor Militare, Cherkasy, Ucraina

⁵ Academia de Zbor a Universității Naționale de Aviație, Kropyvnytskyi, Ucraina

⁶ Universitatea Națională de Afaceri Interne din Harkiv, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Articolul prezintă rezultatele unui studiu al unei proceduri în două etape de identificare a unui obiect de referință într-o imagine curentă generată de un sistem de corelație-extremă utilizat pentru navigarea autonomă a vehiculelor aeriene fără pilot. Scopul acestei lucrări este de a estima teoretic probabilitatea de selecție a obiectelor de dimensiuni mici, cu contrast scăzut într-o imagine curentă segmentată, în conformitate cu procedura propusă în două etape. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost rezolvată problema segmentării imaginilor suprafeței de vizualizare și a selectării unui obiect de referință care diferă ca luminozitate și caracteristicile zonei. Cel mai important rezultat este motivarea utilizării unei proceduri în două etape pentru selectarea unui obiect de referință din imaginea curentă pe baza parametrilor de luminozitate și a dimensiunilor zonei folosind praguri stabilite. Semnificația rezultatelor obținute constă în stabilirea dependenței probabilității de selecție corectă a obiectului ancoră de gradul de zgomot din imaginile curente. Se arată că probabilitatea de selecție corectă a unui

obiect dintr-o imagine este o funcție a valorii de prag și poate fi maximizată prin alegerea valorii acestuia. Această abordare ne permite să luăm în considerare influența diversilor factori care duc la zgomotul imaginii asupra calității imaginilor generate de sistemul de navigație. Se arată că atunci când mai mult de 31% dintre pixelii imaginii sunt distorsionați de zgomot, utilizarea procedurii propuse în două etape face posibilă selectarea obiectului ancora în imagine cu o probabilitate de cel puțin 0.9.

Cuvinte-cheie: sistem de navigație de tip corelație-extrem, vehicule aeriene fără pilot, caracteristici informaționale, metoda de segmentare a imaginii, funcție de decizie.

Сегментация изображений, используемых в системах навигации беспилотных летательных аппаратов

Еремина Н.С.¹, Удовенко С.Г.², Тюрина В.Ю.³, Бойченко О.И.⁴, Бреус П.П.⁵, Онищенко Ю.Н.⁶, Гнусов Ю.В.⁶, Светличный В.А.⁶

¹ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

² Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

³ Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина

⁴ Государственный научно-исследовательский институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники, Черкассы, Украина

⁵ Летная академия Национального авиационного университета, Кропивницкий, Украина

⁶ Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков, Украина

Аннотация. В статье представлены результаты исследований двухэтапной процедуры выделения объекта привязки на текущем изображении, формируемом корреляционно-экстремальной системой, применяемой для автономной навигации беспилотных летательных аппаратов. Целью данной работы является теоретическая оценка вероятности селекции малоразмерных слабоконтрастных объектов на сегментированном с помощью информационных признаков текущем изображении по параметрам яркости и размерам площади в соответствии с предложенной двухэтапной процедурой. Для достижения поставленной цели решена задача сегментации формируемых системой навигации изображений поверхности визирования и последующей селекции объекта привязки при наличии разнородных объектов, отличающихся яркостными и площадными характеристиками. Наиболее существенным результатом является обоснование применения двухэтапной процедуры селекции объекта привязки на текущем изображении по параметрам яркости и размерам площади с использованием установленных порогов. Значимость полученных результатов состоит в установлении зависимости вероятности селекции объекта привязки от степени зашумленности текущих изображений. Особенность полученных результатов заключается в определении значений порогов квантования изображений по информативным признакам с учетом возможности возникновения ошибок первого и второго рода, при которых обеспечиваются требуемая вероятность селекции объекта привязки. Показано, что вероятность селекции объекта на изображении является функцией величины порога и может быть максимизирована выбором его значения. Такой подход позволяет учитывать влияние различных факторов, приводящих к зашумлению изображений, на качество формируемых системой навигации изображений за исключением геометрических, что позволяет упростить этап первичной обработки и повысить быстродействие системы. Показано, что при искажении более 31% пикселей изображения применение предлагаемой двухэтапной процедуры позволяет обеспечить селекцию объекта привязки на изображении с вероятностью не ниже 0,9. Отличие от известных работ заключается в осуществлении селекции объекта привязки на текущем изображении с использованием двухэтапной процедуры по значениям яркости и площади объектов в условиях, приводящих к формированию зашумленных изображений.

Keywords: корреляционно-экстремальная система навигация, беспилотные летательные аппараты, информационные признаки, сегментация изображений, селекция объекта.

INTRODUCTION

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are used for monitoring hard-to-reach surface areas at a considerable distance. They are extensively used in the military search and rescue operations, in assessing the degree of destruction of various objects on land and water. Therefore, it is necessary to further improve navigation systems, the functioning of which is based on the extraction of information about the objects of sighting in various conditions. These tasks are

most effectively solved by UAVs equipped with correlation-extreme navigation systems (CENS). The functioning of these systems is based on the comparison of two-dimensional images formed by different sensors depending on the physical nature of the signals with the reference images (RI) prepared in advance and stored in the memory of the onboard computer [1]. In these systems, the review-comparative method of forming the solving function is implemented. It characterizes the degree of deviation of the true

location of the navigation object from the specified one [1, 2]. CENS functioning is mainly determined not by the type of signals used, but by the quality of information support based on the processing of informative features of sighting objects [1, 3, 4]. Low quality of information support is the reason of discrepancy between the current images (CI) formed during monitoring and preformed reference images [1, 2]. The information support depends on the conditions of image acquisition, especially identical conditions of obtaining the initial information during the formation of reference and current images, the presence in some cases of many heterogeneous and similar objects [2, 4]. The consequence of the mismatch of the compared images is a decrease in the accuracy characteristics of the navigation system, which necessitates the elimination of possible mismatch. A possible direction of eliminating such inconsistency is to reduce the influence factors both at the stage of CI formation and development of the algorithms of primary and secondary processing of CENS [1, 5]. In addition, the principles of CI formation onboard the UAV should be like the principles of RI formation. Considering the time constraints caused by the UAV flight speed and geometrical conditions of sighting (low altitude), the process of CI formation and its comparison with RI should be operative. This circumstance requires consideration of computational and time costs and imposes restrictions on the use of appropriate stable information features (invariants) about the objects of the sighting surface (SS) [1, 2]. Considering these factors necessitate further development of image segmentation methods for selection of navigation landmarks on CI as applied to CENS. A considerable number of publications are devoted to the development of methods and algorithms of image formation and processing based on various segmentation methods and algorithms. However, these publications do not consider the mentioned peculiarities of the construction and functioning of CENS used on UAVs, as well as the characteristics and peculiarities of the description of SS objects depending on the type of the geophysical field used to obtain the initial information about the objects [1]. Therefore, the task of sighting surface image segmentation and selection of the reference object in the images formed and used in CENS in the presence of many heterogeneous objects that differ in brightness and area characteristics

is important and requires the search for new solutions.

I. PUBLISHED LITERATURE ANALYSIS

Abdollahi A. & Pradhan B. (2021) proposed an integrated method for road extraction in images, characterised by the ability to extract roads even in the presence of obstacles with the same colour and spectrum values as the road class. The disadvantage of the proposed method is that it is multi-stage and selects a single class of objects of interest.

Bakhtiari H. R. R., Abdollahi A., Rezaeian H. (2017) improved a method for road extraction in images using Canny method for boundary extraction, followed by merging adjacent segments, classification using support vector method and mathematical morphology techniques. The method is characterised by high accuracy but is effective for a single class of objects.

Senthilnath J., Rajeshwari M., Omkar S. N. (2009) developed a normalised cut method for automatic road detection. In the first stage, unwanted objects are removed and in the second stage, road segments are extracted using progressive image texture analysis and graph-based method.

Singh P. P. & Gard R. D. (2013) They demonstrated an image segmentation method for extracting extended objects. Its essence consists in applying adaptive thresholding and further using morphological operators. However, the method does not consider noise and texture component of the image.

Grinias I., Panagiotakis C., Tziritas G. (2016) have developed a method of automatically selection buildings and roads in images. The method has a high speed of object classification. But it allows to select objects of interest only in Red-Green-Blue (RGB) images.

Li X., Li T., Chen Z. et al. (2022) applied attention modules that collect contextual information while processing all pixels of an image for semantic image segmentation. The proposed approach has high boundary extraction accuracy but is characterised by high computational and time costs.

Kit O., Lüdeke M., Reckien D. (2012) proposed to use a line detection algorithm on satellite images to generate a binary dataset for further lacunarity analysis. The disadvantage of the method is processing not the whole image at once, but sequentially by a grid of a certain size.

Zhao S., Wu H., Tu L., Huang B. (2014) showed the use of vector model of geometric primitives to mark spatial objects in the image. The advantage of the development is thematic segmentation of images of urban areas, and the disadvantage is the transition from raster format of data storage to vector format and subsequent storage of vector data in graphics.

Pan Z., Xu J., Guo Y., Hu Y., Wang G. (2020) proposed a method based on U-net deep learning architecture. The method is characterised by good building extraction in high population density images. The disadvantage of the method is training and testing on urban village plots and availability of vector file of building boundaries.

Mhangara P., Odindi J. (2013) proposed to use texture information to identify objects of interest. The essence of the method is to apply spectral features and object-oriented texture features of Haralick for thematic segmentation and classification of urban land use. The disadvantage of the method is certain difficulties in recognising spectra between several types of objects.

Körting T. S., Fonseca L. M. G., Dutra L. V., Silva F. C. (2010) proposed a re-segmentation method. Its essence is to use a preliminary already over-segmented image as a source image to obtain a new set of objects of interest. The disadvantage of the method is the possible variant of non-fused objects for further analysis.

Dikmen M., Halici U. (2014) developed a two-stage re-segmentation method. The advantage of the method is the post-processing of the image to eliminate some false object segments, and the disadvantage is the presence of some error in assigning shadow segments to the object.

Pandey S. & Khanna P. (2014) They proposed a hierarchical approach to semantic clustering of images. The disadvantage of the approach is the loss of information that a representative image denotes any other image belonging to a cluster. To automatically obtain the total number of clusters, this loss of information is tracked, which is an advantage.

Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y.J. (2015) proposed the image segmentation using subtractive clustering. The advantage of the method is to apply a median filter after k-means algorithm to the resulting image to remove the "unwanted" region in the given image. The disadvantage of the approach is the presence of

many "unwanted" regions after subtractive clustering.

To eliminate the drawback regarding the dependence of clustering results on the initial selection of cluster centres, Dao N., Anh D. N. (2015) developed unsupervised segmentation method by incremental clustering. The computational complexity of the approach is compensated by the unnecessary determination of the initial number of clusters and the avoidance of re-clustering the whole image when the number of clusters increases.

Niharika K., Adeeba H., Krishna A. S. R., Yugander P. (2017) proposed an image segmentation method based on k-means and Otsu thresholding clustering methods. The use of the median filter allowed obtain good results of image segmentation with available speckle noise, but only for radar images of the radar.

For segmenting colour images, Zheng X., Lei Q., Yao R., et. al. (2018) developed an adaptive k-means clustering method without prior introduction of the number of clusters. This method features reduced light influence on segmentation results, segmentation of colour images of different colour representation models and adaptive selection of the number of clusters. The disadvantages are the impossibility of universal clustering of tone and colour images, as well as the need to represent colour images in the LAB colour model.

Shah N., Patel D., Fränti P. (2021) performed image segmentation by k-means algorithm using Mumford-Shah model. When using k-means algorithm for colour quantization in colour models of image representation, pixels are grouped into clusters only in colour space. The method allows optimising both the shape of segments and their content.

Abeyasinghe W., Wong M., Hung C.-C., Bechikh S. (2019) proposed a multi-objective evolutionary clustering algorithm to find optimal cluster centres. The efficiency of the algorithm depends on the choice of the target function, i.e., maximising the inter-cluster distance or minimising the intra-class compactness. The advantage is the generation of a set of "non-dominated" solutions no longer under consideration during the algorithm. The disadvantage of the algorithm is the dependence of its efficiency on the choice of the target function.

The results of analysing the segmentation methods of the most closely represented images in CENS in compressed form are shown in Table 1.

Table 1.

Analysis of segmentation methods.

Name	Advantages	Disadvantages
The k-means method	The segmentation process takes place without prior training. Easy to implement.	Additional processing of the obtained homogeneous areas is required.
Method of emphasising boundaries	The result of segmentation is similar to the results of segmentation by an expert. Easy to implement. High speed performance.	Sensitivity to noise. Difficulty in working with low-contrast images. Additional processing of the results is required.
Break and merge method	Utilises information about the spatial characteristics of points in the image. Excellent results on images with few homogeneous areas.	Sensitivity to the effects of noise. Difficulty in determining unambiguous signs of homogeneous areas.
Segmentation method based on physical properties of objects	Excellent results when the correct object model is selected. Resistant to noise and image defects.	Complexity of segmentation algorithms. Requires initial information about the shape of objects.
Graph theory method	Fast segmentation algorithms are used.	Local point features are more important than global area features. Difficulty in determining weights of graph nodes and branches.

Thus, the analysis has shown that although there are a significant number of image segmentation techniques, they have limited application depending on the specific task and cannot be directly applied in CENS.

METHODS, RESULTS AND DISCUSSION

In accordance with the approaches adopted in [1 – 5], the decision function formed by CENS at a point in time t by comparing the current and reference images is of the form:

$$\mathbf{R}(\mathbf{r}, t, \theta, \theta_i) = \mathbf{F}_{sp}(\mathbf{S}_{ci}(\mathbf{r}, t, \theta), \mathbf{S}_{ri}(\mathbf{r}, \theta_i)), \quad (1)$$

where \mathbf{F}_{sp} is an image comparison operator;

$\mathbf{S}_{ci}(\mathbf{r}, t, \theta)$ is a current image obtained for the sighting angle of view θ at the moment of time t ;

$\mathbf{r} = \|r_i\| = \|x \ y\|^T$ are coordinates of the georeferencing area;

$\mathbf{S}_{ri}(\mathbf{r}, \theta_i)$ is reference image formed in advance for one of the sighting angles θ_i .

The current image is represented by brightness values of objects and backgrounds of the viewed surface in resolution elements:

$$\mathbf{S}_{ci} = \|S(i, j)\|, \quad (2)$$

where,

$$S(i, j) = \begin{cases} S_v(i, j), & \text{when } S(i, j) \in \mathbf{S}_v; \\ S_w(i, j), & \text{when } S(i, j) \in \mathbf{S}_w; \end{cases} \quad (3)$$

$S_v(i, j)$ is the brightness of the image element v -th of the object \mathbf{S}_v ;

$S_w(i, j)$ is brightness of the image element w -th of background \mathbf{S}_w ;

V and W are the numbers of objects and backgrounds of different brightness and shape in the original image.

The RI is also described by a matrix of brightness values of corresponding pixels:

$$\mathbf{S}_{ri} = \|S_{ri}(m, l)\|, \quad m = \overline{1, M}, \quad l = \overline{1, L},$$

where M, L are dimensions of RI.

Model (1) does not explicitly consider the influence of various factors on the formation and processing of CI. Such factors as daily, seasonal, and meteorological conditions, the use of masking

materials on objects, object saturation, attenuation of signals on the propagation path from the object to the receiving device (for passive systems), additive noise of the sensor of received signals, interpixel, perspective and scale distortions [4]. Depending on the type of sensor, its operating frequency, the influence of several factors may have different significance. To a lesser extent it concerns radar, relief and radiometric sensors, as they operate in the long-wave part of the millimeter and short-wave part of the centimeter range. But on sensors operating in the visible range, the influence of factors is much higher. At the same time on the formed image irrespective of sensor type object saturation, electrophysical and area characteristics of objects and backgrounds, and interpixel and geometrical distortions essentially influence. These factors can lead to a reduction and blurring of the contrasts of the object-background pair, and, consequently, to a decrease in the signal-to-noise ratio in the image. As a result, it will lead to erroneous selection of the object of reference in the image.

Problem Statement. The UAV equipped with CENS is supposed to be used in the conditions of developed infrastructure, where there are objects with insignificant differences in brightness and geometric characteristics. Erroneous determination of the object of reference on the CI will inevitably lead to a decrease in the accuracy and probability of UAV location, and when controlling the state of objects, for example, in their destruction – to an erroneous assessment of the degree of destruction.

CI model. Let us use the CI model "object on background" [1, 2], considering that the object is in the viewing area and has a stable contrast with respect to the surrounding background [1, 2], assuming that the object is in the viewing area and has a stable contrast with respect to the surrounding background.

Due to the instability of the brightness of individual elements of the underlying surface and the contrast between the object and the background, we will assume that the CI is defined by the contrast sign of the object and its geometric shape, i.e., as a binary image. The elements of the object correspond to the values 1, and the elements of the background correspond to the values 0. We will solve the problem under the following assumptions and constraints:

- 1) the background is formed by signals of the surface area, and the object has a negative contrast with respect to the background;
- 2) the object is homogeneous in brightness;

3) the background around the object has the same property;

4) each ij -th CI element is a normally distributed value with dispersion σ_{ij}^2 and average brightness value $S(i, j)$, which in the absence of interference can take two values: $S_v(i, j)$ and $S_w(i, j)$;

5) the noise dispersion in the receiving channels of CENS is the same, i.e. $\sigma_{ij}^2 = \sigma^2$.

Let us denote the contrast of the sought object with respect to the surrounding background by $\Delta S = S_v(i, j) - S_w(i, j)$. Then the brightness distribution densities of the background and the object are defined by the expressions [4]:

$$w_w(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(S - S_w)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

$$w_v(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(S - S_v)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (5)$$

For the considered CI models and object and background brightness distributions, it is required to solve the problem of CI segmentation. Its use will provide a high probability of selecting the object of reference. In its turn, it will allow to obtain the minimum error of CENS binding $\Delta \mathbf{R}(\mathbf{r}, t, \theta, \theta_i) \rightarrow \min$, and in the case of estimation of the object destruction degree - its high accuracy.

Problem solution. The use of brightness and geometric features for segmentation of CI SS with the presence of poorly distinguishable small-sized and low-contrast objects leads to the necessity of combining two stages of object selection: by geometric dimensions and by brightness. Suppose that there are no variations of brightness values within a pixel of homogeneous zones [1]. The brightness values of neighboring objects differ insignificantly, but the sensitivity of sighting sensors allows to distinguish them.

According to these conditions, it is necessary to develop an algorithm for image segmentation using brightness and geometric features, which will provide a high probability of selecting the desired object. Let's consider that as geometric features of objects their area is used. The step-by-step process of selection of objects by the selected feature will be carried out in accordance with the selected value of quantization threshold. The threshold values will be chosen in such a way as to select the object in the background

considering the presence of similar objects.

At the first stage of object selection by brightness indicator, let's represent CI in the form of image matrix sweep by rows, resulting in a sample of volume J_0 . Let J_ρ is the number of cells in the frame with signals from a similar object. Then

$$J_\rho + J_v + J_w = J_0, \quad (6)$$

where J_0 is the total number of frame elements that have fallen into the field of view;

J_v , J_w is the number of frame elements occupied by the anchor object and the background. Mutually incompatible events, consisting in belonging of the sample element to the signal of the background, anchor object and similar object, form a complete group. Consequently, the obtained sample is divided into three non-intersecting classes ω_i corresponding to signals from the background (ω_w), similar object (ω_ρ) and anchoring object (ω_v). Taking this into account, the sampling distribution density J_0 is defined by the expression [7]:

$$w(S) = \sum_{i=1}^3 p_i w_i(S), \quad (7)$$

where $p_i = J_i/J_0$, ($i = 1, 2, 3$) are apriority class probabilities;

$w_i(S) = w(S | \omega_i)$ are conditional probability densities of the random variable S , if it belongs to the class ω_i , which are defined by expressions (4), (5).

Thus, the sample consisting of elements of three classes should be divided into two classes to optimally separate the signals of the object from the background signals with respect to the quality indicator to be further specified.

We consider the threshold l of quantization of the sample into two classes to be known. To one of them belong the signals of the object, to the other – the background. Then considering expressions (4), (5) probabilities of errors of the first (second) kind (when the signal belonging to the first (second) class refers to the second (first) class are defined by expressions [5]:

$$\alpha = \int_{S_w-l}^{\infty} w_v(S) dS, \quad (8)$$

$$\beta = \frac{l}{l+V} \int_{-\infty}^{S_w-l} [w_\rho(S) + S w_w(S)] dS, \quad (9)$$

where $V = p_\rho/p_w$.

For a given threshold l , we convert the original \mathbf{S}_{CI} image into a binary image \mathbf{H} by the rule:

$$\mathbf{H}_i = \begin{cases} 1, & S_i \leq S_\rho - l; \quad S_i > S_{\max}; \\ 0, & S_{\max} > S_i > S_\rho - l; \end{cases}$$

$$i \in \overline{1, F_0}$$

Let us estimate the probability of selecting an object in the image as follows. Let the size of the object be $T_1 \times T_2$ cells. Let us partition the CI matrix into rectangular submatrices $T_1 \times T_2$. If at such a partitioning of the CI it does not contain an integer number of cells with the object, then increase the frame size to contain an integer number of submatrices $T_1 \times T_2$, which we denote by $K+1$. In this case, the estimates of the probability of selection of the object on the CI are underestimated due to the frame enlargement. Let us assume that the true position of the object falls into one of the submatrices and denote by $\mathbf{H}^0 \subset \mathbf{H}$ the fragment of the CI corresponding to the RI, and by $\mathbf{H}^i, i \in \overline{1, K}$ the fragments located in the other submatrices.

Let the probability of occurrence 1 in \mathbf{H}^i is equal to r_i . For comparison of fragments \mathbf{H}^i with RI consisting of 1, it is more convenient to operate with numbers:

$$z_i = J_v - s_i, \quad i \in \overline{0, K}, \quad (10)$$

each of which represents the number of units in the fragment \mathbf{H}^i . In (10), J_v is the number of elements of the object.

With this in mind, the decisive rule will be that the fragment $\mathbf{H}^j \subset \mathbf{H}$, for which:

$$z_j = \sup_{i \in \overline{0, K}} z_i, \quad (11)$$

is declared to coincide with RI according to this information feature.

Then the numbers z_i are distributed according to the binomial law:

$$P(z_i) = C_{J_v}^{z_i} r_i^{z_i} (1-r_i)^{J_v-z_i}, \quad z_i \in \overline{0, J_v}. \quad (12)$$

The probability of object selection when using the solving rule (11) is equal to the probability that the number of ones z_0 , corresponding to a match between the RI and the object, exceeds all other numbers $z_i, i \in \overline{1, K}$. Let us denote by A_0^j the event consisting in the appearance of $z_0 = j \in \overline{1, J_v}$ ones in \mathbf{H}^0 , and by $A_i^j, i \in \overline{1, K}$ - the event consisting in the fact that the number of ones z_i will not exceed $j-1$. The events $A_i^j, i \in \overline{1, K}$ are independent in aggregate, since $H^i \cap H^k = \emptyset \forall i, k \in \overline{0, K}$. According to formula (11), the probabilities of events A_i^j are defined by the expressions:

$$P(A_i^j) = \begin{cases} C_{J_v}^j r_0^j I - r_0^{J_v-j}, & i = 0; \\ \sum_{k=1}^{j-1} C_{J_v}^k r_i^k I - r_i^{J_v-k}, & i \in \overline{1, K}. \end{cases} \quad (13)$$

where $C_{J_v}^k$ are binomial coefficients.

Then by the probability multiplication theorem the probability of the event $L_j = \bigcap_{i=0}^K A_i^j$ is equal to:

$$P(L_j) = \prod_{i=0}^K P(A_i^j), j \in \overline{1, J_3}.$$

Since the events $L_j, j \in \overline{1, J_v}$ in the aggregate are inconsistent, the probability that the number of ones \mathbf{H}^0 in exceeds the number of ones in all other fragments \mathbf{H}^i , will be determined as follows:

$$P_s = \sum_{j=1}^{J_v} P(L_j) = \sum_{j=1}^{J_v} \prod_{i=0}^K P(A_i^j), \quad (14)$$

where the probabilities $P(A_i^j)$ are defined by formulae (12). Given that:

$$r_i = \begin{cases} 1 - \alpha, & i = 0; \\ \beta, & i \in \overline{1, K}, \end{cases}$$

(probabilities α, β are given by relations (8), (9)), for the probability of object selection by brightness we obtain the final expression:

$$P_s = \sum_{j=1}^{J_3} C_{J_\theta}^j (1 - \alpha)^j \alpha^{J_v-j} \left[\sum_{k=0}^{j-1} C_{J_v}^k \beta^k (1 - \beta)^{J_v-k} \right]^K. \quad (15)$$

According to expressions (4 - 8), we write down:

$$\alpha = \alpha(l') = \int_{S_{\omega-l'}}^{\infty} w_v(S) dT = 1 - \Phi \quad q - l' ; \quad (16)$$

$$\beta = \beta(l') = \frac{1}{1 + S} [\Phi(-l') + S e^{-\lambda l'}], \quad (17)$$

where $l' = l/\sigma$ is relative threshold;

$$\lambda' = \lambda \sigma.$$

At the first stage of object selection on CI, the influence of perspective distortions caused by sighting geometry is not considered. Therefore, at the second stage of object selection by area it is necessary to consider the possibility of occurrence of errors of the first and second kind caused by distortion of geometrical shape of objects depending on the sighting angles [3].

The use of the object area as an information feature is convenient, because when changing the geometry of sighting, it is not the area that changes, but only the shape of the object. Consequently, it is possible to simplify the process of CI formation because there is no need to perform affine transformations.

By analogy with the first stage, at the second stage the errors of the first and second kind will be determined in accordance with analytical expressions:

$$\alpha_1 = S_1(G_s(x))/S_2(G(x)), \quad (18)$$

$$\beta_1 = 1 - S_3(G_s(x))/S_4(G(x)), \quad (19)$$

where $S_1(G_s(x))$ is background area erroneously attributed to the object in the segmented image $G_s(x)$;

$S_2(G(x))$ is background area of the segmented image $G(x)$;

$S_3(G_s(x))$ is area of correctly selected objects in segmented image $G_s(x)$;

$S_4(G(x))$ is area of the object in the segmented image $G(x)$.

In this approach to the implementation of object selection in the background, the connectivity of adjacent pixels in the image $G(x)$ is taken into account [6].

Let us consider the principles of threshold processing in this case. At the first stage quantisation is performed using thresholds $L_m, m = \overline{1, M}$. Each quantisation threshold has a corresponding size of objects $S_k, k = \overline{1, K}$. As a result, a certain set of slices is formed according to the selected threshold L_{m_i} . On them, the objects having the corresponding area will be segmented and the better objects will be selected. In fact, each individual slice is a matrix with the corresponding pixel value. The area that has the larger number of pixels is the object being searched for on the CI. As a criterion for selecting an object on the CI, we choose the total relative area index. The matrices S_i are element by element combined with each other. As a result, the final matrix S_Σ will be a set of independent samples in the form of integral area indices. The element $S_{ij\Sigma}$ with the largest number of pixels is considered to be the result of the presence of the selection object in the matrix S_Σ .

The probability of object selection on the image P_c does not depend on the results of correlation-extreme processing for other segmentation thresholds. Consequently, the resulting probability of selection of the sought object on CI will be determined according to the expression:

$$P_{c\Sigma} = 1 - (1 - P_c)^K = 1 - \left[(1 - P_{c_1})(1 - P_{c_2}) \dots (1 - P_{c_k}) \right], \quad (20)$$

where P_{c_i} is probability of object selection at the i -th step.

Using formula (15) we can calculate the probability of object selection in the image, which increases with each step. This is explained by the increase in the signal-to-noise ratio of the image.

It can be shown that the value of the signal-to-noise ratio of the image q , taking into account errors of the first and second kind, when the required value of the probability of selection of

the object in the image takes place, on the basis of the maximum likelihood method using expressions (16 – 17) will be determined by the formula [7]:

$$q = \Phi^{-1}(1 - \alpha) + \Phi^{-1}(1 - \beta), \quad (21)$$

where $\Phi(x)$ is Laplace integral.

The probability of exceeding the threshold for each step is defined as:

$$P(k \geq K_L) = \sum_{k=m}^n C_{j,n}^{j,k} \beta^k (1 - \beta)^{n-k}. \quad (22)$$

At large values k , the binomial distribution is approximated by a Gaussian distribution.

Thus, based on the above, image segmentation has been proposed to carry out in two stages. The latter include a sequence of the following operations:

1. Estimation of the characteristics of the original image by segmentation features.
2. Selection of the feature type.
3. Selection of objects according to the selected features.
4. Formation of a set of segmented images.

As an indicator of the segmentation method efficiency, we will use the probability of correct image segmentation and selection of the binding object. Therefore, it is sufficient to use relations (15) and (20) to estimate the efficiency of segmentation. This approach allows us to consider the influence of various factors that lead to image noise on the quality of image formation and the evaluation of the effectiveness of CENS functioning.

According to the above approach to image segmentation used in UAV CENS, the structure of the image segmentation algorithm using luminance and geometry will have the form shown in Fig. 1.

Modelling results.

Let us choose a radio-metric receiver as the CENS sensor. Using the zone model of the image, by processing the aerial image of the reference area, a matrix of numbers is constructed, the elements of which characterise the distribution of radio brightness temperatures of the given area.

In this matrix, a rectangular $M_1 \times M_2$ -submatrix of RI is selected, including the object

and some area around it. The matrix should not contain $M_1 \times M_2$ -submatrices "similar" to the RI.

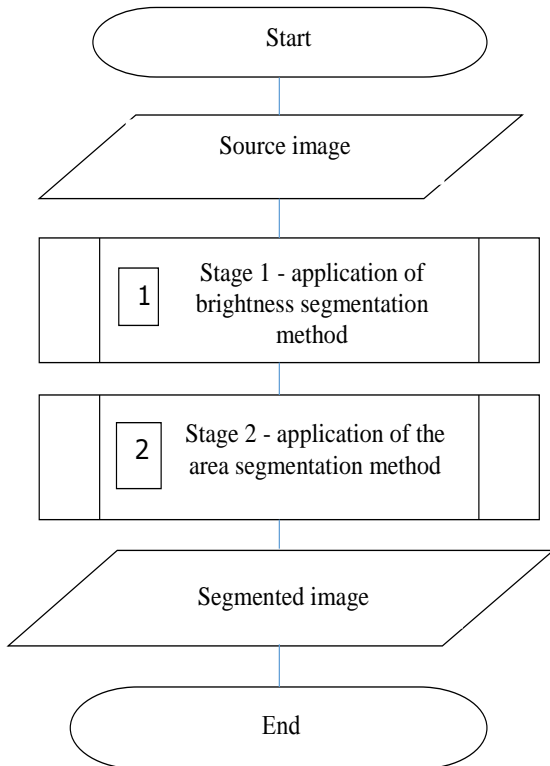


Fig. 1. Structure of the algorithm for image segmentation using bright and geometric features.

This means that the coefficient of mutual correlation of these submatrices with RI exceeds a certain threshold, so that a priori not to reduce the probability of correct selection of the object. In the initial matrix, the $N_1 \times N_2$ -submatrix of the unnoised CI containing RI is selected. The coordinates of the upper left corner of the RI matrix in the CI matrix i_{op}, j_{op} represent the estimated parameter. The principle of CI and RI modelling implicitly assumes that:

1) the grids of RI and CI coincide, i.e. there is no need to shift RI within half-width of the resolution element;

2) there is no rotation of RI relative to CI.

To simulate the noise component in the image caused by the noise of the radiometric channels, a normally distributed value with zero mean and variance σ^2 is added to each element of the modelled image (for simplicity, the noise variance of all channels is chosen to be the same). This completes the modelling part of the algorithm.

Modelling conditions:

- RI matrix: 15×15 elements;

- information content: binary image, object is formed by "1", background is "0";
- object size: 5×5 elements;
- shape of the object is a square of dimension 3×3 ;
- CI matrix: 8×8 elements;
- information content: binary image, object is formed by "1", background is "0";
- object matrix: 3×3 elements;
- object shape: the object is inscribed in a square matrix.

The total number of realisations processed in the series of realisations used to calculate one value of the probability of correct selection of an object in a segmented image P_c was $N_z = 400$.

Figures 2 – 7 show the results of the estimation of the object selection performance on the segmented image for two values of the signal-to-noise ratio $q = 0$ and $q = 4$.

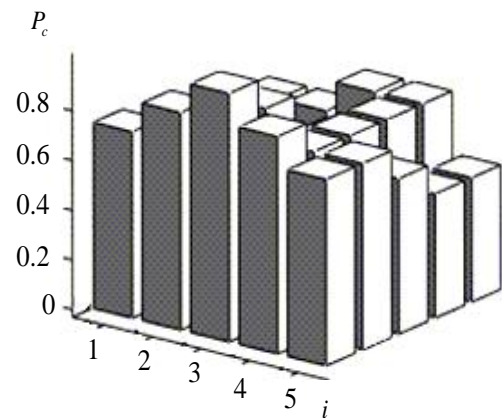


Fig. 2. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 50\%$, $q \approx 4$.

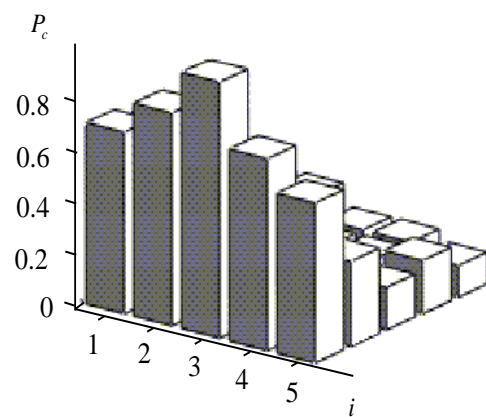


Fig.3. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 50\%$, $q \approx 0$.

The results of estimation of the probability of

correct selection of an object in the segmented image are invariant with respect to the size and nature of the initial data, because P_c in accordance with (15 – 19) is determined by the values of the signal-to-noise ratio.

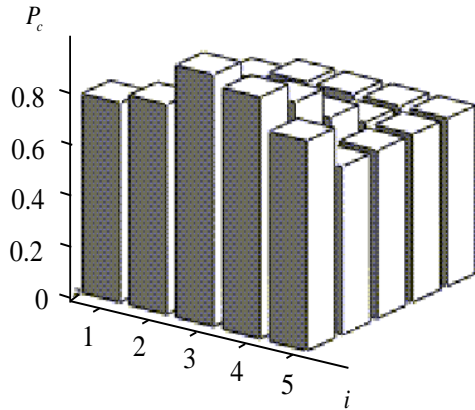


Fig. 4. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 70\%$, $q \approx 4$.

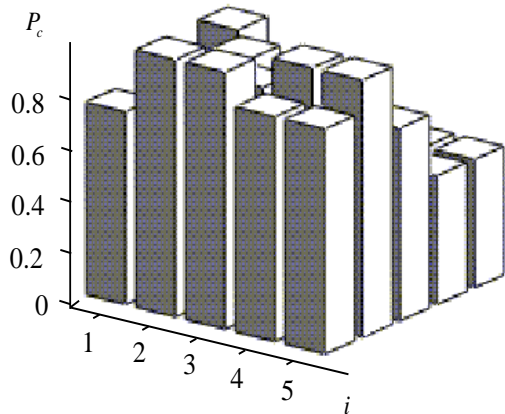


Fig. 5. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 70\%$, $q \approx 0$.

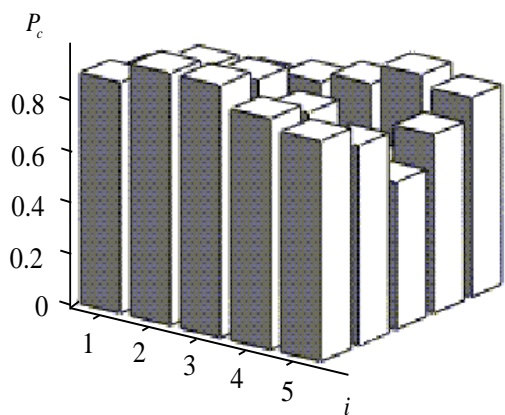


Fig. 6. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 90\%$, $q \approx 4$.

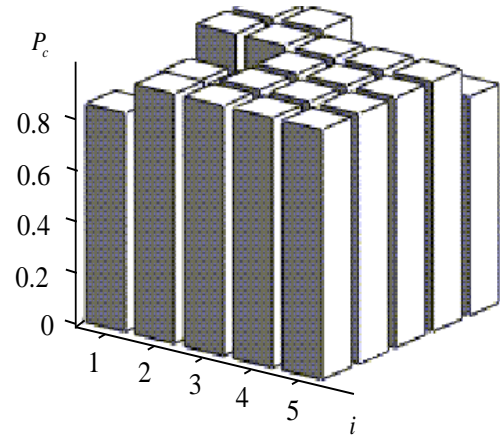


Fig. 7. The results of estimating the probability of object segmentation at: $S = 90\%$, $q \approx 0$.

The results of dependence $P_c = f(q)$ analysis showed that the influence of noise for CI of 8×8 size at distorted pixel area S from 0 to 0.31 provides $P_c = 0.9998 \dots 0.9172$ for values $\beta = 0.0161 \dots 0.1216$, respectively. Distortion of more than 31% ($S = 0.31$) of the image- pixels results in a reduction P_c to 0.9.

CONCLUSIONS

Thus, as a result of this research, a two-stage image segmentation procedure has been developed. It allows selecting the object of reference on the CI formed by the UAV's CENS. It is considered that the brightness of objects and backgrounds is measured by CENS sensors and processed information characteristic of SS. It allows to use the zone representation of the formed images due to the contrast between them.

It is shown that it is necessary to additionally use area characteristics of objects for selection of the object of reference on CI of sighting surfaces with heterogeneous and similar objects. As a result, the influence of perspective distortions of CI on the selection of the object of reference will decrease. Analytical relations for estimation of probability of correct selection of objects are obtained. These relations are a function of the selected quantisation threshold at each step of object selection considering errors of the first and second kind.

By means of modelling the efficiency of object selection on segmented CI depending on the quality of initial images is estimated. It is shown that application of the proposed approach to image segmentation allows to carry out object selection with probability not lower than 0.9 for

typical values of signal-to-noise ratios of images formed by CENS in real conditions.

References

[1] Antyufeev V. Matrix radiometric correlation-extreme navigation systems for aircraft: monograph Ukraine, Kharkov: KhNU V.N. Karazin, 372 p.

[2] Sotnikov O., Kartashov V., Tymochko O., Serhiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Flores-Fuentes W. Methods for ensuring the accuracy of radiometric and optoelectronic navigation systems of flying robots in a developed infrastructure (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-22587-2_16.

[3] Sotnikov A., Tarshyn V., Yeromina N., Petrov S., Antonenko N. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. № 9 (87). pp. 68–74. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101920.

[4] Sterzhanov, M. V. Isolation of connected components in line binary images / M. V. Sterzhanov // Bulletin of TSU. – 2010. – T. 15, issue. 6. – S. 1934–1938.

[5] Kulikov E. I., Trifonov A. P. Estimation of signal parameters against a background of interference.— M.: Sov. radio, 1978. - 296 p.

[6] Abdollahi, A., Pradhan, B. (2021). Integrated technique of segmentation and classification methods with connected components analysis for road extraction from orthophoto images. Expert Systems with Applications, 12, 114908. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114908>.

[7] Abdollahi, A., Pradhan, B. (2021). Integrated technique of segmentation and classification methods with connected components analysis for road extraction from orthophoto images. Expert Systems with Applications, 12, 114908. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114908>.

[8] Bakhtiari, H. R. R., Abdollahi, A., Rezaeian, H. (2017). Semi automatic road extraction from digital images. The Egyptian Journal of Remote Sensing Space Science, 20 (1), 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.03.001>.

[9] Senthilnath, J., Rajeshwari, M., Omkar, S. N. (2009). Automatic road extraction using high resolution satellite image based on texture progressive analysis and normalized cut method. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37, 351361.

[10] Singh, P. P., Gard, R. D. (2013). Automatic road extraction from high resolution satellite image using adaptive global thresholding and morphological operations. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 41, 631-640.

[11] Grinias, I., Panagiotakis, C., Tziritas, G. (2016). MRF-based segmentation and unsupervised classification for building and road detection in peri-urban areas of high-resolution satellite images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 122, 145-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.10.010>.

[12] Li, X., Li, T., Chen, Z, et al. (2022). Attentively Learning Edge Distributions for Semantic Segmentation of Remote Sensing Imagery. Remote Sensing, 14 (1), 102. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14010102>.

[13] Kit, O., Lüdeke, M., Reckien, D. (2012). Texture-based identification of urban slums in Hyderabad, India using remote sensing data. Applied Geography, 32 (2), 660-667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.016>.

[14] Zhao, S., Wu, H., Tu, L., Huang, B. (2014). Segmentation of Urban Areas Using Vector-Based Model. 2014 IEEE 14th International Conference on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops, 15557408. DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom.2014.89.

[15] Pan, Z., Xu, J., Guo, Y., Hu, Y., Wang, G. (2020). Deep Learning Segmentation and Classification for Urban Village Using a Worldview Satellite Image Based on U-Net. Remote Sensing, 12 (10), 1574. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101574>.

[16] Mhangara, P., Odindi, J. (2013). Potential of texture-based classification in urban landscapes using multispectral aerial photos. South African Journal of Science, 100, 3-4. ISSN 1996-7489.

[17] Körting, T. S., Fonseca, L. M. G., Dutra, L. V., Silva, F. C. (2010). Image resegmentation applied to urban imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII, B3b, 393-398. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.5133.9529>.

[18] Dikmen, M., Halici, U. (2014). A Learning-Based Resegmentation Method for Extraction of Buildings in Satellite Images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11 (12), 2150-2153. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2321658>.

[19] Pandey, S., Khanna, P. (2014). A hierarchical clustering approach for image datasets. 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). DOI: 10.1109/ICIINFS.2014.7036504.

[20] Dhanachandra, N., Manglem, K., Chanu, Y. J. (2015). Image Segmentation using K-means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm. Eleventh International Multi-Conference on Information Processing-2015 (IMCIP-2015), 764-771. DOI: 10.1016/j.procs.2015.06.090.

[21] Dao, N., Anh, D. N. (2015). Segmentation by Incremental Clustering. International Journal of Computer Applications, 111, 12, 24-30. DOI: 10.5120/19591-1360.

- [22] Niharika, K., Adeeba, H., Krishna, A. S. R., Yugander, P. (2017). K-means based noisy SAR image segmentation using median filtering and Otsu method. 2017 International Conference on IoT and Application (ICIOT). DOI: 10.1109/ICIOTA.2017.8073630.
- [23] Zheng, X., Lei, Q., Yao, R., Gong, Y., Yin, Q. (2018). Image segmentation based on adaptive K-means algorithm. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 68 DOI: 10.1186/s13640-018-0309-3.
- [24] Shah, N., Patel, D., Fränti, P. (2021). k-Means image segmentation using Mumford–Shah model. *Journal of Electronic Imaging*. – 2021. – Vol. 30. – Is. 6. DOI: 10.1117/1.JEI.30.6.063029.
- [25] Abeysinghe, W., Wong, M., Hung, C.-C., Bechikh, S. (2019). Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Image Segmentation. *IEEE Southeast Con*. DOI: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020457.

Сведения об авторах / Information about authors.



Yeromina Nataliia Sergeevna
PhD, Senior Lecturer of the Department, Kharkiv National University of Radio Electronics. Area of interest: aircraft navigation, computer systems and technologies, EMR protection methods.
E-mail: ereminaport@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0463-2342>



Udovenko Sergey Grigorievich
Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. Area of interest: intelligent systems digital data processing.
E-mail: serhiy.udovenko@hneu.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5945-8647>



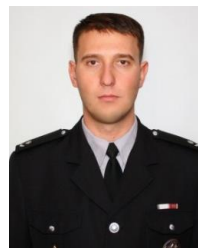
Tiurina Valeriia Yuryivna
PhD student (full-time) of the scientific and organizational department, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, area of scientific interests: navigation.
E-mail: valery.kharkiv@gmail.com



Boichenko Oleksii Igorevich, leading researcher – senior tester – parachutist of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification; area of scientific interests: search and rescue with the help of aviation on a water surface. E-mail: aleksej_boichenko@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4664-4023>



Breus Pavlo Petrovich, PhD student, Deputy General Director of "URGA" Airlines, ATPL TRI Airbus A-320. Area of interest: cybersecurity.
E-mail: ua-aircraft@ukr.net



Onishchenko Yurii Nikolaevich PhD, Kharkiv National University of Internal Affairs. Area of interest: cybersecurity, artificial intelligence, management of cybersecurity of critical infrastructure objects.
E-mail: onischenko1980@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7755-3071>



Gnusov Yurii Valeryevich PhD, Kharkiv National University of Internal Affairs. Area of interest: cybersecurity.
E-mail: gyvduke@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9017-9635>



Svitlychnyi Vitalii Anatolievich, PhD, Kharkiv National University of Internal Affairs. Area of interests: cybersecurity, artificial intelligence, E-mail: vit.svet@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3381-3350>

High Temperature Superconducting Transformer Operating at an Increased Frequency of Alternating Current

Manusov V.Z., Galeev R.G.

Siberian State University of Water Transport,
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The study's aim is to substantiate and employ materials with high technical characteristics for the active elements of a transformer, particularly in the context of increased operating frequencies. To accomplish this objective, the following tasks were addressed: An analysis and synthesis of the properties of a magnetic core composed of amorphous iron and superconducting windings in a high-temperature superconducting transformer (HST) were conducted. Dependencies and graphs illustrating the impact of frequency increase on heat losses related to hysteresis and eddy currents were derived. These losses occur within the magnetic circuit. The study also demonstrates the relationship between reducing size and weight parameters and material consumption of windings in high-temperature superconducting (HST) tapes. Current densities in these tapes can reach up to 500 A/mm². The most noteworthy outcome, taking advantage of superconductivity in the HST, is that HST acts as an ideal diamagnetic material. Additionally, the windings exhibit high electrical conductivity. This resolves issues related to current displacement to the conductor's surface, commonly known as the "skin effect," and effectively addresses concerns about increased resistance in transformers and electrical machines. The absence of the skin effect in HST conductors has been rigorously demonstrated using Bessel functions. The significance of these results is in enhancing the efficiency of transformers operating at high frequencies. This is achieved by synthesizing the properties of the transformer's active elements, which include an amorphous iron magnetic core, HST windings, and a dielectric medium utilizing liquid nitrogen.

Keywords: increased frequency, magnetic circuit, energy efficiency, HTS transformer, skin effect.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.04>

UDC: 621.314.2

Transformator supraconductor la temperatură ridicată care funcționează la o frecvență crescută de curent alternativ

Manusov V.Z., Galeev R.G.

Universitatea de Stat Siberiană de transport pe apă, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Scopul studiului constă în fundamentarea și aplicarea materialelor cu caracteristici tehnice superioare în elementele active ale transformatorului cu o creștere a frecvenței de funcționare. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost rezolvate următoarele sarcini: s-a dat analiza și sinteza caracteristicilor unui miez magnetic realizat din fier amorf și înfășurări supraconductoare într-un transformator supraconductor la temperatură înaltă (HST). Studiul a obținut dependențe și grafice ale efectului creșterii frecvenței asupra pierderilor de căldură asociate cu histerezisul și curenții turbionari, care alcătuiesc pierderi în circuitul magnetic și arată, de asemenea, dependența reducerii parametrilor de greutate și dimensiune și a consumului de material al înfășurărilor de frecvență și densitatea curentului în benzile supraconductoare la temperaturi ridicate (HTS), care pot ajunge la 500 a / mm². Aceasta, la rândul său, afectează dimensiunile înfășurărilor transformatorului și, în consecință, dimensiunile circuitului magnetic. Cel mai impornat rezultat folosind fenomenul supraconductivității în VST este faptul că HTS este un diamagnet ideal, iar înfășurările au o cantitate mare de conductivitate electrică, prin urmare, în transformatoare și mașini electrice, problema deplasării curentului la suprafața conductorului dispare – "efectul pielii" și problema creșterii rezistenței. Din analiza teoretică utilizând condițiile funcțiilor Bessel, absența unui efect de piele în conductorii HTS este dovedită datorită rezistenței ohmice zero la 77 K. Semnificația rezultatelor constă în creșterea eficienței transformatorului atunci când funcționează la frecvențe înalte datorită sintezei proprietăților elementelor active ale transformatorului: un miez magnetic din fier amorf, înfășurări HTS și un mediu dielectric din azot lichid. Avantajele suplimentare ale acestui tip de echipamente electrice în sistemele autonome și mobile includ absența completă a siguranței la incendiu și explozie, precum și absența amprentei de carbon și asigurarea siguranței mediului.

Cuvinte-cheie: frecvență crescută, circuit magnetic, eficiență energetică, transformator HTS, efectul skin.

Высокотемпературный сверхпроводящий трансформатор работающий на повышенной частоте переменного тока

Манусов В.З., Галеев Р.Г.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В автономных и мобильных системах электроснабжения возникает вопрос энергоэффективности и массогабаритных размеров трансформаторного электрооборудования. Цель исследования состоит в обосновании и применении материалов с более высокими техническими характеристиками в активных элементах трансформатора при увеличении рабочей частоты. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: дан анализ и синтез характеристик магнитопровода из аморфного железа и сверхпроводящих обмоток в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе (ВСТ). В исследовании получены зависимости и графики влияния повышения частоты на тепловые потери, связанные с гистерезисом и вихревыми токами, из которых складываются потери в магнитопроводе, а также показана зависимость уменьшения массогабаритных показателей и расхода материала обмоток от частоты и плотности тока в высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, которая может достигать 500 А/мм^2 . Это в свою очередь влияет на размеры обмоток трансформатора и, следовательно, размеры магнитопровода. Наиболее существенным результатом с использованием явления сверхпроводимости в ВСТ, является тот факт, что ВТСП является идеальным диамагнетиком, а обмотки имеют высокую величину электрической проводимости, следовательно, в трансформаторах и электрических машинах исчезает проблема вытеснения тока к поверхности проводника – «скин-эффект» и проблема увеличения сопротивления. Из теоретического анализа с использованием условий функций Бесселя доказано отсутствие скин-эффекта в ВТСП проводниках по причине нулевого омического сопротивления при 77 К . Значимость результатов заключается в повышении КПД трансформатора при работе на повышенных частотах благодаря синтезу свойств активных элементов трансформатора: магнитопровода из аморфного железа, ВТСП обмоток и диэлектрической среды из жидкого азота. К дополнительным преимуществам такого рода электрооборудования в автономных и мобильных системах следует отметить полное отсутствие пожара и взрыва-безопасности, а также отсутствие углеродного следа и обеспечение экологической безопасности.

Ключевые слова: повышенная частота, магнитопровод, энергоэффективность, ВТСП трансформатор, скин-эффект.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании систем электроснабжения автономных и мобильных объектов электротранспортной и логистической структуры, морских и воздушных судов, остро стоит вопрос энергоэффективности и массогабаритных размеров трансформаторного электрооборудования и накопителей энергии. Применение полупроводниковых устройств преобразования напряжения является перспективным направлением развития и замене электрическим машинам основанных на физическом явлении электромагнитной индукции, но на данный момент полупроводниковые устройства являются весьма дорогостоящим оборудованием и к тому же являются весьма не надежными, что при определенных обстоятельствах может привести к нарушениям электроснабжения и даже несчастным случаям. Приоритетным устройством трансформации напряжения при заданной частоте является трансформаторное

электрооборудование на основе магнитосвязанных катушек индуктивности.

Трансформатор при своих качествах высокой надежности и простоте конструкции имеет малую удельную мощность на единицу массы, приблизительно 180 Вт/кг . Учитывая, что трансформаторное электрооборудование включено в мобильную систему электроснабжения его энергоэффективность и массогабаритные параметры оказывают существенное влияние на возможности транспортировки полезной нагрузки.

Цель работы состоит в повышении энергоэффективности, снижении массогабаритных характеристик трансформаторов, что для автономных систем электроснабжения является весьма значимым аспектом энергоэффективности, и в выполнении анализа используемых активных материалов для обмоток и магнитопровода трансформаторного электрооборудования.

На практике применяют несколько методов уменьшения массогабаритных показателей

трансформаторного электрооборудования, а именно:

- Применение материала магнитопровода с высокой индукцией насыщения;
- Применение материалов с высокой плотностью тока для обмоток трансформатора;
- Увеличение рабочей частоты электрической системы.

ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В настоящее время основная доля магнитопроводов трансформатора изготавливают из электротехнических сталей и ферритов. Максимальная рабочая индукция, при которой трансформатор имеет потери в магнитопроводе приемлемые техническим требованиям, находятся в диапазоне $B_c = 1,7 - 1,9$ Тл. По мере того, как насыщение сердечника становится более сильным, увеличивается поток рассеяния, связанный с обмоткой высокого напряжения [1]. Дальнейшее увеличение рабочей индукции будет способствовать уменьшению магнитной проницаемости и, следовательно, понизится индуктивность обмоток, что приведет к увеличению потерь в магнитопроводе. По этой причине увеличение индукции не целесообразно с применением доступных магнитомягких материалов. Снижение габаритов трансформатора за счет увеличения плотности тока является перспективным направлением в связи с появления ВТСП проводников 2-го рода [2, 3, 4].

Создание обмоток трансформатора из сверхпроводящего провода, который при температуре кипения жидкого азота (77 К) - 198°С имеет нулевое активное сопротивление переменному току, что исключает потери на активное сопротивление [5]. Плотность тока в сверхпроводящем проводе может достигать 500 А/мм², по сравнению с медью 2,8 А/мм², разница в 250 раз оказывает существенную роль в уменьшении объема и массы обмоток трансформатора [6, 7, 8, 9].

Самый эффективный метод уменьшения размеров и массы трансформатора связан с увеличением рабочей частоты электрического тока, но требует тщательного подхода к выбору используемых материалов и конструкции трансформатора [10, 11, 12].

$$(S \cdot S_{ок}) = \frac{P_T}{\sqrt{2} \pi K_{м1} J f B_c} \quad (1)$$

где $S \cdot S_{ок}$ – геометрический размер магнитопровода (площадь сечения стержня и площадь окна сердечника); f – частота сети; B_c – максимальная индукция в стержне; $K_{м1}$ – коэффициент заполнения площади круга сталью; J – плотность тока проводника [13].

Из формулы (1) следует, что частота переменного тока и диаметр сердечника обратно пропорциональны. Вследствие этого существенно уменьшается масса магнитопровода сверхпроводящего трансформатора. При увеличении рабочей частоты уменьшается количество витков обмоток трансформатора. Нужно заметить, что при уменьшении диаметра обмотки уменьшается расстояние между стержнями и тем самым уменьшается площадь окна Ш-образного магнитопровода, следовательно, уменьшается объем и масса железа сердечника.

$$W = \frac{U}{4,44 f B_c S} \quad (2)$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЕ «СКИН-ЭФФЕКТ» ПРИ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ.

Применение повышенной частоты всегда приводит к вытеснению тока к внешней периферии проводника, которое получило название «скин-эффект» [14, 15, 16].

При промышленной частоте 50 и 60 Гц, используемой во всем мире, сопротивление скин-эффекту незначительно и обычно не учитывается. Эффект вытеснения возникает вследствие магнитного потока во внутреннем пространстве проводника, созданным действующим током в проводе. Ток, индуцируемый внутренним магнитным потоком, ближе к центру провода имеет противоположное направление действующему току I и попутное направление по внешнему контуру проводника. Скин-эффект приводит к экспоненциальному уменьшению плотности тока с глубиной.

Неравномерное распределение тока по поперечному сечению проводника

отображаются теоретическим анализом с использованием функций Бесселя, которые представляют наличие внутренней индукции в проводнике, на несколько порядков меньше внешней индукции. Для комплексных амплитуд плотности тока и напряженности магнитного поля описываются следующие уравнения.

$$\frac{d^2 J_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dJ_m}{dr} = j\omega\mu\gamma J_m \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}_m}{dr} - \frac{\dot{H}_m}{r^2} = j\omega\mu\gamma \dot{H}_m \quad (4)$$

Сопротивление цилиндрического проводника определяют суммой сопротивлений внутреннего импеданса проводника и внешнего импеданса.

$$Z = Z_{in} + Z_{ex} \quad (5)$$

Внутреннее сопротивление определяется по выражению.

$$Z_{in} = R_{dc} \cdot \frac{u_a J_0(u_a)}{2 J_1(u_a)} = Re(Z_{in}) + I_m(Z_{in}) \quad (6)$$

где R_{dc} – сопротивление провода на постоянном токе в установившемся режиме; $J_0(u_a)$ и $J_1(u_a)$ – функции Бесселя нулевого порядка и первого рода первого рода соответственно; $Re(Z_{in})$ – действительная составляющая внутреннего сопротивления; $I_m(Z_{in})$ – комплексная индуктивная составляющая внутреннего сопротивления

Внешнее сопротивление определяется по выражению.

$$Z_{ex} = jX_{ex} = j2\pi f L_{ex} \quad (7)$$

Разложение ряда функции Бесселя задается следующим образом.

$$\frac{u_a J_0(u_a)}{2 J_1(u_a)} = 1 - \frac{u_a^2}{8} - \frac{u_a^4}{192} - \frac{u_a^6}{3074} - \dots \quad (8)$$

Электромагнитная поверхностная глубина δ , на которой плотность тока составляет $1/e$ ($\approx 37\%$) от его поверхностной плотности, определяется уравнением [17].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma f\mu}} \quad (9)$$

где σ – проводимость проводника; μ – проницаемость проводника.

От поверхности к оси провода плотность тока J уменьшается по экспоненциальной зависимости.

$$J_z = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (10)$$

где J_0 – плотность тока на поверхности; z – глубина производимого расчета;

Из (6) и (7) следует, что чем ближе к оси проводника, тем меньше плотность тока тем самым значительная площадь сечения провода не задействована в передаче электроэнергии.

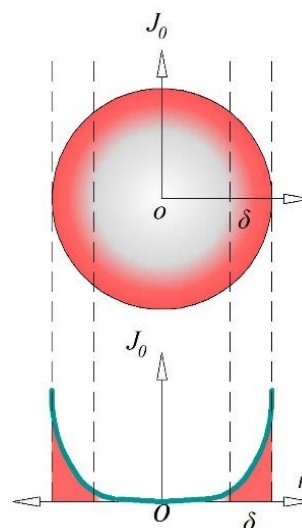


Рис. 1. Графическое отображение плотности тока по сечению проводника.¹

Из анализа следует, что при проектировании сверхпроводящего трансформатора на повышенной частоте необходимо принимать во внимание скин-эффект. В программной среде Elcut профессиональной версии 6.6 методом конечных элементов произведено моделирование вытеснения тока к поверхности для медного проводника диаметром 5,7 мм и плотностью тока 2,4 А/мм² при частоте переменного тока: 200, 400 и 800 Гц. На рисунке 2 представлена цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника. В поперечном сечении медного

¹ Appendix 1

провода площадью 25,5 мм² с шагом дискретизации 0,05 мм получена сетка конечных элементов с 1306 узлами, что в полной мере отображает картину на которой видно, что при частоте 400 Гц и выше более явно проявляется скин-эффект. Медь по магнитным свойствам относится к диамагнетикам, но её магнитная проницаемость больше нуля $\mu = 0,999990$. Это приводит к проникновению магнитного поля вглубь проводника и образованию магнитной индукции определенной напряженностью, что ведет к образованию вихревых токов. Их повышение, в свою очередь, влечет за собой к более интенсивному вытеснению тока к поверхности проводника. В связи с этим возрастает выделение тепла и падение напряжения.

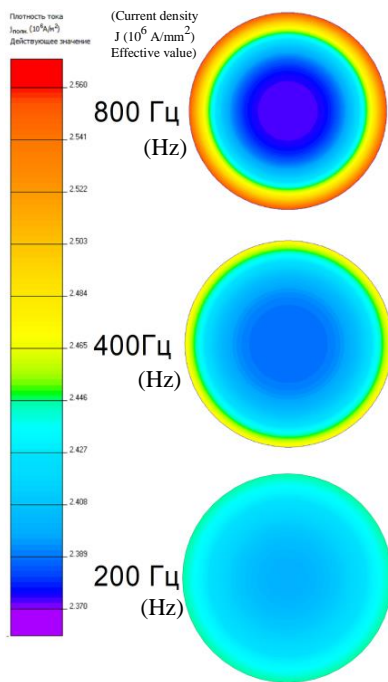


Рис. 2. Цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника при повышении частоты.²

Сверхпроводники являются абсолютными диамагнетиками, магнитная проницаемость которых равна нулю при этом происходит полное вытеснение магнитного поля из объема проводника в сверхпроводящем состоянии. В сверхпроводнике электроны формируют пары, называемые куперовскими парами, которые образуют сверхпроводящее состояние. Они обладают нулевым спином и могут передвигаться без взаимодействия с

кристаллической решеткой, вызывая нулевое сопротивление в материале. Эта подтверждается эффектом вытеснения внешнего магнитного поля из тела сверхпроводника за счет внутреннего вихревого тока (эффект Мейснера) в сверхпроводниках.

ВТСП проводники обладают нулевым сопротивлением при температуре 77 К, следовательно выражение (9) трудно применимо.

Исследование ВТСП трансформатора на повышенных частотах.

В целях исследования произведен анализ характеристик магнитопровода трансформатора на различных частотах электрической сети из магнитомягкого быстрозакаленного аморфного сплава марки 1СР с типом магнитопровода 1В АМЕТ, с магнитными характеристиками ленты указаны на рисунке 3 [18, 19, 20].

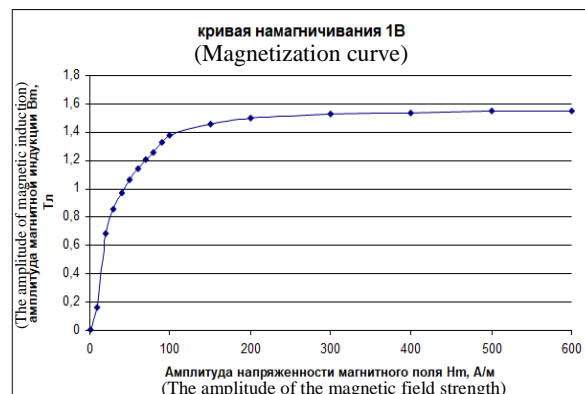


Рис. 3. Магнитная характеристика магнитопровода марки 1В АМЕТ.³

Лента марки 1СР имеет следующие легирующие элементы: В, Si, Р, С, Со, Ва. Полученная закалкой из жидкого состояния вследствие высокой скорости охлаждения (>1000 К/с) металл переходит в пассивное состояние, что приводит к высокой коррозионной стойкости в различных агрессивных средах. Данные свойства аморфных сплавов делают его отличным аналогом обычной электротехнической стали для создания силовых трансформаторов с высокими показателями энергоэффективности [21, 22].

В таблице 1 приведены технические характеристики ВТСП трансформатора.

^{2,3} Appendix 1

Исходные технические характеристики ВТСП трансформатора⁵

Параметр (Parameter)	Величина (Value)	Единица измерения (Unit)
Номинальная мощность (Nominal power)	100	кВА (kVA)
Число фаз (Number of phases)	3	-
Напряжения обмоток ВН (Primary voltage)	10000	В (V)
напряжения обмоток НН (Secondary voltage)	400	В (V)
Схема соединения обмоток (Winding connection)	Δ/Y_H-0	–
Напряжение короткого замыкания (Short-circuit impedance)	4	%
Индукция магнитопровода (core induction)	1,5	Тл (T)
Частота электрического тока (Grid frequency)	50, 200, 400, 800	Гц (Hz)

Ниже в таблице 2 приведена ВТСП трансформатора, работающего при математическая модель и алгоритм расчета различных частотах.

Таблица 2⁶

Алгоритм расчета трансформатора⁷

	Формула (Formula)	Обозначение (Designation)
1	$(S \cdot S_{ок}) = \frac{P_T}{\sqrt{2\pi} K_{м1} J f B_c}$	Габаритный параметр (произведение площади сечения стержня к площади окна магнитопровода) Dimensional parameter (product of the cross-sectional area of the rod to the area of the core window)
2	$E_B = \sqrt{2\pi} f B_c S$	Электродвижущая сила витка (Turnover voltage)
3	$W = \frac{U_{\phi}}{E_B}$	Количество витков обмотки (Number of turns)
4	$S_{пр} = \frac{I_{\phi}}{j}$	Площадь сечения проводника обмотки (The cross-sectional area of the winding conductor) I_{ϕ} – фазный ток; j – плотности тока в проводнике (current densities in the conductor)
5	$W_{сл} = \frac{l_{\phi}}{d}$	Число витков в слое (The number of turns in the layer). Где l_{ϕ} – высота обмотки (Winding height); d – ширина провода (width of the conductor)
6	$N_{сл} = \frac{W}{W_{сл}}$	Количество слоев в обмотке. (Number of layers in the winding)
7	$a_{об} = a N_{сл} + a_{в}$	Толщина обмотки. (Coil thickness) a – толщина проводника (Conductor thickness); $a_{в}$ – вентиляционный канал (Ventilation duct).
8	$G_{сл} = V_{см} K_3 \rho_{см}$	Масса магнитопровода (Core weight)

Особый интерес исследования заключается в зависимости между частотой перемагничивания сердечника трансформатора с изменением размеров магнитопровода, потерь на петлю гистерезиса и вихревые токи[23].

Потери на перемагничивании и вихревые токи посчитаны в соответствии с формулой Штейнмеца[13]:

$$P_h = n f B_c^2 G_{сл} \quad (11)$$

$$P_B = y f^2 B_c^2 G_{ct} \quad (12)$$

где y и n – коэффициент, характеризующий ферромагнитный материал;

G_{ct} – масса сердечника трансформатора.

Полученные зависимости потерь в магнитопроводе с увеличением частоты приведены на рисунке 3.

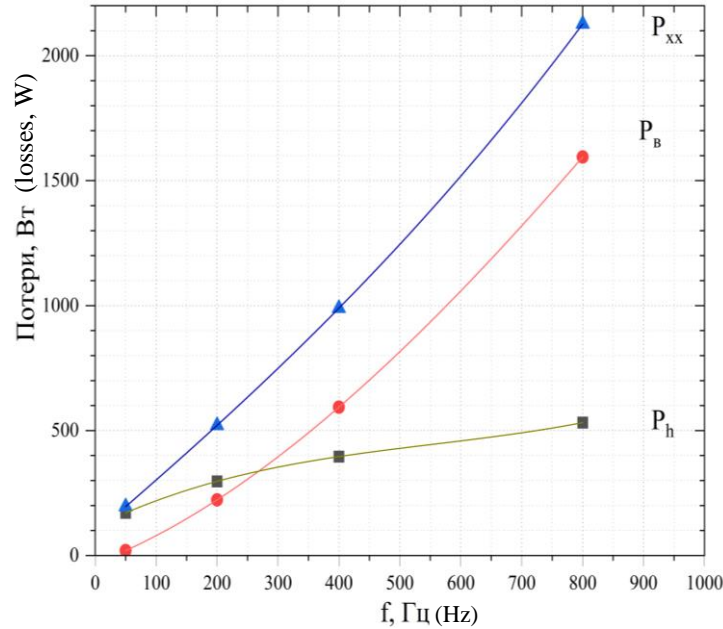
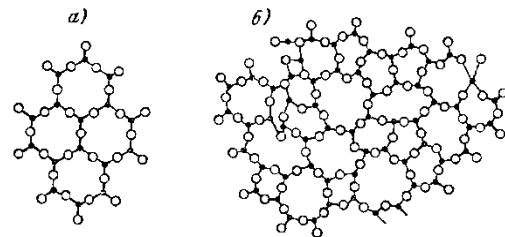


Рис. 4. Зависимости потерь на гистерезис и вихревые токи.⁸

Согласно выражению Штейнмеца (11, 12) и Рис. 4 следует линейная зависимость от повышения частоты для потерь на гистерезис и экспоненциальная зависимость для потерь на вихревые токи. Современные электротехнические стали имеют относительно большую магнитную индукцию насыщения до 2 Тл [24], но низкую магнитную проницаемость, что в свою очередь приводит к значительному увеличению напряженности магнитного поля для достижения необходимой индукции в сердечнике. Тем самым приводит к увеличенной площади петли гистерезиса, что говорит о потерях на перемагничивании.

Для снижения потерь в магнитопроводе, связанных с перемагничиванием сердечника, целесообразно использовать аморфные сплавы, в которых отсутствует строгая периодичность и дальний порядок в расположении атомов, присущая кристаллическому строению магнитомягких электротехнических сталей, которые не имеют меж доменных границ. Благодаря высоким значениям магнитной проницаемости ($\mu = 50000 - 70000$), прочности и твердости, низким значениям

коэрцитивной силы ($H_c \leq 8$ А/м), аморфные сплавы предпочтительно использовать в высокочастотных трансформаторах [25].



а) Кристаллическая решетка; б) аморфная структура

a- Crystal structure; b- amorphous structure

Рис. 5. Сравнение строения кристаллической структуры стали и аморфной структуры.⁹

В современной электротехнической стали, применяемой в трансформаторе, при толщине пластин 0,17–0,5 мм и в зависимости от конструкции магнитопровода соотношение P_B / P_h может изменяться в пределах 0,2–7. При использовании аморфного железа отношение P_B / P_h находится в диапазоне от 0,17–2,9 при повышенных частотах сети 50–800 Гц. Связано это с высоким удельным сопротивлением в пределах 100-300 мкОм·см,

^{8,9}Appendix 1

что несколько больше сопротивления холоднокатаной стали, которая находится в диапазоне 40-80 мкОм·см. [26, 27]

Следующим важным моментом является уменьшение объема сердечника, следовательно, его массы согласно (1).

Зависимость f и массы магнитопровода обратно пропорциональны, как представлено на рисунке 6

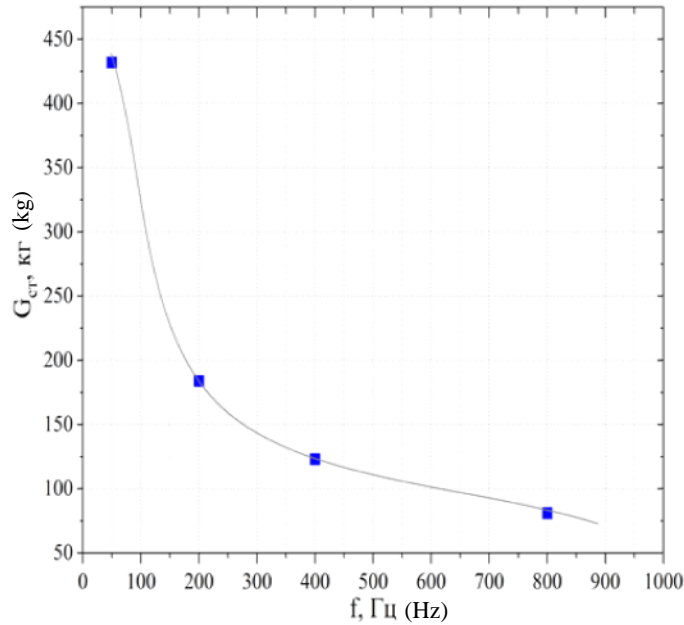


Рис. 6. Зависимость между частотой перемagnetизации и массой сердечника.¹⁰

В работе получена зависимость влияния повышения частоты к увеличению ЭДС, что непосредственно влияет на число витков обмоток трансформатора, как представлено на

рисунке 7. Полученные характеристики ВТСП трансформатора при повышении частоты сведены в таблицу 3.

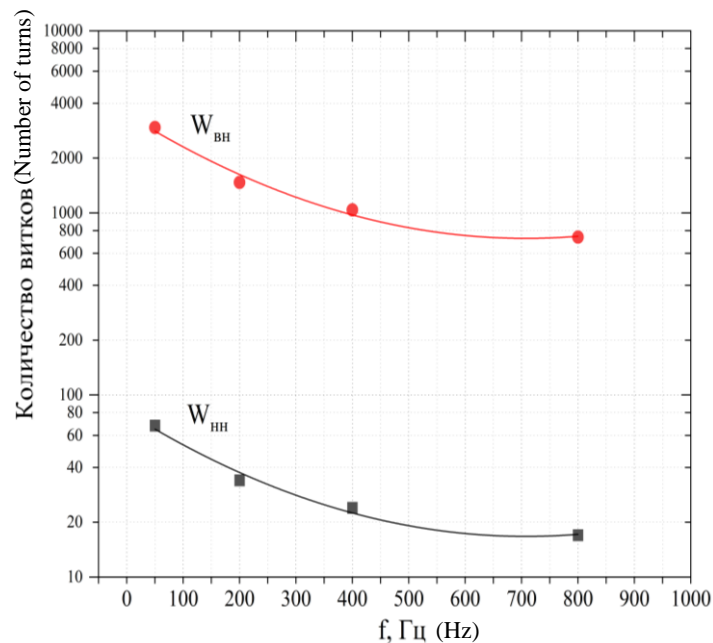


Рис. 7. Зависимость между частотой перемagnetизации сердечника и количества витков на обмотках ВН и НН.¹¹

^{10,11}Appendix 1

Технические параметры ВТСП трансформатора¹³

f частота сети (Grid frequency), Hz	50	200	400	800
d (rod diameter), m	0.135	0,095	0,08	0.067
G _{ст} (the mass of the magnetic circuit), kg	432	184	123	81
E _в (Turnover voltage), V	3.382	6.701	9.623	13.32
w _{нн} (Number of secondary turns)	68	34	24	17
w _{вн} (Number of primary turns)	2945	1473	1040	737
Φ _м (Magnetic flow), Wb	0.015	0.008	0.005	0,004
P _h (Losses on gizeresis), W	171	297	396	532
P _в (Eddy current lose), W	25	223	594	1595
P _{ст} (Core losses), W	196	521	990	2127

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования, подтверждают целесообразность повышение частоты переменного тока питающей электрической сети до значений 400 и далее 800 Гц. Это особенно важно для уменьшения массогабаритных размеров электрооборудования в автономных системах электроснабжения [28].

Показано отдельное влияние повышения частоты на сечение проводников обмоток в связи с явлением «скин-эффекта», на характеристики магнитопровода для которого целесообразно использовать аморфное железо и в целом на массогабаритные размеры трансформатора в целом. Последнее это обстоятельство играет особо важную роль там, где речь идет об увеличении полезной нагрузки за счет элементов системы электроснабжения (проводников, трансформаторов, генерирующих источников) [29].

Полученные зависимости, представленные на Рис. 4, Рис. 6, Рис. 7, показывают, что синтез указанных выше параметров с повышением частоты имеет нелинейный характер по причине экспоненциального возрастания тепловых потерь в магнитопроводе исходя из формул Штейнмеца (11) и (12). Это требует уменьшение магнитной индукции сердечника с повышением частоты электрического тока, что в конечном итоге отражается на количестве витков обмоток и массы сердечника. Наличие криостата требует 20-50 мм толщины стенок для поддержания температуры криогенной среды 77 К. Что в целом компенсируется изоляционными слоями между обмотками и магнитопроводом.

Так, например, массогабаритные размеры ВТСП трансформатора при промышленной

частоте 50 Гц составляют 432 кг, при частоте 400 Гц 123 кг, то есть, 3,5 раза меньше, а при частоте 800 Гц более чем в 5 раз меньше трансформатора на промышленной частоте.

Учитывая, что ВТСП трансформатор при одинаковой частоте более чем в 2-2,5 раза меньше по габаритам традиционного трансформатора. С учетом повышения частоты его массогабаритные размеры почти в 10 раз меньше традиционного трансформатора на промышленной частоте, то есть на «порядок» энергоэффективнее традиционного трансформатора [26], [27].

Отсюда следует, что указанная в регистре частота 200 Гц для судов на подводных крыльях не высока из-за увеличения потерь активной мощности в проводниках с учетом скин-эффекта.

В работе [10] проведено практическое исследование высокочастотного импульсного силового трансформатора со смешанным сердечником при 200 кГц. Автор пришел к выводу, что комбинирование слоев сердечника из аморфного, ферритового и электротехнического железа привело к снижению температуры горячих точек, что позволило повысить номинальную мощность трансформатора. В [14] выполнено численное моделирование скин-эффекта, его влияние на реактивное сопротивление и сравнение с экспериментальными замерами медных трубок при $0,1 - 10^4$ кГц. В работе [28] описывают анизотропию критического тока в сверхпроводящем воздушном трансформаторе при частоте 2,2 кГц. В [24] показано влияние криогенной среды на характеристики магнитопроводов из электротехнического и аморфного железа. Основной новизной и ключевым моментом данной работы является то, что сверхпроводящие обмотки открывают возможность практически неограниченного

повышения частоты в мобильной системе электроснабжения. При этом в последние годы ярко проявляется тенденция к повышению частоты электрооборудования, что позволяет существенно снизить габариты этого электрооборудования особенно это важно для мобильных систем электроснабжения морского, водного транспорта (кораблей и судов) и авиации, так как это позволяет увеличить вес полезного груза и снизить мощность источника генерации на борту. Наряду с этим улучшаются характеристики взлета и посадки и увеличиваются дальность хода транспортного средства. Однако эта тенденция сильно ограничивается явлением вытеснения тока к поверхности проводника, так называемым «скин-эффектом», который увеличивает активное сопротивление проводников и потери активной мощности в них, что снижает энергоэффективность электрооборудования. Так, например, при частоте 400 Гц активное сопротивление возрастает примерно в 2,5-3 раза по сравнению с сопротивлением при промышленной частоте 50 Гц [30]. Вследствие этого потери активной мощности в обмотках трансформаторного электрооборудования возрастают пропорционально от сопротивления. Именно поэтому в оборонной промышленности многих стран частота в качестве приоритетной выбирается величина 400 Гц. В то время как при обмотках из сверхпроводниковых материалов вполне целесообразно использовать частоту 800 и 1000 Гц [31], [32]. Применение ВТСП проводников в электрооборудовании повышенной частоты имеет синергетический эффект ввиду того, что ВТСП является абсолютным диамагнетиком в сверхпроводящем состоянии, что препятствует проникновению магнитного поля вглубь проводника и созданию поверхностного слоя.

Явление сверхпроводимости и возможность обеспечивать ее при температуре жидкого азота (77 К) открывают неограниченные возможности для использования повышенных частот, так как активное сопротивление равно нулю при любой частоте и, следовательно, проблема ограничения частоты полностью исчезает. В настоящее время это еще не осознано электроэнергетическим сообществом. В

работе предпринята попытка показать, что массогабаритные характеристики электрооборудования при принятой для мобильных систем частоте 400 Гц с учетом сверхпроводящих обмоток снижаются в 5-6 раз, а при частоте 800 Гц 9-12 раз, которую мы обосновано предлагаем осваивать.

Синтез характеристик аморфного железа, при сверхпроводимости и повышении частоты решительным образом повышает энергоэффективность электрооборудования с учетом улучшения его массогабаритных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказана целесообразность повышения частоты в локальных и автономных системах электроснабжения в место 50 Гц промышленной частоты до значений 800 Гц, а в перспективе до 1000 Гц, что позволяет существенно улучшить энергетические характеристики и значительно снизить массогабаритные параметры трансформаторов с ВТСП обмотками и источников генерации установленных на объекте.

2. Проведенное в работе исследование позволяет утверждать, что явление сверхпроводимости, реализуемое жидким азотом (77 К), как диэлектрической средой, которое ранее практически не использовалось, устраняет скин-эффект в ВТСП проводниках электрического тока, так как активное сопротивление переменному току обнуляется, тем самым открывая возможность неограниченного повышения частоты в системе электроснабжения.

3. Наряду с этим показано, что применение аморфного железа в качестве сердечника высокочастотного трансформатора позволяет существенно снизить потери и повысить значение индукции в магнитопроводе на повышенной частоте, что так же благотворно влияет на технико-экономические показатели электрооборудования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема "Разработка моделей вейвлет анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей", код темы: FENG-2023-0005)

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹ Fig. 1. Graphical representation of the current density along the conductor.

²Fig. 2. Color diagram of current displacement to the surface of the conductor with increasing frequency.

³ Fig. 3. Magnetic characteristic of the magnetic circuit of grade 1 B AMET.

^{4,5} Table 1 Initial technical characteristics of the HTS transformer.

^{6,7} Table 2. Transformer calculation algorithm.

⁸ Fig. 4. Dependences of losses on hysteresis and eddy currents.

⁹ Fig. 5. Comparison of the structure of the crystal structure of steel and amorphous structure.

¹⁰ Fig. 6. The relationship between the frequency of remagnetization and the mass of the core.

¹¹ Fig. 7. The relationship between the frequency of remagnetization of the core and the number of turns on the windings HV and LV.

^{12,13} Table 3. Technical parameters of the HTS transformer

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Yingying W. Xingyu Z., Xu C. Influence of saturation levels on transformer equivalent circuit model. *Electrical Engineering*, 2021, vol 72, no. 6, pp.381–387.
- [2] Kryukov D.O., Manusov V.Z. Obzor konstruktсии transformatorov so sverkhprovodyashchimi obmotkami [Overview of transformer designs with superconducting windings]. *Electricity*. 2019, no. 8, pp. 4-16. (In Russian).
- [3] Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 794-799.
- [4] Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Superconductor Science and Technology*, 2014, vol. 27, no. 4, Art. no. 044022.
- [5] Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for YBa₂Cu₃O_{7-δ} Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.
- [6] Hu M., Zhou Q.B., Wang X., Tang F.P., Sheng J., Bian X.Y., Jin Z.J. Study of Liquid Nitrogen Insulation Characteristics for Superconducting Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, Art. no. 5500305.
- [7] Hellmann S., Abplanalp M., Elschner S., Kudymow A., Noe M. Current limitation experiments on a 1 mva-class superconducting current limiting transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, doi: 10.1109/TASC.2019.2906804.
- [8] Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong L. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, no. 103294.
- [9] Jaroszynski L., Wojtasiewicz G., Janowski T. Considerations of 2G HTS Transformer Temperature During Short Circuit. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol.28, no4, doi: 10.1109/TASC.2018.2806561.
- [10] Arun P., Practical Study of Mixed-Core High Frequency Power Transformer. *Magnetism*, 2022, no 2, pp. 306-327. doi: 10.3390/2030022 сравнить
- [11] Arun P. Application prospects of hybrid magnetic circuits in high frequency power transformers. *Techrxiv*, 2022, doi: 10.36227/techrxiv.21737858.v1.
- [12] Zabariilo D.A. Features of the calculation of a high-frequency power transformer. *Bulletin of the Dnepropetrovsk National. University of Railway Transport*. 2013, 3 (45), p. 29-35
- [13] Starodubtsev Yu.N. Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti [Theory and calculation of a low-power transformer]. – M.: IP Radiosoft 2017. 320 p. ISBN 978-5-93037-321-9.
- [14] Malcolm S. R. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies *Article in Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*, 2015 vol.60 , pp.51–69.
- [15] Pein A. *Skin effect, proximity effect and the resistance of circular and rectangular conductors*. 2022. 41 p.
- [16] Corcoran J. Nagy P. B. Compensation of the Skin Effect in Low-Frequency Potential Drop Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, no. 4, doi: 10.1007/s10921-016-0374-4.
- [17] Ibrahim M., Pillay P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013 vol. 49, no. 5, p.p. 2061-2068, doi: 10.1109/TIA.2013.2260852.
- [18] PJSC "Ashinsky Metallurgical Plant" magnetic tape pipelines made of soft magnetic amorphous alloys and soft magnetic composite material (nanocrystalline alloy) technical specifications 14-123 -215-2009.
- [19] Azuma D., Ito N., Ohta M. Recent progress in Fe-based amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials. *Journal of magnetism and*

- magnetic materials*, 2020, vol. 501
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373>
- [20] Suzuki K. Amorphous metals Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. – edited by Masumoto Ts. per. from Japanese – Metallurgy, 1987 328 p.
- [21] Pavlenko T. P. Investigation of amorphous alloys in current transformers of semiconductor circuit breakers. *NTI and production efficiency*, 2013, no. 5(m), pp. 42-46.
- [22] Lenke R. U., Rohde S., Mura F., De Doncker R. W. Characterization of amorphous iron distribution transformer core for use in high-power medium-frequency applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, Conference Location: San Jose, CA, USA doi: 10.1109/ECCE.2009.5316134.
- [23] Kurita N., Nishimizu A., Kobayashi C., Tanaka Y., Yamagishi A., Ogi M. Magnetic properties of simultaneously excited amorphous and silicon steel hybrid cores for higher efficiency distribution transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 11, doi: 10.1109/TMAG.2018.2835498.
- [24] Pronto1 A. G., Maurício A., Pinal J. M. Magnetic properties measurement and discussion of an amorphous power transformer core at room and liquid nitrogen temperature. *Journal of Physics: Conference Series* 507 (2014) 032018 doi:10.1088/1742-6596/507/3/032018.
- [25] Tchaikovskiy V. P., Nasypanaya E. P., Martynyuk A. I. Opredelenie poter v stali transformatora pri razlichnykh chastotakh i nesinusoidalnosti magnitnogo potoka s uchetom sootnosheniya gisterezisnykh i vikhrevykh poter [Determination of losses in transformer steel at different frequencies and non-sinusoidal magnetic flux, taking into account the ratio of hysteresis and vortex losses]. *Electrical Engineering and Electrical Equipment*, 2008, no. 71, p.p. 61–63. (In Russian).
- [26] Shen B., Grilli F., Coombs T. Review of the AC loss computation for HTS using H formulation. *Superconductor Science and Technology*, 2020 vol. 33, no. 3, Art. no. 033002.
- [27] Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G. The proposal of a transformer model with winding made of parallel 2g hts tapes with transpositioners and its contact cooling system. *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4., doi: 10.1109/TASC.2018.2807585.
- [28] Liu G., Zhang G., Liu G., Wang H., Jing L. Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer. *Superconducting Science Technology*, 2021, vol. 34, no. 8, Art. no. 85011.
- [29] Nanato N., Adachi T., Yamanishi T. Development of single-phase bi2223 high temperature superconducting transformer with protection system for high frequency and large current source. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1293, 31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018) 12–14 December 2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan doi 10.1088/1742-6596/1293/1/012072.
- [30] Oliveira S.V.G., Barbi I. A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005. ISIE 2005. doi: 10.1109/ISIE.2005.1528980.
- [31] Sarker P. C., Md. Islam R., Guo Y., Zhu J., Lu H. Y. State of art technologies for development of high frequency transformers with advanced magnetic materials. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 2, DOI: 10.1109/TASC.2018.2882411.
- [32] Chan, H. L., Cheng, K. W. E., Sutanto, D. Calculation of inductances of high frequency air-core transformers with superconductor windings for DC-DC converters. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2003, vol. 150, no. 4, p.p 447-454, doi.org/10.1049/ip-epa:20030257.

Сведения об авторах



Манусов Вадим Зиновьевич
 д. т. н., профессор кафедры «ЭиА». Сибирский государственный университет водного транспорта. Область научных интересов: применение искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем
 E-mail: manusov36@mail.ru



Галеев Ратмир Гаязович
 аспирант кафедры «ЭиА». Сибирский государственный университет водного транспорта. Область научных интересов. Исследование и разработка высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов
 E-mail: galeew.ratmir@yandex.ru

Theoretical Examination of the Volume Concentration and Nanoparticles Density Influence on the Convective Heat Transfer Enhancement of Nanofluid in 2D Cavity Including the Square Heater

Oulahou Y.¹, Elguennouni Y.¹, Hssikou M.², Baliti J.², Alaoui M.¹

¹Department of Mechanical-Energetic, Faculty of sciences, Moulay Ismail University, Meknes, Morocco, ²LRPSI, Polydisciplinary Faculty, University of Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Morocco.

Abstract. Nanofluid is one of the solutions of heat transfer, which can apply in devices fields as nuclear power, Nano-electronics systems, and solar fluid heating. In this work, the natural convection of Cu-water nanofluid is examined using the Lattice Boltzmann Method (LBM) as a mesoscopic approach. The main objectives of this work are to study the performance and pattern of Cu-water nanofluid and to demonstrate that the nanofluids behave differently while improving their energy transfer compared to pure fluids. The set goal was achieved by solving the tasks: based on the streamlines and isotherms profiles to demonstrate how the convection process and temperature gradients improve. Also, conducting study on heat transfer of nanofluid by calculate the Nusselt number. Depending on the nanoparticle volume percentage φ , the Grashof number Gr , and the hot obstacle have a significant impact on the convection flow and rate of heat transfer. The most important result is the enhancement of heat transfer with the increasing of volume fraction for a particular Grashof number, also it improves with the rising of Grashof number for a particular nanoparticles volume fraction. Therefore, the aspect ratios of the enclosure have played a significant part in Nusselt number variation. In addition, we found that the Nusselt number Nu_{avg} is higher in the case of cavity without hot obstacle more than for cavity with hot obstacle, so the heat transfer improves in the case of cavity without hot obstacle. The significance of the obtained results consists that the nanofluid is one of the ways to improve heat transfer due to its specific characteristics and properties.

Keywords: convecție naturală, metoda Boltzmann latice, nanofluid, transfer de căldură, număr Grashof.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.05>

UDC: 532; 536.

Studiu teoretic al influenței concentrației volumetrică și densității nanoparticulelor asupra îmbunătățirii transferului de căldură convectiv al unui nanofluid într-o cavitate bidimensională, inclusiv un încălzitor pătrat

Oulahou Y.¹, Elguennouni Y.¹, Hssikou M.², Baliti J.², Alaoui M.¹

¹Departamentul de Mecanică-Energetică, Facultatea de Științe, Universitatea Moulay Ismail, Meknes, Maroc,

²Facultatea Polidisciplinară, Universitatea Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Maroc.

Rezumat. Obiectivele principale ale acestei lucrări sunt de a studia performanța și modelul nanofluidului ”Cu-apă” și de a demonstra că nanofluidurile se comportă diferit în timp ce își îmbunătățesc transferul de energie în comparație cu fluidele pure. Scopul stabilit a fost atins prin rezolvarea sarcinilor: pe baza profilurilor de fluidizare și izoterme pentru a demonstra modul în care procesul de convecție și gradientii de temperatură se îmbunătățesc. De asemenea, efectuarea unui studiu privind transferul de căldură al nanofluidului prin calcularea numărului Nusselt. În funcție de procentul de volum al nanoparticulelor φ , numărul Grashof Gr și obstacolul fierbinte au un impact semnificativ asupra fluxului de convecție și ratei transferului de căldură. Cel mai important rezultat este îmbunătățirea transferului de căldură odată cu creșterea fracției de volum pentru un anumit număr Grashof, de asemenea, se îmbunătățește odată cu creșterea numărului Grashof pentru o anumită fracție de volum de nanoparticule. Prin urmare, raporturile de aspect ale incintei au jucat un rol semnificativ în variația numărului Nusselt. În plus, am constatat că numărul Nusselt Nu_{avg} este mai mare în cazul cavității fără obstacol fierbinte mai mult decât în cazul cavității cu obstacol fierbinte, astfel încât transferul de căldură se îmbunătățește în cazul cavității fără obstacol fierbinte. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că nanofluidul este una dintre modalitățile de îmbunătățire a transferului de căldură datorită caracteristicilor și proprietăților sale specifice.

Cuvinte-cheie: convecție naturală, metoda ecuației Boltzmann latice, nanofluid, transfer de căldură, număr Grashof.

Теоретическое исследование влияния объемной концентрации и плотности наночастиц на усиление конвективного теплопереноса наножидкости в двумерной полости, включая квадратный нагреватель

Оулахоу Ю.¹, Эльгуенноуни Ю.¹, Хсикоу М.², Балити Д.², Алаоуи М.¹

¹Кафедра механико-энергетики, факультет естественных наук, Университет Мулая Исмаила, Мекнес, Марокко.

²Полидисциплинарный факультет Университета Султана Мулая Слимана, Бени Меллаль, Марокко.

Аннотация. Наножидкость — это одно из решений теплопередачи, которое может применяться в таких областях, как ядерная энергетика, системы наноэлектроники и нагрев солнечной жидкости. В этой работе естественная конвекция наножидкости Cu-вода исследуется с использованием метода решеточных уравнений Больцмана при мезоскопическом подходе. Основные цели этой работы — изучить характеристики и структуру наножидкости «медь-вода» и продемонстрировать, что наножидкости ведут себя по-другому, улучшая при этом передачу энергии по сравнению с чистыми жидкостями. Исследование проведено для объемной доли твердых наночастиц и числа Грасгофа Gr в пределах от 0 до 8% и от 10^3 до 10^5 , соответственно. Поставленная цель была достигнута путем решения следующих задач: на основе профилей линий тока и изотерм продемонстрировать, как улучшается процесс конвекции и температурные градиенты. Также проводятся исследования теплопередачи наножидкости путем расчета числа Нуссельта. В зависимости от объемной доли наночастиц число Грасгофа Gr и горячее препятствие оказывают существенное влияние на конвекционный поток и скорость теплопередачи. Наиболее важным результатом является рост теплопередачи с увеличением объемной доли наночастиц для определенного числа Грасгофа, а также она расчете увеличением числа Грасгофа при определенной объемной доле наночастиц. Таким образом, соотношение сторон корпуса сыграло значительную роль в изменении числа Нуссельта. Кроме того, мы обнаружили, что число Нуссельта выше в случае полости без горячего препятствия больше, чем в полости с горячим препятствием, поэтому теплообмен улучшается в случае полости без горячего препятствия. Значимость полученных результатов состоит в том, что применение наножидкости является одним из способов улучшения теплоотдачи благодаря своим специфическим характеристикам и свойствам. **Ключевые слова:** естественная конвекция, метод решеточных уравнений Больцмана, наножидкость, теплопередача, критерий Грасгофа.

INTRODUCTION

In recent years, several researches on systems filled with nanofluids have been conducted due to the unsolved phenomena of nanofluids [1-5]. Heat transmission through natural convection in a nanofluid, which solid nanoparticles are suspended in a pure fluid, is a significant phenomenon due to its extensive application in science and engineering systems. Natural convection heat transfer of nanofluids is used in a wide range of industries fields, such as electronics, automotive, and nuclear reactor cooling, biomedical purposes. Dong et al. [6] simulated a natural convection around the dome in the cooling system. Li et al. [7] studied, in hydrothermal reactor, a natural convection flow and heat transfer. Shahrooz et al. [5] investigated the natural convection of nanofluid flow in a confined space in a study using the first and second laws of thermodynamics, Saha et al. [8] investigated thermal influence of heated fin on MHD natural convection flow of nanofluids inside a wavy square cavity, Saleem et al. [9], and Hu et al. [10] studied Oscillatory natural convection of nanofluid near its density maximum in a narrow horizontal annulus.

The main goal of using nanofluids is to improve energy transmission and heat exchange. Nanofluid displays several benefits compared to pure fluid (water, oil, or ethylene glycol) such as thermal conductivity and heat transfer coefficient. The addition of nanoparticles, such as aluminum oxide (Al_2O_3) [9, 10], copper (Cu) [11, 12], zinc oxide (ZnO) [15], copper oxide (CuO) [16], silicon dioxide (SiO_2) [17], silver (Ag) [18], Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) [19], titanium oxide (TiO_2) [20] to pure fluid enhances the heat transfer properties. Nanoparticles have a range of factors and characteristics that impact heat transfer such as the type, the size, the form, and the concentration of nanoparticles as well as the surface layer on the nanoparticles.

This property was studied by Khanafer et al. [21] in two-dimensional cavity containing nanofluids. They demonstrated that the heat transmission improves as the volume percentage of solid nanoparticle rises. Shanmugapriya et al. [22] studied the impact of nanoparticle shape in enhancing heat transfer of magnetized ternary hybrid nanofluid, Maleki et al. [23] investigated experimentally heat transfer enhancement in heated copper tube for

nanofluids, Ma et al. [24] studied heat transfer enhancement of nanofluid flow at the entry region of microtubes, and Halawa et al. [25] investigated the optimum design of magnetic field arrangement to enhance heat transfer performance of magnetic nanofluid. They found an enhancement in heat transmission by rising the solid nanoparticles volume percentage. In the same direction Ali et al. [26] experimentally studied nanofluids for heat pipes used in solar photovoltaic panels, also Najim et al. [27] simulated performance improvement of shell and tube heat exchanger by using nanofluid. They reported that adding nanoparticles concentration improve Nusselt number, so heat transfer. Contrary to the general expectation, Abu-Nada et al. [28] investigated the effect of nanofluid variable properties on natural convection. The results showed a reduction in the nanoparticles volume percentage causes an enhance in heat transmission.

The reason of these unexpected findings may be understood by taking into account that the performance of nanofluids is a direct result of the two contradictory effects on heat transmission in natural convection flows. This includes effective dynamic viscosity and thermal conductivity, which influence temperature and flow fields, respectively. These parameters increase with volume fraction of suspended nanoparticles [29].

The Lattice Boltzmann method (LBM) has proved its capabilities to study many complicated fluids flow phenomena. By using this approach, Sheikholeslami et al.[30] studied a nanofluid forced convection heat transfer around the elliptic obstacle by using LBM, also Hssikou et al. [31] investigated the variation of heat transfer in a partially heated or cooled enclosure. Moreover, Li et al. [32] conducted a 3D Lattice Boltzmann method study on condensation and condensate on textured structure.

In this study, the LBM is used to simulate natural convection fluid behaviour and enhancement of heat transmission inside an enclosure.

The effect of nanoparticles enhanced thermophysical properties on fluid, presented in terms of streamlines and isotherms distribution as well as the average Nusselt number quantifying the heat transfer, is discussed in this article. The main parameters used in this study are Grashof number Gr , the percentage of the concentration of the nanoparticles ϕ , the aspect

ratio of the closed cavity, and the hot obstacle added to the center of the cavity.

I. PROBLEM STATEMENT

A two-dimensional configuration enclosure of height H and width W filled with Cu-water nanofluid is considered in this study (Fig. 1). The size and shape of the nanoparticles are considered homogeneous and uniform. In addition, we assume that the base fluid's velocity moves at the same of solid nanoparticles and are in a condition of thermal equilibrium. The nanofluid inside the enclosure is heated from the left wall kept at hot temperature T_H , and cooled from the right-hand side wall at a cold temperature T_C , whereas the top and bottom walls are considered adiabatics.

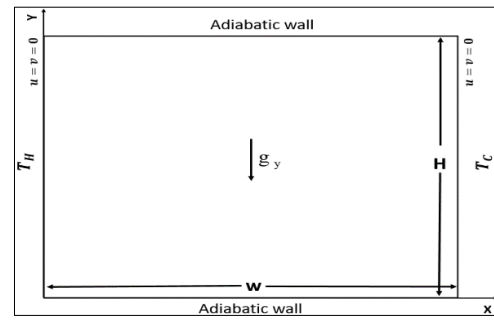


Fig. 1. Geometry enclosure

For the present study, the aspect ratio Ar is the ratio of the enclosure width to its height $Ar = W/H$, which equals to 1 (square form). Note that the block dimension is fixed as $A_o = L/W = 0.25$, in this study.

I. NANOFLUID AND NUMERICAL METHOD

1. NANOFLUID

Table 1 presented the thermos-physical characteristics of the pure fluid (water) and nanoparticle (Cu).

The external force term F_y at y direction and the effective thermos-physical characteristics of nanofluid are taken as.

$$F_y = (\rho\beta)_{nf} g_y \left(T - \frac{T_H + T_C}{2} \right), \quad (1a)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_{np}, \quad (1b)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_{nf} + \phi (\rho c_p)_{np}, \quad (1c)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi) (\rho\beta)_{nf} + \phi (\rho\beta)_{np}, \quad (1d)$$

where ϕ stands for the solid volume percentage, ρ is the density, c_p represents the specific heat capacity at constant pressure, β is the thermal

expansion coefficient, and subscripts f , D_2Q_9 , np and nf refer, respectively, to fluid pure, solid nanoparticle, and nanofluid.

In this research, the nanofluid effective dynamic viscosity μ_{nf} and the effective thermal conductivity κ_{nf} are defined, respectively, according to the Graham [33] (2a) and Patel et al. [34] (2b) models by:

$$\mu_{nf} = \mu_f \left(1 + 2.5\phi + 4.5 \frac{1}{4 \frac{h}{d_{np}} \left(1 + \frac{h}{d_{np}} \right) \left(1 + \frac{2h}{d_{np}} \right)^2} \right) \quad (2a)$$

$$\kappa_{nf} = \kappa_f \left(\frac{\kappa_{np}}{\kappa_f} \left(1 + 25000 \frac{u_c d_{np}}{\alpha_f} \right) \frac{d_f}{d_{np}} \frac{\phi}{1-\phi} + 1 \right) \quad (2b)$$

Where $h = 9nm$ is the inter-nanoparticles spacing, d_{np} is nanoparticle diameter, d_f is the pure fluid diameter, and u_c is Brownian velocity for nanoparticles which is calculated by:

$$u_c = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_{np}^2} \quad (3)$$

Where $k_B = 1.3807 \times 10^{-23}$ is the Boltzmann constant.

2. NUMERICAL METHOD

For the fluid flow and heat transfer fields, LBM based on two distribution functions to calculate the flow (f) and the temperature (g) patterns.

The governing equations for f and g are respectively:

$$f_i(\mathbf{x} + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = \dots - \frac{1}{\tau_f} (f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) + \Delta t F_i \quad (4a)$$

$$g_i(\mathbf{x} + c_i \Delta t, t + \Delta t) - g_i(\mathbf{x}, t) = \dots - \frac{1}{\tau_g} (g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) \quad (4b)$$

where Δt represents lattice time step $\Delta t = 1$, c_i is the discrete particle velocity vector in the i -direction, and τ_f (τ_g) is the relaxation times for the flow (temperature) field. f_i^{eq} (g_i^{eq}) is the flow's (temperature) local equilibrium distribution function [35, 36] at second and first orders, respectively, as:

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left(1 + \frac{3(c_i \cdot u)}{c^2} + \frac{9(c_i \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right) \quad (5a)$$

$$g_i^{eq}(x, t) = \omega_i T \left(1 + \frac{3(c_i \cdot u)}{c^2} \right) \quad (5b)$$

Table 1. Thermophysical characteristics of pure fluid and suspended nanoparticles.

Physical characteristics	Fluid phase (Water)	Solid phase (Cu)
ρ (kg/m ³)	997.1	8954
C_p (J/kg K)	4179	383
k (W/mK)	0.613	400
$\beta \times 10^{-5}$ (K ⁻¹)	21	1.67
μ (kg/ms)	8.55×10^{-4}	-
$d_{f/np}$ (nm)	0.29	10

where the quantities ρ and \mathbf{u} stand for macroscopic density and velocity, respectively. ω_i (ω_i^*) the weight for flow (temperature). Figure 2 illustrates D_2Q_9 model used in this study.

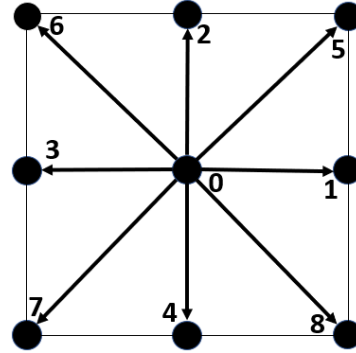


Fig. 2. The discrete velocity sets of the D_2Q_9 model.

The kinematic viscosity ν is given as:

$$\nu = \left[\tau_f - \frac{1}{2} \right] c_s^2 \Delta t \quad (6a)$$

And the thermal diffusivity α is defined by:

$$\alpha = \left[\tau_g - \frac{1}{2} \right] c_s^2 \Delta t \quad (6b)$$

By fixing Grashof (Gr), Mach (Ma), and Prandtl (Pr) numbers, the viscosity ν is calculated by:

$$\nu = c_s Ma N \sqrt{1/Gr} \quad (7)$$

where N denotes the lattices number in the y -direction. Prandtl (Pr) and Grashof (Gr) numbers are given by:

$$Gr = \frac{\beta g_y N^3 (T_H - T_C)}{\nu^2}, \quad (8a)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}. \quad (8b)$$

The external force term F_i of this problem of natural convection, which is applied in collision step, as shown in Eq. (3a) is provided by:

$$F_i = \frac{\omega_i}{c_s^2} F_y c_i, \quad (9)$$

Where $F_y = \rho \cdot g_y \cdot \beta \Delta T$ is the buoyancy force term, g_y is the gravitational vector, and ΔT is computed as $\Delta T = T - \frac{T_H + T_C}{2}$.

Finally, the macroscopic quantities of density ρ , Momentum $\rho \mathbf{u}$, and temperature T are calculated by using equations as follows:

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i, \quad (10a)$$

$$\rho \mathbf{u} = \sum_{i=0}^8 f_i c_i, \quad (10b)$$

$$T = \sum_{i=0}^8 g_i. \quad (10c)$$

Along the heated wall, the local (Nu) and the average Nusselt number (Nu_{avg}) are determined respectively, as follow:

$$Nu = -\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} \frac{H}{T_H - T_C} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (11a)$$

$$Nu_{avg} = \frac{1}{H} \int_0^H Nu \cdot dy. \quad (11b)$$

In this work, note that in part of results and discussion, all the values of stream function have been calculated by $|\psi'_{max}|$, which is defined as:

$$|\psi'_{max}| = |\psi_{max}| \times \nu_{nf}. \quad (12)$$

II. RESULTS AND DISCUSSION

1.

CHOICE OF MESH AND VALIDATION

To ensure a grid independent solution, a thorough mesh testing process was conducted.

Seven alternative mesh configurations were explored for the case of $Gr = 10^5$ and $\phi = 5\%$. The average Nusselt number Nu_{avg} was calculated on the heated side wall.

We concluded that a grid independent solution is ensured with an $N = 140$ grid size, as shown in Table 2. The second step is to validate our results with those of the literature.

So, our findings are compared to Khanafer et al. [21] in terms of the temperature distribution on axial midline (Fig. 3).

Table 2. Grid independent test on the hot wall for $\phi = 0\%$ and for $\phi = 5\%$.

Grid size	Nu_{avg}	
	$\phi = 0\%$	$\phi = 5\%$
60×60	7.30436087	9.08368015
80×80	7.74876928	9.31092167
100×100	7.83996344	9.41771507
120×120	7.88659382	9.47491074
140×140	7.90700579	9.50557423
160×160	7.90773249	9.50557423
180×180	7.89107037	9.51982403

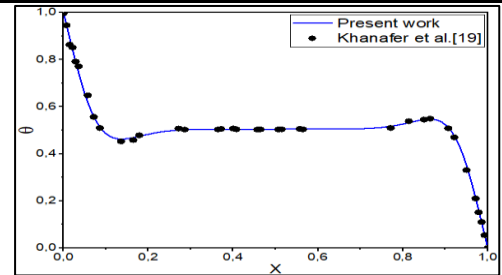


Fig. 3. The temperature profile at the vertical mid-section for $Gr = 10^5$ and $\phi = 5\%$.

The Fig. 4 and 5, which also are compared with those of Khanafer et al. [21], illustrate the isotherms and streamlines profiles.

This shows the good agreement of the present results with literature. So, the ability of lattice Boltzmann method for solving the problems of nanofluid.

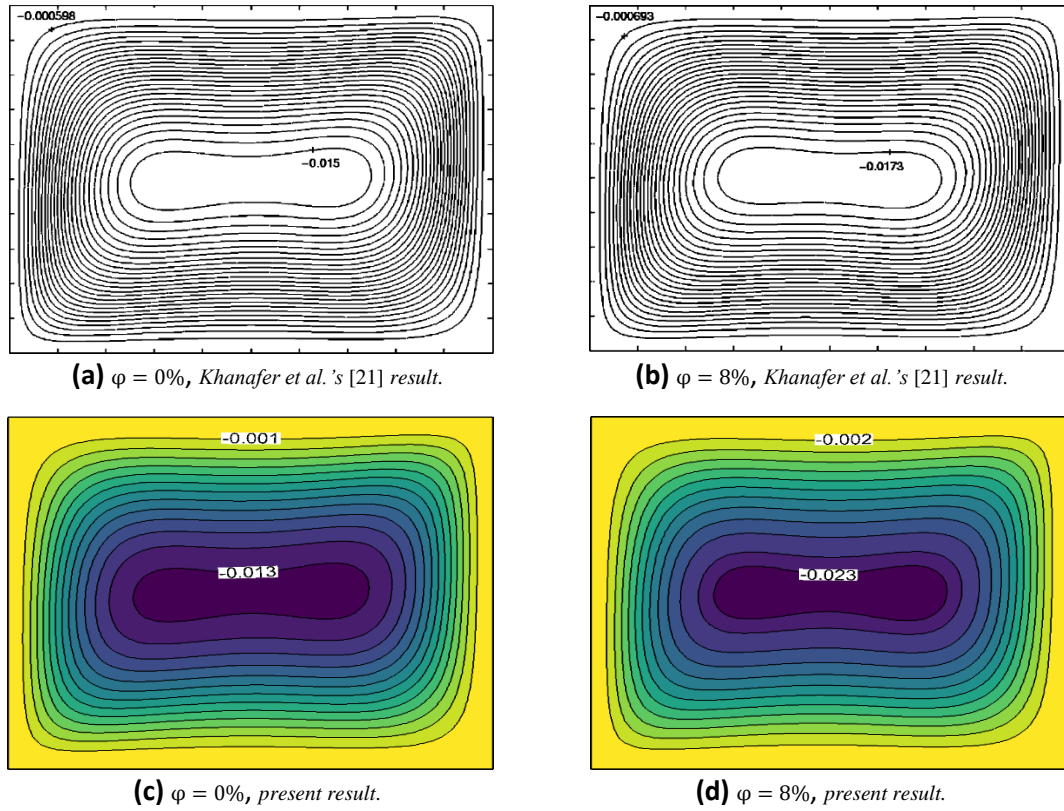


Fig. 4. Streamlines for $\phi = 0\%$ and $\phi = 8\%$, $Gr = 10^4$.

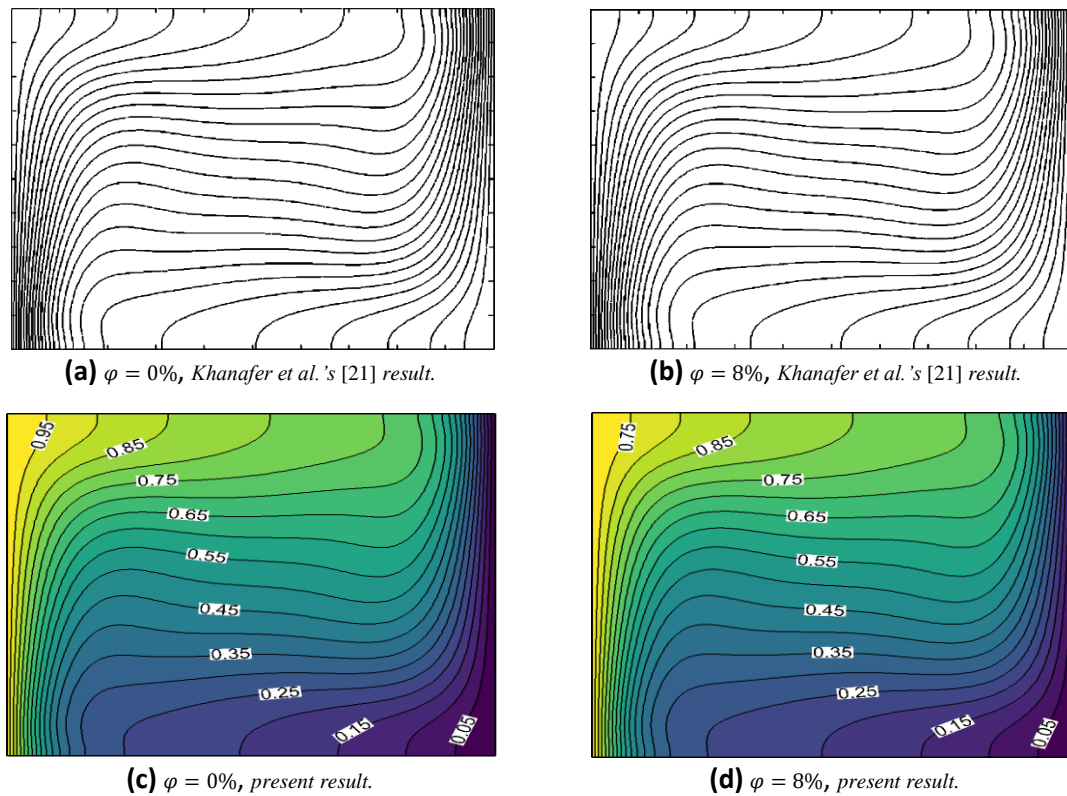


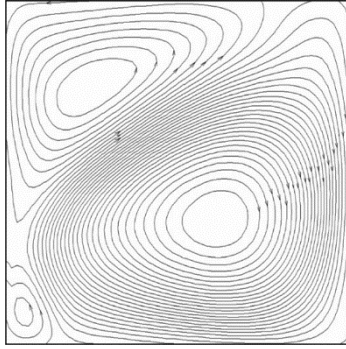
Fig. 5. Isotherms for $\phi = 0\%$ and $\phi = 8\%$, $Gr = 10^4$.

In order to validate the elaborated code, we also compare our findings with the experimental results of natural convection in a cavity filled

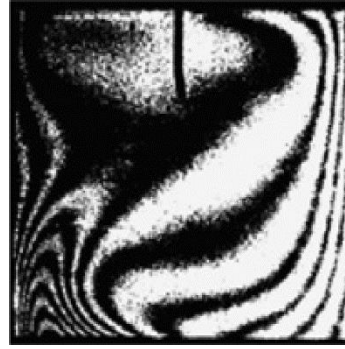
with air $Pr = 0.71$ [37]. The heat source is located at $x_d = 0.25$ on the bottom side of the

enclosure; its length is $\frac{2}{5}H$. Both vertical walls are maintained at a cold temperature, while the top wall is adiabatic. From this examination, it

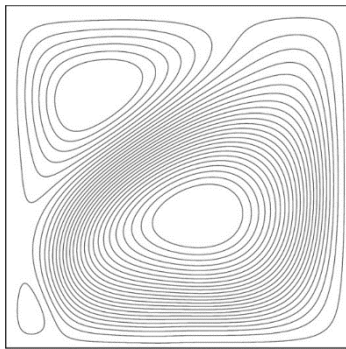
shows that there is a good agreement between the experimental and numerical data of Corvaro and Paroncini [37] and our numerical findings (Fig. 6).



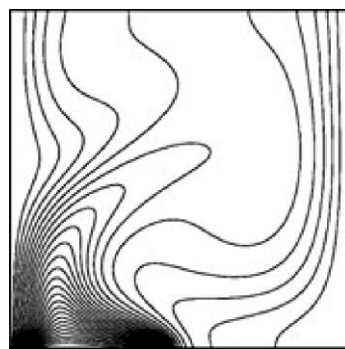
(a) Experimental result of Corvaro et Paroncini [37].



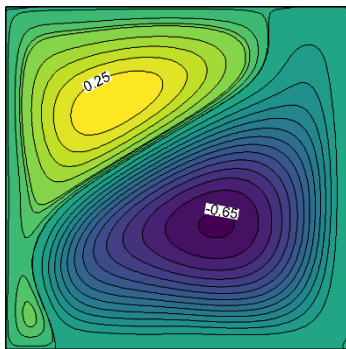
(b) Experimental result of Corvaro et Paroncini [37].



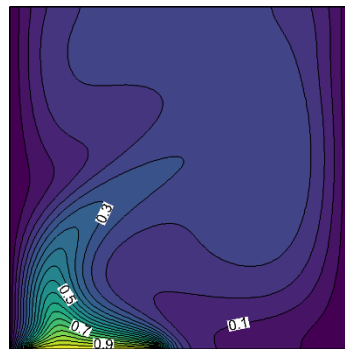
(c) Numerical result of Corvaro and Paroncini [37].



(d) Numerical result of Corvaro et Paroncini [37].



(e) Present result.



(f) Present result.

Fig. 6. Streamlines (a, c, and e) and isotherms (b, d, and f) for $Ra = 2.12 \times 10^5$ in the case of air.

2. EFFECT OF NANOPARTICLES VOLUME FRACTION ϕ AND GRASHOF NUMBER Gr

The graphical findings are presented to determinate the impacts of solid volume percentage ϕ on the streamlines, isotherms profiles, and Nusselt number for two different Grashof number values Gr . Figures 6 and 7

show the streamlines and isotherms profiles for $Gr = 10^3$ with various nanoparticles concentration ϕ (0–8%). The streamlines show that the maximum stream function absolute value $|\psi'_{max}|$ has increased as volume fractions of nanoparticles rise (Fig. 7). The formation of new vortexes, so the intensity of streamlines enhances due to change of nanofluid viscosity.

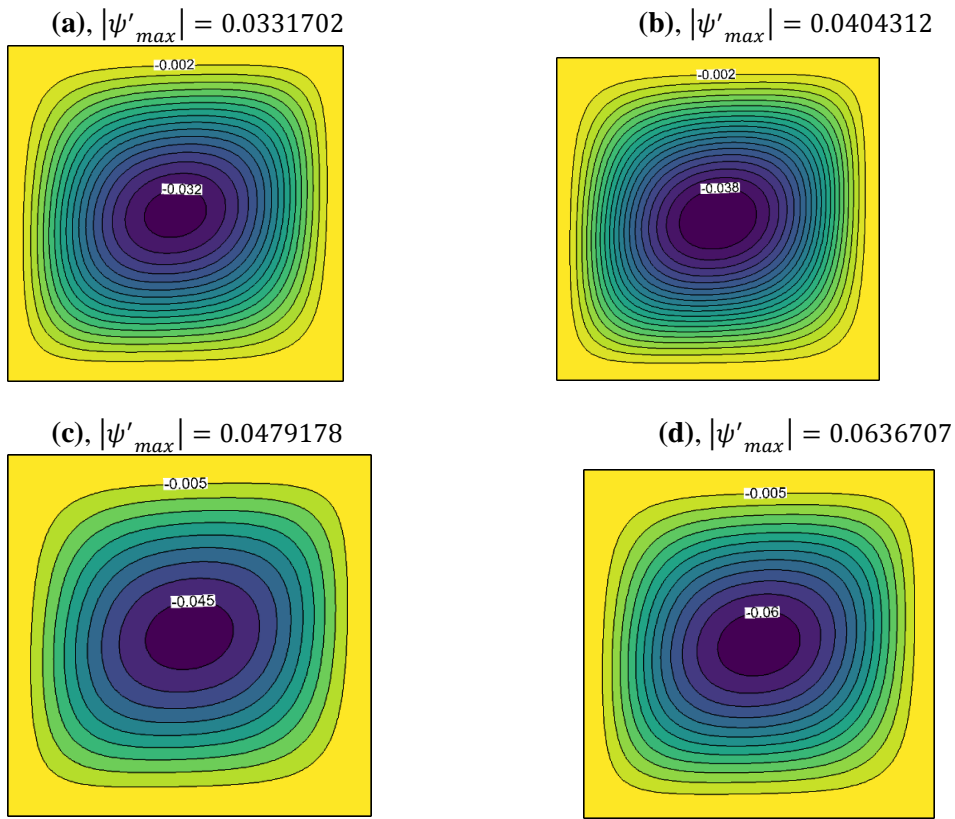


Fig. 7. Streamlines for $Gr = 10^3$, (a) $\varphi = 0\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (c) $\varphi = 4\%$, and (d) $\varphi = 8\%$.

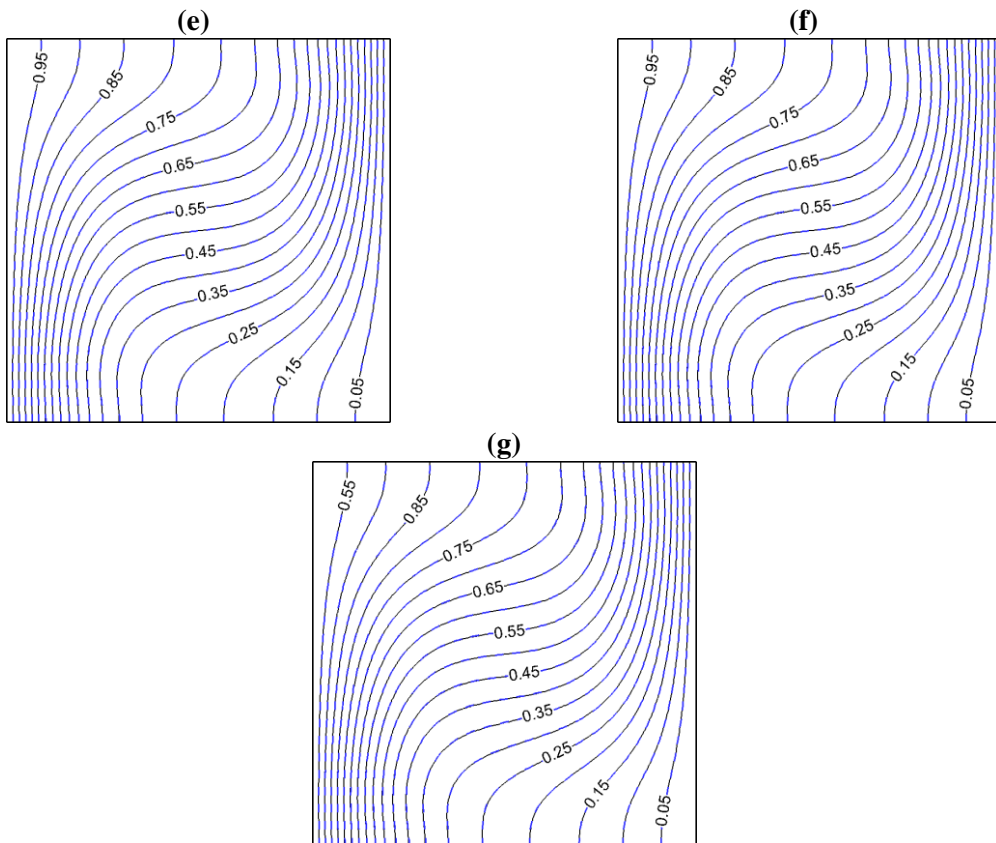


Fig. 8. Isotherms for $Gr = 10^3$, (e) $\varphi = 2\%$ (---), (f) $\varphi = 4\%$ (---), (g) $\varphi = 8\%$ (---), $\varphi = 0\%$ (-).

(a), $|\psi'_{max}| = 0.0032047$

(b), $|\psi'_{max}| = 0.0037453$

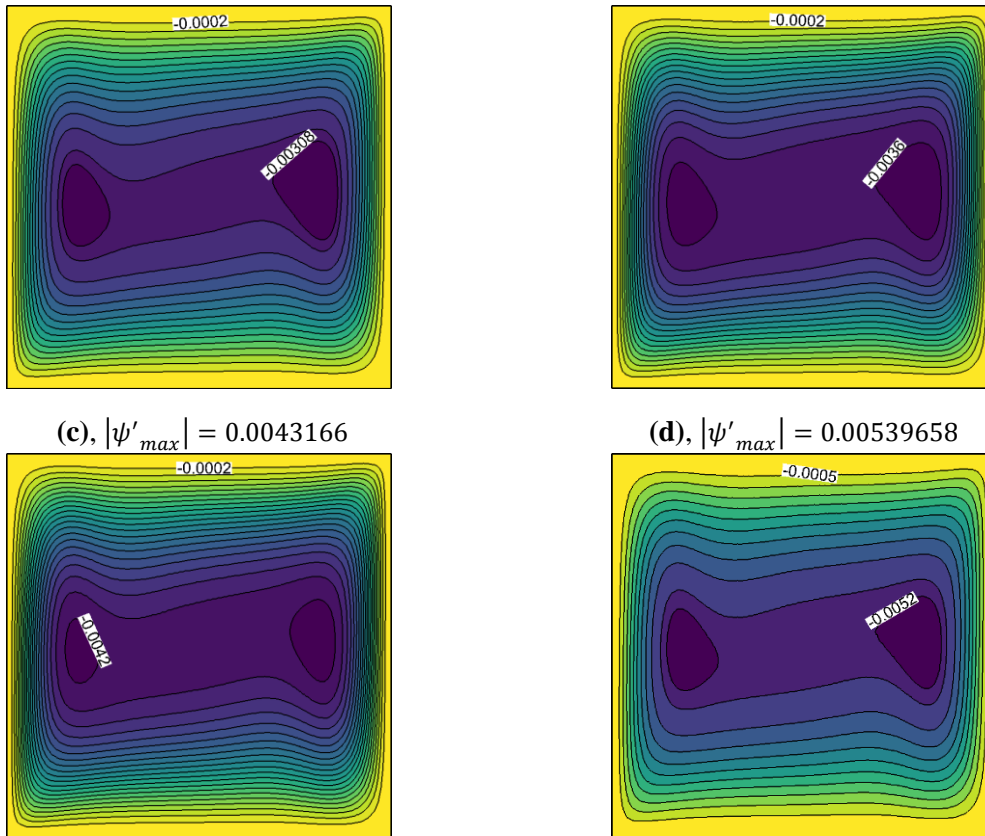


Fig. 9. Streamlines for $Gr = 10^5$, (a) $\varphi = 0\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (c) $\varphi = 4\%$, and (d) $\varphi = 8\%$.

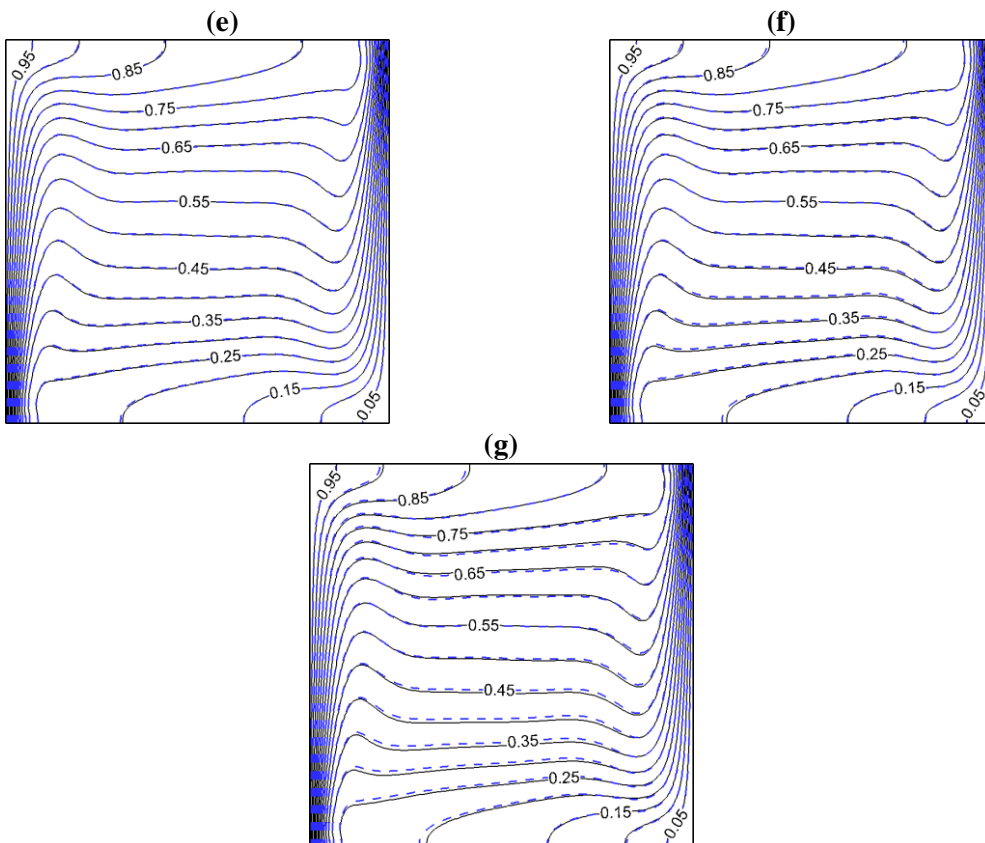


Fig. 10. Isotherms for $Gr = 10^5$, (e) $\varphi = 2\%$ (---), (f) $\varphi = 4\%$ (---), (g) $\varphi = 8\%$ (---), and $\varphi = 0\%$ (-).

Figure 8 demonstrates that, at low Grashof number $Gr = 10^3$, it is observed that there is no significant difference between the lines of temperature for all values of nanoparticles volume percentage due to the lowest Grashof value which make the viscous forces dominate over buoyancy forces, so, the heat transfer is dominant by conduction process.

Figure 9 illustrates that for high Grashof numbers ($Gr = 10^5$), as the solid nanoparticles volume percentage ϕ rises, the $|\psi'_{max}|$ of the cavity increase, indicating better convection. It shows how the Grashof number affects the isotherms, which are more sensitive for $Gr = 10^5$ than $Gr = 10^3$. However, when the volume percentage of nanoparticles rises, the isotherms become increasingly distorted due to an increase of buoyance forces, and the lines on the bottom wall (the top) move and come close to the right side (the left side). Due to higher conductivity of nanofluid, which might improve heat transmission, the thermal boundary layer is more sensitive (Fig. 10). Which means that the natural convection is enhanced.

Figure 11 presents the effect of Grashof number Gr , for a specific nanoparticle concentration $\phi = 4\%$, on the temperature distribution. It shows that the temperature is influenced by Grashof number; for $Gr = 10^5$ the temperature profile is distorted more than for $Gr = 10^4$ and $Gr = 10^3$. Figure 12 elucidates that the impact of volume fraction ϕ , for various Grashof numbers Gr (10^3 , 10^4 , and 10^5), on the average Nusselt number Nu_{avg} along the hot side wall. It is clear that the Nu_{avg} rises as the volume fraction ϕ and Grashof number Gr augment due to reduce of the thermal boundary layer thickness which

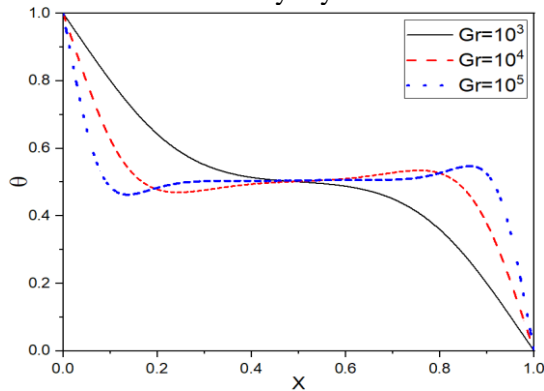


Fig. 11. Temperature profiles in the middle of vertical axis for different values for $\phi = 4\%$ of $Gr = 10^3$, 10^4 , and 10^5 .

is the area near a hot surface where heat is transferred from the surface to the fluid. Accordingly, heat transfer is improved as the solid nanoparticles volume percentage ϕ and Grashof number augment. For $Gr = 10^3$, the Nu_{avg} was not affected much by increasing nanoparticle volume percentage. By increasing Grashof number, the buoyancy forces increase which enhances energy transport. Thus, the heat transmission enhances by convection which is dominated at a high Grashof numbers. In fact, the inertia forces for $Gr = 10^3$ are lower than those for $Gr = 10^5$. Because of this, a greater negative impact of nanoparticles at $Gr = 10^3$, which lowers the Nusselt number more compared to higher Grashof numbers.

For various aspect ratios of the enclosure Ar , the impact of the solid nanoparticle concentration ϕ and the Grashof number Gr on the average Nusselt number Nu_{avg} along the heated side wall, is displayed in Fig. 13. The results indicated that throughout aspect ratios and Grashof numbers, the Nu_{avg} value increased with the rise in nanoparticles volume proportion.

It is obviously observed that for all of Grashof number values the great values of the Nu_{avg} are observed for $Ar = 0.5$ then $Ar = 2$, and the small values are observed for $Ar = 1$.

If one of enclosure dimensions increases, either in width or height, the transfer of energy improves. Our results established that the cavity's geometry also plays a crucial role in heat transmission.

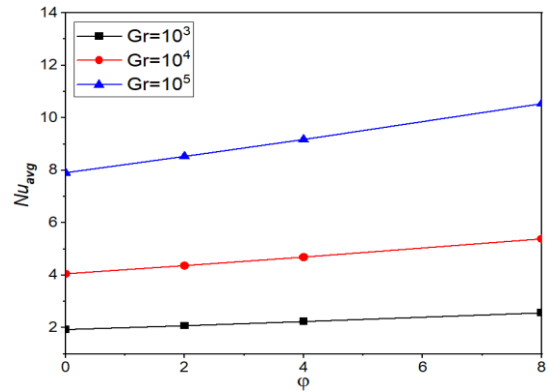


Fig. 12. Average Nusselt numbers Nu_{avg} for various values of ϕ along the heated surface.

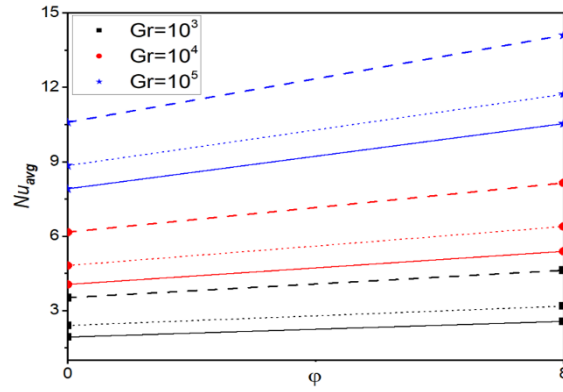


Fig. 13. Average Nusselt numbers Nu_{avg} , (—) $Ar = 1$, (---) $Ar = 0.5$, and (\cdots) $Ar = 2$.

3. EFFECT OF HOT OBSTACLE

In this part of this study, the effect of hot square obstacle situated in the center of a square

enclosure is investigated. The block dimension is $A_o = 0.25$ (Figs. 14 and 15).

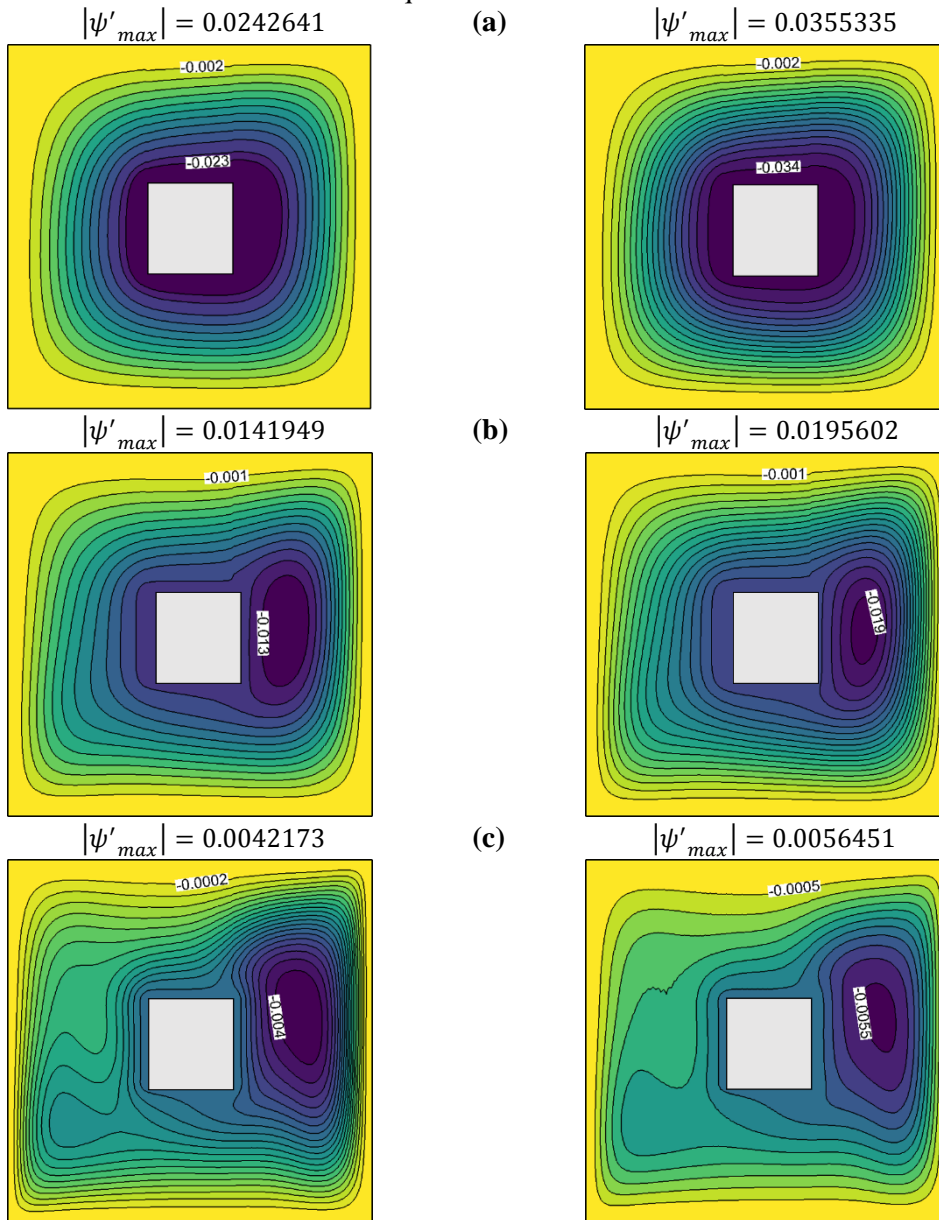


Fig. 14. Streamlines for $\phi = 0\%$ (on the left) and $\phi = 4\%$ (on the right), (a) $Gr = 10^3$, (b) $Gr = 10^4$, and (c) $Gr = 10^5$.

Figure 14 presents the streamlines contours for two distinct values of solid volume percentage $\varphi = 0\%$ and $\varphi = 4\%$, and for three values of Grashof numbers $Gr = 10^3$, 10^4 , and 10^5 . It shows that for $Gr = 10^3$, from $\varphi = 0\%$ to $\varphi = 4\%$, the streamlines have taken the same form with an increasing in the stream function absolute values $|\psi'_{\max}|$.

As a consequence, the convection process is enhanced with the increasing of nanoparticle volume proportion. Moreover, we noticed that for the whole range of volume proportion of nanoparticles φ and Grashof numbers Gr , it is clear that due to the heated block, the circulation

of stream tends to be elongated in rightward horizontal direction, resulting the vortex for $Gr = 10^4$ and $Gr = 10^5$. Also, the results demonstrate that with increasing Gr , the convection process dominates. For Fig. 15, the isotherms are affected by heated obstacle. We observed that for low Grashof number, the isotherms are distorted around the heated block, which causes convection to dominate. Also, we show that there is no visible difference in the lines of temperature between $\varphi = 0\%$ and $\varphi = 4\%$ due to the low Grashof number ($Gr = 10^3$), the impact of nanoparticle volume fraction starts to appearance from $Gr \geq 10^4$.

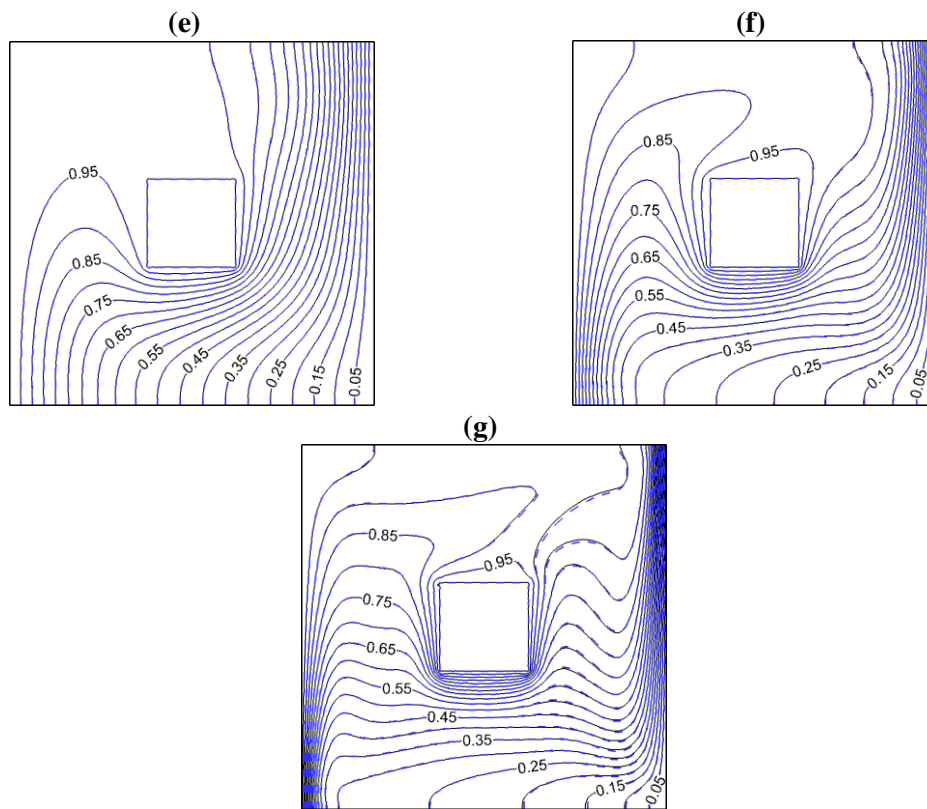


Fig. 15. Isotherms for $\varphi = 0\%$ (—) and $\varphi = 4\%$ (---), for (e) $Gr = 10^3$, (f) $Gr = 10^4$, and $Gr = 10^5$.

To investigated the effect of the existence of the hot obstacle on the Nusselt number Nu_{avg} . Figure 16 presents that the average Nusselt number calculated along the hot wall of the cavity with and without the hot obstacle for a particular Grashof number $Gr = 10^5$ and different nanoparticles concentration values

$0 \leq \varphi \leq 8$. The results showed that without the existence of obstacle, the exchange between the surfaces of the cavity and the fluid is high and important and the thermal boundary layer thickness reduces, so the heat transfer enhances more than the case of cavity with obstacle.

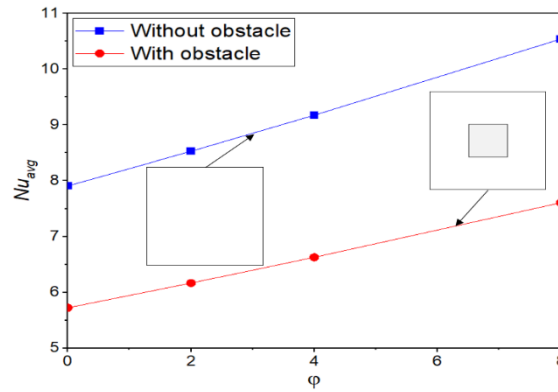


Fig. 16. Average Nusselt numbers on the hot wall of cavity with and without the obstacle for $Gr = 10^5$

CONCLUSION

A numerical study of natural convection heat transport of a nanofluid in a two-dimensional cavity (with and without obstacle), by using Lattice Boltzmann Method (LBM), is conducted. The key parameters are volume percentage of solid nanoparticles ϕ and Grashof numbers Gr , which are in the ranges $Gr = 10^3 - 10^5$ and $\phi = 0 - 8\%$, respectively. The main results of this work are as follows:

- For low Grashof numbers ($Gr = 10^3$), the heat transmission is not sufficiently sensitive to the solid nanoparticle volume percentage ϕ due to decrease of buoyancy forces. While with the rising of Gr to the $Gr = 10^5$, the heat transfer enhances.
- As increases the volume percentage ϕ for high Grashof numbers Gr leads the heat transmission enhancement efficiently. Also, by widening the cavity, either in height or width, we enhance the heat transmission rate.
- The aspect ratios of enclosure have a significant role on heat transfer of nanofluid.
- The hot square obstacle has an important effect on natural convection flow of nanofluid, which the Nusselt number Nu_{avg} is higher in the case of cavity without hot obstacle more than for cavity with hot obstacle, so the heat transfer improves in the case of cavity without hot obstacle.

Nomenclatures

Ar	Aspect ratio
A_o	Obstacle dimensions
d	Length of the heat source along x-axis
c_p	Specific heat capacity at constant pressure
d_{np}	Diameter of nanoparticles
d_f	Diameter of base fluid
h	Inter-nanoparticles spacing
c_i	Discrete particle speeds

c_s	Speed of sound
f	Density distribution function
f^{eq}	Equilibrium state of f
g	Temperature distribution function
g^{eq}	Equilibrium state of g
g_y	Gravity acceleration
Ma	Mach number
κ	Thermal conductivity
Nu	Local Nusselt number
Pr	Prandtl number
Gr	Grashof number
p	Pressure
W	Enclosure length
H	Enclosure height
L	Block length
T	Temperature
$\mathbf{u}(u, v)$	Vector of velocity
x, y	Cartesian coordinates

Greek symbols

ρ	Density
α	Fluid thermal diffusivity
ν	Kinematic viscosity
β	Thermal expansion coefficient
θ	Normalized temperature
μ	Dynamic viscosity
ω_i	Weighted factor for flow (D2Q9)
ϕ	Nanoparticle volume fraction
ψ	Stream function
τ_v	Relaxation time for flow
τ_c	Relaxation time for temperature
Δt	Time increment

Subscripts

f	Fluid
np	Nanoparticle
nf	Nanofluid
avg	Average
H	Hot
C	Cold

References

[1] Bunni M. J. and Abass K. I. Using nano-Fe2O3 as coolants in PV / T system: An experimental study. *International Journal of Computation and Applied Sciences IJOCAAS*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 9-14.

- [2] Boulahia Z., Boulahia C., and Sehaqui R. Two-phase computation of free convection and entropy generation inside an enclosure filled by a hybrid Al₂O₃-TiO₂-Cu water nanofluid having a corrugated heat source using the generalized Buongiorno's mathematical model: Employment of finite volume method. *Materials Today: Proceeding*, 2020, vol. 30, pp. 1056–1067. doi: 10.1016/J.MATPR.2020.05.523.
- [3] Chummar A. and Harish R. Numerical investigation of forced convective heat transfer of nanofluids within an enclosure. *Materials Today: Proceeding*, 2022, vol. 51, pp. 1465–1472. doi: 10.1016/J.MATPR.2021.10.090.
- [4] Sun M. H., Wang G. B., and Zhang X. R. Rayleigh-Bénard convection of non-Newtonian nanofluids considering Brownian motion and thermophoresis. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, vol. 139, pp. 312-325. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.007.
- [5] Yousefzadeh S., Eskandari M., Montazerifar F., Akbari O. A., Kahbandeh F., Khalili M., and Baghaei, S. Natural convection of Water/MWCNT nanofluid flow in an enclosure for investigation of the first and second laws of thermodynamics. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, vol. 61, no. 12, pp. 11687–11713. doi: 10.1016/J.AEJ.2022.05.039.
- [6] Saha T., Islam T., Yeasmin S., and Parveen N. Thermal influence of heated fin on MHD natural convection flow of nanofluids inside a wavy square cavity. *International Journal of Thermofluids*, 2023, vol. 18, pp. 100338. doi: 10.1016/J.IJFT.2023.100338.
- [7] Dong C., Chen S., Chen R., Tian W., Qiu S., and Su G. H. Numerical simulation of natural convection around the dome in the passive containment air-cooling system. *Nucl. Eng. Technol.*, 2023, vol. 55, no. 8, pp. 2997–3009.
- [8] Li Y., Liu F., Li X., and Jin H. Flow and heat transfer characteristics of natural convection in hydrothermal reactor with segmented heating. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 227, p. 120451, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120451.
- [9] Saleem K. B., Marafie A. H., Al-Farhany K., Hussam W. K., Sheard G. J. Natural convection heat transfer in a nanofluid filled l-shaped enclosure with time-periodic temperature boundary and magnetic field. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 69, pp. 177-191. doi: 10.1016/J.AEJ.2022.12.030.
- [10] Hu Y. P., Wang F. J., Zhang Y. C., Li Y. R., Li M. H. Oscillatory natural convection of Al₂O₃-water nanofluid near its density maximum in a narrow horizontal annulus. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 136, p. 106207. doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2022.106207.
- [11] Majstorović D. M., Quindel P., Živković E. M., and Kabelac S. A new setup for speed of sound measurements and experimental data for nanofluids Al₂O₃ or Ag with water or ethylene glycol. *Journal Molecular Liquids*, 2023, vol. 389, p. 122930, doi: 10.1016/J.MOLLIQ.2023.122930.
- [12] Kavitha C., Mukeshkumar P. C., and Arun A. K. Numerical study on the performance of Al₂O₃/water nanofluids as a coolant in the fin channel heat sink for an electronic device cooling. *Materials Today Proceedings*, 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.02.337.
- [13] Waqas H., Jahid Hasan M., Majeed A. H., Liu D. and Muhammad T. Hydrothermal characteristics, entropy and kinetic energy investigation in a sinusoidal cavity for variable wavelengths and solid volume fraction using Cu-water nanofluid. *Journal Molecular Liquids*, 2023, vol. 389, p. 122911, doi: 10.1016/J.MOLLIQ.2023.122911.
- [14] Chowdhury S., Shuvo M. S., and Saha S. Comment on 'Investigation of heat transfer enhancement of Cu-water nanofluid by different configurations of double rotating cylinders in a vented cavity with different inlet and outlet ports' [International Communications in Heat and Mass Transfer, 126 (2021) 105432]. *International Communication in Heat Mass Transfer*, 2023, vol. 147, p. 106977, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2023.106977.
- [15] Rahmati M. Effects of ZnO/water nanofluid on the thermal performance of wet cooling towers. *International Journal Refrigeration*, 2021, vol. 131, pp. 526–534, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2021.03.017.
- [16] Hemmat Esfe M., Alidoust S., Toghraie D. Comparison of thermal conductivity of water-based nanofluids with various combinations of MWCNT, CuO, and SiO₂ nanoparticles for using in heating systems. *Case Studies Thermal Engineering*, 2023, vol. 42, p. 102683, doi: 10.1016/J.CSITE.2022.102683.
- [17] Zou Q., Zhang T., Ma T., Tian S., Jia X., Jiang Z. Effect of water-based SiO₂

- nanofluid on surface wettability of raw coal. *Energy*, 2022, vol. 254, p. 124228, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124228.
- [18] Lanjwani H. B., Anwar M. I., Wahab A., Shehzad S. A., Arshad M. Analysis of triple solutions in mixed convection flow and heat transfer characteristics of Ag-water based nanofluid over porous shrinking/stretching sheet. *Materials Science and Engineering B*, 2022, vol. 286, p. 116076, doi: 10.1016/J.MSEB.2022.116076.
- [19] Scott T. O., Ewim D. R. E., Eloka-Eboka A. C. Experimental study on the influence of volume concentration on natural convection heat transfer with Al₂O₃-MWCNT/water hybrid nanofluids. *Materials Today: Proceeding*, 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.07.290.
- [20] ÖZCAN İ., ÖZSOY A., Emre ÖZGÜR A., KARABOYACI M. An investigation of serial connected U-pipe evacuated tube solar collector performance using TiO₂/Water nanofluid. *Appl. Therm. Eng.*, 2023, vol. 233, p. 121088, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121088.
- [21] Khanafer K., Vafai K., and Lightstone M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*, 2003, vol. 46, no 19, pp. 3639-3653. doi: 10.1016/S0017-9310(03)00156-X.
- [22] Shanmugapriya M., Sundareswaran R., Senthil Kumar P., and Rangasamy G. Impact of nanoparticle shape in enhancing heat transfer of magnetized ternary hybrid nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, p. 102700. doi: 10.1016/J.SETA.2022.102700.
- [23] Maleki N. M. and Pourahmad S. Heat transfer enhancement in a heated copper tube using the electromagnetic vibration method for nanofluids as working fluid: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 141, p. 106566. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106566.
- [24] Ma H., He B., Su L., and He D. Heat transfer enhancement of nanofluid flow at the entry region of microtubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, vol. 184, p. 107944. doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2022.107944.
- [25] Halawa T. and Tanious A. S. Investigation of the optimum design of magnetic field arrangement to enhance heat transfer performance of Fe₃O₄-water magnetic nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, vol. 184, p. 108014. doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2022.108014.
- [26] Ali B., Qayoum A., Saleem S., and Mir F. Q. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NANOFLUIDS FOR HEAT PIPES USED IN SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS. *Journal of Thermal Engineering*, 2023, vol. 9, no 2. doi: 10.18186/thermal.1285179.
- [27] Najim S., Hussein A., and Danook S. H. Performance improvement of shell and tube heat exchanger by using Fe₃O₄/water nanofluid. *Journal of Thermal Engineering*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 24–32. doi: 10.18186/thermal.1239793.
- [28] Abu-Nada E. and Chamkha A. J. Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO–EG–water nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, no 12, pp. 2339-2352. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.07.006.
- [29] Canfrini M., Corcione M., Quintino A. Natural convection in square enclosures differentially heated at sides using Alumina-water nanofluids with temperature-dependent physical properties. *Thermal Science*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 591–608, doi: 10.2298/TSCI120328111C.
- [30] Sheikholeslami M., Keramati H., Shafee A., Li Z., Alawad O. A., and Tlili I. Nanofluid MHD forced convection heat transfer around the elliptic obstacle inside a permeable lid drive 3D enclosure considering lattice Boltzmann method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 523, pp. 87–104. doi: 10.1016/J.PHYSA.2019.02.014.
- [31] Hssikou M., Elguennouni Y., Baliti J., and Alaoui M. Heat Transfer of Gas Flow within a Partially Heated or Cooled Square Cavity. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2020, vol. 2020, pp. 1-11. doi: 10.1155/2020/8886682.
- [32] Li M., Qu J., Ocloń P., Wei J., and Tao W. 3D numerical simulation of condensation and condensate behaviors on textured structures using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 160, p. 120198. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.120198.
- [33] Graham A. L. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Applied Scientific Research*, 1981, vol. 37, no. 3–4,

- pp. 275–286, doi: 10.1007/BF00951252.
- [34] Patel H. E., Sundararajan T., Pradeep T., Dasgupta A., Dasgupta N., Das S. K. A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids. *Pramana – Journal of Physics*, 2005, vol. 65, no. 5, pp. 863–869, doi: 10.1007/BF02704086.
- [35] Wen D. and Ding Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International journal of heat and mass transfer*, 2004, vol. 47, no 24, pp. 5181-5188. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012.
- [36] Oztop H. F. and Abu-nada E. Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids. *International journal of heat and fluid flow*, 2008, vol. 29, no 5, pp. 1326-1336. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.009.
- [37] Corvaro F., Paroncini M. Experimental analysis of natural convection in square cavities heated from below with 2D-PIV and holographic interferometry techniques. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, vol. 31, no. 7, pp. 721–739, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.07.006.

Information about authors.



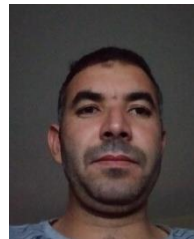
Younes Oulahou
PhD Student, Department of Physics, Mechanical-Energetic, Faculty of sciences, Moulay Ismail University, Meknes, Morocco. Area of scientific interest: Nanofluid dynamics and Mechanical engineering.
younes.oulahou@edu.umi.ac.ma



Youssef Elguennouni
Doctor in Mechanical and Energetics Engineering, Department of Physics, Mechanical-Energetic, Faculty of sciences, Moulay Ismail University, Meknes, Morocco. Area of scientific interest: Fluid Dynamics and Mechanical Engineering.
y.elguennouni@edu.umi.ac.ma



Mohamed Hssikou
Professor of Department of Physics, Mechanical- Energetic, Polydisciplinary faculty, University of Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Morocco. Area of scientific interest: Microfluidic and Rarefied Gas Dynamics and Mechanical Engineering.
m.hssikou@usms.ma



Jamal Baliti
Professor of Department of Physics, Mechanical- Energetic, Polydisciplinary faculty, University of Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Morocco. Area of interest: Fluid Dynamics and Computational Physics.
jamal.baliti@usms.ma



Mohammed Alaoui
Professor of Department of Physics, Mechanical-Energetic, Faculty of sciences, Moulay Ismail University, Meknes, Morocco. Field of Scientific Interest: Computational Fluid Dynamics and Mechanical.
m.alaoui@umi.ac.ma

Assessment of the Slagging Tendency in Power Plant Boiler Furnaces Depending on the Physical-Chemical Characteristics of Ash and Coal

Chernov S.L., Prokhorov V.B., Pay A.V., Aparov V.D.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russian Federation

Abstract. The purpose of the work is to select replacing design coal possible options for low slagging potential reasons in the furnace and on adjacent heating surfaces. Solved problems: the main slagging indices (SI) are summarized, based on considering the two main parameters of the formation of ash deposits, namely viscosity and fusibility. An analysis of existing methods for assessing slagging processes of heating surfaces in steam power boilers was carried out. The scientific goal is achieved by the proposed method of ranking coals according to their slagging tendency on power boiler heating surfaces based on their physicochemical properties. The methodology is based on the slagging potential dependence of the fusibility and viscosity ash characteristics, considering the ratio of the ash percentage content to the heating value of coal. The most important result is ranking of 28 coals of various grades (subbituminous, bituminous, anthracite) burned at Russian power plants according to their tendency to form ash deposits on the furnaces of power boilers. The significance of the results obtained lies in the identification of two coal deposits, subbituminous Irsha-Borodinsky and Berezovsky in Eastern Siberia and Kuznetsky bituminous in Western Siberia, which are universal during the transition to burning non-design fuel from the slagging potential point of view. The dependences of the change in ash viscosity and SI on the SiO_2 / Al_2O_3 and Fe_2O_3 / SiO_2 ratios in ash for Irsha-Borodinsky and Moscow region coals were under consideration. It was concluded that the value of the SI is directly proportional to the load ash content A' and could differ more by an order of magnitude for different coals.

Keywords: power plant, power boilers, solid fuel, coal, slagging, ash fusibility, ash viscosity.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.06>

UDC: 662.959

Evaluarea susceptibilității la zgură a cuptoarelor cazanelor energetice în funcție de caracteristicile fizico-chimice ale cenușii și cărbunelui

Cernov S.L., Prohorov V.B., Pay A.V., Aparov V.D.

Universitatea Națională de Cercetare „Institutul de Inginerie Energetică din Moscova”, Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a selecta opțiuni posibile pentru înlocuirea cărbunelui de proiectare din motive de probabilitate scăzută de zgură în cuptor și pe suprafețele de încălzire adiacente. Sunt rezumați principalii indici de zgură (IS), pe baza luării în considerare a celor doi parametri principali ai formării depozitelor de cenușă, și anume vâscozitatea și fuzibilitatea. A fost efectuată o analiză a metodelor existente de evaluare a proceselor de zgură a suprafețelor de încălzire în cazanele cu energie cu abur. Acest obiectiv este atins prin metoda propusă de ierarhizare a cărbunilor în funcție de tendința lor de a zgura suprafețele de încălzire a cuptoarelor cu boiler pe baza proprietăților lor fizico-chimice. Metodologia se bazează pe dependența zgurii de caracteristicile de fuzibilitate și vâscozitate ale cenușii, ținând cont de conținutul redus de cenușă al cărbunelui. Cel mai important rezultat este clasarea a 28 de cărbuni de diferite grade (maro, tari, antracit) arși la centralele rusești, în funcție de tendința acestora de a forma depozite de cenușă în cuptoarele cazanelor electrice. Semnificația rezultatelor obținute constă în identificarea a 2 zăcăminte de cărbune, ambele Berezovsky brun și Irsha-Borodinsky în Siberia de Est, și piatră Kuznetsky în Siberia de Vest, universală în trecerea la arderea combustibilului neproiectat din punctul de vedere al prevenirii zgurii. Dependența modificărilor vâscozității și IS de raportul dintre conținut și cenușă au fost obținute pentru cărbunii din bazinele Irsha-Borodinsky și regiunea Moscovei. Se arată că până la un raport de aproximativ 0.33, ambele dependențe sunt direct proporționale, iar cu o creștere suplimentară, valorile IS pentru cărbunele Irsha-Borodinsky cresc brusc.

Cuvinte-cheie: centrală electrică, centrale termice, combustibil solid, carbune, zgură, fuzibilitate cenușii, vâscozitate cenușii.

Оценка склонности к шлакованию топок энергетических котлов в зависимости от физико-химических характеристик золы и угля

Чернов С.Л., Прохоров В.Б., Пай А.В., Апаров В.Д.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является выбор возможных вариантов замены проектного угля по соображениям малой вероятности шлакования в топке и на примыкающих поверхностях нагрева. Поставленная цель достигается решением следующих задач: обобщением основных индексов шлакования (IS), основанных на учете двух главных параметров образования золовых отложений, а именно вязкости и плавкости, проведения анализа существующих методик оценки процессов шлакования поверхностей нагрева в паровых энергетических котлах, предложенной методикой ранжирования углей по склонности их к шлакованию поверхностей нагрева топок энергетических котлов на основании их физико-химических свойств. В основу методики положена зависимость шлакования от плавкостных и вязкостных характеристик золы с учетом приведенной зольности угля. Наиболее существенным результатом является проведенное ранжирование 28 углей различных марок (бурые, каменные, антрацит), сжигаемых на электростанциях России, по их склонности к образованию золовых отложений в топках энергетических котлов. Значимость полученных результатов состоит в выделении 2-х месторождений углей, как бурых Березовского и Ирша-Бородинского в Восточной Сибири, так и каменного Кузнецкого в Западной Сибири, универсальных при переходе на сжигание непроектного топлива с точки зрения предотвращения шлакования. Получены зависимости изменения вязкости и IS от отношений содержания SiO_2 / Al_2O_3 и Fe_2O_3 / SiO_2 в золе для углей Ирша-Бородинского и Подмосковского бассейна. Показано, что до значения отношения Fe_2O_3 / SiO_2 , равному примерно 0.33, обе зависимости имеют прямую пропорциональную зависимость, а при дальнейшем росте значения IS для Ирша-Бородинского угля резко увеличиваются. Сделан вывод, что величина IS прямо пропорционально зависит от рабочей зольности A^r и на порядок может отличаться для разных углей.

Ключевые слова: тепловая электростанция, энергетические котлы, твердое топливо, уголь, шлакование, плавкость золы, вязкость золы.

ВВЕДЕНИЕ

Переход на альтернативное (непроектное) топливо при работе ТЭС в настоящее время возникает вследствие сокращения и необеспеченности поставок угля, ухудшения его качества, предложений по использованию более дешевого топлива, ужесточения экологических требований. Под альтернативным топливом понимается уголь, на использование которого не были рассчитаны котлы при их проектировании или реконструкции, а также ранее не прошедший промышленного или опытного сжигания на данной ТЭС.

При переводе котлов основными проблемами являются: шлакование топочных экранов и поверхностей нагрева, расположенных над топкой, загрязнение конвективных поверхностей нагрева, неустойчивость горения непроектного топлива, повышение количества вредных выбросов в атмосферу, абразивный износ конвективной части котлов, снижение экологических показателей, изменение условий работы систем пылеприготовления, шлакоудаления, золоулавливания и топливоподачи [1].

Перед проведением опытного сжигания альтернативного топлива целесообразно проводить предварительную оценку топочного процесса с помощью численного моделирования по следующим ограничивающим параметрам: допустимый механический недожог твердого топлива, отсутствие шлакования топочных экранов и выходной части топки, температуры газов на выходе из топки, образование оксидов азота. В настоящей работе рассматриваются вопросы выбора возможных вариантов замены проектного угля по соображениям малой вероятности шлакования в топке и на примыкающих поверхностях нагрева ширмах, фестонах и т.д.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

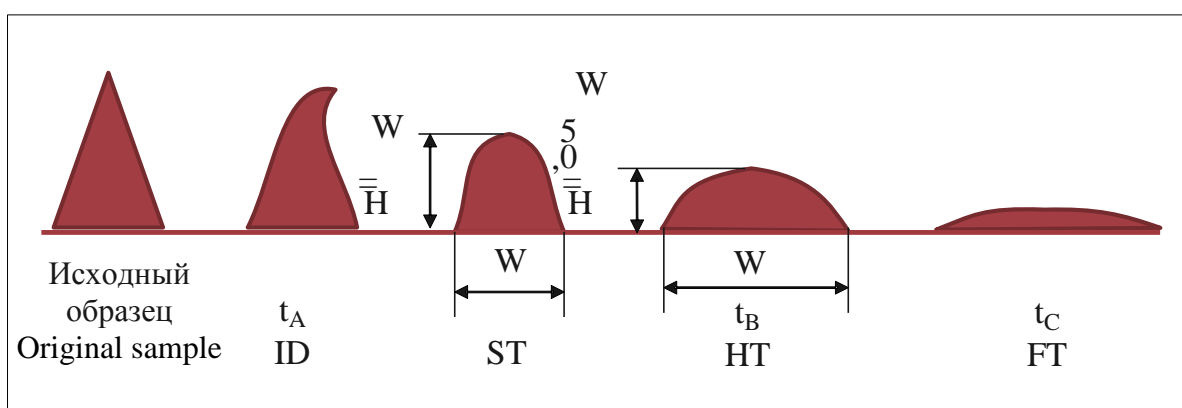
Основными характеристиками золы, определяющими процесс шлакования топки и загрязнения газоходов котла, являются ее плавкость и вязкость, которые зависят от химического состава [2].

В течение десятилетий способность золы к шлакованию определялась по результатам теста на плавкость по изменению формы пирамиды из частичек золы при его

постепенном нагревании рис. 1. По ГОСТ 2057-94 различают температуры начала деформации, начала размягчения t_B (t_2), начала истинного жидкого состояния t_B (t_2). По американской методике ASTM 1857 различают следующие характерные температуры: ID – температура начала деформации, ST – температура размягчения или плавления, HT – температура полусферы, FT – температура жидкоплавкого состояния. Основное различие двух методик заключается в том, что температура начала размягчения t_B не соответствует температуре размягчения ST, а соответствует температуре полусферы HT. Тест на плавкость, определяющий

температурные границы фаз (размягчение, плавление, жидкое состояние) носит скорее описательный, чем измерительный характер. То есть тест не может предсказать реальную ситуацию, которая возникает при эксплуатации котла [3].

Следует отметить, что существует более новый ГОСТ Р 54238–2010 близкий по терминам и определениям к ASTM 1857, однако в справочной литературе сохранились плавкостные характеристики, полученные по старой методике.



ID – onset of deformation, ST – temperature of softening or melting of the sphere, HT – temperature of the hemisphere, FT – temperature of the liquid-melting state (according to ASTM 1857)

Figure 1. The location scheme of direct-flow burners and nozzle. Change in sample shape when determining fusibility and accepted characteristic temperatures (t_A, t_B, t_C according to GOST 2057-94).

ID – начало деформации, ST – температура размягчения или плавления сферы, HT – температура полусферы, FT – температура жидкоплавкого состояния (по ASTM 1857)

Рис. 1. Изменение формы образца при определении плавкости и принятые характерные температуры (t_A, t_B, t_C по ГОСТ 2057-94).

Особую роль в определении склонности угля к шлакованию, то есть прилипанию частичек золы на поверхность топки и образованию прочных отложений, играет вязкость частичек золы, которая во всех случаях увеличивается с уменьшением температуры [4]. В работе [5] показано, что для золы с весовым содержанием оксида железа более 5.0 % температура прилипания к стенкам равна около 1177 °С, в то время как для остальной золы прослеживается обратно пропорциональная зависимость прилипания от её вязкости. Основная зависимость склонности к шлакованию от химического состава золы угля заключается в том, что с

ростом содержания SiO_2 (свыше 75% db) и уменьшением процентного содержания Fe_2O_3 (менее 5 % db) угли становятся «хорошими» и их зола не вызывает загрязнения поверхностей нагрева [2,3]. Получила распространение методика оценки склонности угля к шлакованию по отношению суммы содержания щелочных оксидов В ($Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O$), к кислотным оксидам А ($SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$). Повышение отношения В/А снижает температуру плавкости золы, тем самым повышая склонность золы к шлакованию. Отношение В/А меньше 0.11 считается хорошим с точки зрения отсутствия шлакования в топке. В

работе [2] предлагается эмпирический индекс сернистости (RS), который представлен в виде произведения содержания серы S db на отношение В/А. Метод получен при оценке склонности к шлакованию на углях США и Европы, в которых железо представлено в виде сульфата железа (FeS_2) или пирита. Уголь имеет малую склонность к шлакованию при $RS < 0.6$. Однако данный индекс не годится для углей с малым содержанием серы, где преобладает соединение железа с углеродом ($FeCO_3$) в виде сидерита и основным фактором является содержание в золе Fe_2O_3 . В этом случае содержание железа рассматривается вместо содержания серы и индекс RS не применим.

В таблице 1 [6, 21-24] обобщены основные индексы шлакования, основанные на учете двух главных параметров образования золовых отложений, а именно вязкости и

плавкости. В свою очередь последние в прямую зависят от её химического состава [7]. Отдельно рассматривается влияние химического состава угольных смесей на вязкость и плавкость золы [8,9]. Объясняется это тем, что горение смеси углей протекает не как сжигание топлива с усредненными характеристиками, а как горение двух различных по теплотехническим параметрам углей. Исследование влияния свойств золы на ее количественные характеристики проводились в [10]. В настоящей работе не рассматривается процесс осаждения и образования отложений золы в зависимости от динамических характеристик двухфазного потока, которые были исследованы во многих работах, в частности в [11-13, 25-26]. Также не рассматривается влияние минералогического состава образований на усадку и вязкостные характеристики золы, которые исследуются, например, в [14].

Таблица 1.

Применяемые индексы шлакования

Table 1.

Applied slagging indices

№ п/п	Наименование Name	Индекс шлакования Slagging index	Потенциал шлакования Slagging potential		
			Низкий Low	Средний Medium	Высокий High
1	Кремневое отношение Silica ratio	$SA = 100 \cdot \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	72-80	65-72	50-65
2	Щелочно-кислотное отношение В/А ratio	$B / A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	< 0.11	0.11 – 0.14	> 0.14
3	Плавкость золы, °C Ash fusibility	$AF = \frac{4 \cdot t_A - t_C}{5}$	> 1343	1232 - 1343	< 1232
4	Содержание железа, % Iron content	$RF = Fe_2O_3$	< 6	6 - 7	> 7
5	Температура шлакования (ВТИ), °C Slagging temperature	$t_{shl} = 945 + 7.77 \cdot \frac{A}{B}$	< 1050		

Вязкостно-температурная зависимость изучалась в России в работах [15,16] в основном применительно к топкам с жидким шлакоудалением, а также для прогнозирования некоторых аспектов шлакования. Получили распространение эмпирические методы, в которых наряду с моделями вязкого течения применяются эмпирические коэффициенты. Наиболее широко используется упрощенное описание зависимости вязкости от температуры в виде уравнений на базе зависимостей Аррениуса

$$\mu = A \cdot \exp\left(1000 \frac{B}{T}\right) \text{ или Веймана-Френкеля}$$

$$\mu = AT \cdot \exp\left(1000 \frac{B}{T}\right), \text{ где } A \text{ и } B \text{ эмпирические}$$

коэффициенты часто с физическим смыслом, T – температура. Далее в качестве основной расчетной модели нами выбирается уравнение Аррениуса, так как оно достаточно точно описывает зависимость вязкости от температуры для реальных шлаков, в то время как уравнение Веймана-Френкеля дает в интересующем интервале температур приблизительно тот же результат при значительно более сложной схеме расчетов [15].

II. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для эффективного моделирования процессов шлакования в ряде публикаций [3,7,17] предлагаются следующие основные допущения:

- пиковые значения графика усадки достигаются при температурах между 1100–1500 °С и в эту область попадают температуры размягчения большинства исследуемых углей;

- усадка золы рассматривается как определяющий критерий липкости и может быть заменен вязкостью золы;

- для липкой частицы характерной температурой при столкновении с поверхностью является температура размягчения, $ST(t_B)$, при которой частица прилипает и способна содействовать образованию отложений;

- интенсивность шлакования поверхностей котла прямо пропорционально доле золы в общей массе угля, однако склонность к шлакованию обратно пропорционально вязкости золы.

Эмпирический расчетный метод на базе уравнения Аррениуса разработан в BCURA (British Coal Utilisation Research Association),

носит название методики Watt & Fereday и впервые приведен в [18]. Позднее в работе [6] был проведен сравнительный анализ различных методик оценки склонности золы 4-х индийских, 4-х австралийских, индонезийского, колумбийского, южноафриканского, 2-х американских и 3-х британских углей к шлакованию на основе расчетных индексов, который показал наилучшую сходимость результатов именно для вышеназванного метода. Зависимость вязкость -температура приводится не в виде экспоненциальной, как было показано выше, а в виде логарифмической зависимости:

$$\ln(\mu) = C + 10^7 \cdot m / (t - 150)^2 \quad (1)$$

где t - равна температуре размягчения ST , m и C - эмпирические коэффициенты, отражающие влияние на вязкость каждого из пяти элементов: $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO$. Сумма долей пяти элементов должна быть равна 100%. Эмпирические коэффициенты рассчитываются по нижеследующим формулам (2) и (3), взятым из [19]:

$$m = 0.01404294(SiO_2) + 0.0100297(Al_2O_3) - 0.296285 \quad (2)$$

$$C = 0.015418(SiO_2) - 0.0388047(Al_2O_3) - 0.0167264(Fe_2O_3) - 0.0089096(CaO) - 0.012932(MgO) + 0.0467 \quad (3)$$

Интересно отметить, что коэффициенты в формулах (2) и (3) из [19] уточнены на основе обширной базы данных и отличаются от первоначально полученных в [18]. Проведенный Уральской теплотехнической лабораторией (УТЛ) на собственной базе данных расчетный анализ [15,16] также отличается от первоначального. При модификации коэффициентов, определенных в [18], предложены новые эмпирические коэффициенты расчетных формул применительно к российскому банку данных. Вместо (1) УТЛ была предложена модифицированная формула, отличающаяся тем, что коэффициент m умножался на 1.5, а из коэффициента C вычитается 1.25. При этом коэффициенты становятся ближе к рассчитанным в [19], особенно m , где расхождение составляет всего 10–15 %. Что касается C , то в [19] при ее расчете

учитывается поправка Vomkamp на содержание MgO в золе, которая не берется в расчет при первоначальной и модифицированной версиях УТЛ метода Watt-Feraday.

В качестве t °C в (1) принимается температура размягчения золы ST, при которой частички золы оплавляются и имеют тенденцию прилипнуть к стенкам. Расчет ST ведется по химическому составу золы с использованием следующей эмпирической формулы [20]:

$$ST = a(SiO_2) + b(Al_2O_3) + c(Al_2O_3) + d(CaO) + e(MgO) + f(\infty) + g \quad (4)$$

где

$$\infty = 100 - (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + MgO) \quad (5)$$

Величины констант a, b, c, d, e, f, приведены в табл. 2 в зависимости от процентного содержания SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 в золе.

Таблица 2.

Величины констант при расчете логарифма вязкости по модели Ватта-Фарадея

Table 2.

Values of constants when calculating the logarithm of viscosity using the Watt-Faraday model

№ п/п № п/о	Содержание в золе Ash content	a	b	c	d	e	f	g
1	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 > 30\%$	69.94	71.01	65.23	12.16	68.31	67.19	-5486
2	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 \leq 30\%, Fe_2O_3 \leq 15\%$	92.55	97.83	84.52	83.67	81.04	91.92	-7891
3	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 \leq 30\%, Fe_2O_3 > 15\%$	-3.01	5.08	-8.02	-9.67	-5.86	-3.99	1531
4	$SiO_2 > 60\%$	10.75	13.03	-5.28	-5.88	-10.28	3.75	453

В отличие от методики, изложенной в [6] расходные характеристики золы нами представляются в виде широко применяемого в России параметра приведенной зольности $A^{pr} = \frac{A^r}{Q_n^r} \cdot \left(\frac{\%kg}{MJ}\right)$, где A^r – доля содержания золы на рабочую массу угля, %, Q_n^r – низшая теплота сгорания угля, МДж/кг. В английской работе применяются зольность на сухую массу и высшая теплота сгорания топлива, что с нашей точки зрения не совсем отражает реальный выход золы при сжигании угля в топке энергетического котла. Окончательно считаем, что индекс шлакования (IS)

пропорционален A^{pr} и обратно пропорционален вязкости золы, выраженной в виде $\ln(\mu)$:

$$IS = \frac{A^{pr}}{\ln(\mu)} \quad (6)$$

III. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ УГЛЕЙ

По вышеприведенной методике в настоящем исследовании были проведены расчеты для 28 углей, используемых в России. Характеристика углей и золы приведена в табл.3 - 4, в которой угли расположены по географическому принципу и включает все

основные марки углей: антрацит, каменный уголь, бурый уголь. W^r, A^r, C^r обозначают соответственно содержание влаги, минеральных примесей и углерода на рабочую массу угля. $VГ$ – содержание летучих веществ на горючую массу топлива. $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO$ – элементное содержание в золе, приведенное на бессульфатную массу. Среди месторождений углей по географическому принципу приведены характеристики двух европейских (Уголь 1-2), шести углей залегающих в районе Уральских гор (уголь 3 - 8), двух казахстанских (Уголь 9-10), шести западносибирских (Уголь 11-16), семи восточносибирских (Уголь 17-23), четырех дальневосточных (Уголь 24-27), одного киргизского (Уголь 28). Европейские угли представлены антрацитом и бурым углями; Казахстан и Западная Сибирь – каменными; Урал и Дальний Восток – как каменными, так и бурыми углями; Восточная Сибирь и Киргизия – бурыми.

Антрацит имеет малую влажность, высокое содержание углерода. В данном конкретном случае отмечается повышенная зольность и сравнительно малая теплота сгорания. Данный факт объясняется тем, что в энергетику направляется не сам антрацит, а отходы от продуктов его переработки. Каменные угли представлены широкой областью расхождения всех вышеназванных параметров. Бурые угли характеризуются высокими значениями влажности и выхода летучих, изменяющейся в широком диапазоне зольностью, малыми содержанием углерода и теплотой сгорания.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИНДЕКСА ШЛАКОВАНИЯ

Результаты расчетов приведены в табл. 5, в которой угли представлены по убыванию значений IS. В первой и второй колонках показаны соответственно номера углей по порядку текущей таблицы и номера строк по табл. 3. ST представляет собой температуру размягчения золы, °C, рассчитанную по формуле (4); $\ln(\mu)$ – натуральный логарифм вязкости золы, Па·с, рассчитанный по (1); A^{pr} – приведенная зольность, $(\frac{\%kg}{MJ})$, IS – безразмерный индекс шлакования. Номер угля по порядку показывает его склонность к шлакованию: чем он больше, тем выше

склонность угля к шлакованию. Первые десять углей имеют высокую ST от 1258 до 1475 °C, большую вязкость $\ln(\mu)$ от 5.854 до 4.753 Па·с и высокую приведенную зольность от 1.707 до 3.529 $(\frac{\%kg}{MJ})$.

Решающее значение для этих углей имеет большая величина приведенной зольности, то есть концентрация золы в потоке дымовых газов. Дальнейшее снижение IS происходит при изменении температуры размягчения и вязкости в широких пределах, в то время как приведенная зольность имеет общую тенденцию к уменьшению. Однако, например, уголь Кызыл-Кия (пп. 11) стоит достаточно высоко в таблице несмотря на малую зольность из-за значительного снижения вязкости золы. Сравнение углей одной марки, но разных месторождений не выявили каких-нибудь зависимостей с точки зрения склонности к шлакованию: как бурые, так и каменные угли присутствуют как сверху, так и внизу таблицы. 6 верхних углей с наибольшей предрасположенностью к шлакованию включают 3 бурых, 2 каменных углей и антрацит. Можно предположить, что содержание летучих и связанное с ним содержание углерода в угле мало влияют на склонность к шлакованию.

Предложенная методика оценки склонности углей к шлакованию не способна оценить скорость возникновения загрязнений на теплообменных поверхностях топки котла, которая зависит, кроме состава, количества золы и свойств угля, от температурного режима и аэродинамики топки. Учитывая эти условия, можно создать безшлаковочный режим в топке даже для самых склонных к шлакованию углей. Однако IS позволяет ранжировать угли по их склонности к образовывать отложения. Это особенно важно при предварительном выборе непроектного топлива взамен сжигавшегося ранее. С помощью табл. 5, зная IS обоих углей можно определить какой из них более склонен к образованию отложений. Если непроектный уголь имеет меньше IS, то его применение не должно привести к дополнительным проблемам. В противном случае можно поискать другое непроектное топливо. Такой подход упростит предварительный выбор непроектного топлива и может применяться для любых твердых топлив, в том числе не вошедших в табл. 5.

В табл. 5 каменные угли Кузнецкого бассейна с порядковыми номерами 22, 23, 25, 26 имеют малую величину IS и, следовательно, не обладают склонностью к шлакованию. Все они относятся к одному бассейну, запасы высококачественного угля

которые одни из самых больших в России и, следовательно, использование их как непроектных очень перспективно.

Таблица 3.

Элементарный состав исследуемых углей

Table 3.

Elementary composition of the studied coals

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$W^r, \%$	$A^r, \%$	$C^r, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_n^r, \frac{MJ}{kg}$
1	Донецкий Donetskiy	A A	8.5	34.8	52.2	4	18.23
2	Подмосковный Podmoskovniy	2Б 2В	32.1	30.6	24.3	48	8.67
3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3В	17	35.7	33.6	44	12.56
4	Интинское Intinskiy	Д D	11.5	28.8	44.2	40	16.87
5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж J	8	29.4	52.6	33	20.77
6	Кизилловский Kizilovski	Ж J	6	32	48.6	43	19.68
7	Бабаевское Babaevski	1Б 1В	56	10.1	23.2	65	8.1
8	Тулганское Tulganskiy	1Б 1В	52	14.4	22.2	65.5	7.45
9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzski 1 group	СС SS	6.5	36.9	44.8	25	17.38
10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzski 2 group	СС SS	5	45.6	38.4	25	14.61
11	Кузнецкий Kuznetskiy	Д D	11.5	15.9	56.4	40.5	21.9
12	Кузнецкий Kuznetskiy	Г G	13	28.7	46.6	41.5	18.09
13	Кузнецкий Kuznetskiy	Т T	7	14.6	70.2	12.5	25.12
14	Кузнецкий Kuznetskiy	1СС 1SS	9	18.2	60.8	31	23.4
15	Кузнецкий Kuznetskiy	2СС 2SS	8.5	16.5	66	20	25.33
16	Кузнецкий Kuznetskiy	Ж J	6	39.5	45.2	37	17.71
17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinskiy	2Б 2В	33	7.4	42.6	47	15.28
18	Назаровское Nazarovski	2Б 2В	39	7.9	37.2	47	12.85
19	Березовское Berezovski	2Б 2В	33	4.7	44.2	48	15.66
20	Гусиноозерское Gusinoozerskiy	3Б 3В	26	18.5	39.4	43	14.32

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$W^r, \%$	$A^r, \%$	$C^r, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_n^r, \frac{MJ}{kg}$
21	Итатское Itatskiy	1Б 1В	40.5	6.8	36.6	48	12.81
22	Харанорское Naranorskiy	1Б 1В	40	13.2	33.5	44	11.39
23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3В	25	16.5	42.7	48	15.99
24	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3СС 3СС	10	19.8	60	20	22.48
25	Артемовское Artemovskiy	3Б 3В	23	33.1	29.4	50	11.14
26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2В	37	13.9	34.9	43	11.72
27	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	10.5	19.7	56.5	42	22.23
28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3В	28	13	45.4	35	16.16

Таблица 4.

Состав золы исследуемых углей

Table 4.

Composition of the ash of the coals under study

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$SiO_2, \%$	$Al_2O_3, \%$	$Fe_2O_3, \%$	$CaO, \%$	$MgO_2, \%$
1	Донецкий Donetskiy	А А	54.39	23.70	16.19	4.02	1.69
2	Подмосковный Podmoskovniy	2Б 2В	49.08	36.25	9.78	4.18	0.71
3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3В	58.70	26.21	9.01	3.14	2.94
4	Интинское Intinskiy	Д D	56.58	19.27	14.61	7.15	2.38
5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж J	65.28	20.23	8.97	3.13	2.40
6	Кизилловский Kizilovski	Ж J	56.54	23.07	15.24	3.81	1.34
7	Бабаевское Babaevskiy	1Б 1В	56.00	24.84	2.69	14.39	2.07
8	Тулганское Tulganskiy	1Б 1В	57.57	24.61	5.46	7.11	5.25
9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzskiy 1 group	СС SS	63.98	28.88	5.20	1.12	0.82
10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzskiy 2 group	СС SS	60.80	30.50	6.24	1.74	0.72
11	Кузнецкий Kuznetskiy	Д D	63.76	21.89	7.23	4.25	2.87
12	Кузнецкий Kuznetskiy	Г G	62.65	21.56	6.72	6.19	2.88
13	Кузнецкий Kuznetskiy	Т T	58.33	26.77	7.71	5.00	2.19

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$SiO_2, \%$	$Al_2O_3, \%$	$Fe_2O_3, \%$	$CaO, \%$	$MgO_2, \%$
14	Кузнецкий Kuznetskiy	1CC 1SS	58.44	24.69	10.63	4.27	1.98
15	Кузнецкий Kuznetskiy	2CC 2SS	62.68	23.58	9.01	2.94	1.78
16	Кузнецкий Kuznetskiy	Ж J	67.87	20.53	5.32	4.15	2.13
17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinskiy	2Б 2B	47.56	13.11	8.03	26.22	5.08
18	Назаровское Nazarovski	2Б 2B	30.96	10.15	19.29	35.53	4.06
19	Березовское Berezovski	2Б 2B	30.61	11.22	9.18	42.86	6.12
20	Гусиноозерское Gusinoozerskiy	3Б 3B	53.51	24.61	12.77	5.97	2.93
21	Итатское Itatskiy	1Б 1B	35.73	13.16	14.17	33.40	3.54
22	Харанорское Haranorskiy	1Б 1B	59.86	24.05	5.68	7.64	2.79
23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3B	53.24	29.05	7.39	8.10	2.23
24	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3CC 3SS	55.41	28.53	8.34	5.15	2.57
25	Артемовское Artemovski	3Б 3B	64.26	27.36	4.77	1.80	1.80
26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2B	57.08	26.18	8.01	7.29	1.44
27	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	54.60	27.71	8.79	6.62	2.28
28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3B	31.88	21.29	21.50	20.98	4.36

Таблица 5.
Результаты расчета индекса шлакования (IS) (Представлены в убывающем порядке по величине IS)

Table 5.
Results of calculating the slagging index (SI) (Presented in descending order by SI value)

№ п.п. In order	№ табл. 3-4 table	Уголь Coal	Марка Type	ST	$\ln(\mu), Pa \cdot s$	$A^{pr}, (\frac{\%kg}{MJ})$	IS
1	2	Подмосковный бассейн Podmoskovniy	2Б 2B	1259	5.342	3.529	0.6606
2	10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzskiy 2 group	CC SS	1453	4.753	3.121	0.6566
3	25	Артемовское Artemovski	3Б 3B	1446	5.099	2.971	0.5827
4	3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3B	1368	5.047	2.842	0.5632

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 4 (60) 2023

№ п.п. In order	№ табл. 3-4 table	Уголь Coal	Марка Type	ST	$\ln(\mu), Pa \cdot s$	$A^{pr}, (\frac{\%kg}{MJ})$	IS
5	9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzskiy 1 group	СС SS	1475	4.888	2.123	0.4344
6	1	Донецкий Donetskiy	А A	1309	4.887	1.909	0.3906
7	16	Кузнецкий Kuznetskiy	Ж J	1376	5.854	2.230	0.3790
8	8	Тульганское Tulganskiy	1Б 1B	1327	5.240	1.933	0.3689
9	6	Кизилловский Kizilovskiy	Ж J	1311	5.125	1.626	0.3173
10	4	Интинское Intinskiy	Д D	1258	5.470	1.707	0.3121
11	28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3B	1142	2.815	0.804	0.2858
12	12	Кузнецкий Kuznetskiy	Г G	1306	5.957	1.587	0.2663
13	20	Гусиноозерское Gusinoozerskiy	3Б 3B	1304	5.124	1.292	0.2648
14	7	Бабаевское Babaevskiy	1Б 1B	1322	5.129	1.247	0.2431
15	26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2B	1357	4.968	1.186	0.2388
16	5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж G	1328	5.993	1.416	0.2362
17	23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3B	1361	4.584	1.032	0.2251
18	22	Харанорское Haranorskiy	1Б 1B	1345	5.333	1.159	0.2173
19	18	Назаровское Nazarovskiy	2Б 1B	967	3.037	0.615	0.2024
20	24	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	1355	4.715	0.886	0.1872
21	27	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3СС 3SS	1372	4.734	0.881	0.1868
22	14	Кузнецкий Kuznetskiy	1СС 3SS	1348	5.124	0.778	0.1518
23	11	Кузнецкий Kuznetskiy	Д D	1331	5.854	0.726	0.1240
24	21	Итатское Itatskiy	1Б 1B	982	4.377	0.531	0.1213
25	15	Кузнецкий Kuznetskiy	2СС 1SS	1351	5.587	0.651	0.1166
26	13	Кузнецкий бассейн Kuznetskiy	Т T	1374	3.863	0.581	0.1165
27	17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinskiy	2Б 2B	1077	5.687	0.484	0.0852
28	19	Березовское Berezovskiy	2Б 2B	898	3.863	0.3	0.0777

Угли Итатского, Ирша-Бородинского и Березовского месторождения с порядковыми номерами 24, 27, 28 относятся к бурым углям

и также имеют значительные запасы. Основные характеристики углей составляют: низшая теплота сгорания 11.8–19.0 кДж/кг;

зольность 4.4–8.0 %; сернистость 0.3–0.5 %; влажность 24–44 %. Эти угли не подлежат длительному хранению, могут самовозгораться и поэтому рекомендуются к использованию в качестве непроектного сравнительно не далеко от мест добычи.

Рассмотрим влияние зольности угля и изменения состава золы на индекс шлакования. На рис.2 приведена зависимость IS от A^r для самого шлакующего из ряда углей, приведенных в табл. 5, а именно Подмосковного бассейна. Отметим, что

данный уголь является бурым и в этом случае можно применить широко известную зависимость, что при увеличении зольности этой марки углей пропорционально уменьшается влажность и наоборот. Данную зависимость можно проследить на примере характеристик углей в табл. 3. Анализ полученной зависимости показывает, что величина IS прямо пропорционально зависит от A^r и с ростом последней увеличивается и потенциал шлакования поверхностей нагрева.

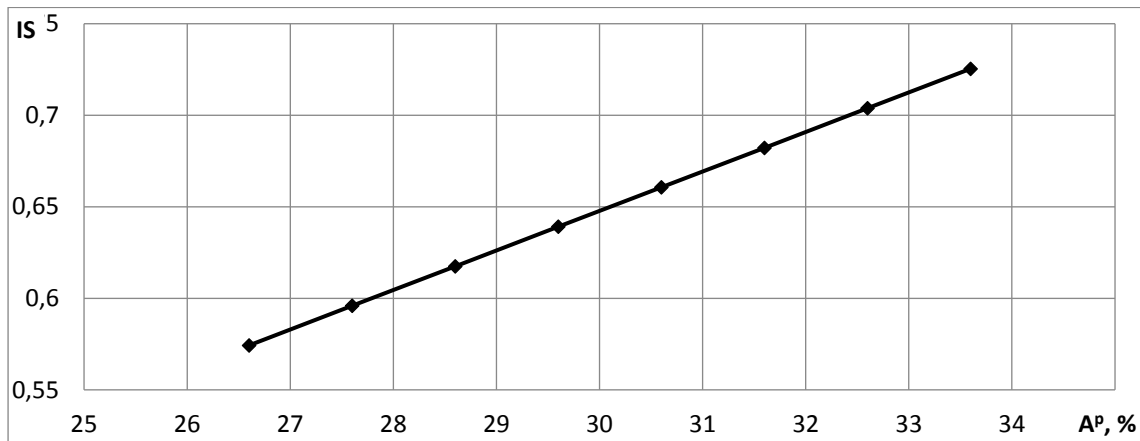
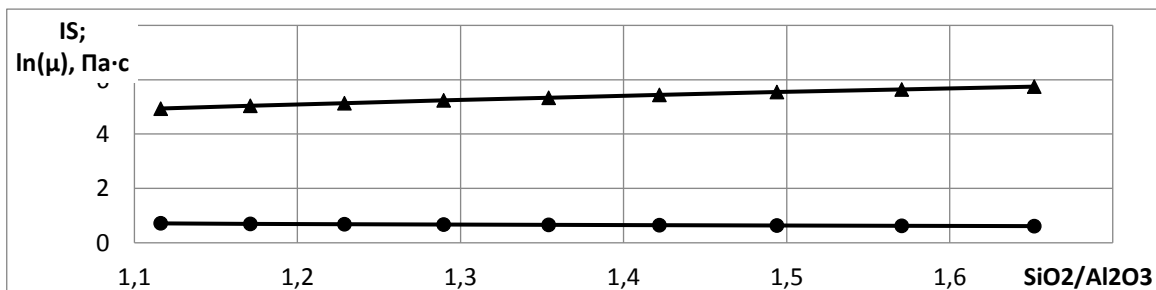


Figure 2. The value of the slagging index for Moscow region coal depending on changes in working ash content.

Рис. 2. Величина индекса шлакования для Подмосковного угля в зависимости от изменения рабочей зольности.

На рис. 3,4 приведены зависимости изменения вязкости золы и IS от соотношения SiO_2 / Al_2O_3 в золе соответственно для самого шлакующего угля Подмосковного бассейна и одного из самых благоприятных с этой точки зрения Ирша-Бородинского угля. Для обоих углей характерна плавная восходящая зависимость для вязкости и плавная

нисходящая для IS с ростом соотношения SiO_2 / Al_2O_3 . Однако, IS для угля Подмосковного бассейна примерно на порядок больше, чем для Ирша-Бородинского, а вязкость при этом примерно одинакова. Объясняется этот факт существенно большей A^{pr} в первом случае.



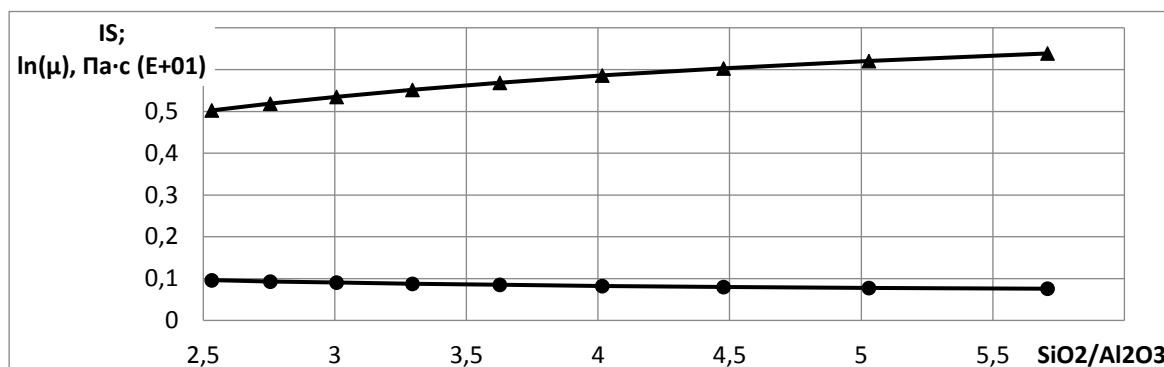
▲ – $\ln(\mu)$; • – IS

Figure 3. Dependence of slagging index and viscosity on the SiO_2 / Al_2O_3 ratio Moscow region coal.

▲ – $\ln(\mu)$; • – IS

Рис. 3. Зависимость индекса шлакования и вязкости от отношения SiO_2 / Al_2O_3 Подмосковный

уголь.



▲ – $\ln(\mu)$; • – $-SI$

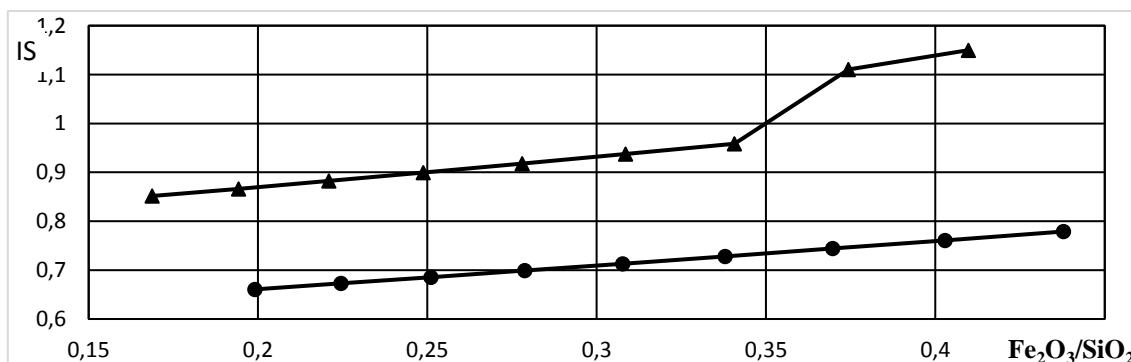
Figure 4. Dependence of slagging index and viscosity on the SiO_2 / Al_2O_3 ratio Irsha-Borodinsky coal.

▲ – $\ln(\mu)$; • – $-SI$

Рис. 4. Зависимость индекса шлакования и вязкости от отношения SiO_2 / Al_2O_3 Ирша-Бородинский уголь.

На рис.5 приведены зависимости IS от отношения Fe_2O_3 / SiO_2 в золе для углей Ирша-Бородинского и Подмосковского бассейна. Показано, что до значений отношения, равному примерно 0.33 обе зависимости имеют прямую пропорциональную

зависимость, больше этого значения IS Ирша-Бородинского угля резко увеличивается. Объясняется это превышением содержания Fe_2O_3 в золе величины 15 %, которая принята как критическая в методике расчета (табл.4).



▲ – Irsha-Borodinsky coal ISH (E-01); • – Moscow region coal

Figure 5. Dependence Effect of changing the Fe_2O_3 / SiO_2 ratio in ash on the slagging index.

▲ – Ирша-Бородинский уголь IS(E-01); • – Подмосковский уголь

Рис. 5. Влияние изменения отношения Fe_2O_3 / SiO_2 в золе на индекс шлакования.

Выводы

1. Разработана методика ранжирования углей по склонности их к шлакованию поверхностей нагрева топок энергетических котлов, на основе которой можно предварительно определить годность непроектного угля для сжигания вместо проектного по показателю индекса шлакования.

2. Методика представлена на основе известного полуэмпирического метода расчета Watt-Fereday с поправкой Vomkamp на содержание в золе MgO для расчета плавкостных и вязкостных характеристик золы. Индекс шлакования IS для ранжирования углей кроме химического состава золы учитывает ее расход и концентрацию на основе приведенной зольности A^{pr} , рассчитываемой как частное от

деления рабочей зольности и низшей теплоты сгорания на рабочую массу топлива.

3. Проведено ранжирование 28 углей различных марок (бурые, каменные, антрацит), сжигаемых на электростанциях России, по их склонности к образованию золовых отложений в топках энергетических котлов. Выделены 2 месторождения угля, как бурого в Восточной Сибири, так и каменного в Западной Сибири, универсальных при переходе на сжигание непроектного топлива с точки зрения предотвращения шлакования.

4. Величина IS прямо пропорционально зависит от рабочей зольности A_r и с ростом последней увеличивается и потенциал шлакования поверхностей нагрева. IS для угля Подмосковского бассейна, зола которого склонна к шлакованию, примерно на порядок больше, чем для Ирша-Бородинского, величина IS для которого одна из наименьших. Вязкость при этом примерно одинакова. Объясняется этот факт существенно большей приведенной зольности в первом случае.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>

Литература (References)

- [1] Maidanik M.N., Verbovetski E.K., Tugov A.N. Preliminary assessment of the possibility to shift thermal power plant boilers for burning alternative coal. *Thermal Engineering* 2021. Т. 68. №9. С.690-697.
- [2] McLennen A.R., Bryant G.W., Bailey C.W, Stanmore B.R., Wall T.F. Index for iron based slagging for pulverized coal firing in oxidizing and reducing conditions. *Energy Fuel*. 2000, 14, 349-354.
- [3] Lawrence A., Kumar R., Nandakumar K. A novel tool for assessing slagging propensity of coals in PF boiler. *Fuel*. 2008, 87, 946-950.
- [4] Browning G.J., Bryant G.W., Hurst H.J., Lucas J.A., Wall T.F. An empirical method for the prediction of coal ash slag viscosity. *Energy Fuel*, 2003, 17, 731-737.
- [5] Walsh P.M., Sayre A.N., Loehden D.O., Monroe L.S., Beer J.M., Sarofim A.F. Deposition of bituminous coal ash in an isolated heat exchange tube: effects of coal properties on deposit growth. *Prog. Energy Combust Sci.* 1990, 16, 327-346.
- [6] Degereji M.U., Ingham D.B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers. *Fuel*. 2012, 102, 345-353.
- [7] Gupta S.K., Wall N.F., Greelman R.A., Gupta R.P. Ash fusion temperatures and transformation of coal ash particulates to slag. *Fuel. Proc. Technol.* 1998, 56, 33-43.
- [8] Dachuan Wang, Qinfeng Liang, Xin Gong, Haifeng Liu. Influence of coal blending on ash fusion property and viscosity. *Fuel* 189(2017) 15-22.
- [9] Mingke Shen, Kunzan Qiu, Long Zhang, Zhenyu Huang, Zhihua Wang, Jianzhong Liu. Influence of coal blending on ash fusibility in reducing atmosphere. *Energies* 2015, 8, 4735-4754.
- [10] Durgun D., Genc A. Effects of coal properties on the production rate of combustion solid residue. *Energy* 34 (2009) 1975-1979.
- [11] Sheng C. et al. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace // *Fuel*. – 2004. – Т. 83. – №. 11-12. – С. 1543-1552.
- [12] Degereji M.U., Ingham D.B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Prediction of ash slagging propensity in a pulverized coal combustion furnace. *Fuel* 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.038>.
- [13] Su S., Pohl J.H., Holcomb D. Fouling propensities of blended coals in pulverized coal-fired power station boilers. *Fuel* 82 (2000) 1653-1667.
- [14] Goni Ch, Helle S., Garcia X., Gordon A., Parra R., Kelm U., Jimenes R., Ilfaro G. Coal blend combustion: fusibility ranking from mineral matter composition. *Fuel* 82 (2003) 2087-2095.
- [15] Alekhovich A.N. Calculation of the viscosity of molten slag and its use in analyzing the applicability of off-design coals. *Thermal Engineering*. 2003. Т. 50. № 12. P. 987-993.
- [16] Alekhovich A.N. Initial slagging temperature as a coal slagging index: determination and application. *Power Technology and Engineering*. 2014. Т.48. №3. P. 210-217.
- [17] Wigley F., Williamson J., Jones AR. Slagging indices for UK coals and their relationship with mineral matter. *Fuel Proc Technol* 1990, 24, 383-389.
- [18] Watt J.D., Ferreday F. The flow properties of slag formed from the ashes of British coals. Part 1: viscosity of homogeneous liquid slag in relation to slag composition. *J. Inst. Fuel* 1969, 42, P. 99-103.
- [19] Vargas S., Frandsen F.J., Dam-Johansen K. Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates. *Progress in Energy Combustion Science* 2001, 27, P. 237-429.
- [20] Yin C., Luo Z, Ni M, Cen K. Predicting coal ash fusion temperature with the back propagation neural network model. *Fuel* 1998;77(15):1777-1782.
- [21] Dachuan Wang, Qinfeng Liang, Xin Gong, Haifeng Liu, Xia Liu Influence of coal blending

on ash fusion property and viscosity. Fuel 189 (2017) 15-20.

- [22] Mingke She, Kunzan Qiu, Long Zhang, Zhenyu Huang, Zhihua Wang and Jianzhong Liu. Influence of Coal Blending on Ash Fusibility in Reducing Atmosphere, Energies 2015, 8, 4735-4754.
- [23] Chao Tong, Xigang Yang, Guoqing Chen, Yong Zhang, Lulu Chen, Yang Zhou, Tengfei He, Baosheng Jin. Experimental investigation for the combustion characteristics of blends of three kinds of coal. Fuel 300 (2021) 12093-7.
- [24] Chakravarty, S.; Mohanty, A.; Banerjee, A.; Tripathy, R.; Mandal, G.K.; Basariya, M.R.;

Sharma, M. Composition, mineral matter characteristics and ash fusion behavior of some Indian coals. Fuel 2015, 150, 96-101.

- [25] Browning GJ, Bryant GW, Hurst HJ, Lucas JA, Wall TF. An empirical method for the prediction of coal ash slag viscosity. Energy Fuel 2003; 17:731-7.
- [26] Rushdi A, Gupta R, Sharma A, Holcombe D. Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility. Fuel 2005;84:1246-58.

Сведения об авторах.



Чернов Сергей Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, струйные и вихревые течения.
E-mail: chernovserl@gmail.com



Прохоров Вадим Борисович, кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: котельные установки, аэродинамика горения, охрана окружающей среды, моделирование.
E-mail: ProkhorovVB@mpei.ru



Пай Артем Викторович, старший преподаватель кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, теплоснабжение, численное моделирование.
E-mail: PaiAV@mpei.ru



Апаров Владимир Дмитриевич, студент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, горелочные установки.
E-mail: AparovVD@mpei.ru

Increasing the Production of Electrical and Thermal Energy in Biogas Plants through the Optimal Addition of Agricultural Waste

**Polishchuk V.M., Shvorov S.A., Pasichnik N.A., Davidenko T.S., Valiev T.O.,
Dvornyk Ye.O.**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The aim of the work is to increase the yield of biogas, and, accordingly, the generation of electrical and thermal energy in biogas plants by optimally adding agricultural production waste to cattle manure. To achieve the goals set, the following tasks were solved: the yield of biogas from cattle manure was determined with the addition of various volumes of organic waste during periodic loading of the digester; on the basis of the experimental data obtained, the unimodality interval was found for the maximum yield of biogas during the fermentation of cattle pus with the addition of organic waste; Using the dichotomy method, the optimal dosage volume of various types of organic wastes into the substrate for quasi-continuous loading of the digester was calculated. Experimental studies were carried out on a biogas laboratory plant with a useful volume of 30 liters in a mesophilic mode. The most significant result is the determination, using the dichotomy method, of the optimal volumes of organate, starch, flour, whey, wastewater from wineries, crude glycerin, fuse, soap stock and molasses to manure pus to increase the biogas yield. As a result of the research, the optimal dosage formulation of various types of organic waste was substantiated to intensify the fermentation of cattle manure. The significance of the research results lies in the fact that with the optimal addition of these cosubstrates to the digester using special dispensers, the biogas yield increases from 1.4 l/h. kg of dry organic matter and above.

Keywords: organic waste, substrate, dry organic matter, biogas plant, digester, biogas, cattle manure, methane fermentation.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.07>

UDC: 621.18:621.182

Creșterea producției de energie electrică și termică în instalațiile de biogaz datorită adăugării optime a deșeurilor agricole

Polisciuk V.N., Șvorov S.A., Pasicinik N.A., Davidenko T.S., Valiev T.O., Dvornik E.A.

Universitatea Națională de Bioresurse și Managementul Naturii din Ucraina, Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este creșterea randamentului de biogaz și, în consecință, generarea de energie electrică și termică în instalațiile de biogaz prin adăugarea optimă a deșeurilor de producție agricolă la gunoiul de grajd. Pentru atingerea obiectivelor stabilite s-au rezolvat următoarele sarcini: s-a determinat randamentul de biogaz din gunoi de grajd de bovine prin adăugarea diferitelor volume de deșeuri organice în timpul încărcării periodice a digesterului; pe baza datelor experimentale obținute s-a constatat intervalul de unimodalitate pentru randamentul maxim de biogaz în timpul fermentației puroiului de bovine cu adaos de deșeuri organice; Folosind metoda dihotomiei, a fost calculat volumul optim de dozare a diferitelor tipuri de deșeuri organice în substrat pentru încărcarea cvasi-continuu a digesterului. Au fost efectuate studii experimentale pe o instalație de laborator de biogaz cu un volum util de 30 de litri în regim mezofil. Rezultatul cel mai semnificativ este determinarea, prin metoda dihotomiei, a volumelor optime de organat, amidon, făină, zer, ape uzate din crame, glicerină brută, fuzibil, stoc de săpun și melasă la puroi pentru a crește randamentul de biogaz. În urma cercetărilor, a fost fundamentată formularea optimă de dozare a diferitelor tipuri de deșeuri organice pentru a intensifica fermentația gunoiului de grajd de bovine. Semnificația rezultatelor cercetării constă în faptul că, odată cu adăugarea optimă a acestor cosubstrate la digesterul folosind dozatoare speciale, randamentul de biogaz crește de la 1,4 l/h. kg de materie organică uscată și peste.

Cuvinte-cheie: deșeuri organice, substrat, materie organică uscată, instalație de biogaz, digester, biogaz, gunoi de grajd bovin, fermentație metan.

Повышение выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления сельскохозяйственных производственных отходов

Полищук В.Н., Шворов С.А., Пасичник Н.А., Давиденко Т.С., Валиев Т.О., Дворник Е.А.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

Аннотация. Актуальной проблемой сегодняшнего дня является промышленное производство биометана с помощью биогазовых установок из органических отходов сельскохозяйственных производств и некондиционной продукции, которые экологически опасны для окружающей среды. Целью работы является повышение выхода биогаза, а, соответственно, выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления к навозу крупного рогатого скота

сельскохозяйственных производственных отходов. Для достижения поставленных целей решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с добавлением различных объемов органических отходов при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялось нахождение интервала унимодальности для максимального выхода биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота с добавлением органических отходов; с помощью метода дихотомии рассчитывался оптимальный объем дозировки различных видов органических отходов в субстрат для квазинепрерывной загрузки метантенка. Экспериментальные исследования проводились на биогазовой лабораторной установке полезным объемом 30 л в мезофильном режиме с газгольдером мокрого типа. Наиболее существенным результатом является определение с использованием метода дихотомии оптимальных объемов органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, soapстока и мелясы к гною навоза для повышения выхода биогаза. В результате проведенных исследований обоснована оптимальная рецептура дозировки различных видов органических отходов для интенсификации сбраживания навоза крупного рогатого скота. Значимость результатов исследований состоит в том, что при оптимальном добавлении в метантенк с помощью специальных дозаторов, указанных косубстратов выход биогаза увеличивается от 1.4 л/ч. кг сухого органического вещества и выше. При этом имеющиеся органические отходы, которые сваливают на стихийных полигонах, способны полностью обеспечить биогазовые заводы высокоэффективными косубстратами, что позволит сократить сроки окупаемости биогазовых установок до 6.4 лет.

Ключевые слова: органические отходы, субстрат, сухое органическое вещество, биогазовая установка, метантенк, биогаз, навоз крупного рогатого скота, метановое брожение.

LIST OF ABBREVIATIONS

ВРХ – навоз крупного рогатого скота; СВ – сухое вещество; СОВ – сухое органическое вещество; ХПК – химическое потребление кислорода; VS – летучее твердое вещество.

ВВЕДЕНИЕ

Современное животноводство сталкивается с огромным количеством энергетических и экологических проблем. Навоз крупного рогатого скота (КРС), в результате его накопления, является потенциальным источником возникновения экологического неблагополучия не только на фермах КРС, но и для всей экосистемы. При хранении навоза может выделяться метан, влияние которого на парниковый эффект в десятки раз сильнее, чем CO₂. С другой стороны, навоз КРС совместно с другими отходами сельского хозяйства можно эффективно утилизировать путем анаэробного сбраживания в биогазовых установках, получая при этом биогаз, электрическую и тепловую энергию, ценное органическое удобрение, а также снижать при этом выбросы парниковых газов.

Эффективная технология производства биогаза из отходов животноводства предусматривает использование дополнительных видов сырья, что позволяет увеличивать мощность отдельных биогазовых заводов, а также оптимизировать и стабилизировать технологический процесс выработки биогаза. Одним из самых перспективных видов такого

дополнительного сырья являются производственные отходы органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, soapстока, мелассы и им подобные. Однако, на сегодняшний день недостаточно полно изучены вопросы эффективной совместной переработки вышеперечисленных отходов путем их сбраживания в биогазовых установках (БГУ) с целью повышения выхода биогаза и производных энергоресурсов (тепла, электроэнергии, биометана), снижения выбросов парниковых газов, что является актуальной научно-технической задачей.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, в современных БГУ навоз КРС часто используется для получения биогаза, из которого производится электрическая и тепловая энергия, а также высококачественные удобрения. Однако, вследствие наличия в навозе КРС большого количества сырой клетчатки, выход биогаза при его сбраживании в биогазовых установках относительно низок. Поэтому актуальной задачей в условиях энергетического кризиса является повышение выхода биогаза из навоза КРС за счет автоматизированного составления меню косубстратов и их оптимального добавления

в БГУ различных видов органических отходов как стимулирующих процесс брожения добавок. Если такая стимулирующая добавка является отходом производства и при этом решается задача ее утилизации, то в этом случае улучшается и экологическая ситуация в регионе.

Экономическая эффективность действующих биогазовых установок сейчас очень низкая. Ни одна из них не имеет удовлетворительного срока окупаемости инвестиций.

В целях повышения выхода биогаза и выработки энергии, в настоящее время широко практикуется совместное сбраживание гноя крупного рогатого скота с силосом кукурузы. Вместе с тем данное сырье можно использовать как продукты питания для человека и как корм для животных. Поэтому для повышения выхода биогаза из навоза крупного рогатого скота целесообразно использовать более дешевое сырье [1-5], стимулирующее выход биогаза – отходы производств, которые необходимо утилизировать с минимальными затратами, улучшая при этом экологию. Однако в настоящее время недостаточно полно решены проблемные задачи автоматизации составления меню различных видов ко субстратов для повышения выхода биогаза на основе интенсификации сбраживания навоза ВРХ, не обоснованы объемы добавления наиболее распространенных органических отходов к субстрату.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате переработки сельскохозяйственного сырья получают эколого опасные сточные воды крахмальных и винодельческих производств, сыворотку, сырой глицерин, масляный осадок, soapstock, барда, некондиционную муку и т.п., которые можно использовать в качестве ко субстрата в биогазовых установках для увеличения выхода биогаза.

В работе [4] утверждается, что выход биогаза при сбраживании барды составляет 0,88 л/г VS, в работе [5] – выход биометана из барды сахарного тростника – 435 л/kg VS, в работе [6] – выход биометана с барды сахарного тростника – 605 л/kg VS, а в [9] – выход биометана из барды – 0,78 л/g VS.

Проводились исследования использования сточных вод крахмальных производств из

картофеля и кассы (маниока обыкновенного) для производства биогаза. Так, в работе [8] указано, что крахмальные производства сильно загрязняют экосистему. В работе [9] отмечается, что, по меньшей мере, 0,6 м³ сточных вод образуется при обработке 1 тонны маниоки или 2,4 м³ сточных вод для каждой тонны полученного крахмала. При их сбраживании при температуре 33±1 С самый большой суточный выход биогаза составлял 0,65 л/л в течение 8,3 суток. В работе [10] описан процесс непрерывного сбраживания сточных вод производства крахмала из кассы с подачей 1,18; 1,28; 1,57 и 2,68 г химического содержания кислорода на литр реактора в сутки, при гидравлическом содержании 15; 13; 8,3 и 6,6 суток. При этом был получен суточный выход биогаза в 0,52; 0,41; 0,65 и 0,63 л/л соответственно. В работе [11] при сбраживании сточных вод крахмального производства из кассы была достигнута максимальная суточная производительность по биогазу в 3,7 л/л. Средний выход биогаза составил 0,36 л/г химического содержания кислорода. Содержание метана в биогазе находилось в диапазоне 69-81%. Производство биогаза из отходов картофеля при температуре 38 С и рН 5-7,5 рассматривалось в работе [12]. Через 10-15 суток выход биогаза составлял 400-650 м³/т сухого вещества. Биогаз содержал 52-72% метана. Сбраживание смеси крахмала и гноя крупного рогатого скота исследовало в работе [13]. Было установлено, что добавление картофельного крахмала к навозу крупного рогатого скота увеличивало выход метана с 4230 л/м³ до 8625 л/м³ при гидравлическом времени содержания 29 суток. Увеличение гидравлического времени удерживания до 56 суток оказывало незначительное влияние на продуцирование метана.

Сырой глицерин является побочным продуктом производства биодизеля. Выход биогаза при совместном сбраживании сырого глицерина и свалочного фильтрата составляет 403,15 мл/г VS [14]. Добавление 2,5% сырого глицерина к субстрату увеличило выход биометана на 36% (1058,9 л/kg VS) [15]. При совместном сбраживании гноя крупного рогатого скота и сырого глицерина (6%) выход биометана составляет 0,59 м³/kg VS [16].

Soapstock образуется в результате нейтрализации биодизеля, а после его промывки смешиваясь с водой превращается в

сточные воды производства биодизеля. Выход биометана при сбраживании сточных вод производства биодизеля с содержанием соапстока составляет 937 л/кг VS [17], а сточных вод производства переработки рыбы с содержанием соапстока составляет 775 л/кг VS [20].

Как указано в работе [19], потенциал по биометану отработанного растительного масла составляет 775 мл/г VS, а в работе [20] – стоков пальмового масла – 0,50 л/г VS. Выход биогаза из осадка масла, полученного из микроводорослей (*Chlorella* sp., *Nannochloropsis* sp. и *Scenedesmus* sp.), составляет 500 мл/г VS [21].

Добавление сыворотки к свиному навозу при температуре брожения 32 С позволяет получить выход биогаза 250 л/кг VS [22]. В работе [23] утверждается, что добавление кисломолочной сыворотки к навозу КРС увеличивает выход биогаза на 10%, а в работе [24] – на 84%.

В работе [25] статистическим методом было сгруппировано 20 различных видов сырья, разделенных на 5 типов: суспензия с низким содержанием клетчатки, суспензия с высоким содержанием волокна, смесь соломы и гноя, суспензия соломы и активный ил. В работе [26] проведен анализ патентной деятельности по производству биогаза и установлено, что наиболее популярным сырьем является активный ил, сточные воды, отходы животноводства и сельского хозяйства.

Анализ проведенных исследований показывает, что требуется дальнейшее изучение вопроса интенсификации выхода биогаза из субстрата на основе КРС, что может быть достигнуто добавлением к нему отходов сельскохозяйственных производств. При этом необходимо определить оптимальные соотношения отходов производств и КРС, при которых обеспечивается максимальный выход биогаза.

Целью работы является повышение выхода биогаза, выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления к навозу крупного рогатого скота сельскохозяйственных производственных отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся

выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с добавлением различных объемов органических отходов при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялось нахождение интервала унимодальности для максимального выхода биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота с добавлением органических отходов; с помощью метода дихотомии рассчитывался оптимальный объем дозировки различных видов органических отходов в субстрат для квазинепрерывной загрузки метантенка.

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование процесса метанового брожения образцов органических материалов в работе проводился с помощью метода периодического сбраживания.

Процесс метанового брожения инициировался на основе смешивания порции образца органического материала с инокулятом (суспензия, содержащая стартовую популяцию жизнеспособных метанообразующих бактерий) в биореакторе, герметизации биореактора и поддержании постоянной температуры $40 \pm 1^\circ\text{C}$. Для анализа воспроизводимости результатов исследований смеси готовились и сбраживались в 3-х повторах.

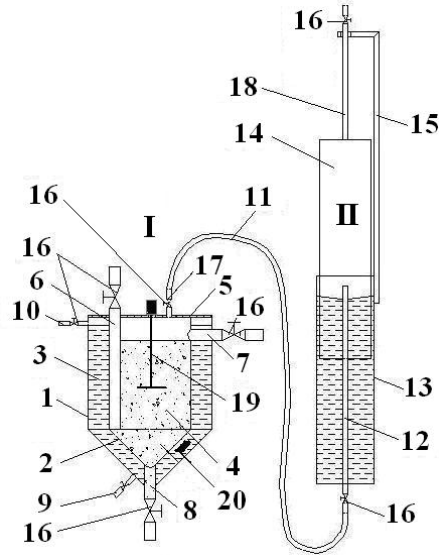
Для проведения исследования использовалась биогазовая лабораторная биогазовая установка с метантенком полезным объемом 30 л с фиксацией выхода биогаза с помощью мокрого газгольдера (рис. 1). Режим загрузки метантенка – периодический, температурный режим – мезофильный. Нагрев и контроль температуры организовано с помощью электрического обогревателя, оборудованного терморегулятором.

Для интенсивного отвода и равномерного распределения тепла от обогревателя использовалась водяная рубашка. Измерение температуры производится с помощью электронного датчика TCM-50. Объем полученного биогаза несколько раз в сутки определялся по шкале, закрепленной на направляющей 15, по высоте поднятия цилиндра-уравномера 14 газгольдера, с последующим пересчетом при известном диаметре цилиндра-уравномера, который составляет 20 см.

В метантенк загружался отмеренный объем субстрата с оптимальным добавлением сельскохозяйственных производственных

отходов, после чего кран 16 закрывался для создания анаэробного режима. Для контроля проводились исследования без добавления и с добавлением сельскохозяйственных производственных отходов в трех повторах.

При добавлении новой порции субстрата перебродивший субстрат обновлялся наполовину (коэффициент опорожнения – 0,5).



I – метантенк; II – газгольдер; 1 – наружный корпус метантенка; 2 – внутренний корпус метантенка; 3 – водяная рубашка; 4 – активная зона метантенка; 5 – крышка; 6 – труба для подачи биомассы; 7 – труба для слива шлама; 8 – труба для удаления шлама; 9 – труба для подачи воды; 10 – труба для установки уровня воды в водяной рубашке; 11 – газопровод; 12 – трубка для подачи биогаза; 13 – корпус газгольдера; 14 – цилиндр-уравномер; 15 – направляющая; 16 – кран; 17 – трубка для отвода биогаза из активной зоны метантенка; 18 – трубка для отбора газа из газгольдера; 19 – мешалка; 20 – нагреватель

Рис. 1. Схема лабораторной биогазовой установки.¹

Основным сырьем для производства биогаза в сельском хозяйстве является навоз. Навоз крупного рогатого скота уже содержит метанообразующие бактерии, что улучшает брожение. Однако выход биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота незначителен и по результатам проведенных исследований составляет в среднем 0,7 л/ч кг СОР, что не позволяет быстро окупить капиталовложения, даже учитывая "зеленый" тариф на электроэнергию, произведенную из биогаза.

Для улучшения выхода биогаза рекомендуется в субстрат добавлять косубстраты органических отходов (или заменять ими воду или дигестат, которые добавляются в субстрат для достижения его оптимальной влажности). К таким косубстратам относятся: размолотое некондиционное зерно хлебных злаков, сырой глицерин, фуз, соапсток, меласса, барда и другие.

При добавлении указанных косубстратов в незначительном количестве выход биогаза, по нашим исследованиям, увеличивается до 1,4 л/ч кг СОР и выше. При этом существенно увеличивать размер метантенка, доброжелателя, резервуаров для биошлама не требуется, поскольку объем загружаемого в метантенк сырья почти не увеличится и поэтому не вызовет дополнительных капиталовложений.

Организация оптимальной дозировки разных видов органических отходов базируется на нахождении таких экспериментальных данных, при которых на каждом этапе функционирования биогазовой установки обеспечивается интенсификация брожения с максимальным выходом биогаза. После получения данных экспериментальных исследований по дозированию различных видов органических отходов осуществлялась их обработка для выявления определенных закономерностей, характера связей между

¹ Appendix 1

уровнями факторов (x) и функциями отклика (y). Обработка результатов исследований проводилась для всех полученных данных (генеральная совокупность) и выборочно для части полученных данных (выборочная оценка). Для этого по результатам экспериментальных исследований производились расчеты: средних значений; дисперсии; средних квадратичных отклонений; абсолютных погрешностей; относительных погрешностей;

коэффициентов вариации; коэффициентов корреляции; коэффициентов регрессии; определялся доверительный интервал для среднего значения; наименьшей существенной разницы; оценивалась достоверность полученных результатов (проверка нулевой гипотезы).

Для использования экспериментальных данных, приведенных в виде таблицы 1, в математической модели определялась зависимость между x и y.

Таблица 1²

Экспериментальные данные

x	x ₁	x ₂	x ₃	...	x _n
y	y ₁	y ₂	y ₃	...	y _n

Эту зависимость можно представить в виде многочлена вида:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m. \quad (1)$$

Одним из методов нахождения коэффициентов уравнений, описывающих экспериментальные точки, является метод наименьших квадратов.

Взаимосвязь между переменными x и y можно описать следующей зависимостью:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (2)$$

Поскольку эта кривая не накладывается точно на экспериментальные точки, то при нахождении i-го значения по формуле (2) по сравнению с табличным значением y_i будет возникать погрешность:

$$y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 = \varepsilon_i. \quad (3)$$

Задача нахождения коэффициентов уравнения состоит в том, чтобы суммарная погрешность для всех n точек была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Но этот критерий в расчете коэффициентов уравнения не может быть использован, поскольку есть положительные и отрицательные значения погрешностей. И если сумма ε_i и будет в уравнении (4) равна 0, то это не означает, что погрешностей нет и уравнение выбрано как наилучшее.

Учитывая это, в качестве критерия оценки полученных результатов выбран минимум суммы квадратов погрешностей:

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Обработка статистических данных производилась с использованием ППП MathCad. Для этого статистические данные вводились в компьютер в виде двух массивов данных таблицы 1: x_i и y_i, где x_i – значение аргумента, а y_i – значение экспериментальных данных. Данные в массивах имеют индексы от 0 до N. Соответственно количество точек в таблице равно N+1.

После того, как массивы введены, для дальнейшей работы с ними производилась их рассортировка по росту аргумента и в транспонируемом виде, преобразовав столбик данных в строку.

Квадратичная аппроксимация табличных данных, т.е. нахождение уравнения вида:

$$y = d_0 + d_1x + d_2x^2, \quad (6)$$

выполнялась с использованием метода наименьших квадратов на основе решения системы трех линейных уравнений, коэффициенты которых и правые части, находились с помощью Mathcad:

$$A1 = \begin{Bmatrix} N+1 & \sum x & \sum x^2 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \end{Bmatrix} \quad B1 = \begin{Bmatrix} \sum y \\ \sum x_i \cdot y_i \\ \sum (x_i)^2 \cdot y_i \end{Bmatrix} \quad (7)$$

После расчета A1 и B1 находились значения массива коэффициентов d_i квадратической зависимости, транспонировав вектор:

$$d = A1^{-1} \cdot B1 \quad (8)$$

Значения среднеквадратичной погрешности определялись по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i [y_i - d_0 - d_1 x_i - d_2 \cdot (x_i)^2]^2}{N}} \quad (9)$$

В результате решения задачи с использованием ППП Mathcad, определяются коэффициенты уравнений, среднеквадратические погрешности уравнений и строится график $f(x)$.

Постановка задачи оптимизации предполагает наличие одного параметра оптимизации x (количество органических отходов) и целевой функции $f(x) \rightarrow \max$ (выход биогаза), определенной в области допустимых значений $x \in D$, где $D=[a, b]$, а a и b – действительные числа, выбранные в диапазоне $[-\infty, +\infty]$. То, что поиск оптимума ограничен поиском минимального значения, не играет существенной роли, поскольку поиск максимума $f(x)$ эквивалентен поиску минимума $-f(x)$.

При наличии нескольких решений – минимумов, точкой глобального минимума функции $f(x)$ в области допустимых значений D будет такая точка x^* , при которой выполняется условие: $f(x^*) \leq f(x)$ для всех $x \in D$.

Точкой локального минимума функции будет точка x^* , в которой при наличии положительного числа r выполняется условие:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ для всех } x \in \{x: |x^* - x| \leq r\}.$$

Решение данной задачи однопараметрической оптимизации может осуществляться многими методами, среди которых наиболее популярны методы: "золотого сечения" или Фибоначчи, дихотомии или половинного деления, квадратичной аппроксимации или Паулла и другие [26]. Для их использования следует сначала найти интервал $[a, b]$, внутри которого находится только одна точка минимума x^* , то есть такой интервал, на котором функция будет унимодальна. Унимодальная на интервале $a \leq x \leq b$ функция $f(x)$ будет только тогда, когда она монотонна с обеих сторон от оптимальной точки x^* . Свойством унимодальной функции является то, что когда на интервале $[a, b]$ есть две точки x_1 и x_2 , и при этом $a < x_1 < x_2 < b$, тогда

при: $f(x_1) \leq f(x_2)$ значение $x^* < x_2$, а при $f(x_1) \geq f(x_2)$ значение $x^* > x_2$.

Это свойство унимодальной функции широко используется в методах оптимизации, уменьшающих интервал $[a, b]$, таких как "золотое сечение", половинное деление и равномерный поиск.

Интервал унимодальности (неопределенности) $[a, b]$ находится последовательными растущими шагами в направлении уменьшения целевой функции до тех пор, пока она не начнет расти.

Алгоритм решения данной задачи будет состоять в последовательном выполнении следующих операций:

1. Задается начальное значение x_0 , начальная величина изменения параметра – шаг h , определяющий направление движения. Задаются два счетчика движения: направо $k=0$ и движения налево $c=0$.

2. Вычисляется значение $f(x)$ и $f(x+h)$.

3. Если $f(x+h) < f(x)$, то увеличивается x , $x = x+h$, а также увеличивается шаг вдвое ($h = 2h$), реализуется движение направо $k=1$ и выполняется переход на п. 2 или (в противном случае) – переход на п. 4.

4. Проверяется, было ли движение направо $k=1$, если было – переход на п. 6 или (в противном случае) – переход на п. 5.

5. Проверяется, было ли движение налево $c=1$, если было – переход на п. 6 или (в противном случае) меняется направление движения $h = -h$, реализуется движение налево $c=1$ и выполняется переход на п. 2.

6. Поиск останавливается и определяется интервал неопределенности, в котором $a = x - |h|$, а $b = x + |h|$.

После нахождения интервала унимодальности, можно перейти к нахождению оптимального значения целевой функции на каждом этапе функционирования БГУ наиболее простым методом однопараметрической оптимизации – методом дихотомии.

Схема решения данной задачи оптимизации методом дихотомии показана на рис. 2. При этом метод дихотомии используется для нахождения оптимума целевой функции на интервале унимодальности.

Согласно схеме алгоритма на интервале $[a, b]$ выбирается две точки относительно середины интервала

$$x_1 = (a + b)/2 - \varepsilon/2 \text{ и } x_2 = (a + b)/2 + \varepsilon/2,$$

где ε – заданная точность, некоторая малая величина $\varepsilon > 0$.

Далее вычисляются значения функции в этих точках и сравниваются между собой с помощью следующих правил:

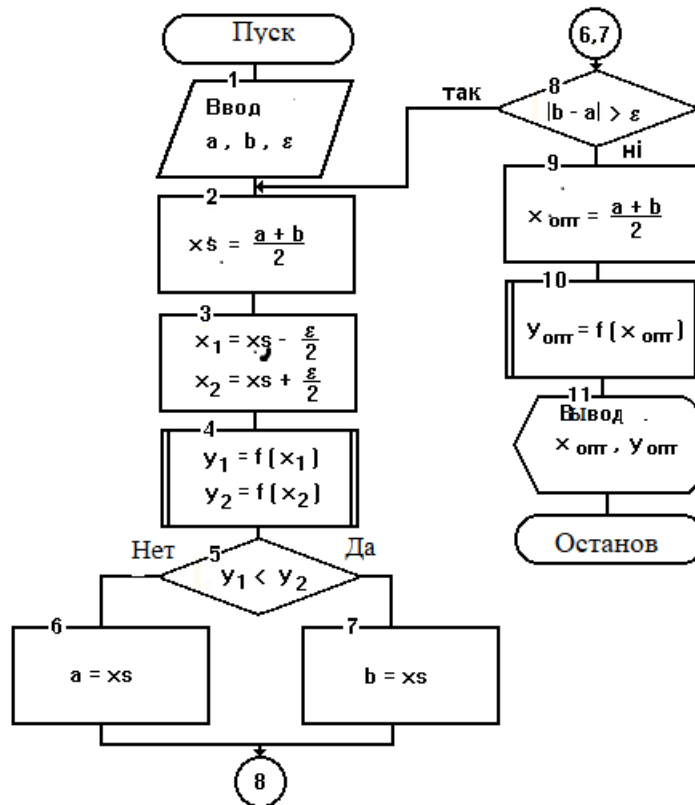


Рис. 2. Схема алгоритма оптимальной дозировки органического вещества методом дихотомии³

если $f(x_1) < f(x_2)$, то оптимум находится на интервале $[a, x_2]$; если $f(x_1) > f(x_2)$, то оптимум ($x_{\text{опт}}$) находится на интервале $[x_1, b]$; если $f(x_1) = f(x_2)$, то оптимум ($x_{\text{опт}}$) находится в интервале $[x_1, x_2]$.

После этого длина отрезка сужается путем переноса точки a или b внутрь отрезка. Отрезок сужается пополам до тех пор, пока его длина не станет меньше заданной точности.

На основе применения данного математического аппарата получено сравнение динамики выхода биогаза при моносбраживании гноя КРС и с оптимальным добавлением различных косубстратов органических отходов (рис. 3).

С рис. 3 видно, что интенсификация и наибольший выход биогаза в пределах интервала унимодальности обеспечивается только при оптимальном добавлении к субстрату, а именно: крахмала 5% СОР от СОР субстрата; 2,3% муки от массы субстрата; 34,2% СОР сырого глицерина в СОР субстрата; 1,3% фуза от массы субстрата; 1,2% соапстока от массы субстрата; 10,6% мелесной барды от

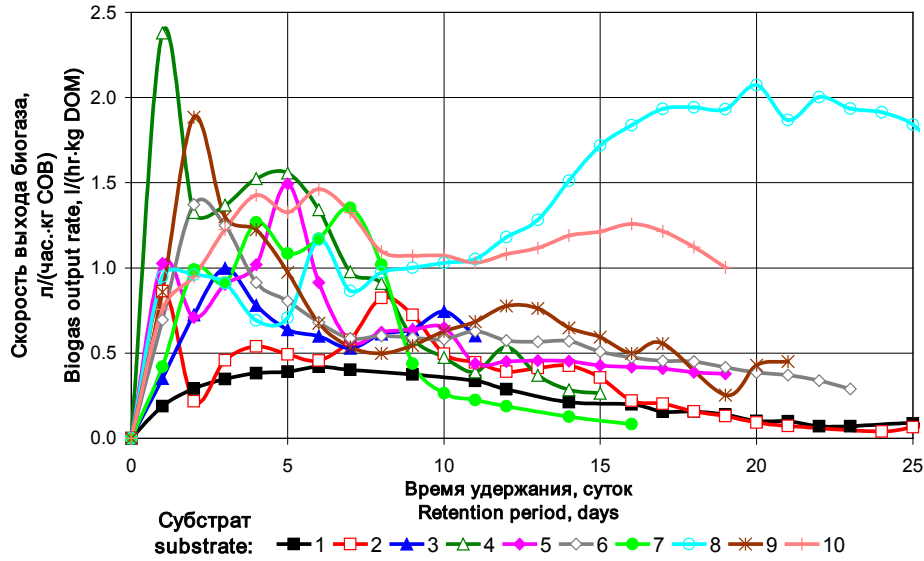
массы субстрата, с заменой 60% воды в субстрате сывороткой; с заменой 13% воды в субстрате со сточными водами виноделия.

Сравнение накопленных выходов биогаза при сбраживании вышеуказанных субстратов приведена на рис. 4.

Результаты сравнения накопленных выходов биогаза (рис. 4) позволяют предоставить практические научно обоснованные методические рекомендации по оптимальному дозированию и интенсивному сбраживанию различных видов органических отходов.

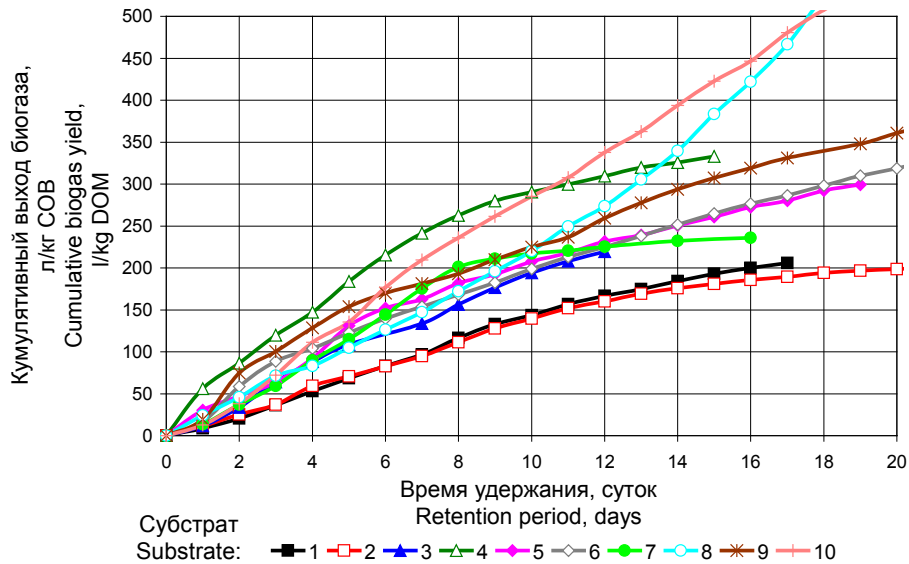
С помощью метода дихотомии определены оптимальные объемы дозировки органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, соапстока и мелесной барды к основному субстрату (навозу крупного рогатого скота) для квазинепрерывной загрузки метантенка..

значительно улучшить экологическую обстановку в регионе и обеспечить срок окупаемости биогазовой установки до 6,4 лет.



1 – контрольный сплошной субстрат КРС; 2 – смесь органата и гноя КРС; 3 – навоз КРС с добавлением 5% СОР от СОР субстрата крахмала; 4* – субстрат с добавлением 2,3% муки от массы субстрата; 5* – субстрат с заменой 60% воды сывороткой; 6 – субстрат с заменой 13% воды сточными водами винодельческих производств; 7 – навоз КРС с дозировкой 34,2% СОР сырого глицирина до СОР субстрата; 8 – гной КРС с дозировкой 1,3% фуза от массы субстрата; 9 – навоз КРС с дозировкой 1,2% соапстока от массы субстрата; 10 – навоз КРС с дозировкой 10,6% мелесной барды от массы субстрата
* – брожение при температуре 40°C

Рис. 3. Динамика интенсивного выхода биогаза при сбраживании разных субстратов. ⁴



1 – контрольный сплошной субстрат КРС; 2 – смесь органата и гноя КРС; 3 – навоз КРС с добавлением 5% СОР от СОР субстрата крахмала; 4* – субстрат с добавлением 2,3% муки от массы субстрата; 5* – субстрат с заменой 60% воды сывороткой; 6 – субстрат с заменой 13% воды сточными водами винодельческих производств; 7 – навоз КРС с дозировкой 34,2% СОР сырого глицирина до СОР субстрата; 8 – гной КРС с дозировкой 1,3% фуза от массы субстрата; 9 – навоз КРС с дозировкой 1,2% соапстока от массы субстрата; 10 – навоз КРС с дозировкой 10,6% мелесной барды от массы субстрата
* – брожение при температуре 40°C

Рис. 4. Сравнение накопленных выходов биогаза при оптимальной дозировке косубстратов и их сбраживании (температура брожения 40°C) ⁵

Таким образом, в условиях энергетического кризиса значимость результатов исследований состоит в том, что с помощью специальных дозаторов при оптимальном добавлении в метантенки промышленных биогазовых заводов указанных органических отходов выход биогаза увеличивается от 1,4 л/ч. кг сухого органического вещества и выше, что позволяет

V. ВЫВОДЫ

1. В условиях работы сельскохозяйственного предприятия животноводческого типа накапливается достаточно большое количество животноводческих отходов (как правило, навоза крупного рогатого скота), которые необходимо использовать в качестве сырья для производства биогаза. Однако выход биогаза из цельного навоза крупного рогатого скота недостаточен для быстрой окупаемости капиталовложений в биогазовую установку. Для интенсификации брожения и повышения выхода биогаза к навозу крупного рогатого скота необходимо добавлять косубстраты, в качестве которых можно использовать отходы перерабатывающих производств.

2. Разработаны методические основы интенсификации брожения, основанные на нахождении интервала унимодальности, в пределах которого с помощью метода

дихотомии рассчитываются оптимальные объёмы добавок к субстрату в виде отходов сельскохозяйственных производств, при которых обеспечивается повышение выхода биогаза.

3. Сформулированы методические рекомендации по увеличению выхода биогаза на промышленных биогазовых заводах, использование которых позволяет улучшить экологическую обстановку в регионе и получить дополнительные энергетические ресурсы. При этом имеющиеся органические отходы, которые сваливают на стихийных полигонах, способны полностью обеспечить биогазовые заводы высокоэффективными косубстратами, что позволит значительно сократить сроки окупаемости биогазовых установок до 6,4 лет.

4. В рамках продолжения данной работы на основе предлагаемого научно-методического аппарата целесообразно в зависимости от условий эксплуатации для конкретной биогазовой установки проводить обоснование технологического оптимума добавления в метантенки БГУ сельскохозяйственных производственных отходов.

Appendix 1

¹**Fig. 1.** Schematic of a pilot plant for batch methane fermentation: 1 - capacity of the bioreactor; 2 - fixed part of the eudiometer; 3 - moving part of the eudiometer; 4 - container with coolant; 5 - PVC tube; 6 - gas cock; 7 - gas analyzer; 8 - working environment of the bioreactor; 9 - internal space of the eudiometer with biogas; 10 - coolant (water); 11 - 5% aqueous NaCl solution; 12 - mercury thermometer; 13 - thermostat ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$).

³**Fig. 2.** Cumulative flow of biogas in time during fermentation of mixtures No. 1-No. 3.

⁴**Fig. 3.** Cumulative flow of biogas in time during fermentation of mixtures No. 4-No. 6.

⁵**Fig. 4.** Cumulative velocity of biogas flow in time during fermentation of mixtures No. 1-No. 3.

²**Table 1.** Experimental data.

Библиография (References)

- [1] Bhatnagar, N., Ryan, D., Murphy, R., Enright, A.M. Trace Element Supplementation And Enzyme Addition To Enhance Biogas Production by Anaerobic Digestion of Chicken Litter. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 13. AN. 3477. doi: 10.3390/en13133477.
- [2] Polishchuk, V.M., Shvorov, S.A., Tarasenko, S.Ye., Antypov, I.O. (2020). Increasing the Biogas Release During the Cattle Manure Fermentation by Means of Rational Addition of Substandard Flour as a Cosubstrate. *Science and innovation*. 16 (4). 25-35. doi: <https://doi.org/10.15407/scin16.04.025>.
- [3] Rogovskii, I.L., Polishchuk, V.M., Titova, L.L., Sivak, I.M., Vyhovskiy, A.Yu., Drahnev, S.V., Voinash, S.A. (2020). Study of Biogas During Fermentation of Cattle Manure Using A Stimulating Additive In Form Of Vegetable Oil Sediment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 15 (22). 2652-2663.
- [4] Rana, Q.U., Khan, M.A.N., Shiekh, Z., Parveen, S., Ahmed, S., Irfan, M. et al. (2021). Production of bioethanol and biogas from *Spirodela polyrhiza* in a biorefinery concept and output energy analysis of the process. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access NOV 2021. doi: 10.1007/s13399-021-02066-9.
- [5] Kiani, M.K.D., Parsaee, M., Mahdaviifar, Z. (2021). Biogas production from sugarcane vinasse at mesophilic and thermophilic temperatures by static granular bed reactor (SGBR). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 48. 101569. doi: 10.1016/j.seta.2021.101569.
- [6] Volpi, M.P.C., Brenelli, L.B., Mockaitis, G.,

- Rabelo, S.C., Franco, T.T., Moraes, B.S. (2021). Use of Lignocellulosic Residue from Second-Generation Ethanol Production to Enhance Methane Production Through Co-digestion. *Bioenergy Research*. Early Access JUN 2021. doi: 10.1007/s12155-021-10293-1.
- [7] Iltchenko, J., Peruzzo, V., Magrini, F.E., Marconatto, L., Torres, A.P., Beal, L.L., Paesi, S. (2021). Microbiota profile in mesophilic biodigestion of sugarcane vinasse in batch reactors. *Water Science and Technology*. 84 (8). 2028-2039. doi: 10.2166/wst.2021.375.
- [8] Kuczman, O., Tavares, M.H.F., Gomes, S.D., Guedes, L.P.C., Grisotti, G. (2014). Cassava Starch Extraction Effluent Treatment in a One Phase Tubular Horizontal Pilot Reactor with Support Medium. *Engenharia Agricola*. 34 (6). 1270-1282. doi: 10.1590/S0100-69162014000600021.
- [9]. Kuczman, O., Tavares, M.H.F., Gomes, S.D., Torres, D.G.B., Fleck, L. (2013). Influence of hydraulic retention time on the anaerobic treatment of cassava starch extraction effluent using a one-phase horizontal reactor. *Journal of Food Agriculture & Environment*. 11 (1). 1118-1120.
- [10] Kuczman, O., Gomes, S.D., Tavares, M.H.F., Torres, D.G.B., Alcantara, M.S. (2011). Specific biogas production from manipueira at one-phase reactor. *Engenharia Agricola*. 31 (1). 143-149. doi: 10.1590/S0100-69162011000100014.
- [11] Colin, X., Farinet, J.L., Rojas, O., Alazard, D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. *Bioresource Technology*. 98 (8). 1602-1607. doi: 10.1016/j.biortech.2006.06.020.
- [12] Fugol, M., Szlachta, J. (2013). Use of the potato industry waste for anaerobic digestion. *Przemysl Chemiczny*. 92 (5). 824-828.
- [13] Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B. (2004). Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture ecosystems & Environment*. 112 (2-3). SI. 171-177. doi: 10.1016/j.agee.2005.08.016.
- [14] Takeda, P.Y., Gotardo, J.T., Gomes, S.D. (2020). Anaerobic co-digestion of leachate and glycerol for renewable energy generation. *Environmental Technology*. Early Access SEP 2020. doi: 10.1080/09593330.2020.1818832.
- [15] Schwingel, A.W., Orrico, A.C.A., de Lucas, J., Orrico, M.A.P., Borquis, R.R.A., Fava, A.F. (2019). Laying hen manure in anaerobic Co-Digestion with glycerin containing different glycerol and impurity levels. *Journal of Cleaner Production*. 215. 1437-1444. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.125.
- [16] Ormaechea, P., Castrillon, L., Suarez-Pena, B., Megido, L., Fernandez-Nava, Y., Negral, L., Maranon, E., Rodriguez-Iglesias, J. (2019). Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and/or co-digested at pilot-plant scale. Characterization by SEM. *Renewable Energy*. 126. 897-904. doi: 10.1016/j.renene.2018.04.022.
- [17] Borowski, S., Cieciora-Wloch, W. (2021). Enzymatic Pretreatment of Byproducts from Soapstock Splitting and Glycerol Processing for Improvement of Biogas Production. *Molecules*. 26 (22). 6782. doi: 10.3390/molecules26226782.
- [18] Sarker, S. (2020). By-products of fish-oil refinery as potential substrates for biogas production in Norway: A preliminary study. *Results in Engineering*. 6. 100137. doi: 10.1016/j.rineng.2020.100137.
- [21] El-Dalatony, M.M., Sharma, P., Hussein, E.E., Elnaggar, A.Y., Salama, E.S. (2022). Pig- and vegetable-cooked waste oils as feedstock for biodiesel, biogas, and biopolymer production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access JAN 2022. doi: 10.1007/s13399-021-02281-4.
- [22] Lim, Y.F., Chan, Y.J., Abakr, Y.A., Sethu, V., Selvarajoo, A., Singh, A., Lee, J.Y., Gareth, M. (2021). Evaluation of potential feedstock for biogas production via anaerobic digestion in Malaysia: kinetic studies and economics analysis. *Environmental Technology*. Early Access FEB 2021. doi: 10.1080/09593330.2021.1882587 4.
- [23] Torres, A., Padrino, S., Brito, A., Diaz, L. (2021). Biogas production from anaerobic digestion of solid microalgae residues generated on different processes of microalgae-to-biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access SEP 2021. doi: 10.1007/s13399-021-01898-9.
- [24] Antonelli, Jh., Lindino C.A., de Azevedo L.C.R., Souza S.N. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciencias Agrarias*. 39 (3). 463-468. doi: 10.19084/RCA15087.
- [25] Hegde, S., Win, S.S., Trabold, T.A. (2017). Stabilizing the Anaerobic Digestion of Food Waste for Biomethane Production. *Proceedings of the Asme 11th International Conference on Energy Sustainability (Charlotte, NC), 2017*. Art. nr.: UNSP V001T02A002.
- [26] Vivekanand, V., Mulat, D.G., Eijsink, V.G.H. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresource Technology*. 249. 35-41. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.169.
- [27] Yang, Y., Zhu, H.G. (2020). Clustering and modelling of rheological parameters for anaerobic digestion materials (ADMs) and its application for feed pump selection. *For results 4th International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*

(EEEP) (November 19-21, 2019, Xiamen, China), IOP Conference Series-Earth and Environmental Science. 467. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/467/1/012053.

[28] Grando R.L., da Fonseca F.V., de Souza Antunes

A.M. (2017). Mapping of the Use of Waste as Raw Materials for Biogas Production. Journal of Environmental Protection.8. 120-130. doi: 10.4236/jep.2017.82010.

Сведения об авторах.



Полищук Виктор Николаевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.

E-mail: polischuk.v.m@gmail.com



Пасичник Наталья Анатольевна. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Основная область исследований: технологии конверсии биомассы в биогаз по сокращенной ферментации, переработка побочных продуктов растениеводства в топливо, биологические корма и удобрения.

E-mail: N.Pasichnyk@nubip.edu.ua



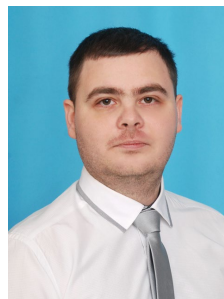
Валиев Тимур Одылович. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, аспирант. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биогаза.

E-mail: timurvaliev@gmail.com



Шворов Сергей Андреевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра автоматике и робототехнических систем имени академика И.И. Мартыненко, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: создание систем сбора и переработки органического сырья.

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua



Давиденко Тарас Сергеевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра автоматике и робототехнических систем имени академика И.И. Мартыненко, аспирант. Основная область исследований: автоматизация технологических процессов.

E-mail: davidenkotaras009@gmail.com



Дворник Евгений Алексеевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, аспирант. Основное направление исследований: технологии и технические средства производства биогаза.

E-mail: dvornykevgen@gmail.com

Universal Method for Detecting Violations in the Integrity of a Digital Image Based on Analysis of Blocks of its Matrix

Bobok I., Kobozeva A.

Odesa Polytechnic National University
Odesa, Ukraine

Abstract. The requirement to provide the content expertise (particularly digital video) in real time is becoming critical. Thus, the aim of the work is to increase the efficiency of identifying the fact of violation of image integrity by developing a universal expert method with low computational complexity. This aim was achieved by using a new approach developed by the authors earlier that based on the properties of the dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number, adapted for the case of a block organization of expertise. The most important theoretical result of the work is the higher rate of growth of the linear approximation of the dependence of the block-average values of the frequency indexes of singular vectors on its number, which was established for the original content, as compared to the non-original content. The significance of the obtained results is that the developed expert method, being a block one, has insignificant computational complexity – $O(n^2)$ operations for an $n \times n$ image matrix, which makes it promising for working with digital content, in particular with video, in real time. At the same time, the algorithmic implementation of the method made it possible to increase the efficiency of detecting violations of image integrity by reducing type I errors by 2% compared to the best analogue; type II errors remained at the same level. The versatility of the method is confirmed by its high efficiency regardless of the specifics of the perturbation effect, including in conditions of minor disturbances.

Keywords: digital image, integrity violation, singular vector, frequency index of singular vector, integrity expertise.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.08>

UDC: 004.056

Metodă universală de detectare a încălcărilor integrității unei imagini digitale pe baza analizei blocurilor din matricea acesteia

Boboc I., Kobozeva A.

Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Ucraina

Rezumat. Cerința de a oferi expertiza integrității care să permită separarea unei imagini originale de una neoriginală fără a ține cont de specificul influenței perturbatoare (în special video digital) în timp real devine critică. Astfel, scopul lucrării este de a crește eficiența identificării faptului de încălcare a integrității imaginii prin elaborarea unei metode expert universale cu complexitate de calcul scăzută. Acest obiectiv a fost atins prin utilizarea unei noi abordări elaborate de autori anterior, care se bazează pe proprietățile dependenței indicelui de frecvență al vectorului singular al matricei imaginii de numărul acestuia, adaptată pentru cazul unei organizări bloc de expertiză. Cel mai important rezultat teoretic al lucrării este rata mai mare de creștere a aproximării liniare a dependenței valorilor medii bloc ale indicilor de frecvență ai vectorilor singulari de numărul acestuia, care a fost stabilită pentru conținutul original, în comparație cu conținut neoriginal. Semnificația rezultatelor obținute este că metoda expert elaborată, fiind una bloc, are o complexitate computațională nesemnificativă $O(n^2)$ – operații pentru $n \times n$ o matrice imagine, ceea ce o face promițătoare pentru lucrul cu conținut digital, în special cu video, în timp real. În același timp, implementarea algoritmică a metodei a făcut posibilă creșterea eficienței detectării încălcărilor integrității imaginii prin reducerea erorilor de tip I cu 2% față de cel mai bun analog; erorile de tip II au rămas la același nivel. Versatilitatea metodei este confirmată de eficiența sa ridicată, indiferent de specificul efectului de perturbare, inclusiv în condiții de perturbări minore.

Cuvinte-cheie: imagine digitală, încălcare a integrității, vector singular, indice de frecvență al vectorului singular, expertiză în integritate.

Универсальный метод выявления нарушения целостности цифрового изображения, основанный на анализе блоков его матрицы

Бобок И.И., Кобозева А.А.

Национальный университет «Одесская политехника»

Одесса, Украина

Аннотация. Современные информационные технологии предоставляют широкие возможности для осуществления несанкционированных изменений цифровых контентов, в частности, цифровых изображений, которым посвящена работа, что может привести к негативным последствиям, вплоть до катастрофических, как для отдельно взятых людей, так и для человечества в целом, когда такие контенты используются в неразвлекательных целях. В настоящий момент растет востребованность универсальных методов экспертизы целостности, позволяющих отделять оригинальные изображения от неоригинального без учета специфики использованного возмущающего воздействия. Критически важным становится требование обеспечения экспертизы контента, в частности цифрового видео, в режиме реального времени. С учетом этого целью работы является повышение эффективности выявления факта нарушения целостности изображения путем разработки универсального экспертного метода, обладающего незначительной вычислительной сложностью. Поставленная цель была достигнута путем использования нового подхода, разработанного авторами ранее, – СНВ-подхода, основанного на учете свойств функции зависимости частоты сингулярного вектора матрицы изображения от его номера, адаптированного для случая блоковой организации экспертизы, когда матрица изображения предварительно разбивается на блоки, анализируемые по отдельности. Наиболее важным теоретическим результатом работы является установленная для оригинального контента большая скорость роста линейной аппроксимации функции, отражающей зависимость средних по блокам значений частот сингулярных векторов от номера вектора, по сравнению с неоригинальным. Значимость полученных результатов заключается в том, что разработанный экспертный метод, являясь блоковым, имеет незначительную вычислительную сложность – $O(n^2)$ операций для $n \times n$ -матрицы изображения, что делает его перспективным для работы с цифровыми контентами, в частности, с видео, в режиме реального времени. При этом алгоритмическая реализация метода позволила повысить эффективность выявления нарушения целостности изображения путем снижения ошибок 1-го рода на 2% по сравнению с наилучшим аналогом, ошибки 2-го рода остались на том же уровне. Универсальность метода подтверждается его высокой эффективностью независимо от специфики возмущающего воздействия, в том числе и в условиях незначительных возмущений.

Ключевые слова: цифровое изображение, нарушение целостности, сингулярный вектор, частота сингулярного вектора, экспертиза целостности.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс внедрения новых информационных технологий во все сферы жизни общества требует незамедлительного повышения эффективности процессов защиты информации. Широкомасштабное использование вычислительной техники и телекоммуникационных систем, переход к безбумажным технологиям, предполагающий расширение цифровых технологий, увеличение объемов обрабатываемой информации и расширение круга пользователей приводят к качественно новым возможностям несанкционированного доступа к ресурсам и данным информационных систем, к их высокой уязвимости. В современных условиях защита информации в целом и защита информации в автоматизированных информационных системах в частности становится все более сложной проблемой, требует для своего решения привлечения современных научных исследований [1, 2].

Нарушение целостности информации, представленной в цифровом виде, в частности, цифрового изображения (ЦИ), проблеме экспертизы которого посвящена настоящая работа, может привести к значительным негативным последствиям, вплоть до катастрофических, когда несанкционированно измененные контенты используются в неразвлекательных целях. Современные информационные технологии предоставляют широкие возможности для осуществления несанкционированных изменений цифровых контентов, следствием чего является повышение актуальности проблемы выявления нарушения целостности цифровой информации, рост востребованности эффективных экспертных методов [3-5].

Все существующие экспертные методы, работающие с ЦИ, можно разделить на две большие группы: универсальные, целью которых является отделение оригинального ЦИ от такого, которое было изменено, без

определения конкретного источника, способа изменения изображения [6], и направленные, действия которых ориентированы на выявление результатов конкретных возмущающих воздействий, учитывают их особенности [7-10]. Узкая область применимости методов второй группы делает их более эффективными, чем универсальные, в условиях, на которые рассчитаны направленные методы. Универсальные методы выявления нарушения целостности, являющиеся в общем случае менее чувствительными к возмущающим воздействиям, можно рассматривать в качестве «первой линии обороны», позволяющей «откинуть» значительную часть измененных контентов, прохождение которой приводит к более чувствительной направленной экспертизе. Учитывая, что чаще всего у эксперта отсутствует точная информация о конкретном виде атаки на контент; универсальные подходы являются гибкими и способными быстро адаптироваться к новым возмущающим воздействиям, в частности к новым стеганографическим методам [11]; экспертиза целостности контента часто является необходимой для возможности его дальнейшего использования и может требовать ограниченного времени для проведения, актуальность универсальных методов растет.

Универсальные экспертные методы сегодня чаще всего предлагаются в условиях стеганоанализа [12] с учетом бурного развития стеганографии, относясь в большинстве своем к группе статистических методов.

Так в [13] предложен универсальный стеганоаналитический метод, позволяющий выявлять стеганосообщения, сформированные на основе контейнеро-изображений, изначально хранимых в формате Jpeg, с учетом того, что Jpeg-компрессия накладывает уникальный отпечаток на изображение, позволяющий определять произошедшие искажения. Выявление изменений в изображении здесь основывается на анализе совместимости 8×8 -блоков пикселей Jpeg-изображения с заданной матрицей квантования. Метод фактически применим к любым стеганографическим алгоритмам, за исключением тех, которые осуществляют встраивание дополнительной информации в

коэффициенты дискретного косинусного преобразования. Поскольку все стеганографические алгоритмы всегда стремятся к минимизации искажений для уменьшения вероятности появления артефактов, то процесс стеганопреобразования не будет полностью уничтожать характерную структуру, созданную Jpeg-компрессией, оставляя возможность определения того, было или нет данное ЦИ сохранено в формате Jpeg до внедрения дополнительной информации. Положительный ответ на вопрос является указателем на стеганопреобразование. Предложенный подход широко используется в стеганоанализе и в настоящий момент, хотя его применимость предполагает использование контейнера исключительно в формате Jpeg, ограничивая его возможности. При этом эффективность предложенного метода значительно падает с уменьшением пропускной способности скрытого канала связи – величины возмущающего воздействия.

Универсальный стеганоаналитический метод, основанный на анализе набора чувствительных статистических параметров, полученных в результате вейвлет-преобразования стеганосообщения, для которого в качестве контейнера используется ЦИ, предложен в [14]. Однако этот метод, как и метод разработанный в [15], основой которого является анализ гистограмм значений яркости пикселей изображения и дискретного преобразования Фурье с учетом отличий этих характеристик для оригинального контейнера и стеганосообщения, не обеспечивают достаточную эффективность стеганоанализа в условиях малых возмущающих воздействий – малой пропускной способности скрытого канала связи.

Универсальные стеганоаналитические методы, имеющие различные математические базисы, которые авторами позиционируются как эффективные, предложены в [16,17]. Однако универсальный стеганоанализ, даже будучи эффективным, не может заменить универсальной экспертизы целостности ЦИ, нарушение которой произошло в результате возмущающих воздействий, которые могут быть отличны от стеганопреобразования. На сегодняшний день универсальные методы выявления нарушений целостности ЦИ практически отсутствуют, что объясняется

крайней сложностью решаемой задачи и концентрацией внимания специалистов на конкретных наиболее распространенных и часто используемых возмущающих воздействиях.

Одним из немногочисленных существующих сегодня эффективных универсальных методов выявления нарушения целостности ЦИ является метод, разработанный в [6], базирующийся на доказанном для большинства $l \times l$ -блоков матрицы оригинального ЦИ, полученных путем стандартного разбиения его матрицы [18], соотношении:

$\angle(u_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^\circ, e_1)$, где u_i, v_i – ортонормированные левый и правый сингулярные векторы (СНВ) блока, которые соответствуют его наибольшему сингулярному числу σ_1 ; $\bar{\sigma} = \sigma / \|\sigma\|$, $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$ – сингулярные числа (СНЧ) блока; $\|\sigma\|$ – норма вектора σ ;

$$n^\circ = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l \quad (1)$$

– n -оптимальный вектор пространства R^l , $\angle(u_i, \bar{\sigma})$, $\angle(v_i, \bar{\sigma})$, $\angle(n^\circ, e_1)$ – величины углов между векторами u_i и $\bar{\sigma}$, v_i и $\bar{\sigma}$, n° и вектором стандартного базиса $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$ пространства R^l соответственно. Указанное соотношение нарушается для ЦИ, не являющихся оригинальными. Предложенный метод хорошо зарекомендовал себя при выявлении результатов различных возмущающих воздействий (наложение шума, фильтрация, размытие и т.д.), в том числе и в качестве стеганоаналитического: ошибки I рода, когда ЦИ, целостность которого была нарушена, определялось методом как оригинальное, составили 5.7%, ошибки II рода, когда оригинальное изображение трактовалось как претерпевшее изменения, составили 4.1%. В силу того, что эффективность остается для метода значительной независимо от конкретики возмущающего воздействия, подтверждая его универсальность, он используется авторами для проведения сравнительной оценки эффективности метода, разработанного в данной работе.

Существующие экспертные методы не решают окончательно проблему выявления

нарушения целостности ЦИ. Все еще остается актуальным вопрос повышения эффективности такого выявления, в том числе, в условиях малых возмущающих воздействий, а в случае стеганоаналитических методов – в условиях малой пропускной способности скрытого канала связи. С учетом того, что разнообразие возмущающих воздействий на ЦИ можно считать бесконечным, разработка универсальных экспертных методов требует более пристального внимания со стороны специалистов в области защиты информации для устранения все еще существующей зависимости качества этой экспертизы от вида и силы возмущающего воздействия.

Недавно авторами в статье, опубликованной в 2023 году в настоящем научном журнале, был предложен новый подход к выявлению неоригинальных ЦИ, основанный на анализе характерных свойств сингулярных векторов матрицы ЦИ, который везде ниже будем называть СНВ-подходом. Данный подход видится перспективным для разработки на его основе новых универсальных экспертных методов, поскольку ориентирован на отличие свойств оригинального и неоригинального ЦИ без учета какой-либо конкретики того возмущающего воздействия, которое привело к нарушению целостности ЦИ.

В настоящий момент с учетом значительных размеров ЦИ, цифрового видео (ЦВ), рассматриваемого как последовательность кадров-ЦИ, критическим важным является обеспечение малой вычислительной сложности соответствующего экспертного метода, особенно в случае, когда экспертиза проводится в режиме реального времени, что часто является актуальной необходимостью.

С учетом всего выше изложенного

Целью работы является повышение эффективности выявления факта нарушения целостности ЦИ путем разработки универсального экспертного метода, обладающего незначительной вычислительной сложностью, на основе СНВ-подхода.

Эффективность метода оценивается количественно ошибками 1-го и 2-го рода.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основы СНВ-подхода. Пусть F - $n \times n$ -матрица оригинального ЦИ. Для нее возможно построение однозначно определяемого в случае отсутствия кратных СНЧ нормального сингулярного разложения [19]:

$$F = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T, \quad (2)$$

где U, V - ортогональные $n \times n$ -матрицы, столбцы которых $u_i, v_i, i = \overline{1, n}$, - левые и правые СНВ F соответственно, при этом левые СНВ дополнительно являются лексикографически положительными [19]; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$,

$$\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0 \quad (3)$$

- СНЧ F ; правая часть формулы (2) дает представление сингулярного разложения в форме внешних произведений, т.е. разложение исходной матрицы на сумму матриц $\sigma_i u_i v_i^T, i = \overline{1, n}$, единичного ранга, каждая из которых определяется сингулярной тройкой (σ_i, u_i, v_i) . Каждому СНВ $u_i (v_i)$ ЦИ ставится в соответствие числовая характеристика, определяемая следующим образом:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} \frac{\eta}{2}, & \text{если } \eta - \text{четное} \\ \frac{\eta+1}{2}, & \text{если } \eta - \text{нечетное} \end{cases} \quad (4)$$

где η - число изменений знака в последовательных компонентах СНВ. Для ЦИ определяется дискретная функция $fr(i), i = \overline{1, n}$, отражающей зависимость $\bar{\eta}(u_i) (\bar{\eta}(v_i))$ - частоты СНВ $u_i (v_i)$ от его номера i . Основой СНВ-подхода является установленное свойство линейности частоты СНВ для оригинального ЦИ в формате без потерь, которое заключается в следующем: практически постоянной является скорость возрастания тренда функции $fr(i)$, т.е. $fr(i)$ хорошо аппроксимируется линейной функцией практически на всей области определения (рис.1).

¹ Appendix 1

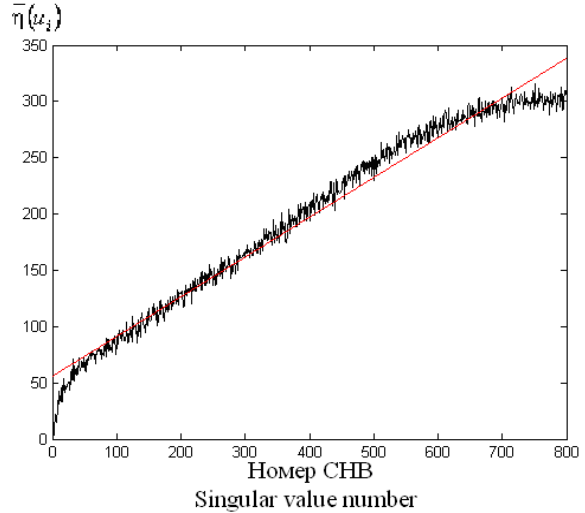


Рис.1. Графики зависимости частоты СНВ от его номера для оригинального ЦИ в формате без потерь и линейной аппроксимирующей функции.¹

Линейность частоты СНВ является характеристикой, чувствительной к возмущающим воздействиям, а значит дает принципиальную возможность для отделения оригинального контента от такого, целостность которого нарушена, в том числе в условиях малых возмущающих воздействий, независимо от их конкретики.

Поскольку ранее авторами показано, что частоты соответствующих левых и правых СНВ u_k и v_k матрицы ЦИ сравнимы между собой, как и частоты соответствующих им гармонических функций, далее для определенности рассматриваются левые СНВ.

В настоящий момент обработка ЦИ, в частности, процессы стеганообразования, сжатия с потерями с использованием стандартов Jpeg, Jpeg2000 и др. происходят поблоково после предварительного (стандартного) разбиения матрицы ЦИ на блоки [18]. Можно указать несколько причин повышения приоритетности блоковых алгоритмов:

- Вычислительная сложность любого блокового алгоритма определяется количеством обрабатываемых блоков, т.е. для $n \times n$ -матрицы F составляет $O(n^2)$ операций, что делает такой алгоритм перспективным для работы с цифровыми контентом, в частности, с ЦВ, в режиме реального времени;
- Блоковая обработка ЦИ дает возможность естественным образом распараллелить

этот процесс, проводя одновременно обработку нескольких блоков;

- Нарушение целостности ЦИ сегодня часто связано с процессом его стеганообразования. Современные стеганометоды, как правило, должны быть устойчивыми к атаке сжатием с потерями для обеспечения возможности сохранения ЦИ-стеганосообщения в таком формате (Jpeg), что, кроме всего прочего, дает возможность избежать дополнительного внимания к полученному стеганосообщению. Поскольку алгоритмы Jpeg, Jpeg2000 разбивают матрицу на блоки с последующей их обработкой, то для обеспечения возможности эффективного декодирования встроенной информации после сжатия стеганосообщения процесс стеганообразования целесообразно проводить также поблоково, управляя составляющими блока таким образом, чтобы устранить возможность разрушения встроенной информации в результате сжатия, что и приводит к блочной обработке ЦИ при встраивании дополнительной информации.

С учетом вышеперечисленного очевидной представляется приоритетность блочной обработки ЦИ на сегодняшний день, что приводит к целесообразности проведения экспертизы аналогичным образом, используя блочные методы. Необходимо отметить, что организация экспертизы при помощи блочных методов имеет смысл независимо от наличия/отсутствия первичной блочной обработки ЦИ с учетом незначительной вычислительной сложности таких методов.

Рассмотрим возможность применимости СНВ-подхода при организации блочной экспертизы. Для этого исследуем вопрос о том, насколько свойство линейности частоты СНВ является чувствительным к размеру матрицы ЦИ (блока), или иначе: насколько это свойство будет оставаться «определяемым» по мере уменьшения размеров контента. С учетом того, что функция $fr(i), i = \overline{1, n}$ монотонной не является, можно предположить, что с уменьшением размером матрицы F линейность частоты СНВ будет все менее

очевидной даже для оригинальных контентов, что подтверждается вычислительным экспериментом, типичные наглядные результаты которого демонстрирует рис.2. Более того, при малом размере F (например, для наиболее часто используемого на практике 8×8 -блока) не только не просматривается линейность частоты СНВ, но и отличить поведение функции $fr(i), i = \overline{1, n}$ для оригинального ЦИ и ЦИ, целостность которого нарушена, не представляется возможным (рис.3), что подтверждается практической неразличимостью и количественных оценок:

$$L = \max_i |fr(i) - l(i)|,$$

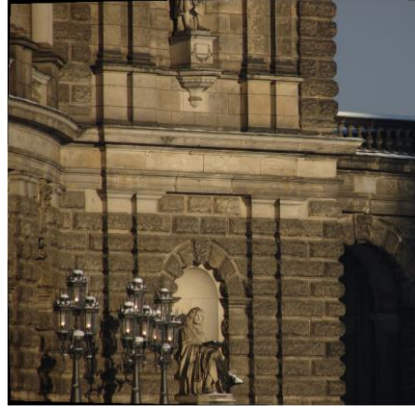
$$P = \left(\sum_{i=1}^n (fr(i) - l(i))^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

где $l(i), i = \overline{1, n}$ – результат дискретизации линейной аппроксимации функции $fr(i)$, которые рассматриваются в качестве показателей нарушения линейности частоты СНВ для ЦИ (кадра ЦВ).

С учетом результатов проведенных экспериментов очевиден вывод о необходимости адаптации СНВ-подхода для случая, когда экспертиза ЦИ осуществляется поблоково.

Рассмотрим зависимость всей совокупности частоты СНВ от их номера для всех блоков ЦИ одновременно. Здесь в силу возрастания количества данных проявление линейности частоты СНВ является ожидаемым и ярко проявляется в изменениях мод гистограмм значений частоты конкретных СНВ блоков (рис.4).

Учитывая результаты последнего эксперимента, можно предположить, что свойство линейности частоты СНВ будет явно просматриваться для блоков оригинальных ЦИ при рассмотрении для каждого СНВ его среднего по всем блокам ЦИ значения частоты $\bar{\eta}_s(u_i(B))$, что подтверждается на практике (рис.5(a)), а его отсутствие имеет место для возмущенных ЦИ (рис.5(б-г)).



а

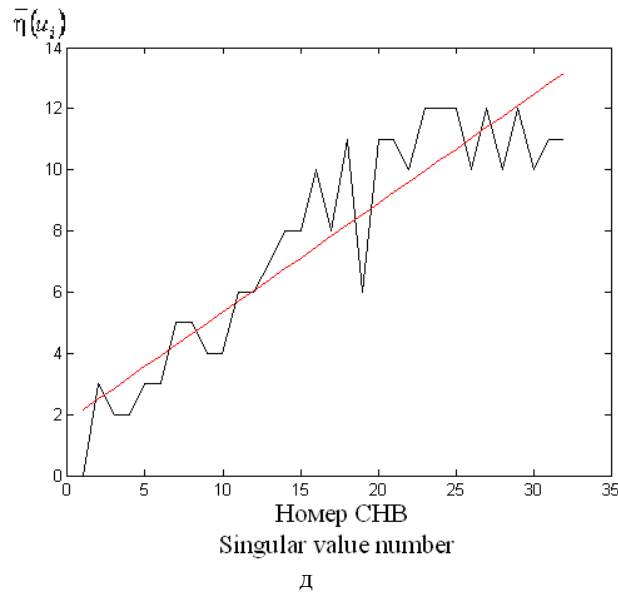
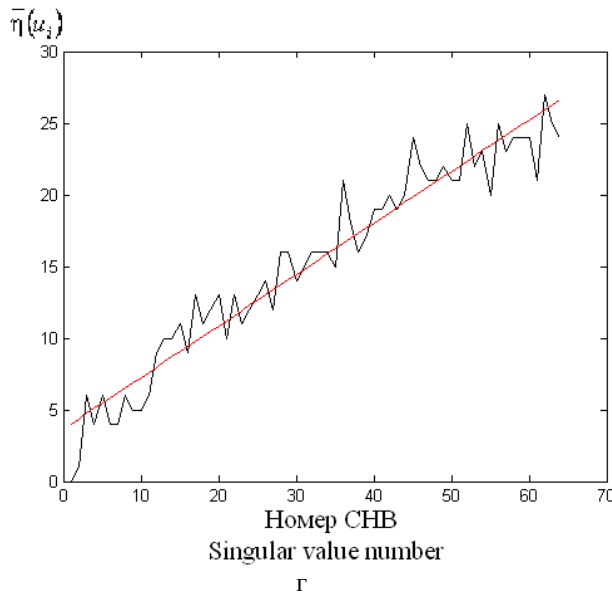
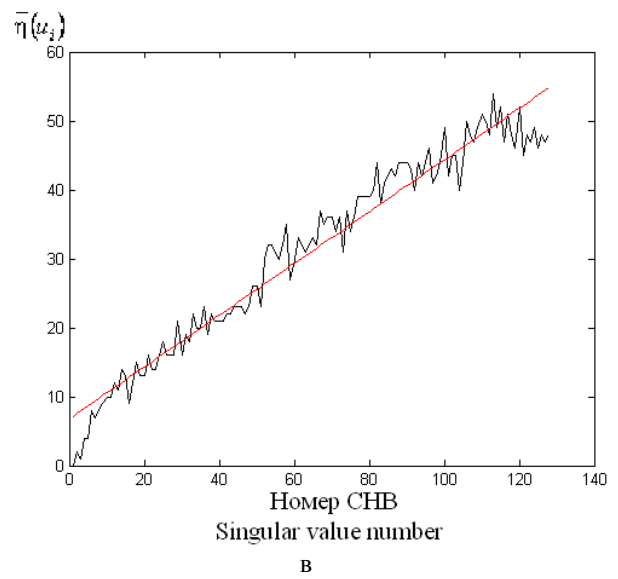
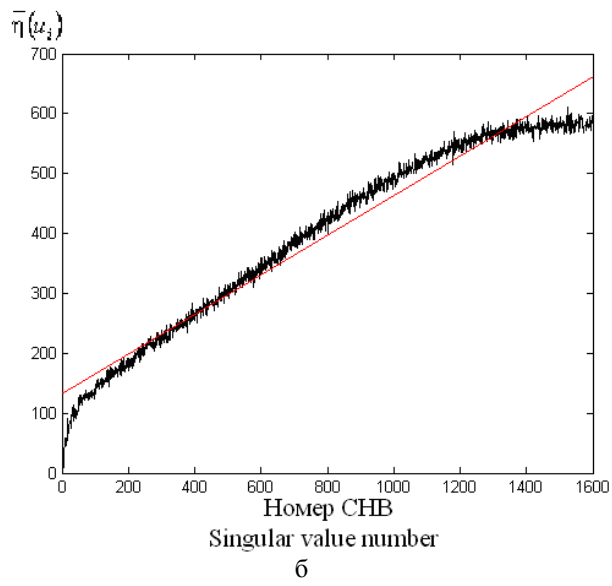


Рис.2. Графики зависимости частоты СНВ от его номера и их линейные аппроксимации для $l \times l$ -подматриц матрицы оригинального ЦИ: а – оригинальное ЦИ; б – $l=1600$; в – $l=124$; г – $l=64$; д – $l=32^2$

² Appendix 1

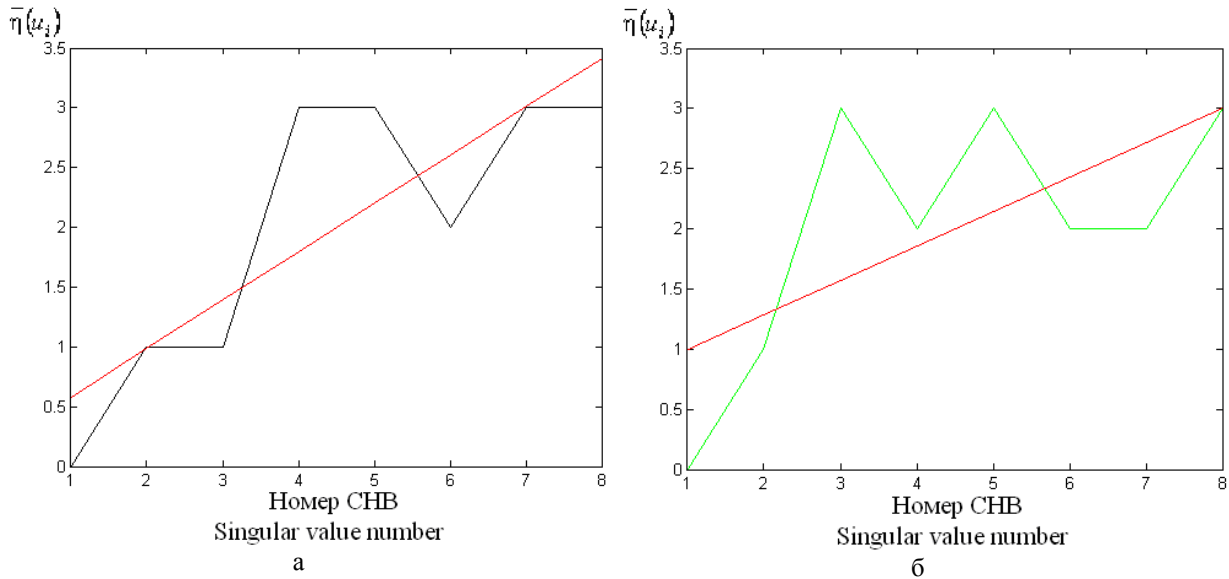


Рис.3. Графики зависимости частоты СНВ от его номера и их линейные аппроксимации для конкретного 8×8-блока конкретного ЦИ: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ после наложения гауссовского шума ($D=0.0001$)³

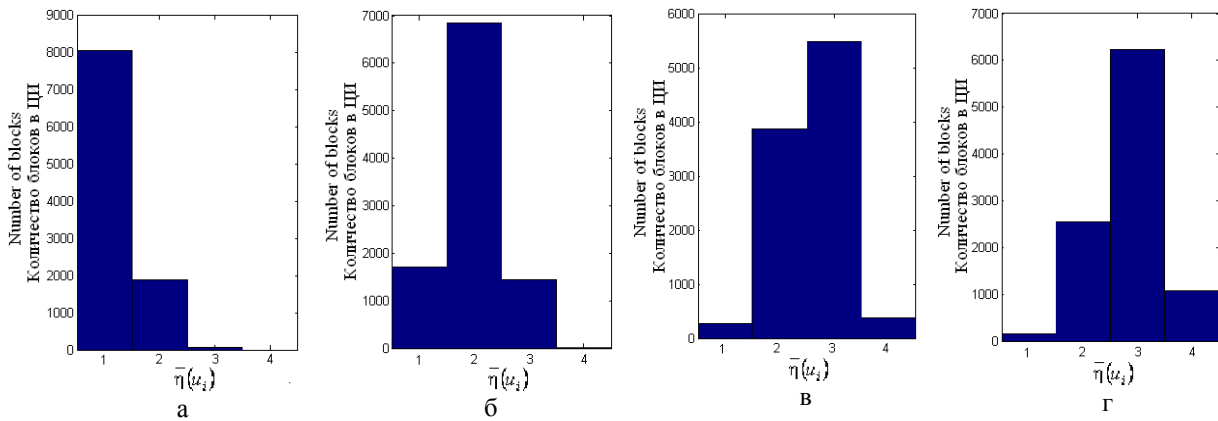


Рис.4. Гистограммы значений частоты для СНВ 8×8-блоков оригинального 800×800-ЦИ: а – для u_2 ; б – для u_4 ; в – для u_6 ; г – для u_8 ⁴

Необходимо установить количественный показатель/показатели нарушения линейности частоты СНВ блоков ЦИ. Ранее авторами было показано, что частота СНВ u_i (v_i) определенным образом отвечает той частотной составляющей контента, информация о которой, главным образом, содержится в сингулярной тройке (σ_i, u_i, v_i) , а именно в матрице ранга 1, имеющей вид $\sigma_i u_i v_i^T$ (2): чем больше частота, максимально представленная в $\sigma_i u_i v_i^T$, тем больше и частота СНВ u_i (v_i). Сингулярные тройки, отвечающие СНВ с наибольшими номерами, несут в себе информацию, главным образом, о высокочастотной составляющей сигнала, а соответствующие СНВ имеют наибольшие частоты. Однако эти же СНВ являются и

наиболее чувствительными к возмущающим воздействиям в соответствии с соотношением [20]:

$$\sin 2\theta_i \leq 2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F),$$

где θ_i – угол поворота СНВ u_i в результате возмущающего воздействия, матричным представлением которого является $n \times n$ -матрица ΔF , $\|\cdot\|_2$ - спектральная матричная норма, $\text{svdgap}(i, F) = \min_{i \neq j} |\sigma_i - \sigma_j|$ -

отделенность СНЧ σ_i , являющаяся мерой чувствительности СНВ к возмущающим воздействиям. С учетом (3) наименьшую отделенность будут иметь СНЧ с наибольшими номерами, следствием чего и является значительная чувствительность соответствующих СНВ, которые могут прореагировать значительным углом

поворота даже на округления, которые присутствуют в любом вычислительном процессе в системе чисел с плавающей точкой. Такая реакция СНВ может вывести

его за пределы того координатного ортанта соответствующего пространства, в котором этот вектор находился первоначально, изменив знаки некоторых его компонент.

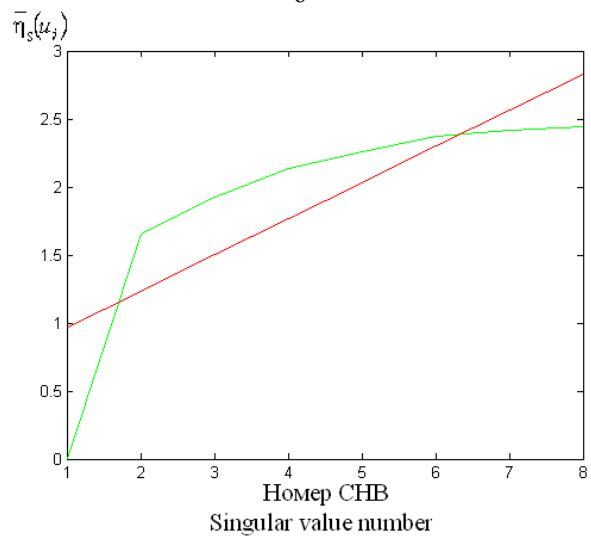
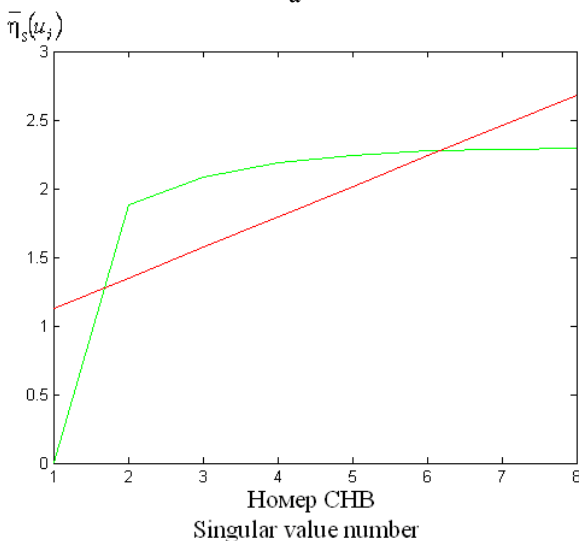
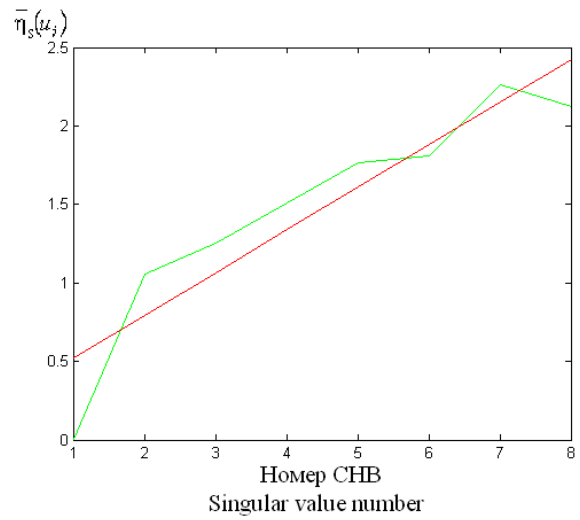
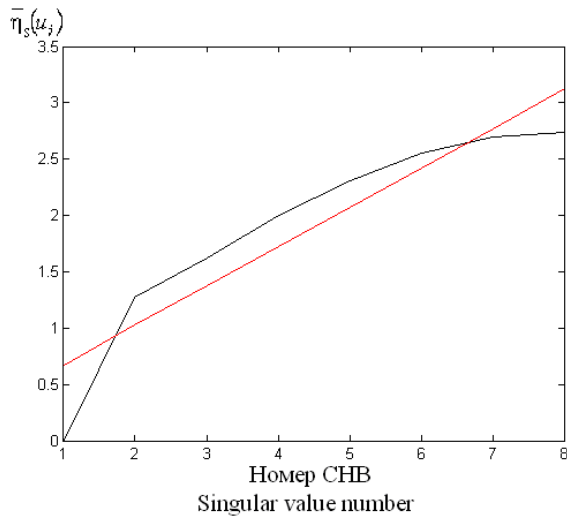


Рис.5. Графики зависимости $\bar{\eta}_s(u_i(B))$ для 8×8 -блоков конкретного ЦИ от его номера: а – оригинальное ЦИ (в формате без потерь); б – ЦИ, подвергшееся сжатию (Jpeg, $QF=75$); в – ЦИ, подвергшееся наложению гауссовского шума ($D=0.0001$); г – ЦИ, подвергшееся наложению мультипликативного шума ($D=0.0001$)⁵

Блоки, которые рассматриваются при блоковой обработке ЦИ на практике, как правило, имеют размер $l = 2^k$, где k – натуральное число. Максимальная частота СНВ блока при таком размере не может превышать 2^{k-1} (случай изменения знака при переходе от каждой компоненты вектора к последующей). Так максимальная частота СНВ в 8×8 -блоках не может быть больше 4. Именно для последних СНВ в большинстве блоков оригинального ЦИ и будет наблюдаться максимальная (близкая к

максимальной) частотность (см. пример рис.4). Однако в силу их большой чувствительности к возмущающим воздействиям эти воздействия, с учетом вышесказанного, с большой вероятностью приведут к изменению их частотности вместе с изменением знаков компонент, а поскольку у большинства СНВ с наибольшими номерами она максимальная (близкая к максимальной) из принципиально возможных значений, то возмущающие воздействия приведут к неувеличению/уменьшению частотности для

⁵ Appendix 1

таких векторов (рис. 6 (рассматривается возмущение ЦИ, информация о котором представлена на рис. 4)), которое подтверждают также результаты вычислительного эксперимента, представленные в табл. 1.

Здесь и ниже при проведении вычислительного эксперимента задействуются следующие множества ЦИ:

- M_1 - оригинальные ЦИ в формате без потерь, из которых 400 ЦИ из баз [21,22], 200 ЦИ, полученных непрофессиональными видеокамерами, $|M_1| = 600$;
- M_2 - ЦИ, целостность которых нарушена. Множество M_2 сформировано из изображений, принадлежащих M_1 , путем

применения различных возмущающих воздействий: наложения гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и $D \in \{0.00001, 0.0001, 0.001\}$; мультипликативного шума ($D \in \{0.001, 0.01\}$); шума «соль-перец» ($d \in \{0.02, 0.05\}$); сжатия с потерями (алгоритм Jpeg с наиболее распространенным коэффициентом качества $QF=75$); стеганопреобразования при помощи метода модификации наименьшего значащего бита (LSB-метод) с различными значениями пропускной способности скрытого канала связи (ПССК) (ПССК=1, 0.75, 0.5 бит/пиксель); $|M_2| = 6120$.

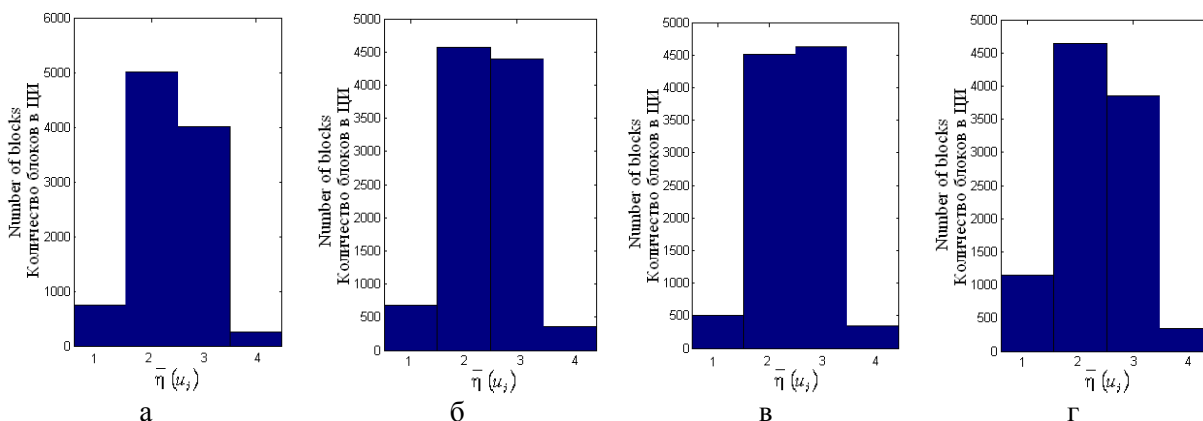


Рис.6. Гистограммы значений частоты для 8-го СНВ 8×8-блоков возмущенного 800×800-ЦИ: а – наложением гауссовского шума ($D=0.0001$); б – наложением мультипликативного шума ($D=0.001$); в – наложением шума «соль-перец» ($d=0.05$); г – сжатием с потерями (Jpeg, $QF=75$)⁶

Большое внимание, которое уделяется в работе возмущающим воздействиям-шумам обусловлено тем, что результат любого возмущения принципиально может рассматриваться как наложение некоторого шума [23,24], кроме того шум часто используется для маскировки локальных нарушений целостности ЦИ (клонирование, фотомонтаж и др.).

Полученные результаты для характера изменения частоты СНВ блоков с наибольшими номерами с учетом того, что частота первого СНВ u_1 во всех блоках всегда равна 0, поскольку все компоненты u_1 положительны, а сам вектор близок к n -оптимальному вектору (1) [6], приводят к следующему выводу: скорость роста

линейной аппроксимации функции $fr(i), i = \overline{1, l}$ для средних по блокам значений частот СНВ будет больше для оригинального контента, чем для того, целостность которого нарушена, что полностью подтверждается результатами вычислительного эксперимента (табл.2).

Необходимо отметить, что отличие как среднего по эксперименту значения среднего по блокам ЦИ значения частоты СНВ блока с наибольшим номером, так и среднего значения углового коэффициента линейной аппроксимации функции $fr(i)$ зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера для полученных блоков, для оригинального и неоригинального контентов будет увеличиваться с ростом силы

⁶ Appendix 1

применяемого возмущающего воздействия (табл. 1, 2 – уменьшение рассматриваемых параметров с увеличением параметров шумов, увеличением ПССК при стеганопреобразовании), что может быть впоследствии использовано для оценки величины возмущающего воздействия, примененного к ЦИ.

С учетом полученных результатов основные шаги предлагаемого универсального метода выявления нарушения целостности ЦИ следующие.

Шаг 1. Матрицу F ЦИ разбить стандартным образом на $l \times l$ -блоки, произвольный из которых – B .

Шаг 2. Для каждого блока B :

2.1. Построить нормальное сингулярное разложение (2): $B = U_B \Sigma_B V_B^T$, определить левые СНВ блока - $u_1(B), u_2(B), \dots, u_l(B)$;

2.2. Для каждого СНВ $u_i(B), u_2(B), \dots, u_l(B)$ определить частоту $\bar{\eta}(u_i(B)), i = \overline{1, l}$ в соответствии с (4).

Шаг 3. Построить гистограмму $\Gamma_{\bar{\eta}}$ значений частоты СНВ $u_i(B)$ блоков ЦИ. Определить $\text{mod}(\Gamma_{\bar{\eta}})$ - моду $\Gamma_{\bar{\eta}}$.

Шаг 4. Если

$$\text{mod}(\Gamma_{\bar{\eta}}) < \frac{l}{2} - 1$$

то целостность ЦИ нарушена, переход на шаг 10.

Шаг 5. Определить $\bar{\eta}_s(u_i(B)), i = \overline{1, l}$, - средние по блокам ЦИ значения частот $u_i(B)$ СНВ.

Шаг 6. Если

$$\bar{\eta}_s(u_i(B)) > C,$$

где C – пороговое значение, устанавливаемое экспериментально, то целостность ЦИ не нарушена, переход на шаг 10.

Шаг 7. Построить функцию $fr(i), i = \overline{1, l}$, зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ $\bar{\eta}_s(u_i(B))$ от его номера.

Шаг 8. Определить угловой коэффициент α для линейной аппроксимации функции $fr(i), i = \overline{1, l}$, полученной на предыдущем шаге.

Шаг 9. Если

$$\alpha \geq P,$$

где P – пороговое значение, устанавливаемое экспериментально, то целостность ЦИ не нарушена, иначе ЦИ претерпело нарушение целостности.

Шаг 10. Окончание экспертизы целостности ЦИ.

Алгоритмическая реализация метода была проведена для $l=8$. Для определения параметров C, P был проведен вычислительный эксперимент, условия которого соответствуют описанным выше. Для матрицы каждого из ЦИ множеств M_1, M_2 строилось предварительное разбиение на 8×8 -блоки, после чего для каждого блока находились частоты всех, в том числе и последнего, СНВ, полученных путем нормального сингулярного разложения матрицы блока; для каждого ЦИ строилась функция $fr(i), i = \overline{1, l}$, зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера, для линейной аппроксимации которой определялся угловой коэффициент α ; а также определялось среднее значение $\bar{\eta}_s(u_i(B))$ частоты u_i по всем блокам. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 7, 8.

В результате вычислительного эксперимента, где основное внимание уделялось ошибкам 1-го рода, пороговые значения для алгоритмической реализации разработанного метода определились как: $C=2.28; P=0.35$.

При тестировании алгоритмической реализации на ЦИ из множества $M_1 \cup M_2$ были получены следующие оценки эффективности: ошибки 1-го рода – 3.9%, ошибки 2-го рода – 4.2%. Сравнительный анализ эффективности с методом, предложенным в [6], показал уменьшение ошибок 1-го рода практически на 2%, ошибки 2-го рода сравнимы по значению. Заметим, что возмущающие воздействия, в условиях которых происходило формирование множества M_2 , включают очень незначительные по силе, в условиях некоторых из них метод из [6] вообще не тестировался, как, например, наложение гауссовского шума с $D=0.00001$, мультипликативного с $D=0.001$,

стеганопреобразование методом выявления результатов этих воздействий не модификации наименьшего значащего бита с ПССК = 0.5 бит/пиксель, при этом снижается, что свидетельствует в его пользу эффективность разработанного метода по сравнению с аналогом.

Таблица 1⁷.

Среднее по эксперименту значение среднего по блокам ЦИ значения частоты восьмого СНВ блока для 8×8-блоков⁸.

Оригинальное ЦИ Original image	ЦИ, целостность которого нарушена в результате возмущающего воздействия The digital image whose integrity is compromised as a result of disturbance									
	Гауссовский шум Gaussian noise			Мультипликативный шум Multiplicative noise		Шум «соль-перец» «Salt & pepper» noise		Стеганопреобразование методом LSB Steganotransformation using LSB-method		Сжатие с потерями Jpeg (QF=75) Lossy compression
	D=0.00001	D=0.0001	D=0.001	D=0.001	D=0.01	d=0.02	d=0.05	ПССК 1 bpp	ПССК 0.5 bpp	
2.7342	2.5069	2.3134	2.2204	2.4146	2.2834	2.5837	2.4319	2.4724	2.5463	2.0829

Таблица 2⁹.

Среднее значение углового коэффициента линейной аппроксимации функции $fr(i)$ зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера для 8×8-блоков¹⁰.

Оригинальное ЦИ Original image	ЦИ, целостность которого нарушена в результате возмущающего воздействия The digital image whose integrity is compromised as a result of disturbance										
	Гауссовский шум Gaussian noise			Мультипликативный шум Multiplicative noise		Шум «соль-перец» «Salt & pepper» noise		Стеганопреобразование методом LSB Steganotransformation using LSB-method		Сжатие с потерями Jpeg (QF=75) Lossy compression	
	D=0.00001	D=0.0001	D=0.001	D=0.001	D=0.01	d=0.02	d=0.05	ПССК 1 bpp	ПССК 0.75 bpp		ПССК 0.5 bpp
0.3526	0.2962	0.2312	0.1975	0.2682	0.2240	0.3273	0.2832	0.2820	0.2960	0.3046	0.2535

^{7,8,9,10}Appendix 1

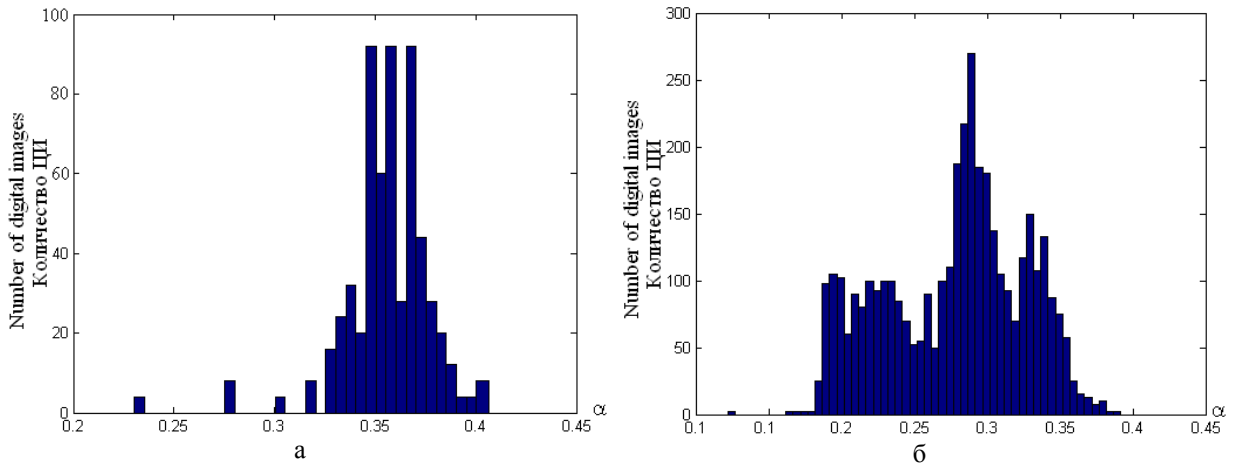


Рис.7. Гистограммы значений угловых коэффициентов α линейных аппроксимаций для функции $fr(i)$ зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера, полученных для ЦИ: а – из множества M_1 ; б – из множества M_2 ¹¹

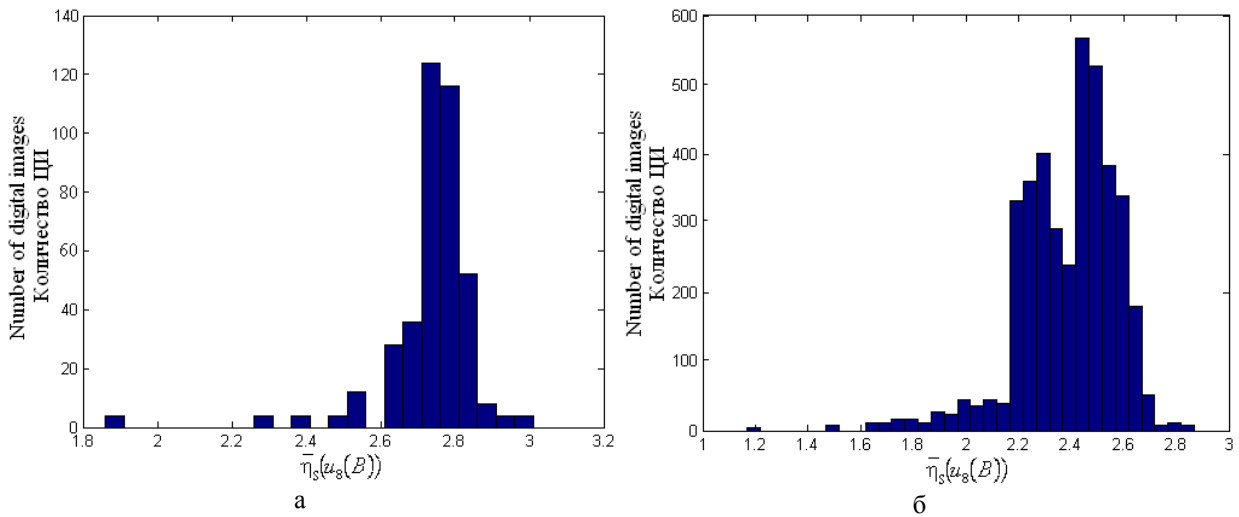


Рис.8. Гистограммы средних по блокам ЦИ значений частоты $u_8(B)$: а – для ЦИ из множества M_1 ; б – из множества M_2 ¹².

Вычислительная сложность предложенного метода в силу его блоковой организации определяется как $O(n^2)$ операций для $n \times n$ -матрицы ЦИ.

С учетом того, что формально ЦВ может рассматриваться как последовательность ЦИ-кадров, разработанный метод может использоваться для экспертизы целостности ЦВ.

ВЫВОДЫ

В работе решена важная научно-практическая задача повышение эффективности выявления факта нарушения целостности ЦИ путем разработки универсального экспертного метода на основе СНВ-подхода.

Разработанный метод, являясь блоковым, имеет незначительную вычислительную сложность – $O(n^2)$ операций для $n \times n$ -матрицы ЦИ, что делает его перспективным для работы с цифровыми контентом, в частности с ЦВ, в режиме реального времени.

В ходе разработки метода:

- проведена адаптация СНВ-подхода для обеспечения эффективности его использования в случае блоковой организации экспертизы ЦИ;
- установлено, что частота СНВ, отвечающих наименьшим СНЧ $l \times l$ -блоков матрицы ЦИ, является характеристикой, чувствительной к возмущающим воздействиям. Для оригинальных ЦИ среднее значение частоты СНВ $u_l(B)$ значитель-

но превосходит этот параметр для ЦИ, целостность которого нарушена, причем отличие возрастает с ростом силы возмущающего воздействия. Учет данного свойства при разработке метода позволил значительно уменьшить количество ошибок 2-го рода при экспертизе по сравнению с вариантом, где это свойство учтено не было;

- установлено, что скорость роста линейной аппроксимации функции $fr(i), i = \overline{1, l}$, отражающей зависимость средних по блокам значений частот СНВ от номера вектора, будет больше для оригинального контента, чем для того, целостность которого нарушена, причем, как и для частоты СНВ, отвечающих наименьшим СНЧ $l \times l$ -блоков, это отличие возрастает с ростом силы возмущающего воздействия, что может быть впоследствии использовано для оценки его величины. Данное свойство позволило в разработанном методе эффективно использовать количественную характеристику линейной аппроксимирующей функции для $fr(i)$ - угловой коэффициент для отделения оригинального ЦИ от такого, целостность которого нарушена.

Разработанная алгоритмическая реализация предложенного экспертного метода позволила повысить эффективность выявления нарушения целостности ЦИ путем снижения ошибок 1-го рода на 2% по сравнению с аналогом, при этом ошибки 2-го рода остались на том же уровне. Универсальность метода подтверждается его высокой эффективностью независимо от специфики возмущающего воздействия, в том числе и в условиях незначительных возмущений.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number for the original lossy digital image and linear approximating function

²**Fig. 2.** The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number and linear approximating function for $l \times l$ -submatrix of original digital image: a – original digital image, b – $l=1600$, c – $l=124$, d – $l=64$, e – $l=32$

³**Fig. 3.** The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number and linear approximating function for 8×8 -block of digital

image: a – original digital image, b – digital image after applying Gaussian noise ($D=0.0001$)

⁴**Fig. 4.** Histograms of the frequency indexes' values for singular vectors of 8×8 -blocks of original 800×800 digital images: a – u_2 , b – u_4 , c – u_6 ; d – u_8

⁵**Fig. 5.** The dependences $\bar{\eta}_s(u_i(B))$ of blocks of original digital images on its number: a – original lossless digital image, b – digital image under compression (Jpeg, QF=75), c – digital image after applying Gaussian noise ($D=0.0001$), d – digital image after applying multiplicative noise ($D=0.0001$)

⁶**Fig. 6.** Histograms of the frequency indexes' values for 8th singular vector of disturbed 800×800 digital image: a – after applying Gaussian noise ($D=0.0001$), b – after applying multiplicative noise ($D=0.001$), c – after salt-and-pepper noise ($D=0.05$), d – after lossy compression (Jpeg, QF=75)

^{7,8}**Table 1.** The experimental average value of the average value over digital image blocks of the frequency index's value of the eighth singular vector of a block for 8×8 blocks

^{9,10}**Table 2.** The average value of the angular coefficient of the linear approximation of the dependence of the block-average value of the frequency index of singular vector on its number for 8×8 blocks

¹¹**Fig. 7.** Histograms of angular coefficients values α of linear approximation for $fr(i)$ function of the dependence of the block-average value of the frequency index of singular vector on its number: a – for digital images from M_1 , b – for digital images from M_2

¹²**Fig. 8.** Histograms of average frequency index's values over digital image blocks $u_8(B)$: a – for digital images from M_1 , b – for digital images from M_2

Литература (References)

- [1] Rai A., Singh A.S., Kumar A.S. A Review of Information Security: Issues and Techniques. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2020, vol. 8, no. 5, pp. 953–960
- [2] Alqahtani F.H. Developing an Information Security Policy: A Case Study Approach. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 124, pp. 691–697
- [3] Korus P. Digital image integrity – a survey of protection and verification techniques. *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 71, pp. 1–26
- [4] Thakur, T., Singh, K., Yadav, A. Blind approach for digital image forgery detection. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 179, no. 10, pp. 34–42
- [5] Shwetha B., Sathyanarayana S.V. Digital image forgery detection techniques: a survey. *AC-*

- CENTS Transactions on Information Security*, 2017, vol. 2(5), pp. 22–31
- [6] Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis. *Transport and Telecommunication Journal*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 128–137.
- [7] Zorilo V.V., Petruk K.O., Lebedieva O.Yu. Vyyavlenyaya multiplykatyvnoho shumy v tsifrovyykh zobrazhennykh v umovakh zberezhennya z vtratamy [Detection of multiplicative noise in digital images under lossy storage conditions]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 13, no. 1-2, pp. 87-96. (in Ukrainian).;
- [8] Li H., Luo W., Qiu X., Huang J. Image forgery localization via integrating tampering possibility maps. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1240–1252.
- [9] Khan S., Khan K., Ali F., Kwak K.-S. Forgery detection and localization of modifications at the pixel level. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 1, 137.
- [10] Chu X., Li H. A survey of blind forensics techniques for jpeg image tampering. *Journal of Computer and Communications*, 2019, vol. 7, no. 10, pp. 1–13.
- [11] Fridrich J., Goljan M. Practical steganalysis of digital images-state of the art. *SPIE International Symposium on Electronic Imaging 2002, Security and Watermarking of Multimedia Contents IV*, vol. 4675. Bellingham, 2002. P. 1–13.
- [12] Mandal P.C., Mukherjee I., Paul G., Chatterji B.N. Digital image steganography: A literature survey. *Information Sciences*, 2022, vol. 609, pp. 1451–1488.
- [13] Fridrich J., Goljan M., Du R. Steganalysis based on JPEG compatibility. Proceedings Volume 4518, Multimedia Systems and Applications IV. Denver, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.448213> (accessed 23.09.2022).
- [14] Farid H. Detecting Steganographic Message in Digital Images. Report TR2001-412, Dartmouth College, Hanover, NH, 2001.
- [15] T. H. Manjula Devi T.H. et al. Extracting hidden image using histogram, DFT and SVM. In Proceedings of the 2nd Bangalore Annual Compute Conference (COMPUTE '09). Association for Computing Machinery, New York, 2009. Article 26, 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1145/1517303.1517331> (accessed 23.09.2022)
- [16] Yan Y., Li L., Zhang Q. Universal steganalysis method based on multi-domain features. *J. of Information & Comp. Sci.*, 2013, pp. 2177–2185.
- [17] Natarajan V., Anitha R. Blind image steganalysis based on contourlet transform. *Int. J. on Cryptography and Information Security*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 77–87.
- [18] Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 4th Ed. Pearson, 2018. 1019 p.
- [19] Bergman C., Davidson J. Unitary embedding for data hiding with the SVD. Available at: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/bb2b5041-1c92-4ff5-b7f4-ff73c3483eed> (accessed 23.09.2022)
- [20] Demmel J. *Applied Numerical Linear Algebra*. SIAM, 1997. 430 p.
- [21] NRCS Photo Gallery. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/newsroom/multimedia/> (accessed 23.09.2022).
- [22] Gloe T., Böhme R. The “Dresden Image Database” for benchmarking digital image forensics. *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC '10)*. New York, 2010, pp. 1585–1591
- [23] Srinivas R., Panda S. Performance analysis of various filters for image noise removal in different noise environment. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 47–52.
- [24] Srivastava C., Mishra S.K., Asthana P. Performance Comparison of Various Filters and Wavelet Transform for Image De-Noising. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 2013, 10, pp. 55-63.

Сведения об авторах.



Бобок Иван Игоревич – д.т.н., доц., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ, социальная инженерия.
E-mail: onu_metal@ukr.net



Кобозева Алла Анатольевна – д.т.н., проф., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ.
Email: alla_kobozeva@ukr.net

The Influence of Previous Treatment of Wheat Straw from Bales on the Intensity of Biogas Outlet

Zablodskiy M.¹, Klendiy P.², Shvorov S.¹, Trokhaniak V.¹, Dudar O.³

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

² Separated subdivision "Berezhany Agrotechnical Institute" National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Berezhany, Ukraine

³ Separated structural subdivision "Berezhany professional college of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine"
Berezhany, Ukraine

Abstract. The purpose of the research is the experimental determination of the effect of preliminary mechanical and additional magnetic treatment of wheat straw from bales on the intensity of biogas output. This goal is achieved by solving the following problems: determining the physical-chemical properties and component composition of winter wheat straw from packs; obtaining chopped straw by grinding on a laboratory grinder to a fraction of 5–25 mm in length; processing soaked straw in water in an extruder to form 15 pre-treatment samples; calculation the carbon-nitrogen ratio for mixture of straw of certain pretreatment option and inoculum; determination the specific energy intensity of the extrusion process; conducting fermentation experiments and studies of the biogas output process for 42 days for various options for pre-treatment of winter wheat straw from packs, in particular the option with the simultaneous action of constant magnetic field. The most important results of the research are: experimental proof of the effectiveness of the method of preliminary mechanical-magnetic treatment of winter wheat straw from bales in the production of biogas, which forms a synergetic effect; with a one-time extrusion of straw and treatment with constant magnetic field of 1.8 mT, the biogas output increases, which makes it possible to obtain the same amount of biogas as with 5-fold extrusion, but with energy costs for extrusion reduced by 4.28 times. At the same time, sufficient productivity of the biogas production process is maintained, the lag phase is reduced, and the biomethane output increases by approximately 5.5%. The significance of the obtained results is that the proposed approach to the formation of biogas technology with using mechanical-magnetic processing of wheat straw ensures the intensification of biogas output and an increase in the level of production.

Keywords: anaerobic fermentation, biogas, wheat straw, magnetic field, energy costs, synergetic effect.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.09>

UDC: 621.37:631.95

Influența tratării anterioare a paielor de grâu din baloți asupra intensității ieșirii biogazului

Zablodski M.¹, Klendi P.², Șvorov S.¹, Trohaniak V.¹, Dudar O.³

¹Universitatea Națională de Științe ale Vieții și Mediului din Ucraina, Kiev,

² Subdiviziune separată „Institutul Agrotehnic Berejani” Universitatea Națională de Științe ale Vieții și Mediului din Ucraina, Berejani

³ Subdiviziune structurală separată „Colegiul profesional Berejani al Universității Naționale de Științe ale Vieții și Mediului din Ucraina” Berejani

Rezumat. Scopul cercetării este determinarea experimentală a efectului tratamentului mecanic preliminar și magnetic suplimentar al paielor de grâu din baloți asupra intensității producției de biogaz. Acest scop se realizează prin rezolvarea următoarelor probleme: determinarea proprietăților fizico-chimice și a compoziției componentelor paielor de grâu de iarnă din baloți; obținerea paielor tocate prin măcinarea pe o râșniță de laborator până la o fracțiune de 5–25 mm lungime; prelucrarea paielor înmuiate în apă într-un extruder pentru a forma 15 probe de pretratare; calculul raportului carbon-azot pentru amestecul de paie cu anumite opțiuni de pretratare și inocul; determinarea intensității energetice specifice procesului de extrudare; efectuarea de experimente de fermentație și studii ale procesului de ieșire a biogazului timp de 42 de zile pentru diverse opțiuni de pretratare a grâului de toamnă din pachete, în special opțiunea cu acțiunea simultană a câmpului magnetic constant de paie. Cele mai semnificative rezultate ale cercetării sunt: dovada experimentală a eficacității metodei de tratare preliminară mecanico-magnetică a paielor de grâu de iarnă din baloți în producerea de biogaz, care formează un efect sinergic; cu o extrudare unică a paielor și tratament cu câmp magnetic constant de 1.8 mT, producția de biogaz crește, ceea ce face posibilă obținerea aceleiași cantități de biogaz ca la extrudarea de 5 ori, dar cu costurile energetice pentru extrudare reduse cu 4.28 ori. În același timp, se menține o

productivitate suficientă a procesului de producere a biogazului, faza de întârziere este redusă, iar producția de biometan crește cu aproximativ 5.5%. Semnificația rezultatelor obținute este că abordarea propusă pentru formarea tehnologiei biogazului cu utilizarea prelucrării mecanico-magnetice a paielor de grâu asigură intensificarea producției de biogaz și creșterea nivelului de producție.

Cuvinte-cheie: fermentație anaerobă, biogaz, paie de grâu, câmp magnetic, costuri energetice, efect sinergetic.

Влияние предыдущей обработки пшеничной соломы из тюков на интенсивность выхода биогаза
Заблудский Н.¹, Клендий П.², Шворов С.¹, Троханяк В.¹, Дудар О.³

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

²Отделенное подразделение «Бережанский агротехнический институт» Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Бережаны, Украина,

³Отделенное структурное подразделение «Бережанский профессиональный колледж Национального университета биоресурсов и природопользования Украины», Бережаны, Украина.

Аннотація. Целью исследований является экспериментальное определение влияния предварительной механической и дополнительной магнитной обработки пшеничной соломы из тюков на интенсивность выхода биогаза. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач: определение физико-химических свойств и компонентного состава соломы озимой пшеницы из паков; получение соломы-сечки при измельчении на лабораторном измельчителе до фракции длиной 5–25 мм; обработка замоченной в воде соломы в экструдере с формированием 15 образцов предварительной обработки; расчет углеродно-азотного соотношения для смеси соломы определенного варианта предварительной обработки и инокулята; определение удельной энергоемкости процесса экструзии; проведение опытов ферментации и исследований процесса выхода биогаза в течение 42 суток для различных вариантов предварительной обработки соломы озимой пшеницы из паков, в частности варианта с одновременным действием постоянного магнитного поля. Наиболее существенными результатами исследований являются: экспериментальное доказательство эффективности способа предварительной механо-магнитной обработки соломы озимой пшеницы из тюков при производстве биогаза, формирующего синергетический эффект; при одноразовой экструзии соломы и обработке постоянным магнитным полем 1.8 мТл увеличивается выход биогаза, что позволяет получить то же количество биогаза, что и при 5-кратной экструзии, но с уменьшенными в 4,28 раза затратами энергии на экструзию. При этом сохраняется достаточная производительность процесса производства биогаза, сокращается лаг-фаза, а выход биометана увеличивается примерно на 5.5%. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный подход к формированию биогазовой технология с использованием механо-магнитной обработки пшеничной соломы обеспечивает интенсификации выхода биогаза и повышение уровня производства.

Ключевые слова: анаэробная ферментация, биогaz, пшеничная солома, магнитное поле, энергозатраты, синергетический эффект.

INTRODUCTION

Wheat straw is one of the most spread vegetative remains, that are produced in the world. Anaerobic fermentation, that is used during the work with wheat straw, is an attractive practice, with the help of which are fixed the issues as energy recuperation, so as control environmental pollution. Biogas technology can secure link between livestock-raising and plant growing, playing an important role in self-sufficient eco-agriculture [5]. Previous treatment is one of the most important stages in the general conversion of biomass, as it directly influence on the economic efficiency of vegetative material processing in a whole. The main aim of previous treatment is increasing the accessibility of cellulose for microbial decomposition by means of destruction the connections of the lignocellulosic complex,

removing lignin and hemicelluloses, reducing the crystallinity of cellulose and increasing the porosity of the material [14, 21]. Different types of physical processes, such as grinding, milling, ultrasound and irradiation can be used for increasing the bioaccessibility of lignocellulosic materials in the biogas fermenter. Energy costs during physical processing of biomass depends on the final size of parts and degree of reduction in crystallinity of the lignocellulosic material. The size of the materials as a rule is reduced to 10-30 mm after crushing and to 0.2-2 mm after grinding.

Thus, for grinding wheat straw to grain size of 0.8 and 3.2 mm, the energy costs makes respectively 51.6 and 11.4 kWh/t. According to the literature facts, the maximum level of fermentative hydrolysis of wheat straw after durable mechanical grinding (14 h) is 80%,

while the degree of cellulose crystallinity decreases to 13% [9]. The main defect of this method of activation is duration and high energy costs.

The known results of the investigation from the studying of the microbial reaction on straw groups of bacteria that decomposing cellulose in laboratory biogas installations, which work with manure apart or together with straw [18, 20]. Using previous treatment (steam explosion) in four laboratory fermenters at different temperatures, was studying the influence on the structure of the community of bacteria that belong to the phyla Firmicutes and Bacteroidetes and decomposing cellulose. The addition of straw, its previous treatment and work temperature were affecting on the bacteria community, but there were none substantial differences in productivity of installations and outlet of gas. In another investigation was studied, microbial consortium, which consists of bacteria and fungi, which synergistically reveal great capacity to decompose lignocellulose [27]. A method of previous treatment of lignocellulose with using this functional microbial consortium was developed. Increased capacity was found to dissolution into wheat straw and broth which contain amounts of organic materials such as volatile fatty acids and carbohydrates, that can be used for biogas synthesis. Anaerobic fermentation of previous treatment wheat straw showed an increase of total outlet of biogas and methane respectively on 39.24% and 80.34%, and the faster start-up of 20-days production process comparing with the process based on the unwrought system.

However, solid organic substrata, such as energy culture crops, crop remains (including wheat straw) and organic fraction of solid everyday waste, naturally have low content of microelements. This aspect has been underlined by researchers and numbers of investigations have been realized to demonstrate the importance of microelements in anaerobic etching. In the work [26], it has been proved, that iron chloride (FeCl_3) as an addition, added to the thermophilic system of bioreactor with sludge, directly increased production of methane.

Trace of metals are important components of cofactors and enzymes, and their addition to anaerobic bioreactor increases production of methane. Many micro- elements are contained in remains of process extraction of herbs [24]. It was shown that the addition of 10% remains of false ginseng during anaerobic fermentation of

wheat straw of combined production of biogas and methane increased on 28 and 37% compared to production, achieved in the control.

The efficiency of the enzyme in fermentative reactions depends on the inclusion of an external magnetic field or participation in the ion-radical reaction of a partner with presence of magnetic moment - magnetic isotope of chemical element [11]. In experiments in vitro was revealed that magnetic isotope of magnesium ^{25}Mg , as well as zinc ^{67}Zn and calcium ^{43}Ca in 2-4 times accelerated synthesis of ATP. For understanding the principles of functioning of biological membranes is important mechanism of passage of ions in the narrow pores of ion channels. For calculations, usually the channel is represented in aspect of a set of energy barriers and pit, without giving a concrete physical picture of the structural features of the channel. In work [3], was investigated the influence of magnetic fields of extremely low-frequency on transport Ca^{2+} in a biological system which consist of highly purified vesicles of plasma membrane. Two quantum-mechanical theoretical models were tested, which assume that biologically active ions can be connected with the channel protein and influence on state of the opening the channel. In the work [25] is presented the analysis of steady axisymmetric stokes flow of an electroconductive viscous incompressible fluid through a spherical part, covered with a porous husk in the presence of a uniform magnetic field. The theoretical basis of the influence of the magnetic field on the physico-chemical reactions of aqueous solutions of biomass additionally is confirmed by the results of the experiment. Under the influence of the magnetic field, increases the degree of electrolytic dissociation, the speed of chemical reactions, and the degree of readiness of ions to take electrons in our research in 2020 Year .

In the research [1] evaluated the state of fermentation technology of straw for receiving of biogas. The results show that the selection of an adequate process previous treatment is one of the main key factors of the successful receiving of biogas from straw. The analysis of conducted researches shows that is needed further study of the issue of intensification outlet of biogas from the substrate based on cattle manure water (cattle) with the addition to it extruded straw.

The aim of this research is experimental determine of the influence of previous mechanical and additional magnetic treatment of wheat straw from bales on the intensity outlet of

biogas with an assessment of the energy intensity of the previous treatment.

RESEARCH METHODS

The used wheat straw from bales of farm's economy of the Koziv district of the Ternopil region of Ukraine is grayish color with the content of spikes - 11%; content of dry matter (TS) – 93%; content of dry organic matter (ODM) is 89%. Humidity of straw was measured with the help highly precise portable hygrometer straw in bale WILE 27 Olli Control FARMCOMP. The humidity of straw was 16%. As a source of methane bacteria (seeding) was been used fermented too much cattle manure water from the fermenter of biogas installation (BGI) of the University: wCP = 1.7%; pH = 7.7. The laboratory fermenter is the gas-tight packet made of polymeric material with a content of 500 ml. To calculated on amount of biomass was added seeding at the rate of 1 part of the sample to 4 parts of the seeding, displaced the air from the fermenter and soldered hermetically the orifice. To soldered packet was hung up weight, and the packet put into the measuring glass tank. In this way, was determined the initial volume of the researched version. The fermenter was hung up in an incubator where it was kept at temperature of +37.5°C for 42 days. The volume of biogas sample was determined by changing the volume of fermenter in which was the researched biomass. The bit of biomethane corrected for the standard conditions of temperature and pressure in the selected volumes of biogas was determined after 42 days by the way of connecting the outlet orifice of bioreactors to containers, which were filled with lime water (450 ml), through which is passed the formed biogas for gathering carbon dioxide. Chopped straw was received by grinding straw from bales on laboratory's grinder into fractions length is approximately 5–25 mm. The productivity of the laboratory's grinder is 2.2 t/h, the specific energy intensity of the grinding process is 5 kW·h·t⁻¹. For the preparation of extruded wheat straw, was used the aft extruder EGK-200 with the nominal power of electric drive 18.5 kW, voltage 380 V.

In the process of extrusion, straw is exposing to short-term, but very intense mechanical influence. Due to the high temperature of 110–180 °C, pressure in 5.1 MPa and efforts in the working parts of the extruder, occur structural-mechanical and chemical changes of the outlet

raw materials. Due to the sharp pressure with outlet of the heated up mass, occurs an "explosion" (increase in volume) of the product, which makes it more accessible for the influence of enzymes. During extrusion, to the working area was supplied water with certain correlation of straw-water (R_{sw}) for removing burning of raw materials in the places of contact with the working surfaces of extruder.

The specific energy intensity of extrusion process was determined as follows:

$$C_e = \frac{\sqrt{3}IU \cos \varphi}{1000G} \quad (1)$$

where C – is specific energy intensity of extrusion process, kW·h·t⁻¹; I – consumed current, A; U – voltage of electrical network, V; G – mass productivity of the extruder, t·h⁻¹ cosφ – power factor of the electric drive.

Determination of dry matter of DM, organic dry matter of ODM, reaction of medium pH, fractional composition and content of chemical elements was carried out according to appropriate standards and known methods [15]. In table 1 is shown the content of chemical elements of straw from bags.

The main components of straw were determined by standard methods: lignin - by the sulfuric acid method with using 72% sulfuric acid; cellulose - nitrogen-alcohol method; ash - by the method of burning.

In the table 2 is presented the component composition of winter wheat straw. The received results are calculated on the absolutely dry mass of the substance.

The correlation of C/N is an important parameter that should be taken into account during the research. In our case, for samples of wheat straw from bales, the correlation C/N= 81.46.

The determined correlation C/N for cattle manure was 16.1. Depending on the number of stages of straw extrusion, was noted a small increase correlation of C/N to values from 82 to 84.

Each fermenter capaciousness of 515 g contained the substrate in which 20% was sum amount of straw of certain version previous treatment and 80% -was the inoculum.

Table 1

The content of chemical elements in 1 kg of winter wheat straw, g

Nitrogen	Carbon	Phosphorus	Calcium	Iron	Potassium	Magnesium	Manganese	Sodium	Zinc
4.8	391.3	4.5	4.9	0.4	28.1	1.25	0.04	0.1	0.02

Table 2

Component composition of winter wheat straw from bales

Content of the component, % from the mass of absolutely dry straw	Indicator for components			
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Ash
	44.8	31.9	18.4	3.7

The calculation correlation of C/N mixture that is fermented, carried out according to the formula:

$$C/N = \frac{\sum M_n \cdot (C_n(100 - W_n))}{\sum M_n \cdot (N_n(100 - W_n))} \quad (2)$$

where C/N is the carbon-nitrogen correlation for the converted mixture; M_n -mass of the n -th component of the mixture, kg; C_n - is content of total carbon in the n -th component of the mixture, %; N_n -content of total nitrogen in the n -th component of the mixture, %; W_n - is the humidity of the n -th component of the mixture, %.

Extruded straw in all experiments was soaked before extrusion in water for 15 minutes at temperature of +16°C. Separately was conducted research of fermentation of extruded wheat chopped straw from bales (1-time extrusion) with the simultaneous action of permanent magnetic field. The permanent magnetic field is created by a coil with the amount of turns of 80, reeled on an insulating frame made of copper wire with section of 1.5mm and located near the package with the substrate in the thermostat. The necessary level of magnetic field strength (magnetic induction) in the area where is located the fermenter is regulating in the circuit by the laboratory's autotransformer - rectifier.

Each test was repeated by three times for all variants of previous treatment of winter wheat straw from bales.

Thus, the initial correlation of C/N of mixture was 19.6. For a successful flowing anaerobic fermentation process, correlation of C/N in the mixture should be 20...30 [10]. For the growth of the population of microorganisms, the optimal launching value is correlation of C:N:P of 150:5:1 in our research in 2020 Year . When using mixtures with a lower correlation of C/N, are observed significant losses of nitrogen in the form of ammonia, and when are using mixtures with a higher correlation, decrease rates in cellular growth. During the process CO₂, it is consumed much more actively, than nitrogen, and before the end of biofermentation, the given correlation is already in the range of 10 ... 15.

RESEARCH RESULTS

The results of researches the process of outlet of biogas during period of 42 days for various versions for previous treatment of winter wheat straw from bales at temperature of the experiment and without taking into account the dissolved carbon dioxide in substrate are presented in Table 3.

On the Fig. 1 is shown the distribution of parts of extruded straw from bales by fractions. The extruded straw, independently from divisible of extrusion has rather equable distribution parts of straw in the middle fractions (№№. 3, 4, 5). Smaller content of parts from fractions with large size of parts (№№. 1, 2), even smaller - with small sizes (№№. 6, 7).

Table 3

Outlet of biogas during 42 days for different versions of previous treatment of straw

№	Versions of previous treatment of straw	Outlet of biogas, m ³ /t VS					
		7d	14d	21d	28d	35d	42d
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Seeding of methane bacteria from the fermenter of BGI of the institute; WCP=1.7%, pH= 7.7	0	12	16	16	22	22
2	Raw wheat straw from bales 153 x 3.8 (control sample)	68	197	224	229	248	248/168 ¹
3	Wheat chopped straw from bales after shredding 17.5 x 3.3mm ²	95	204	239	262	263	263/178 ¹
4	Fresh wheat chopped straw after shredding 17.5x3.3mm ²	126	236	272	292	295	295/199 ¹
5	Extruded straw from bales (2-times extrusion), 8.6 x 1.4 mm ²	191	318	336	337	337	337/233 ¹
6	Extruded wheat chopped straw from bales (1-time extrusion), 8.4 x 1.4 mm ²	190	284	331	331	331	331/232 ¹
7	Extruded wheat chopped straw from bales (2-times extrusion), 6, Z x 1.4 mm ²	206	328	344	344	344	344/237 ¹
8	Extruded wheat chopped straw from bales (3 times extrusion), 5, Z x 1.4 mm ²	208	330	356	356	356	356/245 ¹
9	Extruded wheat chopped straw from bales (4 times extrusion), 5.2 x 1.4 mm ²	201	320	374	374	374	374/260 ¹
10	Extruded wheat chopped straw from bales (5 times extrusion), 5.0 x 1.4 mm ²	214	335	377	377	387	387/262 ¹
11	Extruded fresh wheat chopped straw (5 times extrusion), 5.0 x 1.4 mm ²	234	355	397	399	425	425/298 ¹
12	Extruded wheat chopped straw from bales (2-times extrusion), water was supplied only during extrusion at +16°C 6.3 x 1.4 mm ²	212	320	355	368	368	368/255 ¹
13	Extruded (5-times extrusion) wheat chopped straw from bales, sifted through sieve with size of closets Zmm 4.5 x 1.2 mm ²	201	295	336	342	350	350/234 ¹
14	Extruded (5-times extrusion) wheat chopped straw from bales, sifted through a sieve with size of closets 2 mm 3.5 x 1.0 mm ²	201	299	360	360	360	360/251 ¹
15	Extruded (5-times extrusion) wheat chopped straw from bags, sifted through a sieve with size of closets 1 mm 2.5 x 1.0 mm ²	196	313	360	360	360	360/248 ¹
16	Extruded (5-times extrusion) wheat chopped straw from bales, sifted through a sieve with size of closets of 0.5 mm; 0.5 x 0.5 mm ²	174	320	342	342	342	342/229 ¹
17	Extruded wheat chopped straw from bales (1-time extrusion), 8.4 x 1.4, irradiation of the substrate in fermenter by the permanent magnetic field of 1.8 mTl	219	329	378	379	380	380/272 ¹

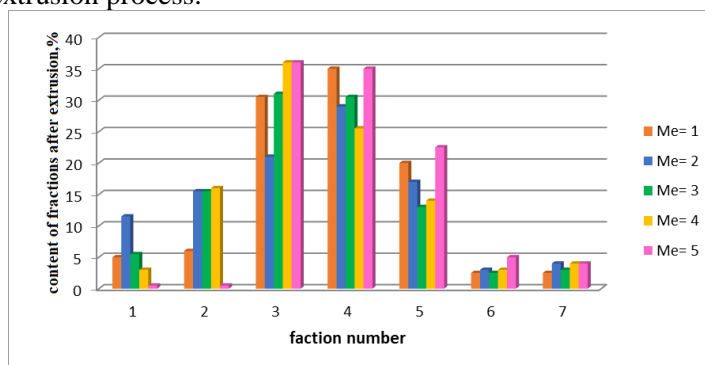
¹ Content of methane in selected volumes of biogas was determined after 42 days.

² Average size of straw's particles

The results of research in the dependence of wheat straw $L_{AV.STV}$, divisible of extrusion M_E , outlet of biogas from the average length parts of

correlation of straw-water (R_{sw}) of raw material during extrusion are presented in the table 4 and on the fig. 2. In the table 4 also brings in an indicators that characterizing power inputs on previous treatment of straw by extrusion, namely: current consumption of electric drive of extruder; duration of extrusion process; specific energy intensity of extrusion process.

When is using straw from bales for extrusion, the average size of parts of straw after 2-times extrusion is 8.6 mm, and when are using chopped straw- 6.3 mm. The outlet of biogas almost did not change (+2%). The current consumption of extruder decreased from 18A to 17A (table 5, Fig. 3).



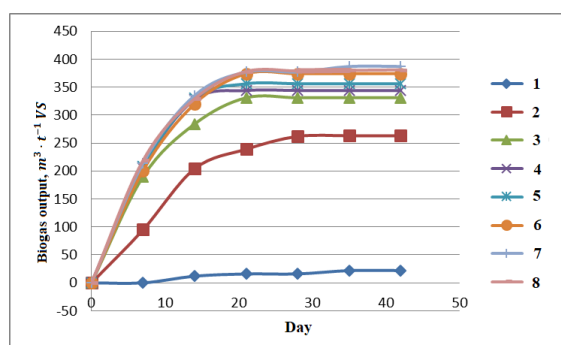
1 - 7 mm x 40 mm, 2 - 5 mm x 25 mm, 3 - 3mm x20mm, 4 - 1 mm x 20 mm, 5 - 0.5 mm, 6- 0.35 mm, 7 - <0.5 mm.

Fig. 1. Distribution parts of straw by fractions.

Table 4

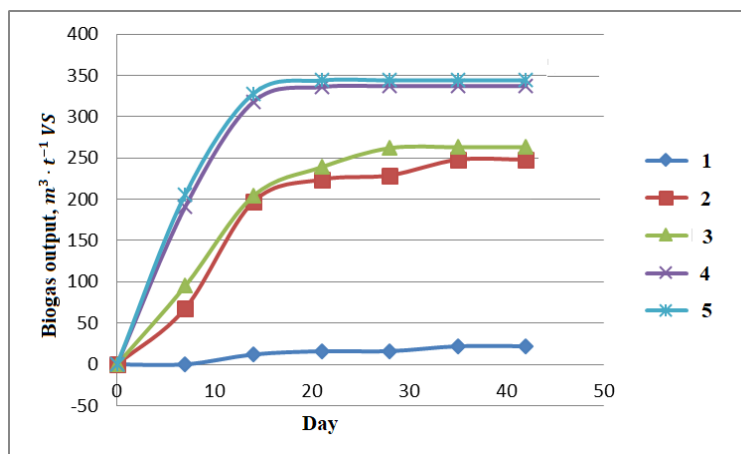
Dependence of outlet of biogas from the divisible of extrusion

№	M_E	R_{sw}	$L_{AV.STV}$, mm		I, A	cosφ	C_e , kW·h/t	G, t ⁻¹	Outlet of biogas, m ³ ·t ⁻¹ VS				
			to extru-sion	after extru-sion					7d	14d	21d	28d	35d
1	–	–	17.5 (5-40)	–	–	-	-	-	95	204	239	262	263
2	1	1:1	17.5	8.4	17.0	0.6	70,6	0,095	190	284	331	331	331
3	2	1:1	17.5	6.3	17.0	0.6	134	0,05	206	328	344	344	344
4	3	1:1.2	17.5	5.3	17.3	0.62	195.9	0,036	208	330	356	356	356
5	4	1:1.5	17.5	5.2	17.2	0.61	246	0,028	201	320	374	374	374
6	5	1:1.75	17.5	5.0	17.1	0.605	309	0,022	214	335	377	377	387



1 - seeding of methane bacteria from fermenter, 2 - wheat chopped straw from bales (17.5 mm), 3 - extruded wheat chopped straw (1-time extrusion, 8.4 mm), 4 - extruded wheat chopped straw (2-times extrusion, 6.3 mm), 5 - extruded wheat chopped straw (3 - times extrusion, 5.3 mm), 6 - extruded wheat chopped straw(4 - times extrusion, 5.2 mm), 7 - extruded wheat chopped straw (5- times extrusion, 5.0 mm), 8 - extruded wheat chopped straw (1-time extrusion, 8.4 mm treated by permanent magnetic field of 1.8 mTl).

Fig. 2. Outlet of biogas by 42 days of fermentation in depending on divisible of extrusion of wheat chopped straw.



1 - seeding of methane bacteria from the fermenter, 2 - wheat straw from bales (153 mm), 3 - wheat chopped straw from bales (17.5 mm), 4 - extruded wheat straw (2-times extrusion, 8.6 mm), 5 - extruded wheat chopped straw (2-times extrusion, 6.3 mm)

Fig. 3. Outlet of biogas by 42 days of fermentation depending on the average length wheat straw from bales before extrusion.

Table 5

Dependence of outlet of biogas on the average length of straw before extrusion

№	M_E	R_{SW}	$L_{AV,STV}$, mm		I, A	$\cos\phi$	C_c kW·h/t	G, t· ⁻¹	Outlet of biogas, m ³ /t VS				
			to extru- sion	after extrusion					7d	14d	21d	28d	35d
1	-	-	153	-	-	-	-	-	68	197	224	229	248
2	2-p	1:1	153	8.6	18.0	0.66	312	0.025	191	318	336	337	337
3	-	-	17.5	-	-	-	-	-	95	204	239	262	263
4	2-p	1:1	17.5	6.3	17.0	0.6	134	0.05	206	328	344	344	344

DISCUSSION

During research №. 10 (Table 3) with extruded wheat chopped straw (5-times extrusion), which was soaked before extrusion in water for 15 minutes at +16°C with sizes of parts of 5.0 mm x 1.4 mm, was got the maximum specific outlet of biogas and biomethane, respectively 387 and 262 m³/t VS. At the same time, in research №16 with analogical conditions of extrusion of straw, but sifted through the sieve with the smaller closet's size (0.5 mm), were got the minimum specific outlet of biogas and biomethane, respectively, 342 and 229 m³/t VS. The result coincides with research of the influence of previous treatment of winter wheat straw that were kept in shelters in ordinary roll bales [7]. The lower sieve selected in this experiment had size of cells 0.5 mm. After sieving, was conducted previous cleaning with hot water. Cumulative production of biomethane was 225 m³/t VS. Dry grinding was chosen as the method of previous treatment because the smaller parts have much larger

surface area per unit mass, and thus, the microorganisms and their enzymes have large contact area to work. However, in our research, was established regularity of decrease of specific outlets of biogas and biomethane even with 5-times extrusion in experiments with the length of straw's parts less than 5 mm. That is, grinding really contributes to the availability of substrate for microbial communities, but exists certain limit of sizes to which should be conducted grinding. For the microbial community is necessary also certain area of carriers for immobilization of microorganisms and creation of colonies.

With decreasing the average length of extruded wheat straw (Table 4) from 8.4 mm to 5.0 mm, the outlet of biogas have increased from 331 m³/t VS to 387 m³/t VS, that is on 17%. Compared to initial chopped straw (control experiment), the average length of straw's parts decreased from 17.5 mm to 5.0 mm, and the outlet of biogas has increased from 263 m³/t VS to 387 m³/t VS, that is on 47%. Attached to length of extruded wheat

straw of 8.4 mm and treatment of substrate with the permanent magnetic field of 1.8 mT (Table 3), the outlet of biogas increased from 331 m³/t VS to 380 m³/t VS, that is on 15%, that allows to receive the same amount of biogas, as attached to the length of extruded straw of 5 mm (Me =5), but with smaller power inputs for mechanical treatment (Table 3-5; Fig. 2, Fig. 3). As shown by the summary curves (Fig. 2, Fig. 3), the speed of methanogenesis process considerable measure was depended on the method of previous treatment. A significant difference was given by the results of researches in which respectively were used wheat straw from bales of durable keeping and fresh straw. Thus, with 5-times extrusion, sizes of parts of straw practically converge, but the outlet of biogas in experiment №. 10 (Table 3) adds up 387 m³/t VS, for methane – 262 m³/t VS, which is lower by about 10% in comparing with the result of experiment. №.11 – biogas 426 m³/t VS, methane - 298 m³/t VS. This is also confirmed in experiments with chopped straw: the outlet of biogas in experiment №. 3 (263 m³/t VS) is lower comparing to the result of experiment №. 4 (295 m³/t VS) on 12%. The difference can be explained by the fact, that deteriorated in store ("gray") straw are washed out the chemical elements and already partly are lost its nutritional properties, since take place partly disintegration of microorganisms by account of additional feeding with nitrogen, which they intercept from the air.

The results of the given research coincide with the results of work [17], in which investigated the bioconversion of lignocellulosic waste (wheat straw) after physical and chemical previous treatment and cattle manure in the process of anaerobic joint fermentation in mesophilic bioreactors of periodical operation. Increases biogas production with increasing of the content volatile matter (VS) in wheat straw and decreasing correlation of inoculum-substrate. (ISR). On the level of total content of solid matter (TS) 3% and correlation of inoculum-substrate (ISR = 1), outlet of biogas and methane were respectively 510 and 307 m³/t VS. Some difference in the productivity of biogas in the work [17] and the given researches caused by 12% difference correlation of inoculum-substrate, and also the chemical previous treatment of wheat straw, which, by the way, complicates the technological process of biogas production. The results of this research on outlet of biomethane also coincide with the

results of work [13], in which investigated the influence of three different methods of previous chemical treatment of wheat straw with using: N-oxide of organic solvent at 120 °C for 3 hours; ethanol as an organic solvent at 180 °C during 1 hour; alkaline treatment with NaOH at 30 °C during 24 hours. The three methods of previous treatment had different influence on the chemical content of straw. Thus, previous alkaline treatment was the most effective for removing the lignin's fraction. The influence of different scales of mechanical fragmentation binding of different concentrations of NaOH on lignocellulosic components and removal of lignin from wheat straw is shown in [8]. The content of lignin rapidly decreased with increasing concentration of NaOH and then reached stable value of about 13% when the concentration of NaOH was higher than 6%. Are known that lignins straw of grass plants are structurally different from lignins of soft or hard wood, and lignins of straw have characteristic solubility in alkalis. The solubility of alkalis is explained by the presence of alkali-labile complicated ethereal links between hydroxycinnamic acids and hemicelluloses (arabinoxylans) in complexes of lignin/phenolic substances-carbohydrates. The action of permanent magnetic field in the process of anaerobic fermentation manifests itself in significant decrease of level of oxidizing-renewable potential and increasing of pH substrate and corresponding increasing of the rate of chemical reactions in our research in 2020 Year . It should also be emphasized the fact that inoculum itself, as component of mixture, also has lignin up to 10% from the mass of dry matter [23]. Assuredly, the concentration and effect of alkaline environment (increasing pH) in the given research were much smaller, but the synergistic effect from increasing the rate of chemical reactions and some dissolution of lignin in substrate was manifested.

It is interesting to compare the results (Table 3) with the results achieved in [5, 16, 19, 22], which demonstrate the synergistic effect in fermentation of mixture of waste and, accordingly, the possibility of adding to wheat straw various nutritional remnants. In work [5], mixture of cow's hem waste with blood (SB), various nutritional remnants (VC) with content of straw (37.5%), foods for animals (37.5%), and waste of fruits and vegetables 12 (25 %). The outlet of biomethane of 452 m³/t VS indicates on the achievement of the synergistic effect even

with low launching value of correlation $C/N=11.8$. In work [16], were used mechanically previous treated lignocellulosic remnants (wheat and rice straw, pulp and wheat straw, bagasse and rice straw, pulp, wheat and rice straw) in anaerobic bioreactors of periodical mode under mesophilic mode. The synergistic effect formed maximum value of $339 \text{ NmLCH}_4/\text{gVS}$ and stable production of biomethane at correlation of substrate to inoculum (S/I) of 1.5 by the way of joint decompose of wheat and rice straw. At the same time, the lowest outlet of biomethane of $15.74 \text{ NmLCH}_4/\text{gVS}$ was observed for mixture of bagasse and rice straw at correlation of substrates to inoculum of 2.5. Besides, all studied mixtures had demonstrated significant by duration (up to 20 days), lag-phase which was not observed in this research (Fig. 2, Fig. 3). Strategies for biological previous treatment of lignocellulosic resources of second-generation for increasing of biogas production are demonstrated in works [19, 22]. However, strategies of chemical and physical previous treatment demonstrate natural defects, including the formation of inhibitory products, biological previous treatment, more often propagandize as ecologically pure process with low energy consumption, low outlays on utilization, and milder conditions of exploitation. *Polyporus brumalis* BRFM985 was cultivated on wheat straw to investigate the simultaneous influence of previous treatment parameters on anaerobic fermentation, including initial moisture of substrate, temperature, duration, and adding of metal. For quantitative judge importance of each parameter and also synergistic effect between them was used methodology reaction of surface. First of all, the addition of metal and secondly, the duration of previous treatment led to the positive influence. Nevertheless, the promising potential of methods of biological previous treatment has not been fully realized yet, and the highest achieved production of methane $182 \text{ m}^3/\text{t TS}$ during 20 days that is rather low result in comparison with the given research (Fig. 2, Fig. 3).

In this work, it is possible to compare the anaerobic joint fermentation of cattle manure with crushed wheat straw with the results of research [23], in which, with an average length of parts of wheat straw, crushed straw of 20 mm, the outlet of methane on 42 day was $250 \text{ m}^3/\text{t VS}$. which exceeds the result of experiments №.3 and №.4 (Table 3). But this is explained by the fact that the research [23] was carried out in

laboratory's reactors in thermophilic mode (50°C).

At the same time, the results of this research significantly exceed the results of experiments [18, 20] that were carried out in laboratory's reactors (5 l) that worked with organic loading of raw straw or straw subjected to steam explosion, during (joint processing) joint digestion with cattle manure. Processes over 25 days at operating temperatures of 37, 44, or 52°C showed stable productivity but low outlet of methane ($0.13\text{--}0.21 \text{ N L CH}_4/\text{kg VS}$) for as separate manure and so as joint digestion with straw.

An evaluation of three versions of previous treatment, i.e., mechanical treatment, steam explosion, alkaline treatment, shows that mechanical previous treatment is economically more beneficial than the other versions, even if the expected outlet of biogas is evidently lower [1]. This is connected with that the previous chemical or thermal treatment leads to high investment costs due to high pressure, temperature or long processing time of treatment. In this research, the specific energy intensity of the extrusion process has proportional dependence on $C_E = 65.2 \cdot M_E$ divisible of extrusion (Table 4). When the length of the extruded wheat straw is 8.4 mm and treatment of substrate by permanent magnetic field of 1.8 mT (Table 3), the outlet of biogas increases, which allows to obtain the same amount of biogas as with 5-times extrusion, but with smaller amount in 4.28 times the power inputs for extrusion (Fig. 2, Fig. 3). At the same time, is kept sufficient productivity of the process of biogas production and the output of biomethane increases by approximately on 5.5%.

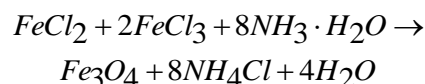
Understanding that in water under the influence of magnetic field, eventuating its structural rearrangement, and on some chemical elements and compounds also influence magnetic field, it is possible to trace the influence (direct or mediated) on specific technological result. A few examples will insert clearness in this statement. Many researches have shown that water that has been previously suffered influence of electromagnetic, electrical, vibrational or magnetic fields keeps its biological activity during long periods of time. At the same time, is observed change on specific electrical conductivity, magnetic susceptibility, surface tension, and viscosity [12]. The water keeps and transmits information that is concerned to dissolved substances with the help of the

hydrogen net. The evolution of physical-chemical parameters over the time provide for trigger effect of the structure of molecular aggregates after the potentiation procedure [6]. The magnetic system, is configured for mode of water destructuring, ensures increasing of monomolecules in its structure to 30%. Since water monomolecules have minimum size in comparing to clusters, they easily penetrate into cells. Besides, they are anomalously polar and, therefore, able to quickly dissolve microcrystals of salt and ensure the unobstructed supply of nutrients to cells of microorganisms. The concentration of hydrogen ions (pH) significantly effects on the development of microorganisms already in the of process fermentation in the bioreactor.

Taking into account the high concentration of magnesium, iron and calcium in straw (Table 1) and substrate, including the magnetic isotope ^{25}Mg , Ca (2+), we can assume that their participation in the process of intensification of methanogenesis [3, 11]. Existing models of functioning of biological membranes [6, 12] represent ion channels as water pores of atomic's sizes, formed by macromolecules with active charged centers. At the same time, the charge centers create a constant electric field, perpendicular to surface and is external to ratio to parts of the interphase region. The direction action of the force is determined by the sign of charge of the part. In the biological membranes exists channels, the properties of which change on the applied influence, for example, of electric or magnetic field.

These effects are called "gates", since by opening and closing the pore under the influence of field, they control by the movement of ions. The proposed theoretical models in [4, 6, 12] and experimentally determined characteristics of the physical-chemical processes in bioreactor give good qualitative convergence of the influence of magnetic field on activation of the methanogenesis processes which were considered in the given work. The effects of change in oxidizing-restoration potential and pH are shown for different substrates both under the influence of rotating electromagnetic field with level of magnetic induction of 0.0035 T, and when substrate is moved in field of permanent magnets with the level of magnetic induction of 0.065 T. The industrial implementation of the method of activation of anaerobic fermentation processes is eventuated by the way of using multifunctional electromechanical converter with

an external massive hollow rotor on which are located the pallets, intended for mixing the substrate. The magnetic field of interharmonic frequencies is formed in the zone of contact of rotor and substrate in our researches in 2017-2019 Years. The methodology of activation of anaerobic fermentation processes by magnetic field can be also used by the way of influencing on the catalyst process nickel [28] and synthetic magnetite. Schematically, the process of obtaining of synthetic magnetite can be written as follows:



Iron chloride practically is almost always dissolved in water, and ammonia hydrate is present in the process of bioconversion of cattle manure water or bird droppings.

CONCLUSIONS

Biogas technology with using mechanically processed wheat straw can provide link between livestock and crop production, thus playing an important role in self-sufficient eco-agriculture.

Was conducted an experimental analysis of the possibilities of using and proposed acombined method of previous mechanical-magnetic processing of deteriorated in store ("gray") winter wheat straw from bales in production of biogas in which is formed synergistic effect.

When the length of extruded wheat straw is 8.4 mm and treatment of substrate with permanent magnetic field of 1.8 mT, the outlet of biogas increases, which allows obtaining the same amount of biogas as with 5-times extrusion, but with less on 4.28 times power inputs for extrusion. At the same time, is kept sufficient productivity of the biogas production process, and the outlet of biomethane increases by approximately on 5.5%.

Extrusion and influence of magnetic field not only shorten the lag- phase and activate the rapid growth of the microbial community in bioreactors, but also significantly shorten the stationary phase of their development.

ACKNOWLEDGMENTS

Supported by Ministry of Education and Science of Ukraine (Kyiv), Ukrainian-Indian Project No. M/41-2021.

REFERENCES

- [1] Andersen L.F., Parsin S., Lüdtko O., Kaltschmitt M. Biogas production from straw—the challenge

- feedstock pretreatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, vol. 12, pp. 379-402. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00740-y>
- [2] Arthur R., Antonczyk S., Off S., Scherer P.A. Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Wheat Straw in a CSTR System with ‘Synthetic Manure’: Impact of Nickel and Tungsten on Methane Yields, Cell Count, and Microbiome. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, no. 1, 13.
- [3] Bauréus Koch C.L.M., Sommarin M., Persson B.R.R., Salford L.G., Eberhardt J.L. Interaction between weak low frequency magnetic fields and cell membranes. *Bio Electro Magnetism*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 395-402. <https://doi.org/10.1002/bem.10136>
- [4] Block S. Brownian motion at lipid membranes: a comparison of hydrodynamic models describing and experiments quantifying diffusion within lipid bilayers. *Biomolecules*, 2018, vol. 8, no. 2, p. 30. <https://doi.org/10.3390/biom8020030>
- [5] Diaz J.P., Reyes I.P., Lundi M., Horvath I.S. Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities, kinetic evaluation and synergetic effects. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, pp. 10834-10840.
- [6] Elia V., Baiano S., Duro I., Napoli E., Niccoli M., Nonatelli L. Permanent physico-chemical properties of extremely diluted aqueous solutions of homeopathic medicines. *Homeopathy*, 2004, vol. 93, no. 03, pp. 144-150.
- [7] Fjortoft K., Morken J., Hanssen J.F., Briseid T., Pre-treatment methods for straw for farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 124, pp. 88-94.
- [8] Gao C., Yang J., Han L. Systematic comparison for effects of different scale mechanical-NaOH coupling treatments on lignocellulosic components, micromorphology and cellulose crystal structure of wheat straw. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 326, 124786.
- [9] Ghizzi D., Silva G. Effects of grinding processes on enzymatic degradation of wheat straw. In: *Bioresource Technology*, 2012, vol. 103, no. 1, pp. 192-200.
- [10] Habiba L., Hassib B., Moktar H. Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition. *Bioresource technology*, 2009, vol. 100, no. 4, pp. 1555-1560. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.019>
- [11] L’etuta U.G., Tikhonova T.A. Magnetic Fields and Magnetic Isotope ²⁵Mg Effects on Biofilms Formation by Bacteria E. coli. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 2019, vol. 484, no. 1, pp. 85-87. <https://doi.org/10.1134/S160767291901023X>
- [12] Lobyshev V.I. Water is a sensor to weak forces including electromagnetic fields of low intensity. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2005, vol. 24, no. 3, pp. 449-461.
- [13] Mancini G., Papirio S., Lens P.N., Esposito G. Increased biogas production from wheat straw by chemical pretreatments. *Renewable energy*, 2018, vol. 119, pp. 608-614.
- [14] Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and bioenergy*, 2004, vol. 27, no. 4, pp. 339-352.
- [15] Mehrabani R.T., Mosavi M.A. Determination of chemical composition and gross energy of cereal straw (Wheat & Barley) in Kermanshah province, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research Center, 1998.
- [16] Meraj S., Liaquat R., Raza Naqvi S., Sheikh Z. Zainab A., Khoja A.H., Atabani A. Enhanced Methane Production from Anaerobic Co-Digestion of Wheat Straw Rice Straw and Sugar-cane Bagasse: A Kinetic Analysis. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 13, 6069. <https://doi.org/10.3390/app11136069>
- [17] Ranjbar F.M., Karrabi M., Shahnavaz B. Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (Experimental investigation and kinetic modeling). *Fuel*, 2022, vol. 320, 123946. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123946>
- [18] Risberg K., Sun L., Levén L., Horn S. J., Schnürer A. Biogas production from wheat straw and manure—impact of pretreatment and process operating parameters. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 149, pp. 232-237.
- [19] Rouches E., Zhou S., Sergeant M., Raouche S., Carrere H. Influence of white-rot fungus *Polyporus brumalis* BRFM 985 culture conditions on the pretreatment efficiency for anaerobic digestion of wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 110, pp. 75-79.
- [20] Sun L., Müller B., Schnürer A. Biogas production from wheat straw: community structure of cellulose-degrading bacteria. *Energy, Sustainability and Society*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 1-11.
- [21] Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 2002, vol. 83, no. 1, pp. 1-11.
- [22] Wagner A.O., Lackner N, Mutschlechner Prem E.M., Markt R, Illmer P. Biological Pretreatment Strategies for Second – Generation Lignocellulosic Resources to Enhance Biogas Production. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 1779, pp. 1- 14.
- [23] Xavier C.A., Moset V., Wahid R., Møller H.B. The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Engineering*, 2015, vol. 139, pp. 16-24.
- [24] Xi Y., Liu Y., Ye X., Du J., Kong X., Guo, D.,

Xiao Q., Enhanced Anaerobic Biogas Production From Wheat Straw by Herbal-Extraction Process Residues Supplementation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 623594, pp. 1-8.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.623594>

[25] Yadav P.K., Deo S., Singh S.P., Fillipov A. Effect of magnetic field on the hydrodynamic permeability of a membrane built up by porous spherical particles. *Colloid Journal*, 2017, vol. 79, pp. 160-171.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X1606020X>

[26] Yu B., Zhang D., Dai X., Lou Z., Yuana H., Zhu N. The synthetic effect on volatile fatty acid dis-

inhibition and methane production enhancement by dosing FeCl₃ in a sludge thermophilic anaerobic digestion system. *RSC Adv.*, 2016, vol. 6, 21090–21098.

<https://doi.org/10.1039/C5RA26245C>.

[27] Zhong C., Wang C., Wang F., Jia H., Wei P., Zhao Y. Enhanced biogas production from wheat straw with the application of synergistic microbial consortium pretreatment. *RSC advances*, 2016, vol. 6, no. 65, pp. 60187-60195.

[28] Zipes D.P., Jalife J., Stevenson W.G., Cardiac Electrophysiology: From Cell to Bedside E-Book. Elsevier Health Sciences. 2017.

Information about authors.



Zablodskiy Mykola, professor of the department of electrical engineering, electromechanics and electrotechnologies, National university of life and environmental sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, scientific interest is technologies conversion of biomass into high-quality biogas with a shortened fermentation period under the influence of electromagnetic field.

E-mail: zablodskiyinn@gmail.com



Trokhaniak Viktor, associate professor of department of Heat and Power Engineering, National university of life and environmental sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, scientific interest is heat and mass transfer processes in biomass fermentation.

E-mail: trohaniak.v@gmail.com



Klendiy Petro, associate professor of the department of power engineering and automation, SS "Berezhany agrotechnical institute" National university of life and environmental sciences of Ukraine, candidate of technical sciences, scientific interest is renewable sources of energy

E-mail: pklendii@gmail.com



Dudar Oksana, teacher of the cycle committee of special electrical engineering disciplines, SSS "Berezhany professional college of National university of life and environmental sciences of Ukraine", scientific interest is renewable sources of energy.

E-mail: oksana-dydar@ukr.net



Shvorov Serhii, professor of the department of Automation and Robotic Systems, doctor of technical sciences, scientific interest is technologies conversion of biomass into high-quality biogas with a shortened fermentation period under the influence of electromagnetic field.

E-mail: sosdok@i.ua

Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter

Santosh D. Gadekar¹, M. Murali²

¹Research Scholar, Faculty of Electrical Engineering, Medi-Caps University, Indore, MP, India

²Associate Professor, Department of Electrical Engineering at Medi-Caps University, Indore, MP, India

Abstract. Electric vehicles have assumed a prominent role in future transport system due to the diminishing availability and escalating costs of fossil fuels, coupled with growing concerns about the impact of global warming. The purpose of the work consists in addressing the pressing need for efficient and sustainable solutions in the realm of electric vehicles and renewable energy integration. The tasks solved in the article to achieve the given goal are the following: an improved Boost-KY converter has been introduced to counter the inherent limitation of low PV panel voltage output. This converter effectively mitigates voltage and current ripples, thereby ensuring a stable power supply for EV charging. Additionally, the Moth Flame Optimized Proportional Integral (MFO-PI) controller has been implemented to regulate converter operation, demonstrating exceptional proficiency in mitigating PV output unpredictability. MATLAB simulation is done to validate the proposed system's performance. The most important results are the achievement of impressive maximum efficiency of 96.21% and remarkably low Total Harmonic Distortion (THD) value of 1.04%. The system maintains consistent voltage and current levels for PV panels and EV battery, ensuring dependable energy supply. The significance of the results obtained consists in their potential to revolutionize the intersection of renewable energy integration, electric vehicle (EV) adoption, and sustainable transportation practices. The PV-based EV charging system not only reduces dependence on finite fossil fuel resources but also contributes to environmental preservation, aligning with global efforts to combat climate change. Furthermore, system adheres to stringent requirements of IEEE 519 standards, positioning it as a catalyst for the adoption of clean energy solutions within the future transport system.

Keywords: PV system, electric vehicle, improved Boost-KY converter, Moth Flame optimized PI controller.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.10>

UDC: 621.3

Optimizarea încărcării vehiculelor electrice cu ajutorul algoritmului de control optimizat prin metoda "molie-flacăra" a convertorului Boost-KY

Santosh D. Gadekar¹, Murali M.²

¹Cercetător științific, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Medi-Caps, Indore, MP, India.

²Profesor asociat, Departamentul de Inginerie Electrică la Universitatea Medi-Caps, Indore, MP, India

Rezumat. Automobile electrice au căpătat un rol important în viitorul sistem de transport din cauza disponibilității tot mai reduse și a costurilor tot mai mari ale combustibililor fosili, precum și a preocupărilor tot mai mari legate de impactul încălzirii globale. Prin urmare, obiectivul principal al acestei cercetări este dezvoltarea unui sistem de încărcare a vehiculelor electrice eficient și durabil bazat pe energie fotovoltaică (PV), utilizând producția de energie fotovoltaică viabilă la nivel mondial. A fost introdus un convertor Boost-KY îmbunătățit pentru a contracara limitarea inerentă a tensiunii scăzute de ieșire a panoului fotovoltaic. Acest convertor atenuează în mod eficient undele de tensiune și de curent, asigurând astfel o sursă de alimentare stabilă pentru încărcarea vehiculelor electrice. În plus, a fost implementat controlerul MFO-PI (Moth Flame Optimized Proportional Integral) pentru a regla funcționarea convertorului, demonstrând o competență excepțională în atenuarea impredictibilității ieșirii PV. Simularea MATLAB este realizată pentru a valida performanța sistemului propus. Cele mai notabile rezultate ale acestui studiu includ obținerea unei eficiențe maxime impresionante de 96.21% și o valoare remarcabil de scăzută a Distorsiunii armonice totale (THD) de 1.04%. Un sistem de încărcare a vehiculelor electrice bazat pe panouri fotovoltaice nu numai că reduce dependența de rezervele limitate de combustibili fosili, dar contribuie și la conservarea mediului, ceea ce este în conformitate cu eforturile globale de combatere a schimbărilor climatice. În plus, sistemul îndeplinește cerințele stricte ale standardului IEEE 519, făcându-l un catalizator pentru introducerea de soluții de energie curată în sistemul de transport al viitorului.

Cuvinte-cheie: sistem fotovoltaic, automobil electric, convertor Boost-KY îmbunătățit, controler PI optimizat cu algoritmul "molie și flacăra".

**Оптимизация зарядки электромобилей с помощью оптимизированного с помощью метода
"Мотылек-Пламя» ПИ-регулятора бустерного КУ-преобразователя
Сантош Д. Гадекар¹, Мурали М.²**

¹Научный сотрудник, факультет электротехники, Университет Medi-Caps, Индор, штат Массачусетс, Индия

²Доцент кафедры электротехники университета Medi-Caps, Индор, штат Массачусетс, Индия
Аннотация. Электромобили играют важную роль в транспортной системе будущего в связи с уменьшением доступности и ростом стоимости ископаемого топлива, а также растущими опасениями по поводу последствий глобального потепления. Таким образом, основной целью данного исследования является разработка эффективной и устойчивой системы зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических элементов, использующей глобальные возможности производства фотоэлектрической энергии. Для борьбы с ограничениями, связанными с низким выходным напряжением фотоэлектрических панелей, был разработан усовершенствованный преобразователь Boost-KU. Этот преобразователь эффективно снижает пульсации напряжения и тока, обеспечивая тем самым стабильное электропитание для зарядки электромобилей. Кроме того, для регулирования работы преобразователя был применен оптимизированный пропорционально-интегральный (MFO-PI) контроллер Moth Flame, демонстрирующий исключительную эффективность в снижении непредсказуемости выходного сигнала фотоэлектрических панелей. Для подтверждения эффективности предложенной системы было проведено моделирование в MATLAB. Наиболее примечательные результаты данного исследования включают достижение впечатляющего максимального КПД 96.21% и удивительно низкого значения суммарных гармонических искажений (THD) 1.04%. Система поддерживает постоянный уровень напряжения и тока как для фотоэлектрических панелей, так и для аккумулятора EV, обеспечивая надежное энергоснабжение. Значимость полученных результатов подчеркивается их потенциалом для решения важнейших задач в области устойчивого развития транспорта и интеграции возобновляемых источников энергии. Система зарядки электромобилей на основе фотоэлектрических панелей не только снижает зависимость от ограниченных запасов ископаемого топлива, но и способствует сохранению окружающей среды, что согласуется с глобальными усилиями по борьбе с изменением климата. Кроме того, система соответствует жестким требованиям стандарта IEEE 519, что делает ее катализатором внедрения экологически чистых энергетических решений в транспортную систему будущего.

Ключевые слова: фотоэлектрическая система, электромобиль, улучшенный Boost-KU-преобразователь, оптимизированный методом «мотылек - пламя» ПИ-регулятор.

1. INTRODUCTION

Consuming fossil fuels has drawbacks like limited supply sources and environmental concerns. Due to the depletion of fossil fuel supplies, renewable energy alternatives have emerged [1]. There are various ways to lessen pollution caused by the burning of fossil fuels in terms of environmental problems. For the transportation of people and commodities, the transportation industry requires a substantial amount of oil and gas resources, which produces CO₂ emissions and environmental damage [2]. As consequently, electric vehicles (EVs) have been proposed and are now being utilized to reduce fossil fuel usage and CO₂ emissions. The controller of an EV uses electricity from the renewable energy sources or utility grid to charge the battery [3]. The PV panels have become increasingly considered to be superior energy source solutions to charge EVs when compared to other renewable resources. Solar power plants are currently utilized as primary source of energy to charge EV batteries because of a range of benefits which includes as lower maintenance and operation costs, a low carbon footprint output, and

the ability to be energy independent. [4, 5]. Some of the recent innovations introduced in the field of PV based EV charging station with their features and constraints are listed in Table 1. Integrating PV panels in series or parallel is not a realistic way to increase voltage or current due to the significant space and cost requirements. As a result, a DC-DC converter with a larger gain voltage conversion ratio is necessary to create substantial voltage outputs [6]. Boost converters are frequently used in PV applications to convert DC to DC voltage, although step-up voltage ratio is the only other option [7]. Additionally, the discontinuous input and output that results in gain swings in Boost converters necessitates the use of extra switching machines. Several architectures have employed Buck-boost converters for the functioning of MPPT in an effort to offset these problems, however these converters suffer from higher switching stress [8]. Additionally, the discontinuous input current of buck-boost converters prevents them from executing optimum MPPT in the lack of substantial coupling capacitors. These converters also require big input capacitors. Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC) and Cuk converter

can now overcome the shortcomings of buck-boost converters. [9, 10]. However, these types of converters are incapable of generating significant speed up/down voltage and are confined to a moderate power range. Huge input and output inductors are necessary for high-powered operation, and the converter is badly affected by grid variations. The above limitations are overcome by using Improved Boost-KY converter. The proposed converter is designed by the incorporation of Improved Boost [11] and KY

converter [12] to provide a higher voltage conversion ratio, making it well-suited for boosting the low-voltage output of PV panels to levels required for efficient battery charging or grid connection. This converter lowers the harmonic content and improves system functionality even more by ensuring a stable power supply for EV charging.

Table 1
Recent innovations in PV based EV charging station

Methods	Remarks	
Fuzzy Logic Control (FLC) [13]	Contributions	Renewable energy integration, efficient charging, decentralized energy management and adaptability.
	Constraints	The scalability of the system for larger charging stations or grid integration present challenges.
Mixed Integer Linear Programming (MILP) [14]	Contributions	Profit maximization, optimal battery sizing, efficient resource utilization and grid stability.
	Constraints	The limitations include dependence on accurate data, computational complexity, reliance on load forecasts and high upfront costs for optimal solutions.
Fuel Cell–Electrolyzer Unit [15]	Contributions	Sustainability, cost efficiency, energy independence and reduced grid dependency.
	Constraints	Challenges related to the initial cost, weather dependence, and complexity of integrating multiple energy sources
Intelligent Energy Management Scheme (IEMS) [16]	Contributions	Peak load reduction, efficient energy management, grid impact reduction and cost effectiveness.
	Constraints	Integration challenges and limited grid scenarios.
Charging/Discharging Scheduling Algorithm [17]	Contributions	Charging satisfaction, economical operation, energy efficient operation and grid-load balancing.
	Constraints	Lack of energy storage and environmental considerations.

It is considered necessary to implement a proper controller to optimize the dynamic characteristics of the converter to provide a stable and controlled output. Because of its simple and feasible design, the operation of converters in a solar system is often regulated by using a PI controller [18]. Nevertheless, even minor load variations degrade the effectiveness of the controller, and its variables are difficult to adjust in non-linear applications such as PV systems. The trial and error method is the most frequently utilized PI controller tuning method, and it is error prone, time consuming, and inaccurate. The

disadvantages of traditional tuning techniques are being addressed as computer technology and optimization approaches advance. A genetic algorithm is utilized to modify PI controller's factors; however, the computation time is long due to slow convergence, and imprecise population coding reduces the performance of GA. For PI parameter tuning, particle swarm optimization technique is used [19, 20]. Although the PSO has the advantage of rapid convergence, its application is restricted by the difficult of being trapped in local optima. GWO has fewer parameters, simpler principles, and is easier to

implement than conventional optimization approaches such as PSO and GA [21, 22]. GWO [23], on the other hand, low solution accuracy, has slow convergence speed and is prone to falling into local optima. Therefore, to solve these problems, Moth Flame optimization algorithm is presented here. MFO-PI controller simplifies the adjustment of its parameters, making it more suitable for non-linear systems [24]. It avoids the need for manual, time-consuming, and error-prone tuning methods like the trial and error approach. It offers rapid convergence and efficiently searches for optimal controller parameters, reducing the time required for tuning.

This work proposes the PV based EV charging system using Improved DC-DC converter with optimized PI controller. The solar panel DC voltage energizes battery for EV charging whereas an excess energy from PV system is enhanced through the use of Improved Boost-KY converter and further supplied to the grid. The efficient proposed converter regulation is obtained by using MF optimized PI controller. Moreover, the MF optimized PI controller offers quick transient response and enhanced convergence speed compared to conventional PI controller. The grid supplies energy to the battery for EV charging during shortage of power from the PV system. This proposed work distinguishes itself from existing ones by offering a

comprehensive and innovative solution that combines advanced converter technology and a specialized control strategy. While traditional converters struggle with fluctuations in PV panel output, this innovative converter ensures reliability in energy transfer for EV charging. The implementation of the MFO-PI controller is specifically designed to handle the unpredictability in PV output. Its exceptional proficiency in regulating the converter operation ensures that the system can adapt to varying conditions, maintaining stable power levels even when faced with fluctuations.

2. PROPOSED SYSTEM DESCRIPTION

The demand for EVs is growing by the day, and one of the most significant problems is a shortage of facilities for charging. Countries are striving for quick expansion of renewable energy to be used as a charging station source in order to lessen their carbon footprint. For the advantage of the system as a whole, this research designs an optimised PI controller combined with solar PV in an EV charging station. The schematic depiction of an organized efficient optimized control for a PV powered EV charging station is shown in Fig. 1.

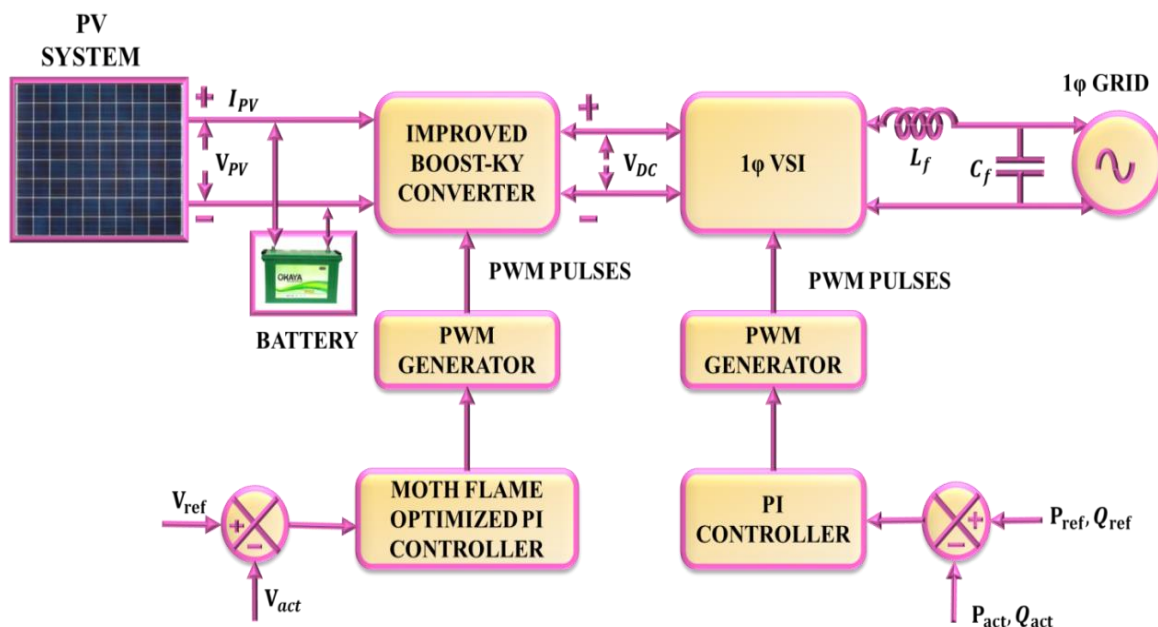


Fig. 1. PV powered EV charging station, using MF optimized PI controller.

In most cases, the electricity generated by a PV system is utilized to charge battery of an electric vehicle. To increase the excess PV voltage, an

Improved Boost-KY converter is used in the proposed work. The proposed converter achieves high voltage gain, improves efficiency, and

lowers costs. Nevertheless, voltage preservation is required to ensure efficient power production with minimal loss; therefore, the MF optimized PI controller is established. By adjusting the PI controller's parameters, the MFO helps to improve the system's efficiency and stability. The generated DC link supply is passed to single phase VSI for active AC conversion, together with a PI controller for voltage stabilisation. The LC filter connected to the system reduces harmonics and improves grid supply. The proposed converter achieves maximum efficiency with enhanced THD value. At times of power deficiency from PV system, the grid energizes the battery.

A. PV System Modelling

Photovoltaic cells are one of the fundamental elements of solar power plants that transform solar power into electrical energy. Fig. 2 depicts the corresponding circuitry of a PV cell and its components.

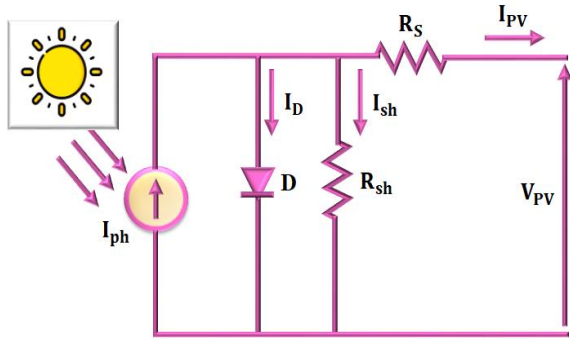


Fig. 2. Equivalent circuit of PV cell

Equations (1, 2, 3, 4, 5 and 6) can express mathematical formulas that describe the PV module in single diode model, which consists of series-connected PV cells.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} , \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{a N_s V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} , \quad (2)$$

$$V_t = \frac{K T_c}{q} , \quad (3)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} \left(I_{sc_n} + K_T (T_c + T_{cn}) \right) , \quad (4)$$

$$I_o = I_{o_n} \left(\frac{T_c}{T_{c_n}} \right)^3 \exp \left(\frac{q E_g}{a k} \left(\frac{1}{T_{c_n}} - \frac{1}{T_c} \right) \right) , \quad (5)$$

$$I_{o_n} = \frac{I_{sc_n}}{\exp \left(\frac{V_{oc_n}}{a N_s V_m} \right)} \quad (6)$$

Where I_{ph} -photo generated current; I_{sh} - current parallel resistance; I_o - diode saturation current; I_d -diode current; V -terminal's voltage, a -ideality factor; N_s - number of series cells; R_s - series resistance; V_t thermal voltage; K Boltzmann constant ; R_{sh} -Shunt resistance; T_c - PV cell's temperature in Kelvin; q - electron charge; G - solar irradiance; I_{sc_n} - short circuit current under standard test conditions (STC); K_T - temperature coefficient of I_{sc_n} ; V_{oc_n} - voltage of open circuit ; E_g -band gap energy. Due to the inconsistency of solar energy, the voltage provided by PV is generally insufficient for grid operation. As a result, converter deployment is essential and the proposed research produced a unique converter for voltage boosting, which is detailed below.

B. Improved Boost-KY Converter Modelling

Fig. 3 depicts an improved Boost-KY converter proposed in this paper to increase the excess PV voltage.

Fluctuations in voltage and current passing through converter components are demonstrated in various operation modes.

The converter in use is in continuous conduction mode (CCM). The filtering elements utilised by the Improved Boost and KY converters included inductor L_2 and capacitor C_0 .

These converters share a common load. In Fig. 3 (a) & (b), the operating modes of the converter are indicated.

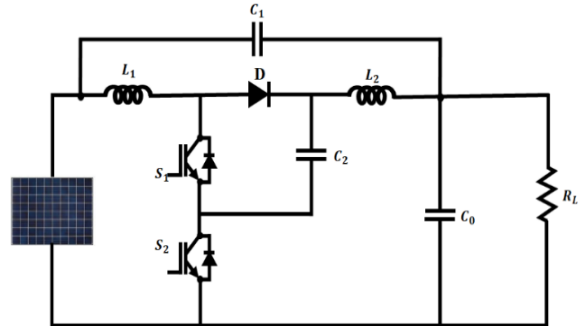


Fig. 3. Proposed Improved Boost-KY converter

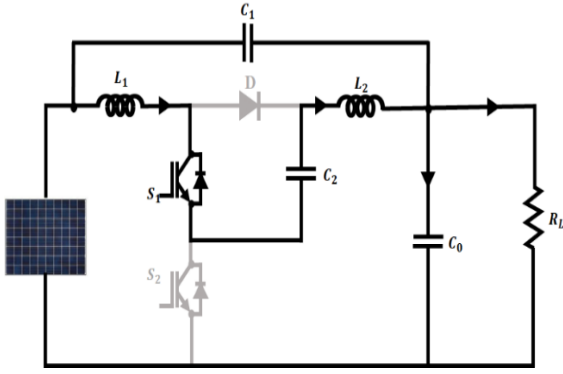


Fig. 3(a). Stage 1.

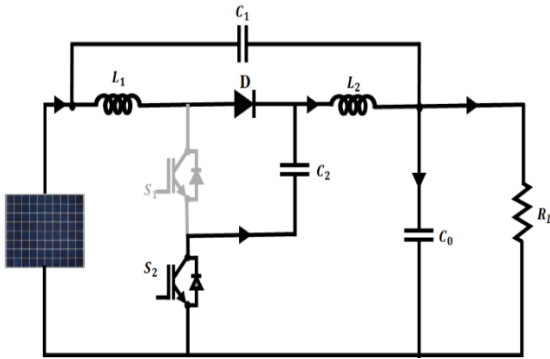


Fig. 3(b). Stage 2.

Stage 1

Operation at Stage 1: During this state, the switch S_1 is ON, the switch S_2 is OFF, and diode D is reverse biased due to the voltage between the inductor L_2 .

The capacitor C_1 releases its stored power and charges the inductor L_2 , whereas the capacitor C_2 releases its saved charges to the load and the output capacitor C_o . Furthermore, Table 2 shows the charging conditions of the converter's various components.

Table 2

Improved Boost KY Converter switching state

Switch S_1, S_2	Diodes D	Inductors		Capacitors		
		L_1	L_2	C_1	C_2	C_o
0,1	1	↑	↑	↓	↓	↑
1,0	0	↓	↓	↑	↑	↓

↓ -discharging, ↑ -charging

Operation at Stage 2: During this mode 2, the switch S_1 is OFF, switch S_2 is ON, and diode D is forward biased and conducting. In contrast to

mode 1, the inductors L_1 and L_2 are discharging while the capacitors C_1 and C_2 are charging.

Considering the subsequent path: $V_{PV}, L_1, C_1, L_2, C_2$ and C_o with the assistance of KVL.

$$V_{PV} + V_{L_1} + V_{C_1} + V_{L_2} + V_{C_2} + V_{C_o} = 0 \quad (7)$$

The voltage over the capacitor C_1 is specified as follows:

$$V_{C_1} = V_{PV} \quad (8)$$

Assuming the switch S_1 has been turned ON at interval DT in stage 1, the voltage across inductor L_1 is expected to be,

$$V_{L_1} = V_{PV} \quad (9)$$

Examine the outermost route in mode 2 and use KVL,

$$-V_{PV} + V_{L_1} + V_{C_1} + V_o = 0 \quad (10)$$

On considering $V_{PV} = V_{C_1}$,

$$-V_{PV} + V_{L_1} + V_{PV} + V_o = 0 \quad (11)$$

$$V_{L_1} = -V_o \quad (12)$$

When there is a periodic operation, average voltage across the inductor is zero.

$$(V_{L_1,sw on})(DT) + (V_{L_1,sw off})(1-D)T = 0 \quad (13)$$

$$V_{PV}(DT) - V_o(1-D)T = 0 \quad (14)$$

Where switch's duty ratio is represented by D . The V_o is written as,

$$V_o = V_{PV} \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (15)$$

The duty cycle is specified as,

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{PV}} \quad (16)$$

Thus, the proposed Improved Boost-KY converter is able to employ in a variety of applications. Whenever the converter has no losses, the energy received by the load is equal to the converter input power,

$$P_{PV} = P_o \quad (17)$$

Input current has a value equal to I_{L_1}

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} = V_{PV} I_{L_1} \quad (18)$$

The predicted output power P_o is,

$$P_o = V_o I_o \quad (19)$$

$$V_{PV} I_{L_1} = V_o I_o \quad (20)$$

The average inductor current is calculated to be,

$$I_{L_1} = I_{PV} = \frac{V_o I_o}{V_{PV}} = \frac{V_o^2}{V_{PV} R_o} \quad (21)$$

When S_1 is turned off, the modification in i_{L_1} is displayed as,

$$\Delta i_{L_1} = \frac{V_{PV} DT}{L_1} = \frac{V_s D}{L_1 f} \quad (22)$$

The ripple voltage at the output is expressed as,

$$\Delta V_o = \Delta V_{C_o} = \frac{V_o D}{R_o C_o f} \quad (23)$$

C. Moth Flame Optimized PI Controller Modelling

A PI controller is a form of closed loop controller that is widely utilized in a wide range of applications. A PI controller requires to preserve the desire voltage by varying duty factor of the Improved Boost-KY converter's output based on the difference among organised and real output voltages. It results in higher peak variations and a slower response time, As a result, optimum tuning is critical, which MFO [25] achieves in this research. To improve performance of the proposed converter, and parameters of a PI controller are modified using MFO.

MFO Algorithm

One of the population-specific techniques influenced by moth flying and navigation behaviours is MFO. Throughout the night time, the moths fly at a position that is set to the moon. As a result, it is capable of flying in a direct path for a considerable distance. In the occurrence of a small distance artificial illumination, nevertheless, moth is going to fly in a spiral pattern as it attempts to keep a fixed position towards the light source. Because of the presence of the solution sets during the process of optimisation, this method has a strong potential to avoid local optimum. The MFO's most recent and most effective approach serves as a guide for

moths. Because of this circumstance, the moths are unable to be contained in lack of progress, and so convergence is confirmed.

The calculated representation of the MFO technique, that involves a fixed of rules, is depicted in the matrix as given as:

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n,1} & \cdots & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Where m the overall moths and number of dimensions is indicated by n . For every month, the statement is put forward that an array occurs for recording related fitness values as given as:

$$OM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

Where n is the number of moths. The fitness value for each moth is the final output of the fitness function. Since matrix M is a constant encoding, it must be decrypted into a transformation integer in order to express a possible meeting process utilising the topology sort process. Each moth's location vector is then passed to the fitness function. The result of this function is assigned to relevant moth as OM_1 . Flames constitute another crucial feature via the MFO algorithm, that is represented in the matrix, that's similar to the moth's matrix seen following to enhance the possibilities.

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & \cdots & F_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n,1} & \cdots & F_{n,d} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Here the d is the dimension parameter and denotes no.of flames. The function is related with the construction of initial solutions and the computation of objective values, for which several randomized distributions are has been used. It needed to be emphasised that both solutions used moths and flames. The variations between them were caused by the treatment approach and the updating of both solutions in each cycle. Moths are regarded to as original search agents since they roam about search space. Flames, on the other hand, are recognised as the finest position of moths that gains so far. As a result, if a better option is found, each moth searches for a flame and jumps into it. A moth's

optimal approach is never lost due to this technique. The MFO method is made up of three tuple approximating global optimal functions that are as given as:

$$MFO = (I, P, T) \quad (27)$$

If I is the randomised moth's population activation function, and appropriate value of fitness is summarised as given as:

$$M_{(i,j)} = (ub(i) - lb(i) \cdot rand() + lb(i)) \quad (28)$$

Where ub and lb are variables lower and upper limits, respectively. Following function systematic model is:

$$I : \emptyset \rightarrow \{M, OM\} \quad (29)$$

The e P function, changes the moths throughout the search space. This function obtains the M matrix and eventually yields its modified version.

$$P : M \rightarrow M \quad (30)$$

T function returns true if the termination requirement is fulfilled. At that point, if termination requirement is dissatisfied, the T function returns false:

$$T : M \rightarrow \{true, false\} \quad (31)$$

A logarithmic spiral is defined as follows for the MFO algorithm:

$$S(M_i, F_j) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (32)$$

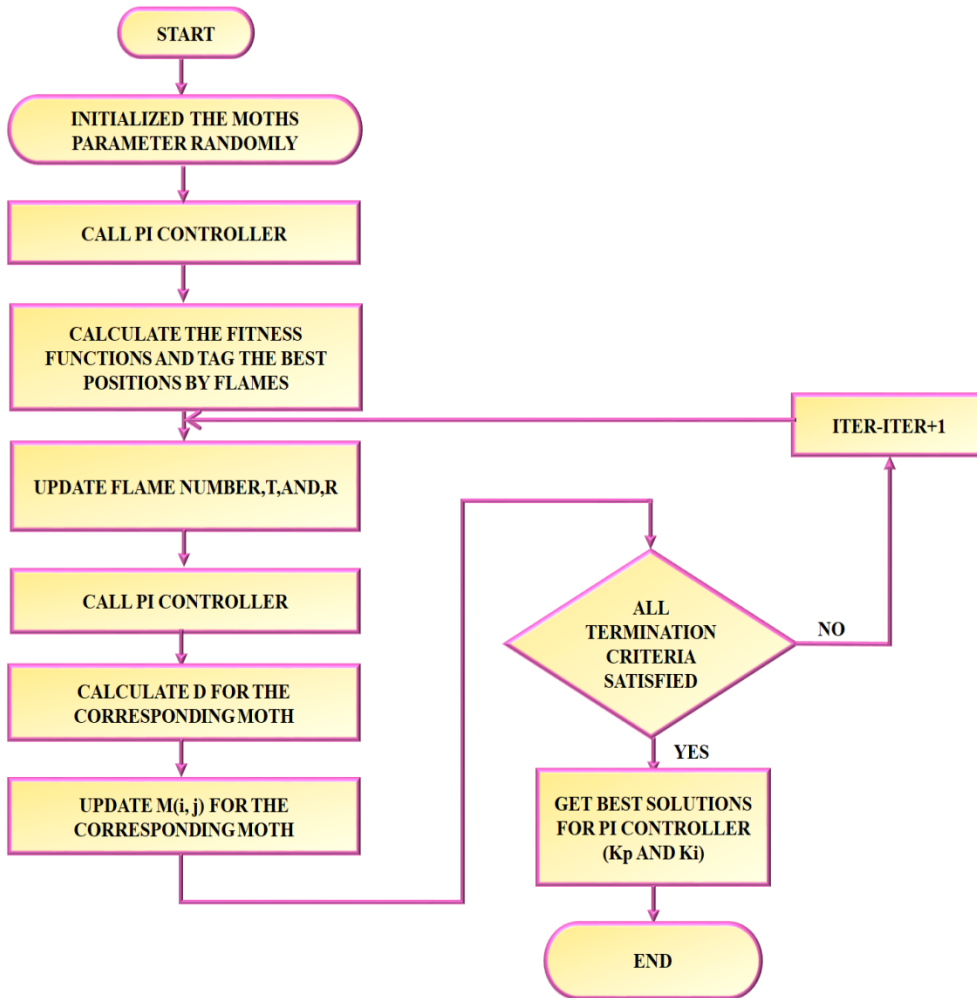


Fig. 4. Flowchart of MF optimized PI controller.

Fig. 4 illustrates the flowchart diagram for MF optimized PI controller.

In this equation, D_i denotes distance of the i -th moth for j -th flame, b is logarithmic spiral, and t is random number. D is estimated as given as:

$$D_i = |F_j - M_i| \quad (33)$$

Where M_i represents the i -th moth, F_j represents the j -th flame. A moth can navigate around a flame using the spiral equation, but it is

not fundamentally in space between them. Adaptive convergence over the course of iterations, constant r decreases from -1 to -2 to increase convergence around the flames. The amount of flames is flexibly reduced by increasing the no. of iterations. In this scenario, the subsequent formula is used subject to the specified condition:

$$flame\ no = round(N - l) \times \frac{N - 1}{T} \quad (34)$$

Where, l denotes current number of iterations, N denotes the maximum amount of flames, and T denotes total number of iterations. The moths successfully adjust their positions in relation to the most optimal flame in the last steps of iterations.

D. Implementing the MFO based PI controller in the MATLAB environment

Define the objective function: Define an objective function that quantifies the performance of the control system. This function typically evaluates how well the PI controller performs based on certain criteria like overshoot, settling time or error. The objective function should take the PI controller parameters as input and return a fitness value to be minimized or maximized by the MFO.

Initialize the Moth-Flame Algorithm parameters: Set an algorithm parameters such as the population size, the maximum number of iterations, the range of controller parameter values and other control parameters like the flame intensity factor, and other parameters specific to the MFO algorithm.

Generate an initial population: Create an initial population of potential PI controller parameter sets. These could be developed at random or based on some prior knowledge.

Perform the MFO optimization: Inside a loop, execute the MFO algorithm to optimize the PI controller parameters. The algorithm involves the following steps:

- a. Evaluate the fitness of each potential solution using the objective function.
- b. Update the position of moths in the population based on their fitness and the movement equations of the MFO.
- c. Apply the MFO specific operations like selecting a leader moth, calculating the flame intensity, and updating positions accordingly.

Termination condition: Decide on a termination condition, such as a maximum

number of iterations or reaching a specific fitness threshold.

Extract the optimized PI controller parameters: After the MFO optimization is complete, extract the optimized PI controller parameters from the best solution found.

Implement the PI controller: Use the optimized PI controller parameters to implement the controller.

E. Single Phase VSI Modelling

Fig. 5 depicts a single phase voltage source inverter system for converting a constant DC link voltage to an alternating current. VSI is indeed the power part of a converter system. It is a type of inverter used to convert a single-phase DC voltage into a single-phase AC voltage with controllable amplitude and frequency.

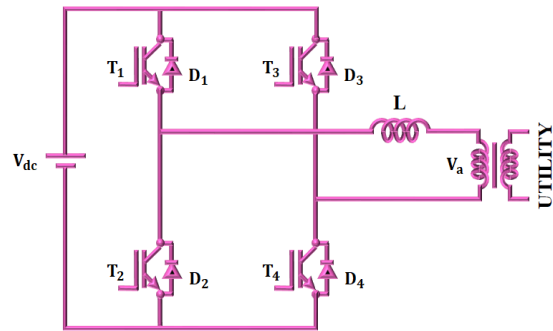


Fig. 5. Single phase VSI

It consists of a direct current voltage source, four switches T_1, T_2, T_3, T_4 and four diodes $D_1, D_2, D_3,$ and D_4 . The inverter output is transmitted to grid via an LC filter, which reduces harmonics while maintaining a sinusoidal waveform.

3. RESULTS AND DISCUSSION

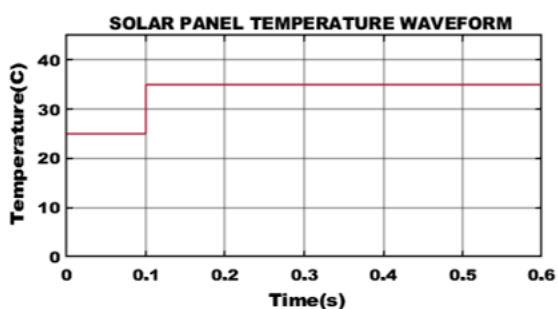
This paper proposes an efficient PV-based EV charging system that employs an improved DC-DC converter with an optimised PI controller. The weak solar panel dc voltage has been enhanced by using an Improved Boost-KY converter that has reduced voltage and current ripple factors. Using an MF optimised PI controller, the suggested converter regulation is effective. Furthermore, as contrasted with conventional PI controllers, the MF optimised PI controller provides faster transient response and faster convergence speed. The proposed system's parameter specifications are presented in Table 3.

Table 3
Design of Parameter

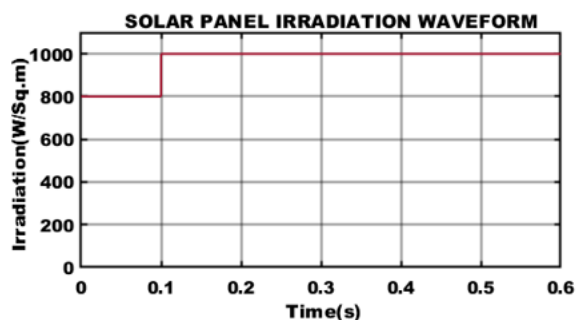
Parameter	Specification
Solar PV System	
Series connected solar PV cells	36
Open Circuit Voltage	12V
Short Circuit Current	8.33A
Peak Power	10KW, 10 Panels

Improved Boost-KY converter	
L_1, L_2	1.2mH
C_1, C_2	4.7 μF
C_0	2200 μF
Switching Frequency F_s	10KHZ

The waveforms for PV panel temperature and irradiance are shown in Fig. 6. The constant temperature and irradiation 35°C & 1000 (W/Sq.m) attained, which is represented in Fig. 6(a) & (b) respectively.



(a)

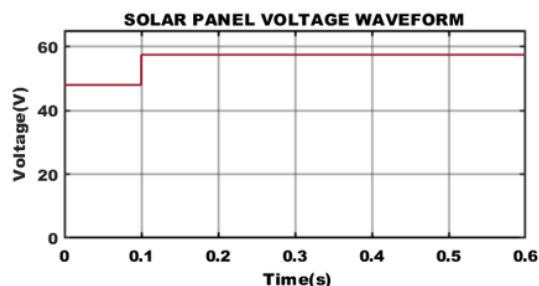


(b)

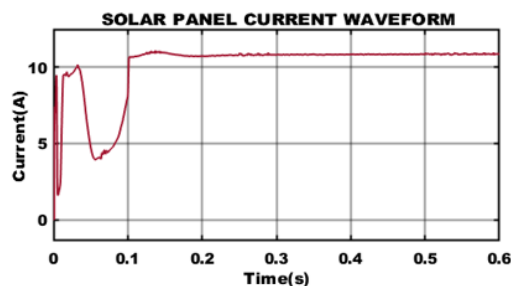
Fig. 6. Waveforms indication of Solar panel (a) Temperature (b) Irradiation.

PV panels are affected by nonlinear variables like as temperature and irradiation. As a result, the power produced by of the PV panel fluctuates often and generates only a small amount of dc voltage. Because this voltage variation has a significant impact on the devices utilised and the

overall system efficiency, a steady voltage of 58V DC is obtained, as presented in Fig. 7 (a). The solar panel's current waveform is shown in Fig. 7(b), that obviously indicates that the current is initially zero and increases gradually to a steady level of 11 A after some time.



(a)



(b)

Fig. 7. Waveforms indication of Solar panel (a) Voltage (b) Current.

Fig. 8 depicts the voltage that is produced of the Improved Boost-KY converter with PI and MFO controlled PI controller. As a result, the Fig. 8 (a) & (b) clearly shows that the estimated settling time of the converter with MFO tuned

PI is less than that of the converter with PI controller. The current become stable after 0.3 seconds with small amount of distortions, which is represented in Fig. 8(c).

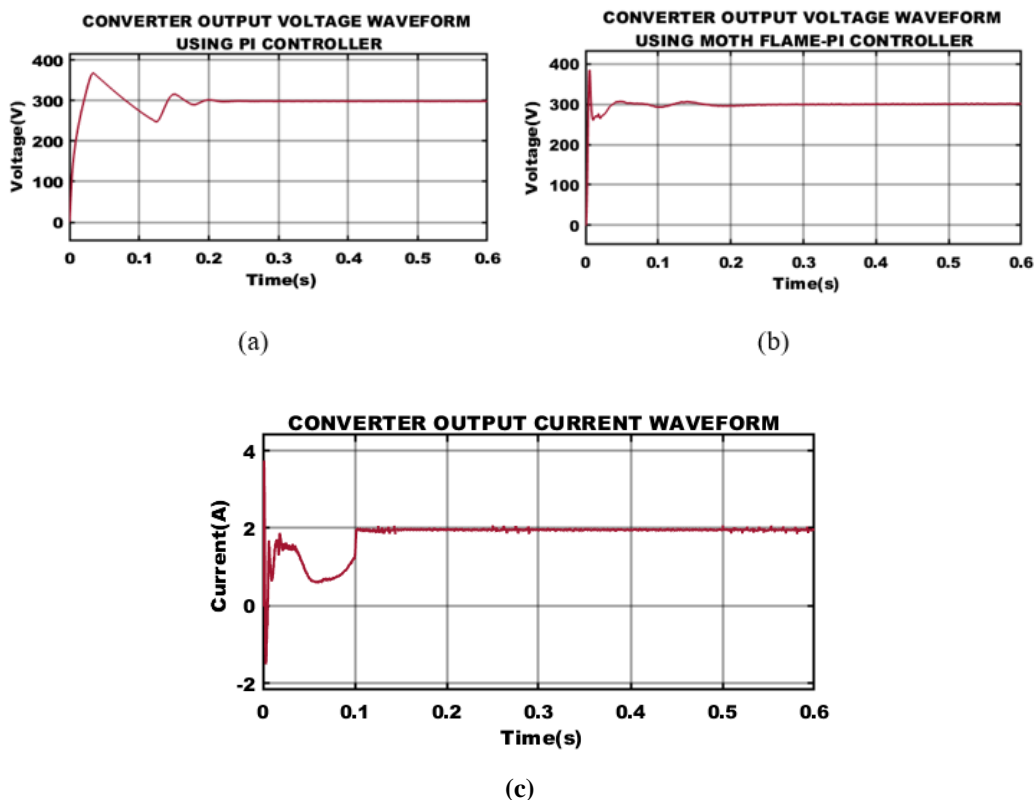


Fig. 8. Waveforms indication of proposed converter voltage (a) Using PI controller (b) Using MF optimized PI controller (c) Current output waveform.

Fig. 9 (a) and (b) illustrate a waveform reflecting the voltage and current of a charge storage battery. It preserves the extra energy generated by the PV panel, depending on its capacity. From the observation, the stable

voltage and current value of 12V and 1A is maintained correspondingly. The battery SOC needs to be maintained within a specific range, which in this case is 70%, as displayed in Fig. 9 (c).

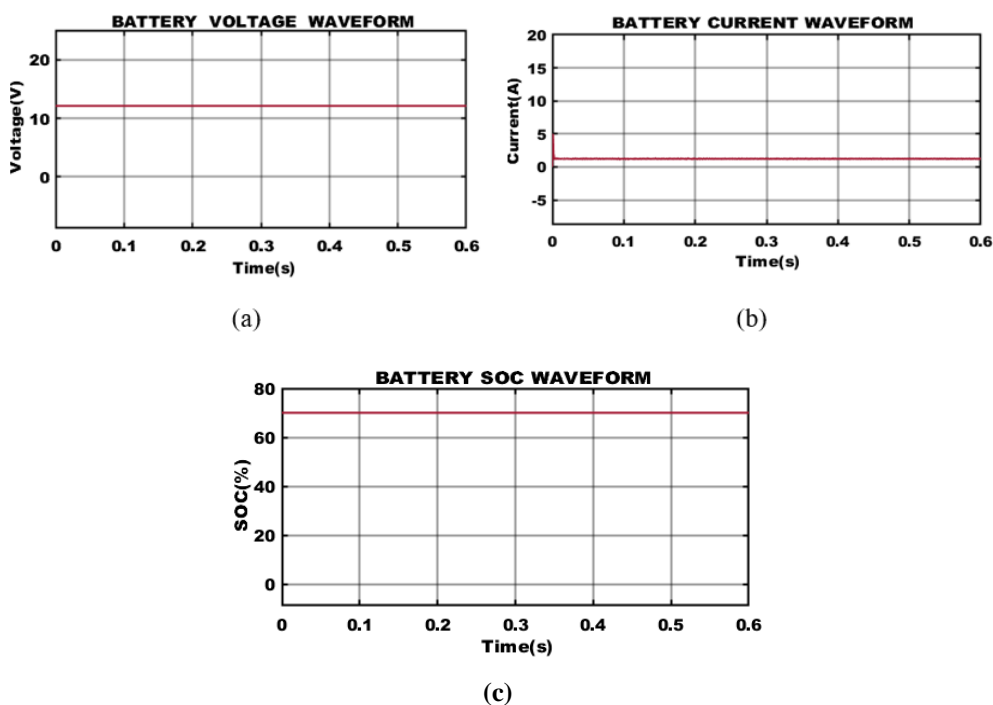


Fig. 9. Waveforms indication of EV battery output (a) Voltage (b) Current (c) SOC.

Figures 10 (a) & (b) depicts waveforms for grid voltage and current. A steady grid voltage of 230V is preserved without distortion in the intended three grid system. In a similar way a steady grid current of 8A remains consistent,

which improves grid performance. The proposed system attains the stable real and reactive power for single phase grid is indicated in Fig. 11.

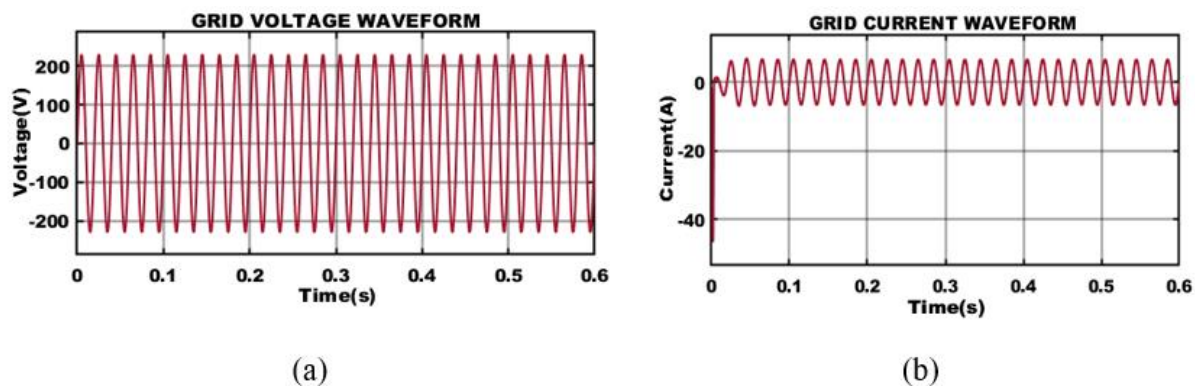


Fig. 10. Waveforms indication of grid output (a) Voltage (b) Current.

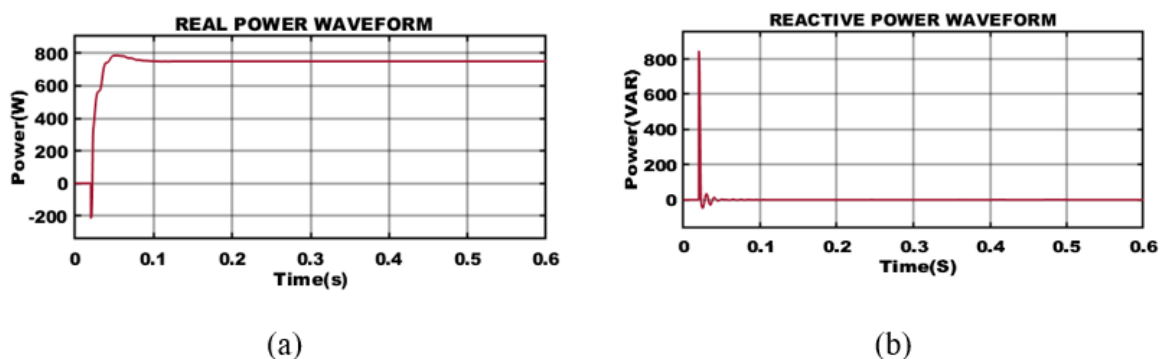


Fig. 11. Waveforms indication of (a) Real power (b) Reactive power.

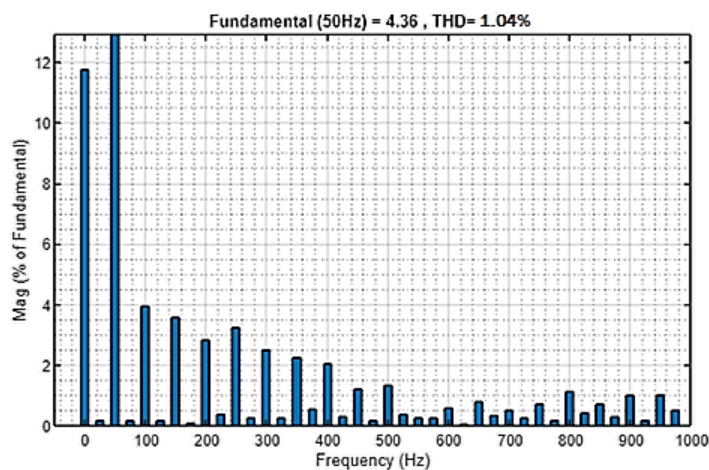


Fig. 12. THD waveform

The proposed system achieves minimal THD value of 1.04%, which satisfies the requirement of IEEE 519 standard. Table 4 & 5 presents a comparison of efficiency & THD with various converters to the proposed

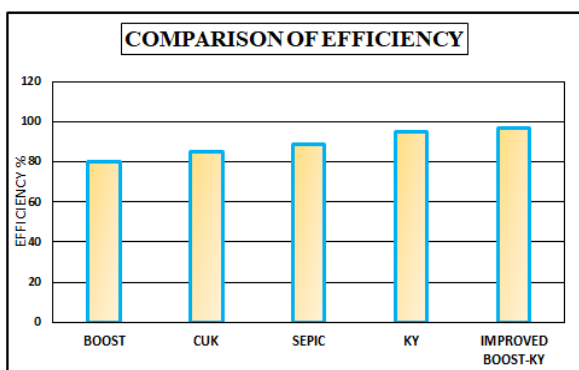
Improved Boost-KY. The proposed converter achieves an enhanced efficiency of 96.21% with a minimized THD value of 1.04%. The corresponding plots are represented in Fig. 13.

Table 4
Comparison Analysis of Efficiency

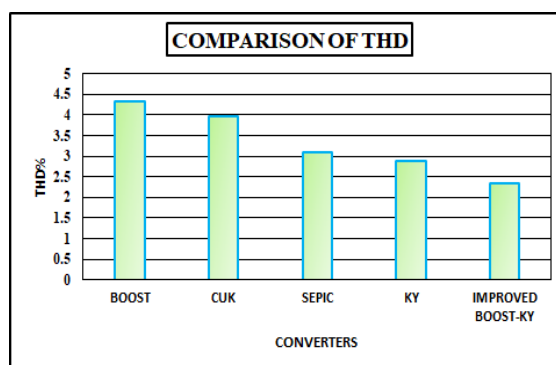
Converter	Components				Efficiency
	C	L	D	S	
Boost [26]	1	1	1	1	80%
Cuk [27]	3	2	2	1	85%
SEPIC [28]	3	2	1	1	88.82%
KY [29]	2	1	1	2	95%
Proposed Improved Boost-KY	3	2	1	2	96.21%

Table 5
THD values

Converter	THD%
Boost[26]	4.32%
Cuk[27]	3.98%
SEPIC[28]	3.08%
KY[29]	2.89%
Proposed converter	2.35%



(a)



(b)

Fig. 13. Comparison analysis of (a) Efficiency (b) THD.

Table 6
Controller transient response comparison

CONTROLLER	Rise Time t_r	Peak Time t_p	Settling Time t_s
PI CONTROLLER [18]	0.06	0.03	0.35
MFO-PI CONTROLLER	0.03	0.02	0.26

Based on the findings in Table 6, In regard to rise time t_r , peak time t_p and settling time t_s

, the proposed MF optimised PI controller is superior to the traditional PI controller. The proposed MF optimised PI controller has a fast settling time of 0.26 seconds. Table 7 provides an effectiveness analysis of various optimization algorithms. The MFO algorithm stands out as the most effective among the algorithms considered in this analysis, delivering a superior solution with a faster convergence speed and minimal computational time. This comparison highlights the MFO algorithm's suitability for the optimization task at hand, where both optimization quality and computational efficiency are essential factors to consider.

Table 7

Effectiveness Analysis of Optimization Algorithms

Algorithms	Objective Function Value	Convergence Speed	Computational Time
MFO	100	50 iterations	0.5s
Genetic Algorithm [19]	120	75 iterations	2.2s
Particle Swarm Algorithm [21]	110	60 iterations	1.8s
Simulated Annealing [30]	115	80 iterations	3.1s
Grey Wolf Optimizer [23]	105	55 iterations	1.5s

Thus the proposed work's exceptional proficiency in regulating the converter operation ensures that the system can adapt to varying conditions, maintaining stable power levels even when faced with fluctuations.

4. CONCLUSION

The primary goal of this study is to enhance the performance of a Boost-KY converter for efficiently converting minimal PV voltage output to higher, more stable voltage levels. To achieve this objective, the following tasks were addressed: An enhanced Boost-KY converter is employed to effectively manage the fluctuations in PV output voltage resulting from the dynamic interplay of irradiance and unpredictable weather conditions. Furthermore, an MFO-PI controller is used to oversee the enhanced Boost-KY converter, significantly mitigating the inherent unpredictability of PV output. As a result of these efforts, the study found that the MFO-PI controller, is highly effective in managing a wide range of peak levels in PV systems operating under various conditions. Additionally, it is observed that MF optimized PI controller achieved a quicker settling time of 0.26 seconds compared to a conventional PI controller. The proposed system's performance was rigorously evaluated using MATLAB simulations. The results demonstrated that the system achieved a maximum efficiency of 96.21% and exhibited low THD. Incorporating energy storage systems, such as batteries or supercapacitor, into the PV-based EV charging system can provide uninterrupted power supply and grid services. Future studies could focus on the optimal integration, control and sizing of energy storage components to maximize system resilience and reliability.

References

- [1] Jiang W., Zhen Y. A real-time EV charging scheduling for parking lots with PV system and energy store system. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 86184-86193.
- [2] Wu D., Zeng H., Lu C., Boulet B. Two-stage energy management for office buildings with workplace EV charging and renewable energy. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 225-237.
- [3] Shariff S.M., Alam M.S., Ahmad F., Rafat Y., Asghar M.S., Khan S. System design and realization of a solar-powered electric vehicle charging station. *IEEE Systems Journal*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 2748-2758.
- [4] Minh P.V., Le Quang S., Pham M.H. Technical economic analysis of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations under different solar irradiation conditions in Vietnam. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 3528.
- [5] Zhang Y., You P., Cai L. Optimal charging scheduling by pricing for EV charging station with dual charging modes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 3386-3396.
- [6] Kim S., Cha H., Kim H.G. High-efficiency voltage balancer having DC-DC converter function for EV charging station. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 812-821.
- [7] Bellinaso L.V., Figueira H.H., Basquera M.F., Vieira R.P., Gründling H.A., Michels L. Cascade control with adaptive voltage controller applied to photovoltaic boost converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 55, no. 2, pp. 1903-1912.
- [8] Nayak P.S., Kamalpathi K., Laxman N., Tyagi V. K. Design and simulation of BUCK-BOOST type dual input DC-DC converter for battery charging application in electric vehicle. *2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, 2021. IEEE.
- [9] Divyasharon R., Banu R.N., Devaraj D. Artificial neural network based MPPT with CUK converter topology for PV systems under varying climatic conditions. *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 2019. IEEE.
- [10] Maroti P.K., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B., Bhaskar M.S., Meraj M., Iqbal A. A new structure of high voltage gain SEPIC converter for renewable energy applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 89857-89868.
- [11] Zaoskoufis K., Tatakis E. C. An improved boost-based DC/DC converter with high-voltage step-up ratio for DC microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 1837-1853, 2020.
- [12] Zaoskoufis K., Tatakis E. C. An improved boost-based DC/DC converter with high-voltage step-up ratio for DC microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 1837-1853.
- [13] Abraham D. S., Chandrasekar B., Rajamanickam N., Vishnuram P., Ramakrishnan V., Bajaj M., Piecha M., Blazek V., Prokop L. Fuzzy-based efficient control of DC microgrid configuration for PV-energized EV charging station. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 6, pp. 2753.
- [14] Dukpa A., Butrylo B. MILP-based profit maximization of electric vehicle charging station based on solar and EV arrival forecasts. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 15, pp. 5760.
- [15] Enescu F. M., Birleanu F. G., Raboaca M. S., Raceanu M., Bizon N., Thounthong P. Electric Vehicle Charging Station Based on Photovoltaic

- Energy with or without the Support of a Fuel Cell–Electrolyzer Unit. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 762.
- [16] Amir M. Z., Haque A., Bakhsh F. I., Bharath Kurukuru V. S., Sedighizadeh M. Intelligent energy management scheme-based coordinated control for reducing peak load in grid-connected photovoltaic-powered electric vehicle charging stations. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023.
- [17] Jin H., Lee S., Nengroo S. H., Har D. Development of charging/discharging scheduling algorithm for economical and energy-efficient operation of multi-EV charging station. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 4786.
- [18] Yilmaz U., Kircay A., Borekci S. PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, pp. 994-1001.
- [19] Belgaid Y., Helaimi M.H., Taleb R., Youcef M.B. Optimal tuning of PI controller using genetic algorithm for wind turbine application. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 167-178.
- [20] Ibrahim M.A., Mahmood A.K., Sultan N.S. Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm. *Int J Pow Elec & Dri Syst ISSN 2088.8694*, 2019, pp. 8694.
- [21] Deželak K., Bracinik P., Sredenšek K., Seme S. Proportional-integral controllers performance of a grid-connected solar PV system with particle swarm optimization and ziegler–nichols tuning method. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 2516.
- [22] Dash S.K., Ray P.K., Korkua S.K., Mishra S., Puhan P.S. Development of PV tied UPQC using PSO based PI tuning Controller based on SOI-QSG PLL. *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 2020. IEEE.
- [23] Sule A.H., Mokhtar A.S., Jamian J.B., Sheikh U.U., Khidrani A. Grey Wolf Optimizer Tuned PI Controller for Enhancing Output Parameters of Fixed Speed Wind Turbine, *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 2020, pp. 118-122.
- [24] Mehne S. H. H., Mirjalili S., "Moth-flame optimization algorithm: theory, literature review, and application in optimal nonlinear feedback control design," *Nature-inspired optimizers: theories, literature reviews and applications*, 2020, pp. 143-166.
- [25] Shehab M., Abualigah L., Al Hamad H., Alabool H., Alshinwan M., Khasawneh A. M. Moth–flame optimization algorithm: variants and applications. *Neural Computing and Applications*, 2020, vol. 32, 9859-9884.
- [26] Nejabatkah F., Danyali S., Hosseini S.H., Sabahi M., Niapour S. M. Modeling and control of a new three-input DC–DC boost converter for hybrid PV/FC/battery power system, *IEEE Transactions on power electronics*, 2011, vol. 27, no. 5, pp. 2309-2324.
- [27] Galea F., Apap M., Spiteri Staines C., Cilia J. Design of a high efficiency wide input range isolated Cuk Dc-Dc converter for grid connected regenerative active loads, 2011.
- [28] Javeed P., Yadav L.K., Kumar P.V., Kumar R., Swaroop S. SEPIC Converter for Low Power LED Applications, In *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1818, no. 1, pp. 012220. IOP Publishing.
- [29] Saravanan S., Usha Rani P., Thakre M.P. Evaluation and Improvement of a Transformerless High-Efficiency DC–DC Converter for Renewable Energy Applications Employing a Fuzzy Logic Controller. *MAPAN*, 2022, pp. 1-20.
- [30] Magzoub M.A., Alquthami T. Optimal design of automatic generation control based on simulated annealing in interconnected two-area power system using hybrid PID—fuzzy control. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 1540.

Information about authors.



Santosh Dinkar Gadekar, research scholar in the Department of Electrical Engineering at Medi-Caps University, Indore, MP, India. His current research areas of interest are Electrical Machines, Operation and control of Power Systems, E-mail: santoshgadekar.919@gmail.com



M. Murali Professor in the Department of Electrical Engineering at Medi-Caps University, Indore, MP, India. His current research areas of interest are Transmission Pricing, Artificial Intelligence & E-mail: murali233.nitr@gmail.com

Optimization of Operating Modes of CHPPs as a Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions

Tatarinova N.V., Suvorov D.M.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to analyze and evaluate the operating efficiency of CHPPs to develop an optimal operating strategy based on minimizing fuel consumption and greenhouse gas emissions. To achieve this goal, the following tasks were solved: a quantitative assessment of the most effective methods of operating units in typical operating modes was given; dependences of changes in the main energy and environmental parameters based on mathematical models of turbine units using real energy characteristics of turbine stages and compartments were constructed; long-term optimization method to exploitation operation of CHPPs to the point of view of reducing greenhouse gas emissions was shown on specific examples. The most significant results are the following: a comprehensive methodology for applying mathematical models for solving the most typical problems for CHPP was used, both from the point of view of saving primary fuel and reducing carbon emissions; the dependences of the influence of operating parameters on the carbon footprint were calculated; it has been established that the specific consumption of equivalent fuel and the carbon footprint are reduced when the loads are redistributed between turbine units during the heating period; the advantages of two-stage heating of delivery water over single-stage heating and sequential loading of turbines of the same type over parallel loading have been determined. The significance of the results obtained lies in their applicability in solving problems of optimizing the operating modes of CHPPs, taking into account the determination of the values of reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: greenhouse gas emissions, carbon footprint, cogeneration, district heating, energy efficiency, CHPP, operating measures.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.11>

UDC: 697.34

Optimizarea modurilor de operare ale CHPP ca o modalitate de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră

Tatarinova N.V., Suvorov D.M.

Universitatea de Stat din Veatka, Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a analiza și evalua eficiența operațională a CET pentru a dezvolta o strategie de operare optimă bazată pe minimizarea consumului de combustibil și a emisiilor de gaze cu efect de seră. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: a fost efectuată o evaluare cantitativă a celor mai eficiente metode de operare a unităților în moduri de operare tipice; s-au construit dependențe ale modificărilor principalelor parametri energetici și de mediu pe baza modelelor matematice ale unităților de turbină folosind caracteristicile energetice reale ale etajelor și compartimentelor turbinei; Metoda de optimizare pe termen lung a exploatarea CET din punctul de vedere al reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră a fost prezentată pe exemple specifice. Rezultatele cele mai semnificative sunt următoarele: a fost utilizată o metodologie cuprinzătoare de aplicare a modelelor matematice pentru rezolvarea celor mai tipice probleme pentru CET, atât din punct de vedere al economisirii combustibilului primar, cât și al reducerii emisiilor de carbon; au fost calculate dependențele influenței parametrilor de funcționare asupra amprentei de carbon; s-a stabilit că consumul specific de combustibil echivalent și amprenta de carbon sunt reduse atunci când sarcinile sunt redistribuite între turbine în perioada de încălzire; au fost determinate avantajele încălzirii în două trepte a apei de livrare față de încălzirea într-o singură treaptă și încărcarea secvențială a turbinelor de același tip față de încărcarea paralelă. Semnificația rezultatelor obținute constă în aplicabilitatea lor în rezolvarea problemelor de optimizare a modurilor de funcționare a CET, ținând cont de determinarea valorilor de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră.

Cuvinte-cheie: emisii de gaze cu efect de seră, amprenta de carbon, cogenerare, termoficare, eficiență energetică, CET, măsuri de exploatare.

Оптимизация режимов работы ТЭЦ как способ снижения выбросов парниковых газов Татарина Н.В., Суворов Д.М.

Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью данной работы является анализ и оценка эффективности работы паротурбинных ТЭЦ для выработки оптимальной эксплуатационной стратегии на основе минимизации расхода топлива и выбросов парниковых газов. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: дана количественная оценка наиболее эффективных способов эксплуатации теплофикационных турбоустановок в характерных режимах работы; построены зависимости изменения основных энергетических и экологических параметров на базе математических моделей турбоустановок с использованием реальных энергетических характеристик ступеней и отсеков турбин; на конкретных примерах показано, каким образом в долгосрочной перспективе можно организовать оптимальную с точки зрения снижения топливных затрат и выбросов парниковых газов эксплуатацию ТЭЦ. Основным показателем для расчета энергетической эффективности является удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, рассчитанный в сопоставимых условиях, а для расчета экологической эффективности – объем выбросов парниковых газов в углеродных единицах. Наиболее существенными результатами являются следующие: использована комплексная методика применения математических моделей, на основе которых решаются наиболее характерные для большинства ТЭЦ задачи оптимизации режимов их работы как с точки зрения экономии первичного топлива, так и с точки зрения снижения углеродных выбросов; рассчитаны зависимости влияния режимных параметров работы ТЭЦ на величину углеродного следа; установлено, что удельный расход условного топлива и величина углеродного следа на отпускаемую ТЭЦ электрическую энергию существенно уменьшаются при перераспределении нагрузок между турбоагрегатами в отопительный период при работе по тепловому графику; определено преимущество двухступенчатого подогрев сетевой воды перед одноступенчатым подогревом и последовательной загрузки однотипных турбин перед параллельной. Значимость полученных результатов заключается в их применимости при постановке и решении задач оптимизации режимов работы ТЭЦ с учетом определения величин снижения выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, углеродный след, когенерация, централизованное теплоснабжение, энергетическая эффективность, ТЭЦ, режимные мероприятия.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности производства энергии всегда являлось ведущим направлением научных исследований и практических работ. Оно имеет приоритетное значение не только для энергетической отрасли, но и общества в целом, так как позволяет сделать энергию более доступной для населения, а также способствует развитию новых технологий, созданию рабочих мест и экономическому росту.

В европейских странах с относительно холодным климатом (Германия, Великобритания, Швеция и ряд других скандинавских стран), где производство тепловой энергии не менее важно, чем производство электроэнергии, давно осознали, что комбинированная выработка (когенерация) в сочетании с централизованным теплоснабжением, особенно в городах с высокой плотностью населения, может иметь существенные преимущества перед отдельной и выступать эффективным инструментом повышения эффективности системы теплоснабжения в целом [1, 5, 15]. Тем не менее, если сравнить долю когенерации в общем объеме производимой Европейским союзом электроэнергии, то она составляет в среднем лишь около 12% (в от-

дельных странах до 58% – это Финляндия, Швеция, Дания, Нидерланды), и за последнее десятилетие существенного увеличения этой доли не произошло [8, 16]. В абсолютных цифрах когенерация в ЕС сократилась более чем на 10% за последние 10 лет, и по сравнению с Россией и странами постсоветского пространства, где эта доля доходит до 30%, эта величина кажется очень небольшой. Но и в России за последние 25 лет доля комбинированной выработки электроэнергии на тепловых электростанциях снизилась на 19% в силу того, что в настоящее время теплоснабжение в стране представлено разрозненными структурами, объекты которых не имеют единой технической, экономической и инвестиционной политики. Поэтому ТЭЦ проигрывают на рынке тепловой энергии локальным системам теплоснабжения на газе (прежде всего ввиду изношенности тепло-транспортных систем, вынуждающих потребителей переходить на собственные источники теплоснабжения). Это в конечном итоге негативно сказывается на стоимости тепловой энергии для конечных потребителей, на эффективности использования энергоресурсов, а также усугубляет экологические проблемы [3, 4].

Тем не менее, страны, где сегодня объем когенерации невелик, планируют его увеличение, например, в Германии поставили цель удвоить долю производства электроэнергии ТЭЦ с 13% в 2020 году до 25% к 2025 году. Причем, энергия, получаемая в комбинированном цикле, при котором тепло направляется именно на теплофикацию промышленных и жилых объектов, там приравнивается к «зеленой» энергетике. В Великобритании, помимо господдержки, генерирующие компании, переходящие на выработку электроэнергии с одновременным производством тепла, могут рассчитывать еще и на стимулирующие гранты [1, 2]. В то же время основной прирост когенерационных мощностей ожидается в текущем десятилетии в Азиатско-Тихоокеанском регионе, приближая его долю к 50%. В целом внимание к когенерации растет во всем мире: в перспективе до 2030 года прогнозируется ежегодный прирост таких мощностей на уровне 2,8% (причем с развитием распределенной энергетики появилась возможность применять технологию когенерации с другими источниками энергии в едином цикле как с использованием различных видов углеводородного, так и возобновляемого топлива) [6, 9-13].

Помимо того, что когенерация – это самая энергоэффективная технология производства электроэнергии и тепла, это обусловлено еще и возрастающей всемирной обеспокоенностью по поводу глобального потепления. Поэтому большой интерес вызывают проекты, ориентированные на снижение потребления первичной энергии, а значит, и сокращение выбросов парниковых газов. И если раньше зачастую во многих странах энергетическая стратегия была направлена в основном на оптимизацию потребления энергии, то сейчас, с учётом введения новых ограничительных мер в области снижения экологической нагрузки на климат (в частности, трансграничного углеродного налога в Евросоюзе) и вследствие этого имеющим место заметным спадом рентабельности целого ряда промышленных объектов, акцент смещается в сторону сокращения потребления ресурсов. Отсюда и повышенное внимание к когенерации, которая в последние годы становится мировым трендом в наибольшей степени именно потому, что способствует частичной декарбонизации энергетической отрасли и замедлению процессов глобального потепления [7, 17-20].

Россия, согласно данным ООН, находится в пятерке мировых лидеров по выбросу основного парникового газа – CO₂. Выше только Китай, США, ЕС и Индия. Вместе с тем, она имеет значительный потенциал для роста комбинированного производства тепловой и электрической энергии, который до конца не используется, несмотря на довольно давнюю традицию и явные экологические преимущества.

Использование надежных и точных методов расчета и оценки выбросов парниковых газов имеет существенное значение. Анализ опыта европейских стран (Швеции [6], Болгарии [35]), а также Турции [10], Китая [9] и других стран показывают, что вектор научной мысли направлен преимущественно в сторону совершенствования методик, направленных на уточнение стехиометрических уравнений процесса горения твердого, жидкого и газообразного топлива. Эти новые методологии характеризуются более высокой точностью по сравнению с существующими, однако, в них не уделяется внимание такому важному элементу, как математические модели турбинных установок, которые позволяли бы адекватно рассчитывать общий расход тепла на турбины и, в конечном итоге, расход первичного топлива. Вместо этого до сих пор используются стандартные нормативные характеристики турбоустановок, дающие, как было показано в работе [29], существенные погрешности при расчетах, что в конечном итоге приводит и к недостаточно корректному расчету выбросов парниковых газов.

Целью данной работы является исследование эффективности выработки электроэнергии на ТЭЦ в характерных режимах их работы с использованием математических моделей турбоустановок, основанных на реальных энергетических характеристиках ступеней и отсеков с учетом таких критериев, как снижение расхода топлива и уменьшение выбросов парниковых газов.

Эта работа включает обсуждение факторов, которые заслуживают большего внимания как с точки зрения интерпретации данных когенерации при разных режимных параметрах, так и с точки зрения более широкого внедрения этой технологии в контексте климатической повестки (использования ее потенциала и возможностей для сокращения выбросов CO₂).

Выбор темы исследования обусловлен следующим. Во-первых, доля электроэнер-

гии, производимой на ТЭЦ, как уже было показано ранее, весьма значительна [22]. Экономичность процесса производства электроэнергии в данном секторе имеет большое значение для более эффективного использования природных ресурсов, обеспечения доступности и стабильности электроэнергии для населения и промышленности.

Во-вторых, производство электроэнергии на ТЭЦ сопряжено с выбросом парниковых газов, таких как углекислый газ, который является основной причиной глобального потепления и изменения климата. В связи с тем, что изменение климата является одной из главных глобальных проблем на сегодняшний день, улучшение эффективности производства электроэнергии будет положительно сказываться на снижении углеродного следа.

В-третьих, повышение эффективности производства электроэнергии на ТЭЦ может привести к экономическим выгодам за счет снижения затрат на использование и эксплуатацию тепловых установок и повышения конкурентоспособности производства электроэнергии на глобальном рынке, в том числе, за счет снижения налогообложения прямых углеродных выбросов (для энергетических компаний во многих странах концепция углеродных активов все еще нова, зачастую компаниям не хватает опыта и знаний по управлению ими) [2, 5].

В работе решаются следующие задачи. Во-первых, это выбор наиболее подходящей методики для расчета распределения тепловых и электрических нагрузок между теплофикационными турбоагрегатами, позволяющей определять наиболее экономичные внутристанционные режимы ТЭЦ в соответствии с располагаемыми вычислительными средствами и граничными условиями, а также изменение величины углеродного следа при изменении общего расхода тепла на турбоустановку. Во-вторых, это расчет на базе адекватных математических моделей турбин с реальными энергетическими характеристиками зависимостей эффективности выработки электроэнергии на тепловом потреблении на ТЭЦ по сравнению с отдельной выработкой при разных климатических условиях. В-третьих, это оценка влияния режимных мероприятий (оптимизации режимов работы ТЭЦ) на основные энергетические показатели станции и величину углеродного следа и построение соответствующих зависимостей. В-четвертых, это энергетическая и экологиче-

ская оценка (с точки зрения снижения величины углеродного следа) наиболее эффективных способов эксплуатации теплофикационных турбоустановок в различных режимах работы.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ РАСЧЕТОВ

Сравнительный анализ литературных источников, экспериментальных и теоретических данных [21, 23, 25] показывает, что в настоящее время в России и за рубежом не существует не только универсального подхода к созданию алгоритма оптимизации режимов работы ТЭЦ, но и к созданию самих математических моделей когенерационных установок. Несмотря на многообразие существующих на сегодняшний день моделей [27, 28, 30], они, как правило, слабо пригодны для выполнения успешных комплексных расчетов энергетических и экологических показателей в связи с отсутствием в них достоверных характеристик, которые бы давали адекватную оценку в широком диапазоне режимов работы. До сих пор традиционно применяются слишком упрощенные (спрямленные) как расходные, так и энергетические характеристики турбины и отдельных ее ступеней (отсеков) [26, 27], несмотря на то, что реальные характеристики имеют более сложный и в большинстве случаев нелинейный характер. Оптимизационные задачи решаются в той или иной степени только на режимах, близких к номинальным, когда КПД отсеков принимается постоянным параметром или его изменение учитывается упрощенно [31, 32]. Однако в работах [24, 29] было показано, что применение нормативных характеристик турбин и их конденсаторов для решения задач оптимизации не вполне целесообразно, а в некоторых случаях и неправомерно, особенно в существенно переменных режимах работы. Поэтому авторами была использована разработанная на кафедре теплотехники и гидравлики ВятГУ целая серия математических моделей для расчета максимально полного спектра стационарных переменных режимов теплофикационных паротурбинных установок отечественного производства, построенных на основе достоверных (верифицированных с высокой степенью точности) энергетических характеристик турбинных ступеней и отсеков, имеющих универсальный характер, а также для расчета режимов работы конденсаторов таких турбоустановок [24]. Эти модели

позволяют с учетом текущего состояния турбинного оборудования и тепловой схемы производить полный детальный тепловой расчет и определять энергетическую эффективность того или иного решения по изменению режима работы в широком диапазоне изменения параметров. Такие модели реализованы в виде программы, а апробация и отладка проведены на действующих ТЭЦ. Реализованный алгоритм состоит из нескольких основных этапов: во-первых, выбор начального приближения из библиотеки возможных режимов (этот этап почти не осложнен итеративными процессами; полученные на этом этапе результаты расчета используются в качестве базы исходных данных); во-вторых, расчет турбоустановки на переменный режим (базой для него являются данные из предыдущего этапа). В результате решения задачи находится состояние системы, определяемое параметрами во всех элементах в нерасчетных условиях. Для этого каждый элемент описывается системой алгебраических уравнений теплового баланса, гидравлики, теплопередачи, аэродинамики и т.п. С учетом числа элементов, включенных в расчетную схему (более 20), общее количество уравнений в системе более 50. Большая часть уравнений нелинейные либо трансцендентные. Линейными из уравнений перечисленных типов яв-

ляются только балансовые и уравнения связей между элементами, осуществляющих передачу параметров. Данная оценка размерности и сложности задачи показывает, что ее полное и корректное решение без использования численных моделей невозможно. Многоуровневый итерационный алгоритм решается модернизированным методом Ньютона с релаксацией (изменением "шага" итерационного процесса) по нескольким переменным. На наиболее трудоемких ветвлениях общая степень вложенности итеративных циклов достигает шести, включая уровень расчета теплофизических свойств рабочих тел. Достоинство такого подхода состоит в том, что система уравнений формируется не для конкретной расчетной тепловой схемы турбоустановки, а предусматривает возможность ее изменения без изменения алгоритма расчета в целом.

На рис. 1 на примере турбины Т-50-12.8 показана тепловая схема расчетной модели, топология которой меняется по желанию исследователя, т.е. структура программы позволяет при необходимости легко заменить модели теплообменников, конденсатора, направления слива дренажей, питание деаэратора и т.п.

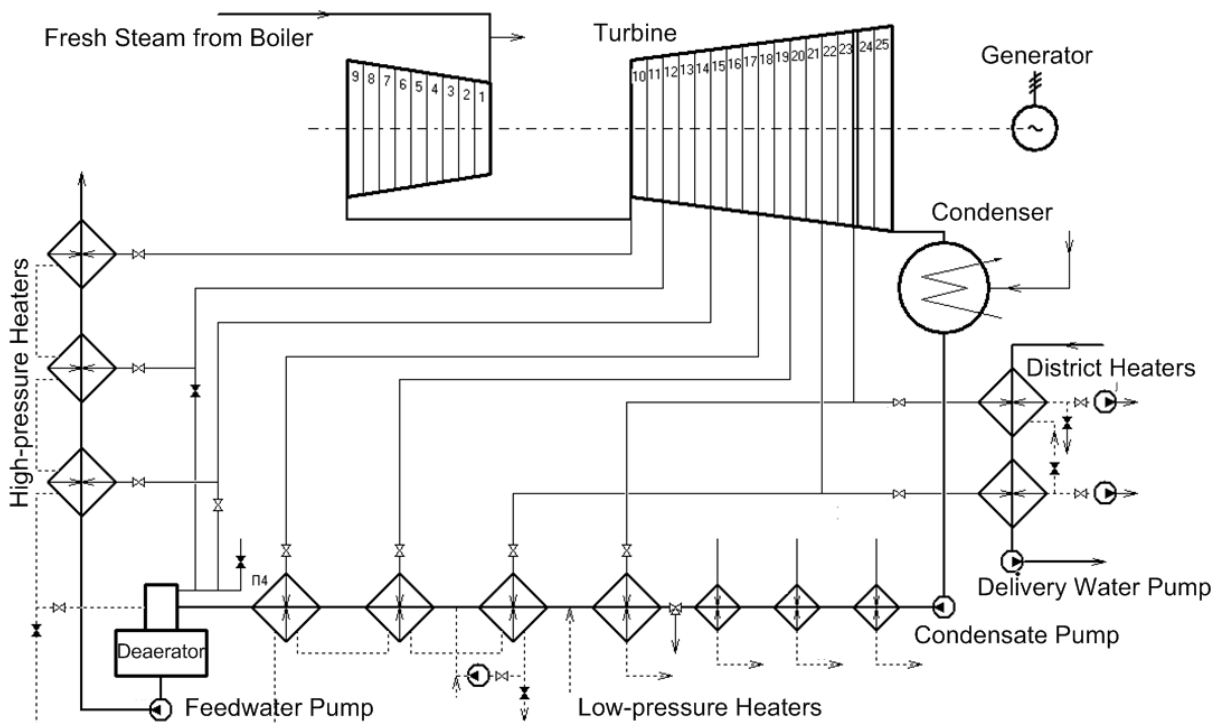


Рис. 1. Общий вид принципиальной тепловой схемы турбоустановки.¹

¹ Appendix 1

Для оценки энергетической эффективности изменения режима работы турбины были выбраны величины: общий расход теплоты на турбоустановку Q_o , удельный расход топлива на выработку электрической энергии b и удельный расход теплоты на выработку электрической энергии q . В сравнительных расчетах в качестве абсолютных показателей были использованы такие величины, как изменение потерь теплоты в холодном источнике (конденсаторе), изменение расхода теплоты на турбину, изменение расхода топлива.

Из общего уравнения энергетического баланса турбоустановки следует, что общий расход теплоты на турбоустановку Q_o равен:

$$Q_o = Q_i + N_i + Q_k, \quad (1)$$

где N_i – внутренняя мощность турбины, МВт; Q_i – расход теплоты из отборов турбины; Q_k – расход теплоты в конденсатор, МВт.

Удельный расход теплоты на выработку электрической энергии q определяется как:

$$q = (Q_o - Q_i) / N_e, \quad (2)$$

где Q_o – расход теплоты на турбоустановку, Q_i – расход теплоты из отборов турбины, N_e – электрическая мощность [29].

При исследовании переменных режимов требуется, прежде всего, оценка изменения экономичности турбоустановки при изменении режима ее работы и использование абсолютного показателя q или его изменения оказывается неудобным. Более продуктивным в таких случаях является применение сравнительного показателя, а именно – удельного расхода тепла при изменении выработки электроэнергии:

$$q_{add} = (\Delta Q_o - \Delta Q_i) / \Delta N_e, \quad (3)$$

где $\Delta Q_o = Q_o - Q_{oo}$, $\Delta Q_i = Q_i - Q_{io}$; $\Delta N_e = N_e - N_{eo}$; Q_{oo} , Q_{io} , N_{eo} и Q_o , Q_i , N_e относятся соответственно к некоторому исходному и новому режимам работы турбины [29].

Величина q_{add} характеризует энергетическую эффективность того или иного изменения режима работы турбины, связанного с

изменением выработки либо отпуска электроэнергии.

Использование показателя q_{add} оказывает также весьма полезным для решения оптимизационных задач при совместной эксплуатации группы турбоустановок [29].

Углеродный след (Carbon Footprint) – это мера выбросов газов, которые вносят вклад в глобальное потепление, включая CO₂, метан и другие газы, освобождающиеся в результате деятельности человека [8]. Углеродный след – это важный инструмент для оценки организаций, товаров или услуг с точки зрения углеродного воздействия. Для теплоэнергетических объектов оценка углеродного следа является особенно важной, так как выбросы газов, связанных с производством электроэнергии и тепла, составляют значительную долю от общего объема выбросов в атмосферу.

Существует несколько подходов к оценке углеродного следа для теплоэнергетических объектов, а именно [33, 34]:

1. Метод определения потенциала глобального потепления;
2. Метод жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA);
3. Метод инвентаризации выбросов (Emissions Inventory);
4. Метод оценки углеродного следа по руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов, разработанный Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор метода зависит от целей оценки углеродного следа, доступности данных и бизнес-модели объекта. Важно также учитывать факторы, влияющие на выбросы газов, такие как тип источника (например, уголь, газ, ветер), процесс производства, а также расходы на энергию и использование ресурсов.

Методика МГЭИК по оценке углеродного следа от тепловых электростанций ISO 14067:2018 «Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification» широко используется во всем мире и представляет собой наиболее авторитетный и надежный инструмент для оценки влияния выбросов парниковых газов на климат. Российский аналог оценки углеродного следа – ГОСТ Р 56276–2014/ISO/TS 14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции» — был введен в действие в

2016 году. МГЭИК регулярно выпускает таблицы с конкретными значениями углеродного следа для энергоносителей, а в руководящих документах МГЭИК приведены формулы для оценки выбросов на всём жизненном цикле предприятия в энергетике [34].

Далее рассмотрен расчёт углеродного следа при стационарном сжигании топлива, так как он будет использован для дальнейших оценок.

Инвентаризация парниковых газов ПП модельной ТЭЦ составлена на основе стандарта ГОСТ Р ИСО 14064-1 – 2021 «Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации» и находится в гармонизации с другими стандартами, например, ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, IDT).

Прежде всего, для оценки углеродного следа необходимо иметь данные о количестве сожженного топлива для каждой категории источника, а также использовать коэффициенты выбросов по умолчанию, которые могут быть получены в соответствии с диапазоном значений неопределенности, представленных в разделе 2.3.2.1 [34]. Для этого используется соответствующее уравнение:

$$C = B \cdot K_{gg}, \quad (4)$$

где C - выбросы данного парникового газа (ПГ) по типу топлива (кг); B - количество сожженного топлива (ТДж); K_{gg} - коэффициент выбросов данного ПГ (greenhouse gas) по типу топлива (кг ПГ/ТДж. Коэффициенты для расчета взяты из таблицы 2.2 [34]. Для CO_2 – 56100 кг CO_2 /ТДж; для CH_4 – 1 кг ПГ/ТДж; для N_2O – 0,1 кг ПГ/ТДж.

С помощью потенциала глобального потепления (ППП) рассчитывают так называемый CO_2 -эквивалент (CO_2e) выбросов, т.е. данные о выбросах ПГ каждого вида пересчитываются в эквивалентные значения выбросов CO_2 с помощью специальных переводных GWIF-коэффициентов. Используются значения ППП для 100-летнего временного горизонта, приведенные в методических указаниях МГЭИК (они выражаются в относительных единицах и определяют, насколько более мощными являются эти газы по срав-

нению с углекислым газом (CO_2), взятым за базовое значение).

Для трех основных газов значения GWIF-коэффициентов следующие: CO_2 – 1, CH_4 – 25, N_2O – 298 [GOST Р ISO 14044-2019. National Standard of the Russian Federation. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (Standartinform, Moscow, 2019)]. Результаты по количеству выбросов ПГ представлены в CO_2 -эквиваленте. Другие виды ПГ: гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ), гексафторид серы (SF_6) и трифторид азота (NF_3) для рассматриваемых категорий выбросов ПГ не учитываются.

При пересчете выбросов парниковых газов N_2O и CH_4 мы умножаем их объемы на соответствующие GWIF-коэффициенты. Таким образом, мы можем оценить общий вклад этих газов в глобальное потепление на протяжении 100 лет. Потребление топлива имеет единицы измерения ТДж, поэтому для расчёта можем взять суммарные затраты теплоты. Тогда конечная формула всех выбросов C будет иметь вид:

$$C = Q_o \left(K_{CO_2} + K_{CH_4} \cdot GWIF_{CH_4} + K_{NO_2} \cdot GWIF_{NO_2} \right), \quad (5)$$

где Q_o – общие затраты тепла при производстве электрической и тепловой энергии; K_{CO_2} , K_{CH_4} , K_{NO_2} - коэффициенты выбросов парниковых газов, $GWIF_{CH_4}$, $GWIF_{NO_2}$ – переводные коэффициенты ППП каждого из парниковых газов.

Расчет режимов работы агрегатов модельной ТЭЦ выполняется на основании программ расчета турбоустановок Т-50-12.8, Т-185/220-12.8 и ПТ-80/100-12.8. Исследование производится для климатических условий г. Кирова, которые аналогичны таким условиям в странах Северной Европы. На первом этапе расчетного исследования оценивается общий энергетический и экологический эффект от теплофикации для модельной ТЭЦ. На втором этапе оценивается влияние той или иной долгосрочной эксплуатационной стратегии ведения режимов работы на ТЭЦ на величину углеродного следа при производстве энергетической продукции на примере турбоустановок разных типов.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОЙ И РАЗДЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА МОДЕЛЬНОЙ ТЭЦ, КЭС И КОТЕЛЬНОЙ

В качестве объекта исследования выбрана модельная ТЭС, работающая на газе, с турбоустановкой Т-50-12.8, которая может работать как в теплофикационном, так и конденсационном режимах, и водогрейная газовая котельная системы централизованного теплоснабжения. Сравнялось потребление первичной энергии для двух систем, работающих на органическом (ископаемом) топливе (природном газе) – ТЭЦ (комбинированное производства теплоты и электроэнергии) и система конденсационной ТЭС (турбина переводится в конденсационный режим работы) и котельной для производства теплоты. Для оценки энергетического эффекта от когенерации проведено сравнение нескольких наиболее характерных режимов раздельной и комбинированной выработки электрической и тепловой энергии по тепловому (при максимальном и номинальном расходе свежего пара) и электрическому графикам (соответствующим режимам работы в отопительный и неотопительный периоды). Были рассчитаны значения электрической мощности, отопительной нагрузки и общие затраты теплоты на турбоустановку. Принятые исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

В ходе сравнительных расчётных исследований на математической модели Т-50-12.8 полученные результаты комбинированной и раздельной выработки энергии представлены на рис.2 (по энергетическому ΔQ_o и экологическому критериям ΔC). Расчет углеродного следа C , у.е. (углеродная единица = 1 т CO_2 -эквивалента, $t CO_2e/s$), был выполнен по формуле (5), подробный расчет приведен ниже в качестве примера для одного из режимов (при расходе свежего пара $G_o=70$ кг/с, расходе сетевой воды $W=200$ кг/с, температуре обратной сетевой воды $\tau_2=50^\circ C$):

$$C = Q_o (K_{CO_2} + K_{CH_4} \cdot GWIF_{CH_4} + K_{NO_2} \cdot GWIF_{NO_2}) = 189.12 \cdot (56100 + 1.25 + 0.1 \cdot 298) = 10.62 \text{ kg } CO_2 / s = 0.01062 \text{ t } CO_2e / s = 0.01062 \cdot 3600 \cdot 24 \text{ t } CO_2e / day = 917.6 \text{ t } CO_2e / s.$$

Таблица 1².

Основные начальные параметры турбоустановки Т-50-12.8 при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии³

Параметры (parameters)	Значения (values)
Давление свежего пара p_o , МПа (fresh steam pressure p_o , МПа)	12.7
Температура свежего пара t_o , °C (fresh steam temperature t_o , °C)	555
Расход свежего пара G_o , кг/с (fresh steam consumption G_o , kg/s)	1 режим - 20 кг/с; 2 режим - 50 кг/с; 3 режим - 70 кг/с (1 mode - 20 kg/s; 2 mode - 50 kg/s; 3 mode - 70 kg/s)
Температура обратной сетевой воды τ_2 , °C (return delivery water temperature τ_2 , °C)	50
Расход сетевой воды W , кг/с (delivery water consumption W , kg/s)	диапазон от 200 до 800 кг/с с шагом 100 кг/с (range from 200 to 800 kg/s in increments of 100 kg/s)
Степень открытия регулирующей диафрагмы части низкого давления (РД ЧНД) $H_{РД ЧНД}$, % (Degree of opening of the sliding grid of the low-pressure section (SG LPS) $H_{SG LPS}$, %)	0% (при комбинированной выработке) 100% (при раздельной выработке) (0% (with combined generation) 100% (with separate generation))
КПД котлов, % (boiler efficiency, %)	92
КПД транспорта теплоты, % (heat transfer efficiency, %)	98

По полученным результатам можно заключить, что процесс одновременной выработки тепловой и электрической энергии имеет более высокую энергоэффективность по сравнению с раздельной схемой энергоснабжения, когда тепловая энергия производится на паровых или водогрейных котельных, а электрическая энергия поставляется из централизованных источников — тепловых электрических станций. Комбинированный метод производства электроэнергии и тепло-

^{2,3} Appendix 1

ты в одной энергоустановке снижает потребность в топливе примерно на 27-34% по сравнению с раздельным в широком диапазоне режимов работы, и наряду с этим уменьшает и углеродный след, величина снижения которого находится в этих же пределах (33-34%).

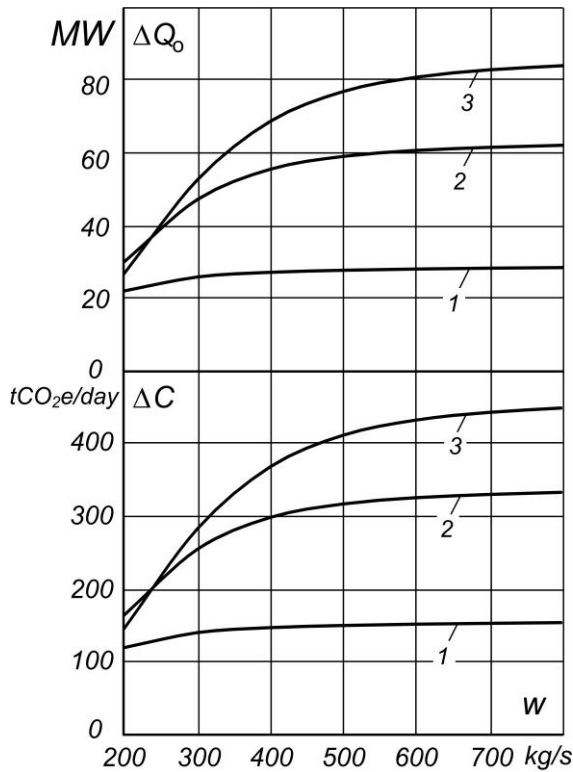


Рис. 2. Разница суммарных затрат теплоты и величины выбросов парниковых газов (в углеродных единицах у.е./сут. (tCO₂e/day)) на турбоустановку и котельную при раздельной и комбинированной выработке энергии и различных режимах работы, соответствующих расходу свежего пара G₀: 1 - 20 кг/с (kg/s), 2 - 50 кг/с (kg/s), 3 - 70 кг/с (kg/s), в зависимости от расхода сетевой воды W (kg/s).⁴

Таким образом, и в новых технологических условиях теплофикация сохраняет свою эффективность перед раздельной выработкой. В таких странах, как Германия, Великобритания, Дания, Швеция, Китай и другие, выбирают когенерацию как ключевую составляющую своей энергосистемы. Они активно внедряют и развивают возобновляемые источники энергии и уделяют большое внимание повышению эффективности своих ТЭЦ, что позволяет использовать вторичные ресурсы для производства тепла в комбинированном цикле. Как показывает их опыт, применение тригенерационных систем (вместо когенерационных) еще больше способствует повышению коэффициента использования

первичной энергии и снижению расхода традиционного топлива [6, 19, 20]. Однако, для точной оценки энергетической и экологической эффективности работы паротурбинных ТЭЦ при различных граничных условиях и для выбора обоснованных решений использование математических моделей турбоустановок с реальными характеристиками турбинных ступеней и отсеков может быть полезно.

РАСЧЕТНОЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Вторая часть исследования направлена на решение такой важной технико-экономической задачи, как оптимизация режимов работы теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с целью повышения эффективности использования природных ресурсов, которые служат топливом для ТЭЦ, и повышение не только экономической эффективности работы станции на рынке электроэнергии и тепла, но и снижения воздействия на окружающую среду.

Постановка задач оптимизации работы ТЭЦ имеет высокую вычислительную сложность, причинами которой являются: а) сложный вид целевой функции; б) большое число управляемых (варьируемых) параметров, которое зависит от применяемых математических моделей агрегатов ТЭЦ; в) большое число ограничений, накладываемых на значения управляемых параметров; г) зависимость критериев оптимальности работы ТЭЦ и граничных параметров от условий ее эксплуатации. Поэтому выбор математических моделей ТЭЦ является определяющим для достижения поставленной цели и зависит от особенностей решаемой задачи. Имеющаяся в распоряжении авторов библиотека математических моделей теплофикационных турбоустановок позволяет в полной мере решать задачи такого класса, что будет показано на нескольких частных примерах ниже.

В качестве первого примера проанализировано изменение величины Q₀ в зависимости от прироста электрической мощности в результате разного (параллельного и последовательного) открытия регулирующих диафрагм однотипных турбин при работе по электрическому графику (рис.3).

В соответствии с расчетами по модели рост мощности во всех условиях приводит к снижению величины Q₀. Данный вывод име-

⁴ Appendix 1

ет большое практическое значение, так как позволяет правильно организовать режим работы турбоустановок на ТЭЦ и снизить выбросы углекислого газа. Как показали проведенные исследования, более экономичным является последовательное открытие регулирующей диафрагмы (РД). Полученный эффект от оптимального распределения пиковой нагрузки между турбинами связан в первую очередь с нелинейным характером зависимости внутренней мощности части низкого давления (ЧНД) от расхода пара. В этой связи следует отметить, что уменьшение вентиляционных пропусков пара в ЧНД теплофикационных турбин не только повышает их экономичность в базовом режиме, но также расширяет возможность и увеличивает эффективность оптимизации переменных режимов работы турбоустановок. Из нормативных характеристик при этом следует, что приоткрывать РД нужно параллельно на всех турбоагрегатах, т.е. оптимальным является как будто бы равномерное распределение нагрузки, что и происходит в настоящее время в большинстве случаев при эксплуатации одинаковых турбин.

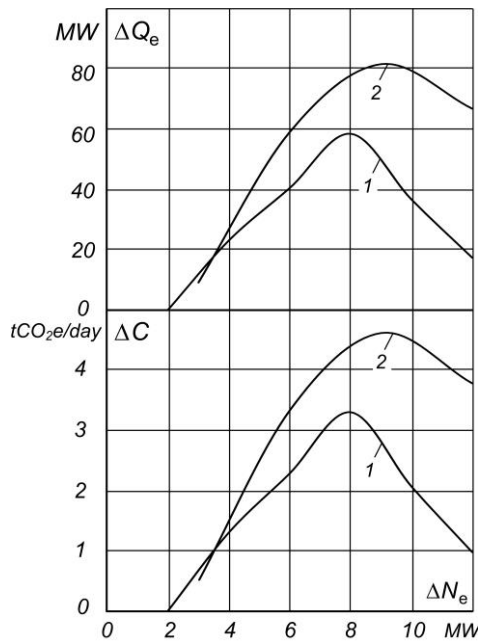


Рис. 3. Сравнительное изменение энергетической эффективности (затрат теплоты на выработку электроэнергии ΔQ_e) и величины выбросов парниковых газов (в углеродных единицах у.е./сут. (tCO_2e/day)) при оптимизации распределения пиковой нагрузки между двумя (1) и тремя (2) однотипными турбинами Т-50-12.8 при последовательной и параллельной загрузке в зависимости от прироста электрической мощности ΔN_e .⁵

В качестве второго примера эффективной организации эксплуатации выполнена оценка эффективности перераспределения тепловой и электрической нагрузки между различными турбоустановками в пределах одной ТЭЦ. Граничные условия моделирования нагрузок и режимов работы агрегатов ТЭЦ соответствуют наиболее типичным для Кировских ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5 условиям. В неотапительный период ТЭЦ работает по электрическому графику (то есть с заданной суммарной электрической мощностью (ΣN_e)) при относительно малом и неизменном отпуске теплоты для нужд горячего водоснабжения. В таких условиях появляется возможность оптимизации за счёт перераспределения как расхода сетевой воды между турбоустановками, так и их электрической мощности. В таблице 2 и на рис.4 приведены результаты расчётных исследований как электрической нагрузки, так и расхода сетевой воды между различными турбоустановками при определённых уровнях ΣN_e .

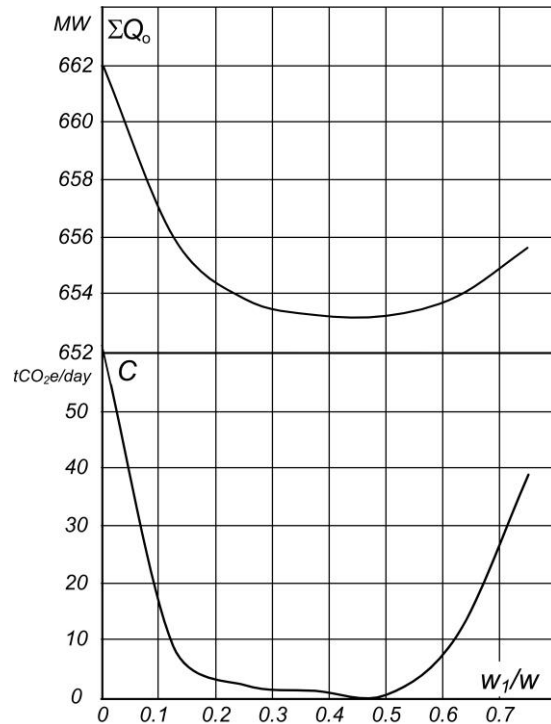


Рис. 4. Возможная эффективность перераспределения расхода сетевой воды между турбоустановками №1 и №3 и сравнительное изменение величины углеродного следа в режимах работы в неотапительный период. Суммарная мощность турбоустановок 240 МВт.⁶

Таблица 2⁷.

Результаты расчетного исследования перераспределения расходов сетевой воды при совместной работе ТГ №1 и ТГ №3. Суммарная электрическая мощность 240 МВт.⁸

Режим (mode)	w ₁ т/ч (t/h)	w ₃ т/ч (t/h)	ΣG_o , кг/с (kg/s)	ΣQ_o , МВт (MW)	ΔQ_o , МВт (MW)	$N_{e1}/\Sigma N_e$	C, у.е./сут. (t CO ₂ e/day)
1	1000	3000	264,68	662,87	7,195	0,460	34,91
2			262,44	661,25	5,578	0,417	27,06
3			258,88	656,37	0,698	0,354	3,39
4			257,91	655,63	-0,038	0,295	-0,18
1	1500	2500	260,46	657,63	1,953	0,416	9,48
2			258,32	655,52	-0,154	0,354	-0,75
3			257,37	654,55	-1,118	0,292	-5,42
4			257,12	653,93	-1,740	0,236	-8,44
1	2000	2000	258,41	655,67	0,000	0,367	0
2			257,11	654,01	-1,658	0,292	-8,04
3			256,88	653,17	-2,506	0,229	-12,16
4			257,72	653,26	-2,417	0,173	-11,73
1	2500	1500	257,89	655,80	0,127	0,310	0,62
2			257,19	653,29	-2,386	0,229	-11,58
3			259,29	655,18	-0,487	0,167	-2,36
4			260,88	655,58	-0,091	0,112	-0,44
1	3000	1000	257,19	653,84	-1,829	0,260	-8,87
2			259,08	655,11	-0,560	0,188	-2,72
3			261,02	655,99	0,320	0,125	1,55
4			263,04	655,52	-0,154	0,053	-0,75
1	3500	500	259,42	655,97	0,293	0,203	1,42
2			261,28	657,07	1,393	0,146	6,76
3			262,87	656,57	0,902	0,083	4,38
4			265,36	657,27	1,594	0,019	7,73
1	4000	0	296,02	711,13	55,455	0,656	55,46
2			272,84	683,50	27,823	0,472	27,82
3			261,01	661,96	6,292	0,265	6,29
4			262,98	655,65	-0,027	0,083	-0,027

Как правило, в летний период в эксплуатации находятся только два турбоагрегата. Поэтому в качестве примера проведён расчёт одновременной работы турбоагрегата (ТГ) №1 (типа ПТ-80/100-12.8) и ТГ №3 (типа Т-185/220-12.8). Суммарная величина расчетной электрической нагрузки потребителей принята равной 240 МВт, чему соответствует состав основного оборудования ТЭЦ с тремя турбинами (на ТЭЦ работает два турбоагре-

гата Т-185/220-12.8 и один ПТ-80/100-12.8). За счет перераспределения расхода сетевой воды между ними тепловая и электрическая нагрузка агрегатов ТЭЦ изменяется, что приводит к изменениям суммарного расхода теплоты на турбоустановки, потерь тепла в конденсаторе и, как следствие, углеродного следа. Причем для расчета изменения режимов работы ТЭЦ эти потери рассчитываются для каждого значения тепловой нагрузки.

^{7,8} Appendix 1

Представленные данные характеризуют влияние перераспределения расхода сетевой воды между турбинами в граничных режимах, т.е. в режимах с минимальным суммарным расходом теплоты топлива ΣQ_o , которые, как правило, достигаются при полном открытии РД на одной из турбин. Они показывают, что перераспределение расходов сетевой воды оказывает достаточно существенное влияние на экономичность работы ТЭЦ. Из данных, приведённых на рис.4, следует, что при определённых и неизменных сочетаниях расходов сетевой воды (w_1/w) имеет место тенденция к снижению общих затрат теплоты (ΣQ_o) при равномерном распределении расхода сетевой воды между турбоустановками. В то же время перевод одной из турбин в чисто конденсационный режим и передача всей тепловой нагрузки на другую всегда приводит к снижению экономичности работы ТЭЦ. Эти же закономерности наблюдаются при анализе величины углеродного следа в соответствующих режимах.

В качестве третьего примера проведена оценка эффективности некоторых изменений при эксплуатации сетевых подогревателей установок. Традиционно, в летний период теплофикационные турбоустановки эксплуатируются с одноступенчатым подогревом сетевой воды в нижнем сетевом подогревателе. В силу относительно малых тепловых нагрузок одноступенчатый подогрев действительно может обеспечить заданный температурный график. Однако при этом возникает ситуация, когда при отпуске небольшого расхода пара в нижний отбор имеет место дросселирование в регулирующей диафрагме (РД) значительного конденсационного потока. Данное обстоятельство приводит к снижению относительного внутреннего КПД турбоустановки, а значит и её экономичности.

Представляется, что более эффективным в указанных условиях является двухступенчатый подогрев сетевой воды, то есть последовательно в нижнем и в верхнем сетевых подогревателях. При этом для поддержания заданного отпуска тепла возможно либо применение обвода сетевой воды помимо сетевых подогревателей, либо регулируемое ограничение подачи пара в верхний сетевой подогреватель. Для оценки возможности эффективности такого подхода были проведены соответствующие расчёты для двух турбо-

установок типа Т-185/220-12.8, результаты которых представлены на рис. 5–6.

Представленные данные свидетельствуют о том, что в реальных условиях эксплуатации переход с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды даёт значительное снижение расхода тепла на турбоустановки в условиях сохранения тепловой нагрузки и электрической мощности. При этом возможная экономия топлива ΔB может достигать для турбин различного типа 0,5-2 т у.т./ч, а сокращение углеродного следа до 170-900 у.е./мес. соответственно. Если принять во внимание стоимость 1 у.е. на рынке в размере порядка €85, то экономический эффект от внедрения этих мероприятий может составить от 14 до 76 тыс. € в месяц на одну турбоустановку.

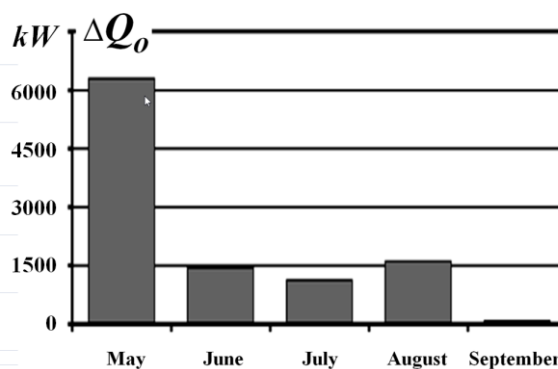


Рис. 5. Энергетическая эффективность перехода с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды в неотапливаемый период работы двух турбоустановок. Изменение расхода теплоты на турбины.⁹

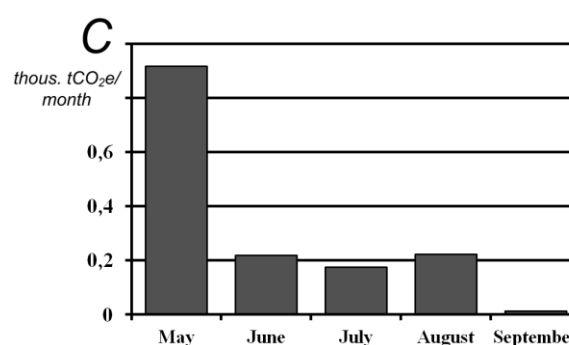


Рис. 6. Экологическая эффективность перехода с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды в неотапливаемый период работы двух турбоустановок. Изменение величины углеродного следа.¹⁰

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о принципиальной возможности оптимизации режимов работы по электрическому графику группы теплофика-

ционных турбоустановок, получать экономию первичного топлива и сокращать выброса парниковых газов практически без дополнительных капитальных затрат. Все это достигается путем использования малозатратных способов изменения режимных параметров и регулирования нагрузок, способствует повышению конкурентоспособности ТЭЦ на рынках тепловой и электрической энергии и снижению налоговой нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Политика в области энергетики в краткосрочной перспективе свидетельствует о невозможности для многих стран мира полностью избежать сооружения и работы тепловых электростанций. Однако существуют способы снизить негативное воздействие таких электростанций на окружающую среду. Среди них можно выделить реструктуризацию энергетической отрасли (увеличение доли когенерационных установок при строительстве новых источников производства электрической энергии), а также снижение расхода органического топлива при эксплуатации ТЭЦ за счет проведения режимных оптимизационных мероприятий. Исследование, проведенное в рамках данной работы, представляет данные о снижении парниковых выбросов от ТЭЦ на основе оптимального ведения режимов работы станции, что ранее не исследовалось. Основные выводы и рекомендации сводятся к следующим положениям.

1. Разработан и исследован методологический подход к комплексной оценке энергетической и экологической эффективности работы ТЭЦ на основе математического моделирования, позволяющий дать теоретическое обоснование предлагаемых решений по эксплуатации ТЭЦ и возможность исследования влияния различных факторов на величину углеродного следа. Показано, что он позволяет решать характерные задачи по оптимизации режимов работы станции, такие как перераспределение тепловых и электрических нагрузок между турбоустановками, расходов сетевой воды при разных граничных условиях (постоянство вырабатываемой электроэнергии или общего расхода топлива на станции), определение порядка загрузки турбоустановок в пиковые периоды. Предложенный подход был апробирован на ряде ТЭЦ г.Кирова и его эффективность подтверждена детальными расчетно-экспериментальными исследованиями, результаты которых приве-

дены в статье. Изложен алгоритм построения математических моделей для любых типов теплофикационных турбин, основанный на применении реальных энергетических характеристик оборудования, приведенных к универсальному математическому виду.

2. Обоснована применимость изложенного подхода также для количественной экологической оценки (по величине снижения выбросов парниковых газов) наиболее эффективных режимов работы теплофикационных турбоустановок в периоды как пиковых, так и частичных нагрузок в фактических условиях эксплуатации ТЭЦ.

3. На примерах теплофикационных паротурбинных установок типов ПТ-80/100-12.8, Т-50-12.8 и Т-185/220-12.8 представлен сравнительный анализ энергетических и экологических (по величине углеродного следа) показателей в характерных режимах работы и при оптимизации, полученных в результате расчета с использованием разработанных математических моделей. Установлено, что правильный выбор последовательности загрузки турбоустановок различных типов и степени использования паротурбинного оборудования ТЭЦ, в среднем, позволяет снизить удельный расход топлива на отпуск электроэнергии, и, следовательно, величину выбросов парниковых газов для большинства реальных режимов примерно на 3-5%.

4. Примерами, приведенными выше, подтверждена возможность использования предложенной методики и критериев определения энергетической эффективности и разработанных математических моделей для решения задач управления оборудованием ТЭЦ для оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами в условиях выполнения существующих графиков нагрузок. Перераспределение нагрузок между турбоагрегатами в пользу наиболее мощных турбин либо коррекция по расходам и температуре прямой и обратной сетевой воды на источнике приводит к сокращению углеродного следа, в среднем, на 5-10%.

5. Установлено, что при сохранении суммарной тепловой и электрической нагрузок потребителей снижение удельных затрат на производство электроэнергии в целом по электрической станции может быть достигнуто за счет изменения тепловой схемы турбоустановки, а именно, за счет перехода с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды, прежде всего в неотапитель-

ный период. При этом возможная экономия топлива может достигать для турбин различного типа 0,5 – 2 т у.т./ч, а сокращение углеродного следа – до 170-900 у.е./мес. соответственно.

6. По результатам проведенного исследования можно заключить, что разработанные и обоснованные рекомендации, относящиеся к оптимизации распределения нагрузок между турбоагрегатами, и предложения по рациональным режимам их эксплуатации позволяют уменьшить неблагоприятное воздействие ТЭЦ на окружающую среду и повысить эффективность производства и отпуска тепловой и электрической энергии при относительно небольших затратах на их реализацию.

Таким образом, в результате выполненного исследования установлена применимость полученных результатов при постановке и решении задач оптимизации режимов работы ТЭЦ с учетом расчета снижения выбросов парниковых газов, в том числе за счет: во-первых, определения граничных условий таких задач; во-вторых, выбора вида математических моделей оборудования и установления требований к их точности; в-третьих, использования методики расчета энергетического эффекта и величины снижения углеродного следа.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** General view of the basic thermal scheme of the turbine unit.

^{2,3}**Table 1.** Basic initial parameters of the T-50-12.8 turbine unit for combined generation of electrical and thermal energy.

⁴**Fig. 2.** The difference in the total heat costs and the amount of greenhouse gas emissions (in carbon units tCO₂e/day) for the turbine unit and the boiler plant with separate and combined energy production and various operating modes corresponding to the fresh steam consumption G₀: 1 - 20 kg/s, 2 - 50 kg/s, 3 - 70 kg/s, depending on the flow of delivery water W (kg/s).

⁵**Fig. 3.** Comparative change in energy efficiency (heat consumption for electricity generation ΔQ_e) and the amount of greenhouse gas emissions (in carbon units tCO₂e/day) when optimizing the distribution of peak load between two (1) and three (2) turbines of the same type T-50-12.8 with sequential and parallel loading depending on the increase in electrical power ΔN_e.

⁶**Fig. 4.** Possible efficiency of redistribution of delivery water consumption between turbine units No. 1 and No. 3 and comparative changes in the carbon footprint in operating modes during the non-heating

period. The total electric power of turbine units is 240 MW.

^{7,8}**Table 2.** Results of a computational study of the redistribution of delivery water costs during the joint operation of TG No. 1 and TG No. 3. Total electric power is 240 MW.

⁹**Fig. 5.** Energy efficiency of the transition from one-stage to two-stage heating of delivery water during the non-heating period of operation of two turbine units. Change in heat consumption to turbines.

¹⁰**Fig. 6.** Environmental efficiency of the transition from one-stage to two-stage heating of delivery water during the non-heating period of operation of two turbine units. Change in carbon footprint.

Литература (References)

- [1] Kusch-Brandt S. Cogeneration (combined heat and power production) in Europe. *The 5th International Virtual Research Conference In Technical Disciplines*, 2017, pp. 52-55. doi: 10.18638/rcitd.2017.5.1.105.
- [2] Muncán V., Mujan I., Andjelkovic A., Macura D. Current trends of district heating and cooling in Europe. *8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2023, pp. 1-6. doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193702.
- [3] Stepanov D.V., Rezydent N.V. Efficiency of Gas-Piston Cogeneration Facilities in the Systems of Centralized Heat Supply. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2023, vol. 167, pp. 36-41. doi: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-36-41.
- [4] Huang X., Luo X., Chena J., Yanga Zh., Chena Y., Ponce-Ortegab J., El-Halwagic M.M. Synthesis and dual-objective optimization of industrial combined heat and power plants compromising the water-energy nexus. *Applied Energy*, 2018, vol. 224, pp. 448-468. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.095
- [5] Abbasi M., Deymi-Dashtebayaz M., Gord M., Abbasi S., Assessment of a CHP system based on economical, fuel consumption and environmental considerations. *International Journal of Global Warming*, 2015, vol. 7, pp. 256. doi: 10.1504/IJGW.2015.067757.
- [6] Wang J., Jing Y., Zhang Ch. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes. *Applied Energy - APPL ENERG*, 2011, vol. 88, pp. 4621-4631. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.007.
- [7] Fumo N., Mago P., Chamra L. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 2344-2350. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.007.
- [8] Şeneren M., Yiğit M. The Carbon Footprint Reduction Related to Domestic Heating Using Thermal Power Plant Waste Heat. *International Journal of Environment and Climate Change*,

- 2023, vol. 13, pp. 716-723. doi: 10.9734/ijec/2023/v13i71924.
- [9] Lou L., Mu H., Chen X., Li H. The Carbon Footprint Analysis of Thermal Power Plants. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 807-809, pp. 814-821. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.807-809.814.
- [10] Özdemir A. Decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions in electricity generation by primary fossil fuels in Turkey. *Energy*, 2023, vol. 273, pp. 127264. doi: 10.1016/j.energy.2023.127264.
- [11] Hu W., Xia X. Carbon Footprint Tracking and Quantitative Analysis Model for Power Industry Based on Thermodynamics. *International Journal of Heat and Technology*, 2022, vol. 40, pp. 1166-1174. doi: 10.18280/ijht.400507.
- [12] Zhang Ch., Zou X., Lin Ch. Carbon Footprint Prediction of Thermal Power Industry under the Dual-Carbon Target: A Case Study of Zhejiang Province, China. *Sustainability*, 2023, vol. 15, pp. 3280. doi: 10.3390/su15043280.
- [13] Raghuvanshi Sh., Chandra A. Carbon dioxide emissions from coal based power generation in India. *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, pp. 427-441. doi: 10.1016/j.enconman.2005.05.007.
- [14] Mitrova T., Melnikov Y. Energy transition in Russia. *Energy Transit*, 2019, no. 3, pp. 73–80. doi: 10.1007/s41825-019-00016-8
- [15] Smil, V. *Energy and civilization: a history*. MIT Press, US, 2018. p. 568.
- [16] Schiffer, HW., Trüby, J. A review of the German energy transition: taking stock, looking ahead, and drawing conclusions for the Middle East and North Africa. *Energy Transit*, 2018, no. 2, pp. 1–14. doi: 10.1007/s41825-018-0010-2
- [17] Haroon H., Saleem F., Arif H., Imran I. Evaluation of Catastrophic Global Warming due to Coal Combustion, Paradigm of South Asia. *International Journal of Innovations in Science and Technology*, 2021, no. 3, pp. 198-207. doi: 10.33411/IJIST/2021030406.
- [18] Henderson, J., Mitrova T. Implications of the Global Energy Transition on Russia. *The Geopolitics of the Global Energy Transition*, 2020, pp. 93-114. doi: 10.1007/978-3-030-39066-2_5.
- [19] Mo J., Zhang W., Tu Q., Yuan J., Duan H., Fan Y., Pan J., Zhang J., Meng Zh. The role of national carbon pricing in phasing out China's coal power. *iScience*, 2021, vol. 24, pp. 102655. doi: 10.1016/j.isci.2021.102655.
- [20] Rodrigues J., Wang J., Behrens P., De Boer P. Drivers of CO2 emissions from electricity generation in the European Union 2000–2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 133, pp. 104-110. doi: 10.1016/j.rser.2020.110104.
- [21] Qing Cao Zu. The Characteristic of Changing Behaviour of Steam Turbine. *Water Conservancy and Electric Power Press*, 1991. p.141. (in Chinese).
- [22] Tumanovskii A.G. Prospects for the development of coal-steam plants in Russia. *Thermal Engineering*, 2017, no. 64, pp. 399-407. doi: 10.1134/S004036361706008X
- [23] Tzolakis G., Papanikolaou P., Kolokotronis D., Samaras N., Tzourlidakis A., Tomboulides A. Simulation of a coal-fired power plant using mathematical programming algorithms in order to optimize its efficiency. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 256-267. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.051
- [24] Shempelev A.G. Razrabotka i aprobaciya metodiki vvyasneniya prichin ogranichenij moshchnosti turbostanovki na osnove utochnennoj matematicheskoy modeli ee kondensatora [Development and approbation of methodology aimed to define the reasons for turbine unit capacity limitation based on the specified mathematical model of its condenser], *Problems of the Regional Energetics*, 2021, no. 4, pp. 79–87. doi: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.08 (in Russian)
- [25] Carcascia C., Cosib L., Ferrarob R., Pacificic B. Effect of a real steam turbine on thermoeconomic analysis of combined cycle power plants. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 32-47. doi: 10.1016/j.energy.2017.07.048
- [26] Wolfrum Ph., Kautz M., Schäfer J. Smart Operation of CHP Units. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, vol. 45, iss. 21, pp. 61-66. doi: 10.3182/20120902-4-FR-2032.00013
- [27] Luo X., Zhang B., Chena Y., Moa S. Operational planning optimization of multiple interconnected steam power plants considering environmental costs. *Energy*, 2012, vol. 37, pp. 549-561. doi: 10.1016/j.energy.2011.10.049
- [28] Stodola A. *Steam and Gas Turbines*. New York, Peter Smith, 1945. 1356 p.
- [29] Simoyu L.L., Efros E.I., Gutorov V.F., Lagoon V.P. *Teplofikacionnye parovye turbiny: povyslenie ekonomichnosti i nadezhnosti* [Heating steam turbines: increase in economy and reliability]. St. Petersburg: Energotech, 2001. 208 p. (in Russian)
- [30] Choa H., Lucka R., Eksioglub S.D., Chamraa L.M. Cost-optimized real-time operation of CHP systems. *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41, iss. 4, pp. 445-451. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.011
- [31] Kultyshev A.Y., Stepanov M.Y., Linder T.Y. Diagrams of regimes of cogeneration steam turbines for combined-cycle power plants. *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, no. 12, pp. 913-918. doi: 10.1134/S0040601512120051

- [32] Kumar R. Thermodynamic Modeling and Validation of a 210-MW Capacity Coal-Fired Power Plant. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, 2016, vol. 40, pp. 233-242. doi: 10.1007/s40997-016-0025-5
- [33] EIB Project Carbon Footprint Methodologies. Methodologies for the assessment of project greenhouse gas emissions and emission variations. Version 11.2. European Investment Bank, 2022.
- [34] Rukovodyashchie printsipy natsional'nykh inventarizatsii parnikovykh gazov MGEIK, 2006. Podgotovleno Programmoi MGEIK po natsional'nym kadastram parnikovykh gazov [IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventories Program] // Iggleston Kh.S., Buendia L., Miva K., Ngara T. i Tanabe K. (redaktery). T. 5. Otkhody. Yaponiya: IGES, 2006. p. 165.
- [35] Iliev I., Beloev H., Ilieva D., Badur J. A novel method for calculating greenhouse gas emissions from the combustion of energy fuels. *Archives of Thermodynamics*, 2023, vol. 43, pp. 3-20. doi: 10.24425/ather.2022.144404.

Сведения об авторах.



Суворов Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплотехники и гидравлики ВятГУ. Научные интересы - оптимизация режимов работы ТЭЦ, энергосбережение
E-mail: dmilar@mail.ru



Татарина Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидравлики ВятГУ. Научные интересы - математическое моделирование турбоустановок ТЭЦ
E-mail: nvt_s@mail.ru

The Energy-Saving Control Criterion for Impact Crushing Machines

Chausov S., Sabo A., Popova I.

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Zaporizhzhia, Ukraine

Budko V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the article is to substantiate the use of a new criterion for controlling the grinding technological process to improve the use of electrical energy. The subject of the study is the process of using electrical energy in impact grinding machines. The set goal is achieved by solving the following problems: analyzing the energy of the grinding process, determining the parameters of raw materials and operating modes of the electric drive that affect the efficiency of electrical energy usage. Based on theoretical research, a mathematical model of energy consumption in grinding processes has been developed. Analytical studies of the resulting mathematical model showed the nonlinear extreme nature of the specific energy consumption of the grinding process with changing raw material parameters and operating modes. This creates the prerequisites both for using specific electrical energy costs as a control criterion and for the use a controlled electric drive to achieve maximum energy savings. The most important result is that the operating modes of grinding machines could be established by more efficient use of electrical energy. The significance of the work lies in the fact that by adapting the operating modes of the electric drive to the current parameters of the raw materials and the state of the equipment make possible to reduce the specific electrical energy consumption up to 15% and this is the basis for using a criterion based on specific costs in control systems for technological processes with grinding impact machines. For further application of the obtained results it is necessary to conduct experimental studies to confirm the increase in the efficiency of electrical energy use.

Keywords: control criterion, energy consumption, mathematical model, adjustable electric drive, grinding.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.12>

UDC: 631.363.25:681.5.017

Criteriul de control al economisirii energiei pentru mașinile de șlefuit cu impact

Ciausov S.V., Sabo A.G., Popova I.A.

Universitatea Agrotehologică de Stat din Taurida, nuBudico

Budico V.I.

Universitatea Națională Tehnică a Ucrainei „Institutul Politehnic din Kiev numit după Igor Sikorsky”,
Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul articolului este de a fundamenta utilizarea unui nou criteriu de control al procesului tehnologic de măcinare pentru a îmbunătăți utilizarea energiei electrice. Subiectul studiului este procesul de utilizare a energiei electrice în mașinile de șlefuit cu impact. Scopul stabilit este atins prin rezolvarea următoarelor probleme: analiza energiei procesului de măcinare, determinarea parametrilor materiilor prime și a modurilor de funcționare ale acționării electrice care afectează eficiența utilizării energiei electrice. Pe baza cercetărilor teoretice, a fost elaborat un model matematic al consumului de energie în procesele de măcinare. Studiile analitice ale modelului matematic rezultat au arătat natura extremă neliniară a consumului specific de energie al procesului de măcinare cu modificarea parametrilor materiilor prime și a modurilor de operare. Acest lucru creează premisele atât pentru utilizarea costurilor specifice cu energia electrică ca criteriu de control, cât și pentru utilizarea unei acționări electrice controlate pentru a obține economii maxime de energie. Cel mai important rezultat este că modurile de funcționare ale mașinilor de șlefuit ar putea fi stabilite printr-o utilizare mai eficientă a energiei electrice. Semnificația lucrării constă în faptul că, prin adaptarea modurilor de funcționare ale acționării electrice la parametrii actuali ai materiilor prime și starea echipamentului fac posibilă reducerea consumului specific de energie electrică cu până la 15% și acesta este baza de utilizare a unui criteriu bazat pe costuri specifice în sistemele de control pentru procesele tehnologice cu mașini de șlefuit cu impact. Pentru aplicarea în continuare a rezultatelor obținute este necesară efectuarea unor studii experimentale care să confirme creșterea eficienței utilizării energiei electrice.

Cuvinte-cheie: criteriu de control, consum de energie, model matematic, acționare electrică reglabilă, mărunțire.

Энергосберегающий критерий управления измельчающими машинами ударного действия
Чаусов С.В., Сабо А.Г., Попова И.А.

Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного,
 Запорожье, Украина

Будько В.И.

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина

Аннотация. Целью статьи является обоснование применения нового критерия управления технологическим процессом измельчения, который позволит достичь улучшения использования электрической энергии. Предметом исследования является процесс использования электрической энергии в измельчающих машинах ударного действия. Поставленная цель достигается решением следующих задач: анализом энергетики процесса измельчения, определением параметров сырья и режимов работы электропривода, влияющих на эффективность использования электрической энергии. На основании теоретических исследований разработана математическая модель энергозатрат в процессах измельчения. Исследования полученной математической модели показали нелинейный экстремальный характер удельных энергозатрат процесса измельчения при изменяющихся параметрах сырья и режимах работы. Это создает предпосылки как для использования в качестве критерия управления удельных затрат электрической энергии, так и необходимости применения регулируемого электропривода для достижения максимального энергосбережения. Наиболее важным результатом является то, что установлено наличие режимов работы измельчающих машин, позволяющих более эффективно использовать электрическую энергию, затрачиваемую на технологический процесс. Значимость работы состоит в том, что за счет адаптации режимов работы электропривода к текущим параметрам сырья и состоянию оборудования достигается снижение удельных расходов электрической энергии на величину до 15%, а это является основой для использования критерия на основе удельных затрат в системах управления технологическими процессами с измельчающими машинами ударного действия. Для дальнейшего применения полученных результатов необходимо проведение экспериментальных исследований с подтверждением повышения эффективности использования электрической энергии.

Ключевые слова: критерий управления, энергозатраты, математическая модель, регулируемый электропривод, измельчение.

INTRODUCTION

The search for methods and means of reducing energy consumption for technological requirements is a problem that will be relevant both in the present and in the near future. The solution to the problem lies not only in the search for non-traditional sources of electricity and methods of their use, but also in an in-depth study of the technological process energy. At the same time, the implementation of energy saving in technological systems is a more difficult task. As a rule, this is due to the presence of certain restrictions on the operation of machine drive modes that is determined by technological requirements for input raw materials, intermediate stages of the process and finished products. Thus, to solve the problem of finding energy-saving methods in impact grinding machines with an adjustable electric drive, the following problems must be solved:

1) analyze the energetics of work processes that take place in impact crushers and determine the main factors affecting the energy consumption of the process;

2) develop a theoretical model that allows you to determine the relationship between raw material parameters, equipment operating

modes, and energy consumption for work processes in impact crushers;

3) conduct an analytical study of the model and establish the nature of the influence of operating modes and raw material parameters on energy consumption in impact crushers;

4) to establish the presence of the prerequisites for influencing the work process energy consumption in impact crushers due to the change of operating modes and the application of new control criteria when using an adjustable electric drive;

5) to determine a new criterion for energy-saving control of impact crushers and justify the feasibility of its use in the control of technological systems with an adjustable electric drive;

6) to draw conclusions and give an assessment of the application of the energy-saving criterion for the control of the impact crushing machines with an adjustable electric drive.

Bringing the input raw materials to the required granulometric composition is one of the key technological operations in the food, fodder and mining industries of the national economy. In the vast majority, this technological stage is the foundation for ensuring the quality indicators of finished products within the given limits.

At the same time, as the analysis of modern production shows, this technological operation is the stage of the technological process in which the energy intensity is the greatest [1, 2]. It is natural that the general situation in today's energy resources market determines the constant scientific interest in conducting research in the field of energy efficiency analysis of grinding technological processes. This is evidenced by the number of scientific studies in this direction in recent years [1, 3, 4-7].

As a rule, all modern technological processes are controlled by automatic regulation systems, the behavior of which is based on a certain criterion or a system of criteria [1, 5-9].

Thus, in work [1] the authors analyzed various strategies for controlling the grinding process and gave their comparative analysis. The study of the processes occurring during grinding was given by the authors in [10] and it has as a criterion the achievement of maximum equipment performance. The search for a solution to the problem of overall economic efficiency of production is also proposed as a management criterion in work [8]. The authors of the work proposed an extreme search management system based on an economic quality criterion.

The research results presented by the authors in [3] give reason to assume an extreme nature for optimal operating modes and their instability when the composition and properties of raw materials change. This article also talks about the shortcomings and difficulties encountered when using standard control criteria based on the load current of the electric drive of grinding machines.

The research results presented in [5] are of particular interest. Here it was considered the influence of the design parameters of machines for grinding biomass on the specific costs of electrical energy. The research materials make it possible to significantly narrow the range of many factors influencing energy costs.

It should be noted that the analysis of the energy efficiency of the technological process from the point of view of the electrical energy use efficiency is practically not used in the control criteria. The need to conduct research in order to develop such a criterion becomes even more relevant in view of both the situation on the energy market and from the point of view of the constant increase in the electricity cost share in the production total costs [12, 13].

At the same time, scientific research in the field of studying the working processes of impact crushers provides a stable basis for the analysis of the working process energy use efficiency and the synthesis of the appropriate control criterion [14-16]. The expediency for a such research conducting is additionally supported by the availability of the modern technical tools in the field of adjustable electric drives and their control hardware. It becomes possible to find a relatively simple implementation for the complex technological system disintegration into elementary operations based on the architecture using local control controllers, so it makes possible some significantly simplify for the solution to improve the electrical energy use efficiency due to its implementation separately in each technological unit, but with the presence of appropriate control criteria.

I. RESEARCH METHODS

Impact grinding machines used in flow processing systems can be classified by the presence of a corrugated deck, the angle of coverage of the sieve and the direction of feed of raw materials into the grinding chamber [3, 11]. At the same time, regardless of the design features of the machine, the process of grinding raw materials can be divided into two stages: grinding by hitting the raw materials against the hammer and deck and subsequent processing by grinding in the annular area formed by the rotating edges of the hammers and the surface of the sieve [10,11]. In this way, the use of electric power for grinding work processes in impact crushers can be described by the equation:

$$W_{cr} = W_{idl} + W_{ht} + W_{fr}, \quad (1)$$

here W_{ht} – the energy consumption when the hammers of the rotor collide with the flow of raw materials fed into the crushing chamber, J; W_{fr} – energy consumption in the annular layer, J; W_{idl} – idling energy consumption, J.

In order to obtain the necessary results, let us consider the processes in more detail. When raw materials enter the working chamber of the machine, a collision of raw material particles with the rotor hammers occurs. As a result, the particles either collapse or bounce off the hammer. In this case, an exchange of energy and momentum occurs between the hammer and the particle. As a result, the rotor loses energy and slows down, and the energy transferred to the particle goes towards its destruction and (or)

heating [11]. This case represents a partially elastic collision of two bodies. Suppose that the impact of a particle on a hammer is central - then according to [11] the energy consumption during the collision of two bodies can be described by the equation:

$$\Delta W = \frac{m_1 m_0}{2(m_1 + m_0)} (v_m - v_0)^2 (1 - k^2), \quad (2)$$

Here m_1 – hammer mass, kg; m_0 – particle mass, kg; v_m – linear speed of the hammer before co-impact, m/s; v_0 – linear velocity of the

particle before the collision, m/s; k – the recovery coefficient determined by the type of raw material and which characterizes the degree of elasticity [11].

The material flow moves at speed \bar{v}_0 under the axial feed (see Fig. 1a, point 1). At the same time, the tangential component of the initial velocity is much smaller than the radial one \bar{v}_{0p} . Besides, the velocity of the particle before the collision is much smaller than the velocity of the hammer ($\bar{v}_0 \ll \bar{v}_m$), so in equation (2) it can be assumed that $v_0 \approx 0$.

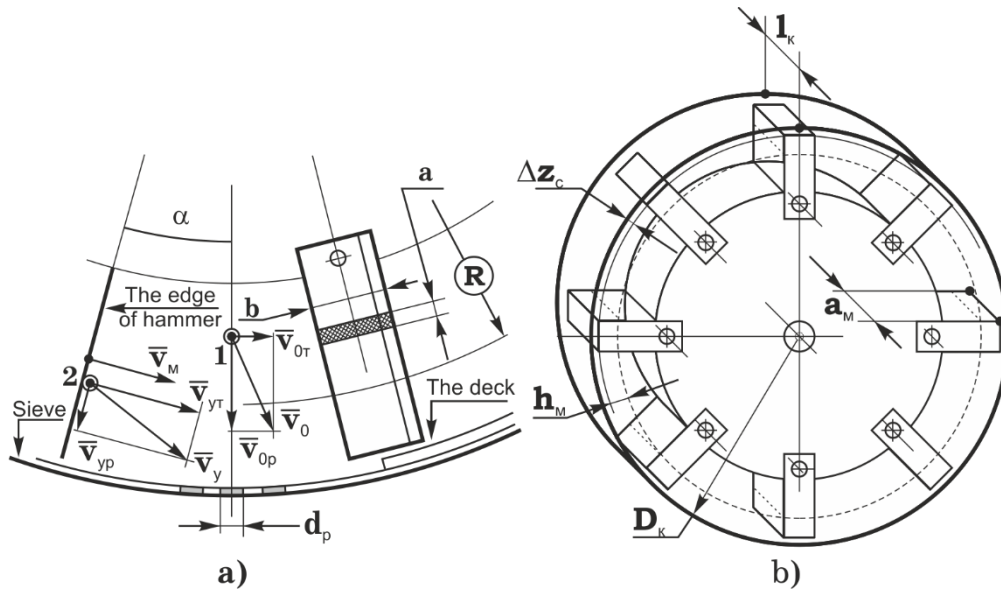


Fig. 1. The scheme for the grinding process energy calculation.

Let us assume that the flow of raw materials entering the crushing chamber is distributed evenly across the width of the row of crushing drum rotor hammers and that particles of the loaded material do not pass between the hammers. Thus, further interaction can be considered as the interaction of a monolithic row of hammers with a flow of components. Based on the above and equation (2), we can write down the expression that determines the energy consumption per second:

$$\Delta W = \frac{m_l m_0 v_m^2}{2(m_l + m_0)} (1 - k^2), \quad (3)$$

Here m_0 – the mass of particles colliding with a row of hammers, kg, m_l – the mass of a row of hammers, kg.

Let us assume that the flow of raw materials entering the crushing chamber is distributed

evenly across the width of the hammers of the crushing drum rotor. In this case, due to the high rotation speed of the rotor and the small distance between the hammers in a row (and in addition, hammers in two adjacent rows of the rotor are usually installed in a checkerboard pattern), it can be assumed that particles of the loaded material do not pass between the hammers. Consequently, further interaction can be considered as a collision of a continuous row of hammers with a flow of components, while the mass of the row is:

$$m_l = m_1 z_{hl}, \quad (4)$$

Here m_1 – the mass of one hammer, kg; z_{hl} – the number of hammers in a row.

Preliminary calculations show that due to the significant total mass of a series of hammers

compared to the mass of colliding particles ($m_0 \ll m_i$), it can be assumed that:

$$m_i + m_0 \approx m_i. \quad (5)$$

Then equation 3 will take the form:

$$\Delta W = \frac{m_0 v_m^2}{2} (1 - k^2). \quad (6)$$

Let q be the value that determines the second loading of the crusher, then the mass of particles colliding with a row of hammers:

$$m_0 = \frac{q}{n_c x_{hm}}, \quad (7)$$

here n_c – the rotor rotation frequency, rpm;
 x_{hm} – the number of rows of hammers on the rotor.

Let's determine the power consumption required to overcome the moment of resistance caused by the rotor collision with the material flow:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ht} &= \frac{\int_0^t \Delta W}{t} = \frac{qv^2(1-k^2)}{2n_c x_m} n_c x_m =, \quad (8) \\ &= \frac{1}{2} qv_m^2(1-k^2) \end{aligned}$$

Here t – the time spent on the grinding process, s.

After integrating equation (8) over time, we've got a simplified expression which can be used to determine the energy consumption for the destruction of raw materials by impact:

$$W_{ht} = \frac{1}{2} \int_0^T qv_m^2(1-k^2) \cdot dt. \quad (9)$$

The linear speed at a co-impact can be calculated as [17, 18]:

$$v = 2\pi mR, \quad (10)$$

here R – the radius at which the hammer collides with the raw material particles, m.

Then equation (8) can be rewritten in the form:

$$W_{ht} = \frac{1}{2} \int_0^T q(2\pi mR)^2(1-k^2) \cdot dt. \quad (11)$$

The working process in the grinding chamber occurs in such a way: a layer of material is formed and here the final destruction of particles occurs to a given granulometric composition. Let's determine the energy consumption of this part of the work process. In its essence and nature, the process occurring at this stage of the process is similar to the energy of the processes that occur when cultivating the soil with the rotor of a working tool such as a cutter [3, 19]. Moreover, the peculiarity of this case is that the energy can be determined as in the case of a complete absence of linear supply of the working body into the grinding medium. The power required to drive the cutter rotor in the absence of its supply to the environment can be calculated according to the equation [19]:

$$P_{fr} = 10^{-4} \frac{\kappa_{ev} chz_h n_p}{6}, \quad (12)$$

Here κ_{ev} – the coefficient of specific resistance of the medium to cutting, N/m; z_h – the number of cutter teeth on the rotor; c – tooth width, m; h – penetration of the teeth into the soil layer, m; n_p – rotation frequency of the drive shaft, rpm.

Taking into account certain assumptions, the model of the process of rotation of the crusher rotor in the chamber material layer can be adapted to equation (12). During the operation of the cutter, only the sector of the lower part of the working body is in direct contact with the soil, and power losses are caused by the movement of the knives in this volume of material [9]. The energy consumption during the operation of the hammers in the annular layer between the sieve and the rotor is determined by the work to overcome the forces of friction against the side walls of the hammer and the resistance of the medium to the hammer movement. Moreover, unlike a milling cutter, the entire surface of the rotor is in contact with the material layer (see Fig. 1b). Thus, power losses in the annular layer of the camera can be determined by the equation [19]:

$$\Delta P_\kappa = \kappa_c a h_n \pi (D - \Delta z_c) \cdot z_h n, \quad (13)$$

Here κ_{cp} – the specific resistance of the raw material in relation to the movement of the rotor hammers in it, MPa; a – width of a row of hammers, m; h_h – depth of hammers in the annular layer, m; D – diameter of the crusher chamber, m; Δz_c – the gap between the ends of the hammers and the sieve surface, m; n – the rotation frequency of the crusher rotor, s^{-1} .

Let's determine the depth of the knives in the material layer of the crushing chamber. In the steady mode of operation of the crusher, the amount of incoming product is equal to the amount removed from the working chamber. Moreover, the maximum value of the last value is limited and determined by the granulometric composition of the finished raw material and the throughput capacity of the crusher sieve. From the above, it can be concluded that the height of the material layer in the crushing chamber is a function of the crusher loading q . Let's determine the depth of the rotor hammers h_{hm} depending on the substance amount in the chamber.

According to fig. 1 the ring area formed by the deepening of the hammers in the material layer is calculated as:

$$S = \pi \left(\left(\frac{D}{2} - \Delta z_c \right)^2 - \left(\frac{D}{2} - \Delta z_c - h_{hm} \right)^2 \right). \quad (14)$$

After performing the transformation:

$$S = \pi h_{hm} (D - 2\Delta z_c - h_{hm}). \quad (15)$$

Then the volume of the cylinder formed by the deepening of the hammers h_{hm} and the ends of the rotor knives (see Fig. 1b) across the entire width of the crusher chamber will be determined by the equation:

$$V = \pi h_{hm} (D - 2\Delta z_c - h_{hm}). \quad (16)$$

If we divide the right and left sides of equation (16) by πh_{hm} and open the brackets in the right side of the equation we get:

$$\frac{V}{\pi h_{hm}} = \frac{\pi h_{hm} D - 2\pi h_{hm} \Delta z_c - \pi h_{hm}^2}{\pi h_{hm}}. \quad (17)$$

After performing the transformation:

$$h_{hm}^2 + h_{hm} (2\Delta z_c - D) + \frac{V}{\pi h_{hm}} = 0. \quad (18)$$

Solving the quadratic equation (18) with respect to h_{hm} we've got:

$$h_{hm} = \frac{(-2\Delta z_c + D) \pm \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - \frac{4V}{\pi h_{hm}}}}{2} \quad (19)$$

For physical reasons (due to the fact that $h_{hm} < D/2$) in solution of equation (19) the root can be unambiguously preceded by the sign "-". In steady state the amount of raw material entering the chamber is equal to the amount of raw material removed from the chamber through the sieve:

$$q = \frac{dm_2}{dt}, \quad (20)$$

here m_2 – mass removed from the working chamber, kg.

According to [16]:

$$\frac{dm_2}{dt} = \beta m_k, \quad (21)$$

Here m_k – mass of the product in the crushing chamber, kg; β – proportionality factor.

The crushing process in hammer crushers is built in such a way that the interaction between the rotor hammers and the surrounding layer of material in the crushing chamber is possible only when $h_{hm} > 0$, i.e. when $m_k > m_0$ (since usually $m_k \gg m_0$ then equation 21 in general is valid), where m_0 is the mass of material in the chamber, which corresponds to the filling of the chamber to the level Δz_c (see Fig. 1b). So, a more accurate description of the raw material removing from the impact machine chamber will be given by the equation:

$$\frac{dm_2}{dt} = \beta \cdot (m_k - m_0). \quad (22)$$

According to (20-22) we got:

$$q = \beta \cdot (m_k - m_0). \quad (23)$$

So:

$$m_k = \frac{q}{\beta} + m_0 \quad (24)$$

According to [11, 19], the coefficient β is proportional to the rotor rotation frequency and can be determined as:

$$\beta = \alpha \cdot n_p \quad (25)$$

here α – a dimensionless coefficient (depends on the sieve parameters and the gap between the hammers and the sieve), $\alpha = 0,0015\dots 0,0023$ [19].

From the known definition of specific gravity, we get:

$$V = \frac{m}{\gamma} \quad (26)$$

here m – weight of the product layer, kg; γ – specific weight of the product in the layer, kg/m³.

Since the gap Δz_c is sufficiently small in the normal mode, it can be assumed that:

$$m_{hm} = \pi D \Delta z_c \mathcal{N}_k \quad (27)$$

So:

$$V = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{q}{\alpha n_p} + \pi D \Delta z_c l_k \gamma \right) \quad (28)$$

If we put (28) into (19):

$$h_{hm} = (D - 2\Delta z_c - \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - \frac{4 \left(\frac{q}{\alpha n_p} + \pi D \Delta z_c l_k \gamma \right)}{\pi l_k \gamma}}) / 2 \quad (29)$$

After performing the transformation in equation (29) and substituting the value of the layer height, we obtain the equation that determines the power loss in the annular layer:

$$\Delta P_k = (D - 2\Delta z_c - \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - \frac{4 \left(\frac{q}{\alpha n_p} + \pi D \Delta z_c l_k \gamma \right)}{\pi l_k \gamma}}) \cdot \left(\frac{q}{\alpha n_p \pi l_k \gamma} + D \Delta z_c \right) \frac{\kappa_{ev} \pi (D - \Delta z_c) z_m \alpha n_p}{2} \quad (30)$$

By substituting the value (30) into (2) we get an equation that allows us to determine the power consumption for work processes in the chambers of hammer-type crushers:

$$\Delta P_{cr} = \Delta P_{xx} + \frac{1}{2} q v_{hm}^2 (1 - k^2) + (D - 2\Delta z_c - \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - \frac{4 \left(\frac{q}{\alpha n_p \pi l_k \gamma} + D \Delta z_c \right)}{\pi l_k \gamma}}) \times \frac{\kappa_{ev} \pi (D - \Delta z_c) z_m \alpha n_p}{2} \quad (31)$$

The raw materials crushed in impact crushers possessing different parameters have a different ability to destroy under impact. In addition, it is known that the humidity of products has a significant impact on energy consumption [10, 12, 20, 21]. On the basis of the conducted research the corresponding coefficients were determined. The introduction of coefficients makes it possible to estimate the actual energy consumption for the process. The numerical values of these coefficients are functionally dependent on the type of raw material and can be estimated according to literature data [19].

The working surfaces of the machines wear out during the normal exploitation. Let ζ be a coefficient characterizing the wear degree of the machine working surfaces. Let's assume that it has a directly proportional effect on the amount of energy consumption. Taking into account the condition of the equipment and the type of raw materials the power losses for the work processes in the chamber of hammer-type impact crushers will be determined as:

$$\Delta P_{cr} = \Delta P_{xx} + \frac{\zeta q v_{hm}^2 (1 - k^2)}{2 \cdot \kappa_{ei} \kappa_{pi}} + (D - 2\Delta z_c - \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - \frac{4 \left(\frac{q}{\alpha n_p \pi l_k \gamma} + D \Delta z_c \right)}{\pi l_k \gamma}}) \times \frac{\kappa_{ev} \pi (D - \Delta z_c) z_m \alpha n_p}{2} \quad (32)$$

here κ_{pi} – coefficient of rejuvenability of raw materials; κ_{ei} – raw material moisture factor.

II. RESULTS

Using this equation, it is possible to determine the amount of electrical energy spent on technological operations. However, this integral indicator is not sufficiently informative as it

does not allow to evaluate the efficiency of the use of electrical energy and realize the reduction of electrical energy consumption in impact crushers. From the point of view of controllability of work processes in impact machines the performance is a function of its loading. At a finite time, the performance can be described by the technological load parameter. Taking into account (32) the specific consumption of electrical energy in the power drive electrical equipment of the grinding machines will be described as:

$$A_{cr} = \frac{W_{xx}}{q\eta_{en}\eta_{tr}} + \left[\frac{\xi v_{hm}^2 (1-k^2)}{2 \cdot \kappa_{ei} \kappa_{pi}} + (D - 2\Delta z_c - \sqrt{(2\Delta z_c - D)^2 - 4 \left(\frac{q}{\alpha n \pi l_k \gamma} + D\Delta z_{hm} \right)}) \times \left(\frac{\pi \kappa_{cp} (D - \Delta z_c) z_{hm} a n_p}{2q\eta_{en}\eta_{tr}} \right) \right] \quad (33)$$

Here η_{en} – asynchronous motor efficiency; η_{tr} – engine-working machine transmission efficiency.

It can be seen from the above equation that the factors that most affect the electrical energy use efficiency of impact crushers are: electric drive modes (speed of rotation and loading) and physical and mechanical properties of raw materials (moisture and specific gravity). Thus, it is advisable to analyze the electrical energy

use efficiency based on the consideration of the nature of the electrical energy specific consumption for the grinding process for those parameters described above and could be applied as control inputs.

To fulfill the tasks one should conduct a study of equation (33) for the presence of extrema and determine the nature of the behavior of the electric energy specific consumption function within the limits of physically acceptable values of the above-mentioned controlling influences. Let's assume that the mentioned function is defined and differentiated in the entire range of physically permissible values of the control parameters. Then the nature of the behavior of this function can be determined on the basis of the behavior of its derivatives according to the above-mentioned operating mode control parameters. Based on the parameters of a typical unit for grinding using the Mathcad package, one could separate derivative functions of the specific consumption of electrical energy A calculated based on the variable parameters of the electric drive: the loading of the crushing chamber $\partial A/\partial q$ and the rotation frequency of the crusher rotor $\partial A/\partial n$. On this basis, the graphical dependences $\partial A/\partial q$ were constructed for various parameters of raw materials in the range of physically permissible loads of the machine (Fig. 2a) as well as $\partial A/\partial n$ in the range of permissible regulation of the rotation frequency by the electric drive (Fig. 2b).

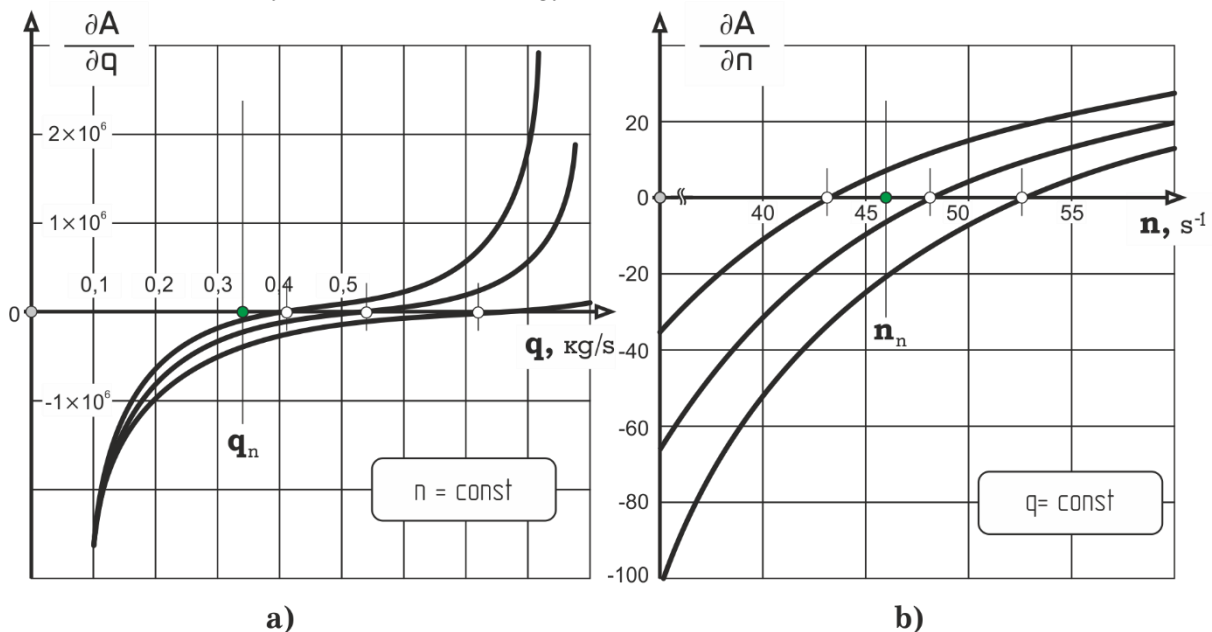


Fig. 2. Graphical dependences of the private derivatives of the function of the grinding process electrical energy specific consumption according to the variable parameters of the electric drive control:
a – when the load of the crusher chamber changes,
b – when changing the rotation frequency of the crusher rotor.

Based on the analysis of the above graphical dependencies, it can be concluded that in the plane of both variable operating modes of the electric drive (rotor rotation frequency and camera loading) the function of the specific consumption of electric energy of the grinding process has an extremum [22, 23]. At the same time, it is clearly visible that in the case of adjustment of both electric drive operating modes, like the case of loading, the derivatives change their sign from "-" to "+". It can be asserted that the set points of the extremum are definitely the minimum point according to [22, 23]. It can be stated that in the technologically permissible range of changes in the electric drive operating

modes the function of the electrical energy specific consumption is continuous and has no other extremum points. So, the function reaches its smallest value at the calculation points of the minimum.

Further theoretical studies were carried out by means of analytical calculations also using the Mathcad package. The specific consumption of electrical energy of the power drive electrical equipment was calculated depending on the crusher electric drive operation modes. The corresponding analytical response surface (Fig. 3a) and a map of the electric energy specific consumption level lines (Fig. 3b) were obtained.

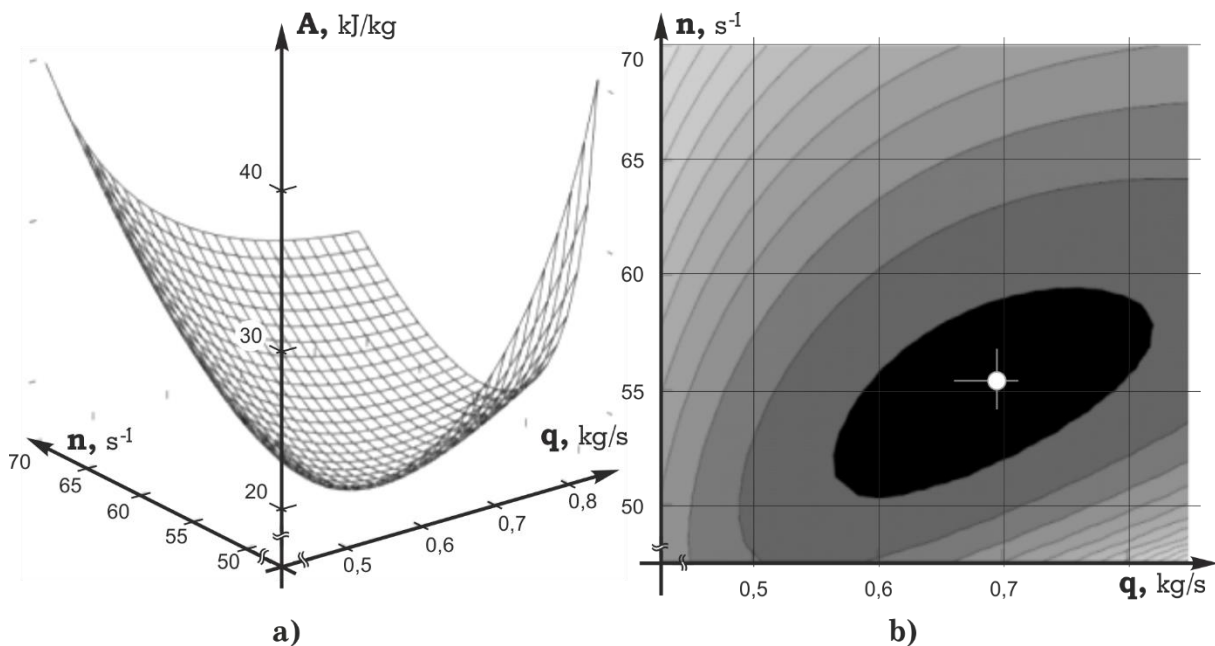


Fig. 3. Theoretical dependences of the electrical energy specific consumption when controlling the variable modes of electric drive operation (the frequency of rotation of the rotor and the loading of the working chamber of the crusher): a – response surface, b – level line map of the response function.

From the analysis of the obtained analytical dependences of the specific consumption of electrical energy it can be concluded that the efficiency of the use of electrical energy for the grinding process in the plane of the above-mentioned variable operating modes of the electric drive has a non-linear extreme character.

At the same time, when controlling the operating modes of the electric drive, both in the plane of changing the rotation frequency (n) and in the loading plane (q), there is always a value of the operating mode of the electric drive, which corresponds to the minimum specific energy consumption, and therefore to the maximum efficiency of the electric energy use. An important fact is that this mode of operation

is not fixed and changes when a certain value of the control parameter is applied and vice versa.

In order to obtain a complete picture of the energy consumption of the grinding process. It is advisable to study the influence of variable physical and mechanical parameters of raw materials on the efficiency of the electrical energy use in the grinding process. As evidenced by the analysis of literary sources, the most influential parameters are moisture (ψ) and specific gravity (γ) of raw materials.

The obtained calculated graphical dependences (Fig. 4) clearly confirm that the value of the variable operating modes of the electric drive according to the parameters of load and rotation frequency which ensures the

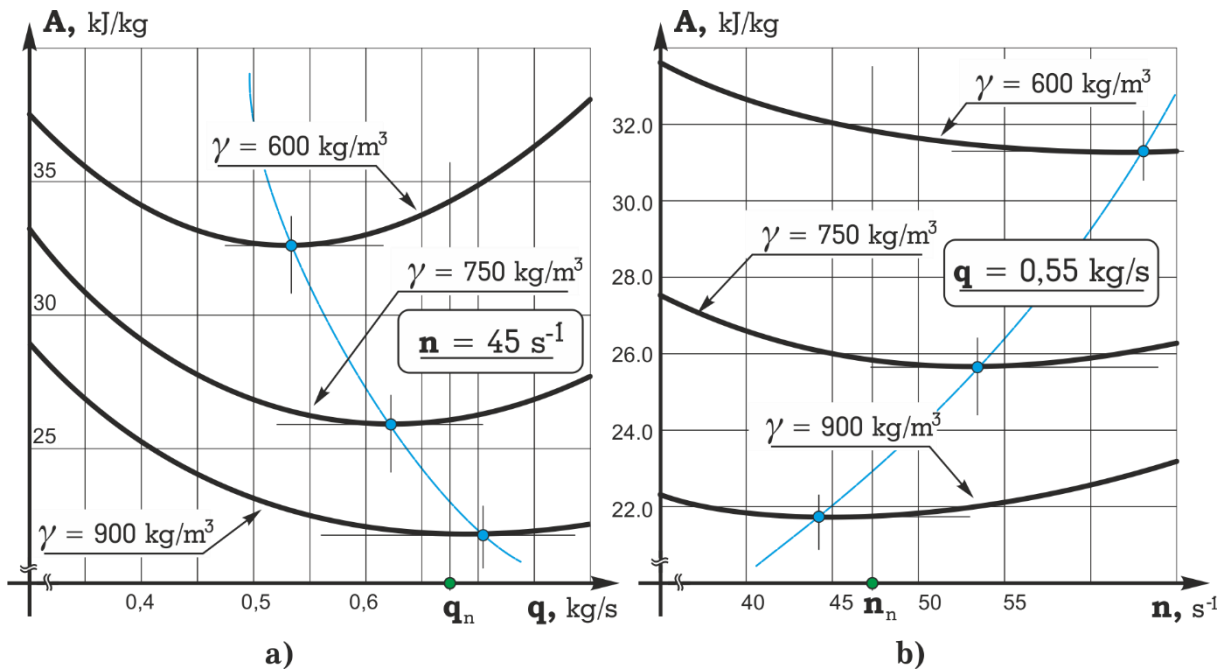


Fig. 4. Theoretical dependencies of the specific consumption of electrical energy on the grinding process when the specific weight of the raw material changes in different operating modes of the electric drive: a – as a function of load, b – as a function of rotation frequency.

rational use of electrical energy changes when the above physical parameters of the raw materials are varied.

It can be seen that with an increase in γ , the optimal value of q shifts to a higher direction, and the value of n - to the zone of lower rotation frequencies. The value of specific costs is inversely proportional to the specific weight change.

With increasing humidity, the optimal value of the rotation speed shifts to the zone of higher speeds, while the change in q is insignificant, and the value of the specific electrical energy consumption is directly proportional to this parameter of the component (Fig. 5).

An increase in the wear coefficient of working surfaces ζ also leads to an increase in specific energy consumption. But the main thing is that the value of the adjustable parameters of the electric drive, which ensure the operation of the equipment with maximum efficiency in the use of electrical energy, also changes.

The reason for this behavior of the electrical energy use efficiency the at different loads is most likely the behavior of power losses in the drive power electrical equipment caused directly by work processes. It is clear that the main destruction occurs when the hammers of the rotor collide with the flow of particles. At the same time, with fixed parameters of the rotor and constant frequency of its rotation, the number of particles destroyed by impact is finite. Undestroyed particles fall into the annular layer in the area of the sieve, where they are destroyed by friction, reducing the overall efficiency of the process. It is logical that the moment of the rotor rotation resistance in it depends on the layer height. Thus, exceeding the load above the maximum number of crushed particles leads to additional energy consumption and, therefore, to a decrease in the efficiency of the use of electrical energy.

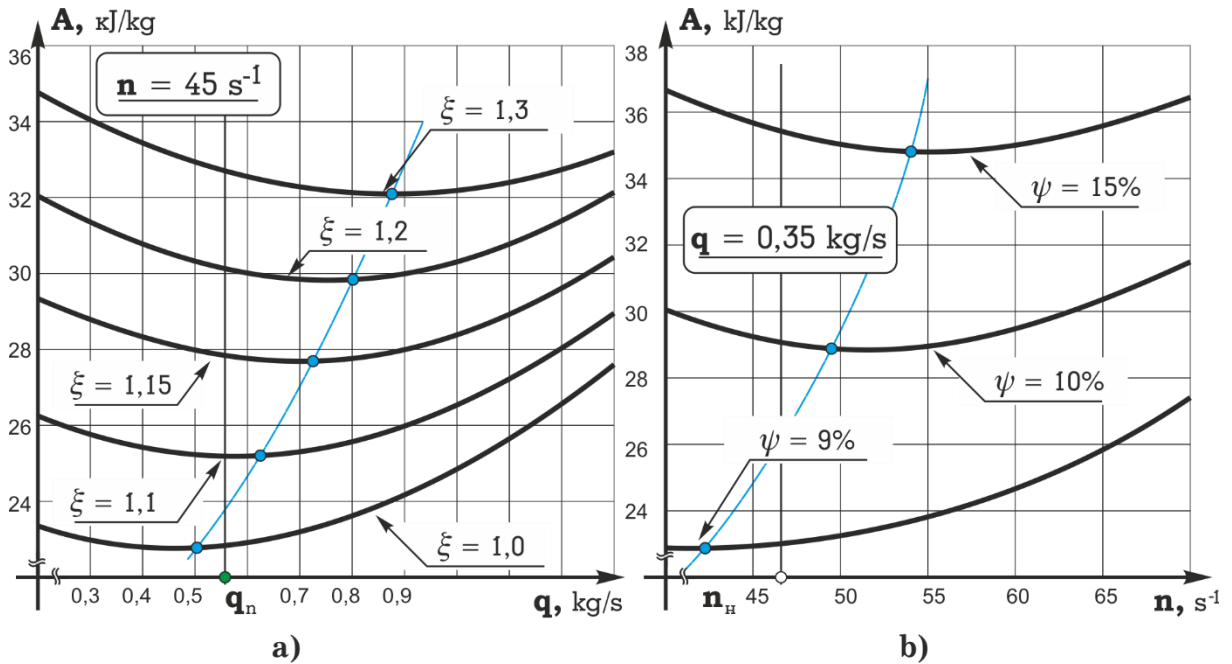


Fig. 5. Theoretical dependences of the specific consumption of electrical energy of the grinding process: a – depending on the load at different wear rates; b – depending on the rotation frequency at different humidity

The nature of the electrical energy use efficiency depending on the rotor rotation frequency and the physical properties of the component can be explained by the fact that the efficiency of direct grinding is functionally dependent on the critical rate of destruction of raw materials. The critical rate of destruction, in turn, depends on the initial physical and mechanical properties. That is, there is always a rotation frequency that corresponds to the maximum efficiency of the electrical energy use for the grinding process.

At the same time, it turns out from fig. 4 and 5 that non-compliance with the operation modes of the electric drive, which ensure the maximum efficiency of the use of electrical energy, can lead to overspending of up to 15% of electrical energy per unit mass of finished products.

This feature is not used both when making decisions in the existing criteria for controlling grinding machines and in the principles of hardware implementation of control systems for these machines. Accordingly, typical systems for controlling the operating modes of electric drives implemented on the basis of ensuring the nominal load current do not guarantee the maximum efficiency of the use of electrical energy in the technological process. Improvement of indicators of the electrical energy use is possible when applying an integral criterion for controlling the electric drive operating modes of impact crushing machines, which is based on the analysis of the specific

consumption of electrical energy. As evidenced by the above analytical dependencies, the application of this criterion allows not only to improve the energy indicators of the technological process, but also to adapt the operating modes of the electric drive both to the variable physical parameters of the component and to the variable state of the working machine.

III. CONCLUSIONS

1. It was established that the typical criteria for controlling the modes of operation of the electric drive of impact crushing machines do not ensure the maximum efficiency of the use of electrical energy in the technological process. It was determined that the factors affecting the efficiency of the use of electrical energy can be divided into two groups: operating modes of the electric drive and physical properties of raw materials.

2. The dependence has been obtained that allows one to determine the specific consumption of electrical energy for the grinding process. The model allows us to determine the operating modes of the electric drive that will ensure grinding with minimal electrical energy consumption under variable physical properties of the raw materials and the condition of the equipment.

3. The nonlinear extreme nature of the specific electrical energy consumption of the grinding process has been established depending on

the variable operating modes of the electric drive: rotor speed and loading of the working chamber of the grinding machine. It has been established that the values of operating modes that ensure maximum efficiency in the use of electrical energy vary depending on the variable properties of the raw materials and the condition of the equipment.

4. An energy-saving criterion for determining the operating modes of impact grinding machines based on the minimum specific energy consumption, determined according to (33) based on the changing parameters of raw materials and the condition of the equipment, is substantiated.

5. It was found out that due to the adaptation of the operating modes of the electric drive to the variable parameters of the raw materials and the condition of the equipment, it is possible to achieve a reduction of the specific consumption of electrical energy by up to 15%. This, in turn, forms the basis for the use of the specified criterion in control systems and the synthesis of relevant technical solutions.

6. For the further practical application of the obtained analytical results, it is necessary to conduct experimental studies in order to confirm the effect of increasing the efficiency of the use of electrical energy when applying the new criterion for controlling the operating modes of the electric drive.

7. The need to substantiate new approaches to control the operating modes of the electric drive of impact grinding machines becomes even more relevant in view of the emergence of new hardware solutions in the field of adjustable electric drive, which makes it possible to apply the results of research for some other types of machines.

References

- [1] Yamashita Andre S., Thiviergeb Alex, Euz'ebio Thiago A.M. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, 2021, Vol. 170. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107036>.
- [2] Atta K.T., Johansson A., Gustafsson T. 2014. Control oriented modeling of flow and size distribution in cone crushers. *Minerals Engineering*, 2021, Vol. 56, pp. 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.031>.
- [3] Khobin, V., Levinskyi, V., & Levinskyi, M. Hammer mill load current adaptive control system trials. *Automation of Technological and Business Processes*, 2019, 10(3), pp. 67-73. <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i3.1091>.
- [4] Amer Mariam A., Ali El-Sayed A. E., Dawood Victor M. Modified and improved performance of local hammermill for mushroom residues chopping. *Bulletin of the National Research Centre*, 2022, Vol. 46, Article number: 228.
- [5] Paraschiv Gigel, Moiceanu Georgiana, Voicu Gheorghe, Chitoiu Mihai, Cardei Petru, Dinca Mirela Nicoleta and Tudor Paula, Optimization Issues of a Hammer Mill Working Process Using Statistical Modelling. *Sustainability*, 2021, 13, 973. <https://doi.org/10.3390/su13020973>.
- [6] Tumuluru, J.S.; Heikkila, D.J. Biomass grinding process optimization using response surface methodology and a hybrid genetic algorithm. *Bioengineering*, 2019, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6010012>.
- [7] Duarte Robson A., Yamashita André S., da Silva Moisés T., Cota Luciano P. and Euzébio Thiago A. M. Calibration and Validation of a Cone Crusher Model with Industrial Data. *Minerals*, 2021, 11, 1256. <https://doi.org/10.3390/min11111256>.
- [8] Mikhailenko A. Two-level system of automated control over cone crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, Vol. 3, No. 2(69), pp. 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24899>.
- [9] Tromans D. Mineral comminution: energy efficiency considerations. *Minerals engineering*, 2008, Vol. 21, Iss. 8, pp. 613–620.
- [10] Fenechea M. Design of hammer mills for optimum performance. *Journal of Vibration and Control*, 2013; 19(14), pp. 2100-2108. doi:10.1177/1077546312455210.
- [11] Lysenko, O., Kuznetsov, M., Chebanov, A., Adamova, S. (2019). Hybrid Power System Stochastic Optimization. In: Nadykto, V. (eds) Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer, Cham. Pp. 385–394. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_40.
- [12] Ciężkowski P., Correlation of energy consumption and shape of crushing plates. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2012, pp. 91–100.
- [13] Ciężkowski, Paweł, Maciejewski, Jan and Bąk, Sebastian. "Analysis of Energy Consumption of Crushing Processes – Comparison of One-Stage and Two-Stage Processes" *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol.39, No.2, 2017, pp. 17-24. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0012>.
- [14] Gromov, D. Analysis of Hierarchical Structures for Hybrid Control Systems: PhD Thesis / D. Gromov. - Berlin, 2010. – 118 p.
- [15] Gang, D., Xiumin, F., Dongming, H. Analysis and optimization of cone crusher performance. *Minerals Engineering*, 2009, Vol. 22, pp. 1091–1093. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.020>.

- [16] Itävuori, P., Hulthén, E., Yahyaoui, M., Vilkkio, M., Mass balance control of crushing circuits. *Minerals Engineering*, 2019, Vol. 135, pp. 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.033>.
- [17] Machado Leite, M. Kinetic models for the simulation of crushing circuits. *Minerals Engineering*, 1990. Vol. 3, pp. 165–180. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(90\)90089-T](https://doi.org/10.1016/0892-6875(90)90089-T).
- [18] Herbst, J.A., Oblad, A. Modern Control Theory Applied to Crushing Part 1: Development of a Dynamic Model for a Cone Crusher and Optimal Estimation of Crusher Operating Variables. IFAC Proc., 1985, Vol. 18, pp. 301–307. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)60525-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)60525-1).
- [19] El-Shal M.S., Tawfik, M.A., El-Shal A.M., Metwally, Khaled. Study the effect of some operational factors on hammer mill. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 2010, Vol. 27. pp. 54-74. <https://doi.org/10.21608/mjae.2010.106853>.
- [20] Alvarado, S., Algüerno, J., Auracher, H., Casali, A. Energy-exergy optimization of comminution. *Energy*, 1998, Vol. 23, pp. 153–158. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00061-3).
- [21] Gary Liu P.E., Hammer milling and jet milling fundamentals. // CEP June 2019, pp. 48-54.

Information about the authors.



Sergiy Chausov,
Candidate of technical sciences, associate professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Scientific interests are related to research in the field digital control systems, modeling and automation of technological processes, rational use of energy resources.
E-mail: sergio.chausov@gmail.com



Vasily Budko,
Doctor of technical science, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Research area: Processes of transformation and accumulation of energy of the Sun and wind; Improving the efficiency of autonomous and backup power supply systems based on renewable energy sources.
E-mail: solar_budko@ukr.net



Sabo Andrii
Candidate of technical sciences, associate professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Scientific interests are related to research in the field of modeling and development of control systems, machine learning, energy saving and rational usage of the natural resource.
E-mail: andriy.sabo@gmail.com



Iryna Popova,
Candidate of technical sciences, associate professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Scientific interests are related to research in the field of operating modes of asynchronous electric motors and development of electrical equipment protection devices. E-mail: irnapopova54@gmail.com