

# ენერჯია

---

# ENERGY

სერია: „ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი  
გადაწყვეტის გზები“

---

SERIES: “MODERN PROBLEMS OF POWER ENGINEERING  
AND WAYS OF SOLVING THEM”

**3(107)/2023**

ნაწილი **I**  
Part

ჟურნალი დაფინანსებულია შპს „მონტაჟ ჯორჯია“-ს მიერ

---

The magazine was funded by LTD "Montage Georgia"

თბილისი-Tbilisi

ISSN 1512-0120



**ჟურნალ „ენერჯია“-ს თემატური გამოცემა „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“ დააფინანსა შპს „მონტაჟ ჯორჯია“**

მთავარი რედაქტორი - მერაბ ლორთქიფანიძე

მთავარი რედაქტორის მოადგილე - შალვა გაგოშიძე

**საორგანიზაციო კომიტეტის პრეზიდიუმი:**

დავით გურგენიძე, ევგენი სოკოლი (უკრაინა), მიხეილ ზაგირნიაკი (უკრაინა), მიხაილო მიუსოვი (უკრაინა), მურთაზ დევაძე, ვლადიმერ კლეპიკოვი (უკრაინა), ბადურ ჭუნაშვილი, მაია ტუღუში

**საორგანიზაციო კომიტეტი:**

ნუგზარ ბერიძე, თეიმურაზ გამრეკელაშვილი, ალა დრანკოვა (უკრაინა), რომან ზაიცევი (უკრაინა), ომარ ზივზივაძე, ლევან იმნაიშვილი, დავით კახიანი, გიგა მამისეიშვილი, ევტიხი მაჭავარიანი, თენგიზ მუსელიანი, მიკოლა მუხა (უკრაინა), იგორ ორლოვსკი (პოლონეთი), არჩილ სამადაშვილი, მამუკა ქობალია, ვერა შამარდინა (უკრაინა), ლენა შატაკიშვილი, ემზარ ჩაჩხიანი, ალექსეი ჩერნი (უკრაინა), ენვერ ჩიჩუა, თენგიზ ჯიშკარიანი, პაატა ცინცაძე

**ჟურნალის მომზადებაში მონაწილეობა მიიღეს:**

ინა თუმანიშვილი (ტექსტის რედაქტირება), ეთერი ზამბახიძე, ბაბილინა ბურჭულაძე (ტექსტის კომპიუტერული აწყობა)

---

***LTJ "Montage Georgia" sponsored the thematic issue of the magazine "Energy" "Modern problems of energy and ways of their solution"***

**The editor -in-chief** – Merab Lortkipanidze

**Deputy of the editor -in-chief** – Shalva Gagoshidze

**Presidium of the Organizing Committee:**

David Gurgenidze, Evgeni Sokol (Ukraine), Mykhaylo Zagirnyak (Ukraine), Mykhaylo Miusov (Ukraine), Murtaz Devadze, Vladimir Klepikov (Ukraine), Badur Tchunashvili, Maia Tughushi.

**Organizing Committee:**

Nugzar Beridze, Tiumuraz Gamrekelashvili, Alla Drankova (Ukraine), Roman Zaitsev (Ukraine), Omar Zivzivadze, Levan Imnaishvili, Davd Kakhiani, Giga Mamiseishvili, Evtikhy Matchavariani, Tengiz Museliani, Mykola Mukha (Ukraine), Igor Orlovsky (Poland), Archil Samadashvili, Mamuka Kobalia, Vira Shamardina (Ukraine), Lena Shatakishvili, Emzar Chachkhiani, Oleksii Chorny (Ukraine), Enver Chichua, Tengiz Jishkariani Paata Tsintsadze.

**In the preparation of the journal took part:**

Ina Tumanishvili (Text editing), Eteri Zambakhidze, Babilina Burchuladze (Computer assembly of text)

ელექტროენერგეტიკური სისტემები და კომპლექსები,  
ელექტრომექანიკური სისტემები, ძალური ელექტრონიკა  
Electric power systems and complexes, Electromechanical systems and Power electronics

<i>V.Klepikov, O.Bieliaiev.</i> Determination of weight coefficients of a quasi-neuroregulator for a two-mass electromechanical system with a nonlinear frictional load. . . . .	5
<i>O.Nazarova, O.Rusiak.</i> Fuzzy logic technologies in the diagnostic system of electromechanical processes of the cold rolling mill. . . . .	10
<i>V. Kotlyarov, Y.Anischenko.</i> An approach to automated selection of servos for mobile robots. . . . .	16
<i>M.Mukha, A.Drankova.</i> An implementation example the monitoring energy parameters of the vessel electric power system. . . . .	21
<i>V.Tityuk, A.Chorniy, P.Kurliak.</i> Dynamic identification of synchronous motor stator's resistance by starting characteristics. . . . .	26
<i>ბ.ჭუნაშვილი, მ.ქობალაია, თ.გამრეკელაშვილი, ნ.რთველაძე.</i> ელექტრომომარაგების ქსელის 35 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა და დაზიანებების მიზეზების დადგენა. . . . .	30
<i>ბ.ჭუნაშვილი, მ.ქობალაია, თ.გამრეკელაშვილი, ნ.რთველაძე.</i> მზის ფოტოელექტროსადგურების მიერ ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა და ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფა. . . . .	37
<i>თ.მუსელიანი, ბ.ჯინჭველიძე.</i> ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების ეკონომიური ეფექტურობა ენერგოსისტემაში. . . . .	42
<i>მ.ტულუში, ლ.სიხარულიძე, გ.გოგიტიძე, ფ.ვარშანიძე, მ.ლორია.</i> გემის ელექტროენერჯის ხარისხისა და ელექტროენერგეტიკული სისტემის ოპტიმიზაციის გზები. . . . .	46
<i>ი.შაველაშვილი, გ.შაველაშვილი, დ.ტურბელაძე, ნ.გოგინაშვილი.</i> სს „თელასის“ გამანაწილებელი ქსელისათვის ელექტროენერჯის ტექნიკური დანაკარგების სტრუქტურის ფორმირება და მისი ანალიზი. . . . .	52
<i>M.Kvrivishvili, G.Shavelashvili, N. Lashkhauri, N.Kvrivishvili.</i> Analysis of the effectiveness of neutral resistive grounding in the network 6-10 kV and elaboration of measures to raise it. . . . .	58
<i>გ.ჯავახიშვილი, ა.დიდებულაძე.</i> კუთხით რხევითი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მუშაობის პრინციპი. . . . .	64
<i>ლ. იმნაიშვილი, მ. ბედინეიშვილი, თ.თოდუა, კ.ქასოშვილი.</i> ენერგომომხმარებლის მენეჯმენტის IoT სისტემა. . . . .	68
<i>პ. ბოჩიკაშვილი, ზ.აზმაიფარაშვილი, გ.მურჯიკენელი, ი.მოდეზაძე.</i> სინქრონიზაციის პრობლემები ქსელური ინვერტორების დაგეგმარებისას. . . . .	73
<i>პ. ბოჩიკაშვილი, ზ.აზმაიფარაშვილი, გ. მურჯიკენელი, ო.ტომარაძე.</i> ქსელური ინვერტორების გამოყენების თავისებურებანი მიკრო და მინი ჰიდროელექტროსადგურებში. . . . .	77
<i>ნ. იაშვილი, ე.ლეებარგი, ი.კოვალი.</i> გაზის დეტექტორების საერთაშორისო სერტიფიცირების აუცილებლობის შესახებ. . . . .	80
<i>ნ.იაშვილი, ს.ორლოვი, კ. აგევი.</i> გაზის გაჟონვის დეტექტორების ტესტირების ლაბორატორიული მეტროლოგიური სტენდის დამუშავება. . . . .	84
<i>ნ.აბელაშვილი.</i> ლაბორატორიათაშორისი გამოცდის საკონტროლო ნიმუშის მომზადება ენერგეტიკის სფეროს აკრედიტებული საგამოცდო ლაბორატორიებისათვის. . . . .	88
<i>მ.თევდორაძე, თ. რუხაძე, მ.სალთუციანი.</i> მწვანე გამოთვლების მოთხოვნების უზრუნველყოფა ინფორმაციულ ტექნოლოგიებში. . . . .	92
<i>გ.არაბიძე, ნ.არაბიძე, ს.მინდიაშვილი.</i> საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი. . . . .	98
<i>ნ. ქევიციანი, თ.ჯიშკარიანი, ნ.ჯავახიშვილი.</i> ენერგოეფექტური შეშის ღუმელების დანერგვის სტრატეგია საქართველოში. . . . .	104



ელექტროენერგეტიკური სისტემები და კომპლექსები, ელექტრომექანიკური სისტემები, ძალური ელექტრონიკა

Electric power systems and complexes, Electromechanical systems and Power electronics

Determination of weight coefficients of a quasi-neuroregulator for a two-mass electromechanical system with a nonlinear frictional load

**Klepikov V.B.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, E-mail: klepikovvladimir390@gmail.com

**Bieliaiev O.S.**, Postgraduate,

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, E-mail: guzozzzo@gmail.com

**Annotation.** A method for synthesizing a new type of regulator that provides specified parameters for regulating electric drives of a wide class of machines and mechanisms in which frictional self-oscillations (AKF) occur under normal or abnormal conditions is outlined. In its structure, the regulator looks like a simplified neural network (without middle layers), which explains the name given to it by the authors - "quasi-neuroregulator". The quasi-neuroregulator has an advantage over other methods: subordinate regulation - applicability for systems with elastic connections; modal control - eliminates the need to measure a number of phase coordinates, including difficult-to-measure ones, such as elastic moment; neural network method - eliminates the need for repeated iterative calculations of a large number of weight coefficients. The quasi-neuroregulator allows to determine the value of the weighting coefficients from the analytical expressions derived in the article and use only one output coordinate for feedback. The universality of the method is achieved by using a modified system of generalized dimensionless parameters and linearization in characteristic areas of the friction load.

**Keywords.** Neuroregulator, neural network, frictional load, quasi-neuroregulator, electromechanical system

**AKF problem.** The task of an electric drive (ED) of a wide class of machines and mechanisms is to ensure optimal movement of machine working parts in accordance with the requirements of the technological process. Some of the electric drives have a "friction pair" type load with a nonlinear characteristic [1-4]. Its linearized graphical representation for characteristic areas is shown in figure 1.

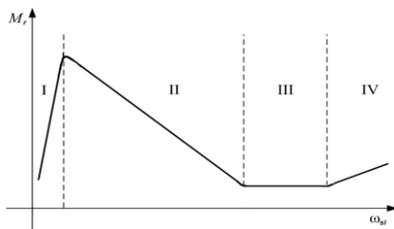


Fig. 1. Linearized characteristic of the friction load

In Fig. 1: I - section of elastic sliding; II - falling section; III -  $M_r \approx \text{const}$ ; IV - weakly ascending section.

When slipping (skidding or sliding), such a characteristic contains a "falling" section II, in which an increase in the slip speed  $\omega_{sl}$  leads to a decrease in the moment of resistance  $M_r$  [5]. Due to the nonlinearity of this characteristic, frictional self-oscillations (AKF) may occur. In foreign literature, stalled frictional oscillations (stick-slip) are widely known [5-7, 9, 10], but the self-oscillatory mode may not contain stops (non-relaxation AKF [11, 12]).

AKF, as a rule, worsen the performance of the technological process of machines and mechanisms. In particular, the accuracy of material processing may deteriorate; wear of sliding surfaces increases, excessive elastic moments occur, up to breakage of kinematic links

[7]. In addition, unwanted vibrations and noise occur, and energy losses increase. Static and dynamic control indicators are deteriorating.

**Quasi-neuroregulator.** An electric drive, as a source of mechanical energy, can eliminate AKF through the synthesis of an effective automatic control system [13-15]. In 2006, at the Department of Automated Electromechanical Systems, a new regulator was proposed and patented, which allows eliminating the AKF and providing the required regulation parameters. In its structure, with a linear approximation of the nonlinear load characteristic, it is similar to a neural network, which determined the name given to it by the authors - quasi-neuroregulator (QNR), presented in figure 2 [8].

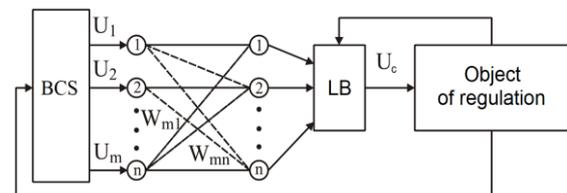


Fig. 2. Functional diagram of the quasi-neuroregulator

In Figure 2:

$n$  – the number of output neurons equal to the number of linearized sections of the load characteristic;

$m$  - the number of input signals, depending on the order of the characteristic polynomial of the system;

LB - a logical block that connects the output neuron to the control object, corresponding to the linearized load section where the operating point of the system is currently located;

BCS - Block of control signal and feedback signals of the controlled coordinate with delays;

$U_1 - U_m$  - input signals of the QNR, representing the current value of the output coordinate and its discrete previous values;

$W_{m1} \dots W_{mn}$  - analytically calculated weight coefficients.

Unlike traditional neural networks, in QNR the weight coefficients are calculated using analytical relationships, the method for determining which is described in this article. The values of the QNR input signals are multiplied by the calculated weight coefficients and transmitted to the output neurons 1...n directly, without the presence of hidden layer neurons, as is the case in traditional neural networks. Signals arriving at the output neurons can be transformed by the activation function, as is done in neural networks, and transmitted to the control object as a control signal  $U_g$ .

For linear systems, one output neuron is usually sufficient, but when working with nonlinear systems, their nonlinearity is approximated by linear sections, the number of which is determined by the required approximation accuracy.

Unlike modal controllers, the QNR does not require information about a significant number of phase coordinates, the parameters of which can be difficult to measure, such as the elastic moment, and there is no need to construct state observers that increase the order of the characteristic polynomial [16]. Since the QNR is created on a microprocessor basis, its use also provides their well-known advantages, including the ability to implement logical operations required by the technological process.

**Modified block diagram.** The block diagram of the system under consideration is presented in Fig. 3. This article explores an electromechanical system with a QNR, the regulation object of which is a two-mass electromechanical system with an elastic kinematic connection and the dependence of the load on the slip speed according to the friction characteristic. The diagram is drawn up under the assumption that the electromechanical energy conversion link is a first-order aperiodic link and the influence of internal viscous friction of the elastic kinematic connection is not taken into account.

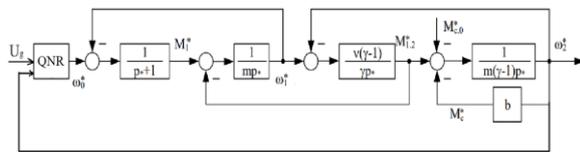


Fig. 3. Structural diagram of EMS with frictional load

A dimensionless generalized representation of the system parameters was used [13], which makes it possible to significantly reduce the number of physical parameters taken into account during the synthesis and makes the obtained results more universal. In contrast to the generalized parameters presented in the above source, in this article their modified combination is used by using the parameter  $m$ , which is the ratio of the electromechanical to electromagnetic time constants  $m = \frac{T_M}{T_E}$  [17].

The dimensionless generalized parameters used in the diagram in Fig. 3 are also:

the mass ratio coefficient  $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$ ;

the ratio of squared frequencies of undamped mechanical and electromechanical resonances

$$\nu = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{EM}^2};$$

the ratio of the friction load mechanical characteristic stiffness to the stiffness modulus of the electric drive characteristic  $b = \frac{\beta_s}{\beta}$ .

The differentiation operator in dimensionless form is also used  $p_* = pT_E$ .

This set of relative and dimensionless parameters characterizes the dynamic properties not of one specific system, but of a class of systems with different physical parameters. The advantage of such a mathematical description of systems compared to a description in physical parameters is the possibility of obtaining, for example, control laws for a wide class of objects in the field of electric drives.

**Purpose of the article.** Obtain analytical equations for calculating the values of the weight coefficients of the quasi-neuroregulator in the modified generalized parameters of a two-mass electromechanical system with elastic kinematic connection and nonlinear frictional load, using external feedback along one coordinate - the speed of the second mass.

**Theoretical part and calculations.** In connection with the linearization of nonlinearity over characteristic sections, the obtained analytical expressions for the ratio coefficients are universal, i.e. are also valid for any other linear section. The task of the regulator is to prevent frictional self-oscillations and ensure the required dynamic control parameters.

Let the object of regulation be the ED. The open-loop electromechanical system of the electric drive has a characteristic polynomial in normalized form  $D_o(p)$ :

$$D_o(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_i p^i + \dots + a_1 p + a_0. \quad (1)$$

The coefficients  $a_i$  are determined by the values of the parameters of the control object. The monograph [1] shows that for EMS with a nonlinear frictional load for each section of the mechanical characteristic (Fig. 1) in a system with a common adder, the characteristic polynomial of the closed-loop system  $D_c(p)$  is equal to the sum of the open-loop polynomial  $D_o(p)$  and the complementary polynomial  $D_{com}(p)$  each component of which depends on the feedback value of the corresponding coordinate

$$D_c(p) = D_o(p) + D_{com}(p). \quad (2)$$

Compared to the coefficients of the open-loop system, each of the coefficients of the closed system changes by the value  $\Delta a_i$ , i.e.

$$D_c(p) = p^n + (a_{n-1} + \Delta a_{n-1})p^{n-1} + \dots + (a_i + \Delta a_i)p^i + \dots + (a_1 + \Delta a_1)p + a_0 + \Delta a_0. \quad (3)$$

The control parameters are determined by the values of the roots of the characteristic polynomial of the closed system,

which in turn depend on the values of its coefficients. If, due to feedback, we ensure that the coefficients  $D_c(p)$  are the same as those of some desired polynomial  $D_d(p)$  with the necessary roots:

$$D_d(p) = p^n + a'_{n-1}p^{n-1} + \dots + a'_i p^i + \dots + a'_1 p + a'_0, \quad (4)$$

that is, fulfill the condition:

$$D_c(p) = D_d(p), \quad (5)$$

then the necessary regulatory parameters will be achieved. To satisfy condition (5), it is necessary that each of the coefficients of the polynomial  $D_c(p)$  receives an addition from the feedback action:

$$\Delta a_i = a'_i - a_i = b_i. \quad (6)$$

From which it follows that the addition to the polynomial of the open-loop system (taking into account that the coefficients of both polynomials at the highest degree are the same and equal to one), the complementary polynomial from the action of feedback is equal to

$$D_{com}(p) = b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_i p^i + \dots + b_1 p + b_0. \quad (7)$$

In particular, one of the standard polynomials, the values of the roots of which are known, can be chosen as desired. For the system under consideration, the complementary polynomial has the form:

$$D_{com}(p) = b_3 p_*^3 + b_2 p_*^2 + b_1 p_* + b_0 \quad (8)$$

To obtain the values of  $b_3$ - $b_0$  taking into account the values of the generalized parameters of the system, we find the coefficients values of the polynomials of the open-loop system through the values of the dimensionless generalized parameters of the circuit, using the Mason formula.

$$W(p) = \frac{\sum_{i=1}^q P_i \Delta_i}{\Delta}, \quad (9)$$

where

$P_i$  - the  $i$ -th path from the input signal (or disturbance) to the coordinate of interest. It is the product of the transfer functions of all its constituent links;

$q$  - number of paths;

$\Delta$  - determinant of the system, calculated as the product

$$\Delta = \prod_{k=1}^m (1 - L_k)^*, \quad (10)$$

where

$L_k$  - the transmission of the  $k$ -th circuit, representing the product of the transfer functions of the links included in it (in this case, the transfer function of the negative feedback is taken into account with a "minus" sign);

$m$  - circuit number.

Substitution of generalized parameters into the Mason formula and the corresponding transformations led to the following relations for the coefficients of the open-loop system:

$$a_3 = 1 - \frac{b}{m(\gamma-1)} \quad (11)$$

$$a_2 = \frac{1}{m} \left( 1 + \frac{v(1+(\gamma-1))}{\gamma} + \frac{b}{(\gamma-1)} \right) \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{vm(\gamma-1)(1+(\gamma-1))+b(v(\gamma-1)+\gamma)}{m^2\gamma(\gamma-1)} \quad (13)$$

$$a_0 = \frac{v(b+1)}{m^2\gamma} \quad (14)$$

The idea of quasi-neuroregulation is to generate, according to the structure of the output neuron, a signal that implements relation (7) and supply this signal to the input of the control object. Because the numerical values of the coefficients  $a_i$  of the polynomial  $D_d(p)$  are known, and the coefficients of the open-loop system  $D_o(p)$  are determined by its parameters, then the numerical values of  $b$  are found from relation (6). To calculate the derivatives  $p_i$  included in the terms of relation (7), it is proposed to use the finite difference method [14].

The essence of this method is illustrated in Figure 4 and relationships (15)-(17). In the figure:  $y_1$  is the current value of the adjustable coordinate  $y$ , and  $y_2, y_3, \dots$  are its previous values with a delay of time  $\Delta t$ .

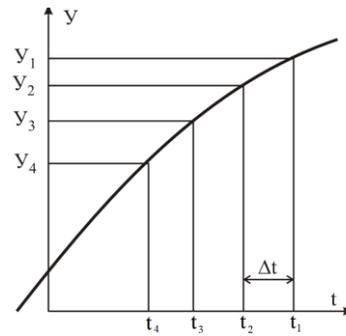


Fig. 4. Finite difference method

For small values of  $\Delta t$ , it is obviously true that at time  $t_1$ :

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{v_1}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta t}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dt^2} &\approx \frac{v_1^2}{(\Delta t)^2} = \frac{v_1 - v_2}{(\Delta t)^2} = \frac{(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)}{(\Delta t)^2} = \\ &= \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{(\Delta t)^2}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3y}{dt^3} &\approx \frac{v_1^3}{(\Delta t)^3} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{(\Delta t)^3} = \frac{(y_1 - 2y_2 + y_3) - (y_2 - 2y_3 + y_4)}{(\Delta t)^3} = \\ &= \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{(\Delta t)^3}; \end{aligned} \quad (17)$$

.....

This system, as an object of regulation, has a fourth-order characteristic polynomial  $D_o(p)$ .

$$D_o(p) = p_*^4 + a_3 p_*^3 + a_2 p_*^2 + a_1 p_* + a_0. \quad (18)$$

Coefficients  $a_0$ - $a_3$  are determined by the values of the parameters of the regulated object. Let us establish that to solve the problem posed, only one output coordinate will be used - the speed of the second mass  $\omega_2$ . To ensure the required control indicators, it is necessary to calculate the additions  $b_0$ - $b_3$  to each of the coefficients of the polynomial (18).

As desired, we choose the standard fourth-order Butterworth polynomial:

$$D_a(p) = D_B(p).$$

$$D_B(p) = p_*^n + a'_{n-1}\omega_0 p_*^{n-1} + a'_{n-2}\omega_0^2 p_*^{n-2} + \dots + a'_1\omega_0^{n-1} p_* + a'_0\omega_0^n, \quad (19)$$

where  $\omega_0$  - the main parameter of the distribution of roots equal to the geometric mean root, and if  $a_0=1$ , then

$$\omega_0 = \sqrt[n]{p_1 p_2 \dots p_{n-1} p_n} \quad (20)$$

In the literature, standard polynomials are usually specified with a dimensionless differentiation operator  $p_*=p/\omega_0$ . When obtaining relations, it is necessary that the dimensionless differentiation operators in the expression for the open polynomial (18) and the standard polynomial be the same. Obviously, this will be achieved if  $\omega_0$  in the standard polynomial is taken to be the same as the base value for the dimensionless open-loop operator. Physically, this means that the unit of time is the electromagnetic constant of the electromechanical system. In this case, the Butterworth polynomial has the form:

$$D_B(p) = p^4 + 2,6p^3 + 3,4p^2 + 2,6p + 1. \quad (21)$$

The required numerical values of the coefficients  $b_0, b_1, b_2, b_3$  are found as the difference between the Butterworth polynomial and the open-loop polynomial at the same powers of derivatives  $\pi$ . Substituting (11)-(14) and (21) into (6) we get:

$$\begin{aligned} b_3 &= 2.6 - a_3; \\ b_2 &= 3.4 - a_2; \\ b_1 &= 2.6 - a_1; \\ b_0 &= 1 - a_0. \end{aligned}$$

Let pass in expression (8) to derivatives in finite differences. As input signals we use the current values  $\omega_2(t)$  equal to  $y_1$ , and the previous values  $y_2, y_3, y_4$  corresponding to the values  $\omega_2(t-\Delta t), \omega_2(t-2\Delta t), \omega_2(t-3\Delta t)$ . Then

$$D_{com}(p) \approx b_3 \frac{y_1 - 3y_2 + 3y_3 - y_4}{\Delta t^3} + b_2 \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{\Delta t^2} + b_1 \frac{y_1 - y_2}{\Delta t} + b_0 \quad (22)$$

The structure of the QNR, which implements the analytical relationships for the linearized section of the friction characteristic, is presented in Figure 5.

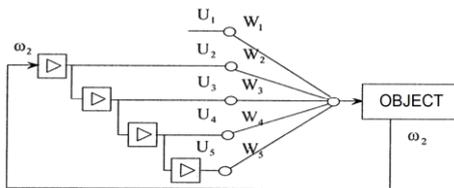


Fig. 5. Neural network structure of the quasi-neuroregulator

By grouping the terms of relation (22) with respect to each of the signals  $y_1, y_2, y_3, y_4$ , we find the weighting

coefficients  $W_1, W_2, W_3, W_4$  that provide the required control signal:

$$W_1 = \frac{b_3}{\Delta t^3} + \frac{b_2}{\Delta t^2} + \frac{b_1}{\Delta t} + b_0; \quad (23)$$

$$W_2 = -\frac{3b_3}{\Delta t^3} + \frac{2b_2}{\Delta t^2} + \frac{b_1}{\Delta t}; \quad (24)$$

$$W_3 = \frac{3b_3}{\Delta t^3} + \frac{2b_2}{\Delta t^2}; \quad (25)$$

$$W_4 = \frac{b_3}{\Delta t^3}. \quad (26)$$

The resulting expressions for calculating the weight coefficients are valid for each of the linearized sections of the load characteristic. The numerical values of the weight coefficients will be determined by the rigidity of the mechanical characteristics of these sections. If it is necessary to consider a transient process in which the operating point passes through all sections, the structure of the QNR looks like in Fig. 2, where the number of output neurons will be equal to four.

**Conclusions.** Analytical relations are derived for calculating the weight coefficients of a quasi-neuroregulator using the structure of a simplified neural network. The values of the weight coefficients calculated from these relationships ensure the elimination of frictional self-oscillations and the specified values of the dynamic parameters of the electromechanical system. In contrast to the synthesis of a neural network of traditional neuroregulators, the need for repeated up to  $10^6$  iteration calculations of weight coefficients using a computer is eliminated.

## References (Literature)

1. Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография / В. Б. Клепиков. Х. : Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»». 2014. – 408 с.
2. Иванченко Ф.К., Красношпапка В.А. Динамика металлургических машин. М.: Металлургия. 1983. – 294 с.
3. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт. 1965. – 267 с.
4. Armstrong - Helouvy В. Control of Machines with Friction. - Kluwer Academic Publishers. - Boston / Dordrecht / London. 1991. - 173 p.
5. Електротехніка Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. "Енергоєфективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення" Київ, Інститут електродинаміки НАН України. 2018. – 310 с.
6. Kato S., Yamaguchi K., Matsubayashi T. On the dynamic behaviour of machine tool slideway. Characteristics of static friction in stick-slip motion // Bulletin of the JSME. 1970. Vol. 13. № 35. P. 170–179.
7. Причини поломок осей рудничных электровозов /А.А. Ренгевич, П.С. Шахтарь, К.П. Володько, А.И. Ющенко, М.К. Галушко, Б.А. Кузнецов, Г.Я. Куделя, М.К. Мехеда, О.Х. Охримчук // Вопросы рудничного транспорта//Сб. Статей/Под ред. Н.С. Полякова. М.:Госгортехиздат. 1962. Вып 6. с. 192–203.
8. Деклараційний патент України 12362. Квазинейрорегулятор для електромеханічної системи / В.Б. Клепиков, В.І. Колотіло, І.С. Полянська, А.В. Руденко (Україна). 2006. Бюл. №7.



## Fuzzy logic technologies in the diagnostic system of electromechanical processes of the cold rolling mill

**Nazarova Olena**, PhD, Associate Professor,

National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: [nazarova16@gmail.com](mailto:nazarova16@gmail.com)

**Rusiak Oleksandr**, PhD. student

National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

**Annotation.** The article is devoted to the issue of increasing the efficiency of the diagnostic system of electromechanical processes of the cold rolling mill by supplementing the decision-making system with elements of fuzzy logic. The object of improvement of the existing information and measurement diagnostic complex is the section of the unwinding mechanism and rolling stand. The main goal is the development of a diagnostic system that will warn about the pre-emergency condition regarding the break of the rolling metal strip. The conducted computer simulation of the fuzzy decision-making system showed that the system works correctly, according to the established requirements, as well as to the developed base of fuzzy rules, and can be used to diagnose the pre-emergency condition associated with the break of the rolling metal strip.

**Keywords:** fuzzy logic, diagnostic system, electromechanics, electric drive, cold rolling, simulation.

**Introduction.** Currently, the use of microprocessor technology has contributed to the "intellectualization" of industrial equipment. A vivid example of this is electric drives, which are systems capable of self-adjustment and adaptation. Such systems are becoming increasingly widespread as drive technology for high-performance lines.

One of the most important modern trends in the development of information technologies is the use of fuzzy logic in the development of automated information processing and management systems. The advantages of using fuzzy logic are the simplification of modeling of complex systems, the creation of flexible decision support algorithms based on human-understandable sets of rules, the possibility of processing imprecise and incomplete information [1]. In [2], the direction of creation of intelligent support systems for engineering solutions for complex non-linear electric power facilities with the use of mathematical apparatus of artificial intelligence is considered. The development of software for the automated monitoring of the residual resource of mechanical equipment of rolling mills was carried out [3].

The development of systems for continuous monitoring and diagnostics of the technical condition of the electrical equipment of a metallurgical enterprise is the main direction of the intelligent information systems design for industrial enterprises [4]. This work presents a method of diagnosing equipment based on changes in motor current. In this document [5] a method is proposed that analyzes the load torque and motor speed variation in rough and finished drive cages (stands) according to the steel to be rolled. The results can be used as part of an expert system for automatic estimation of power consumption at the hot rolling condition.

So, the parameters for monitoring and diagnostics of rolling equipment can be conditionally divided into mechanical and electrical, but in most cases they are quite strongly interrelated with each other. Considering the sources discussed above, it can be concluded that

when developing monitoring and diagnostic systems, the main electromechanical parameters should include the rolling force, current and voltage of the motor, rotation frequency, load moment. Quite often, certain mathematical and computer models of equipment are used to check the functionality of the proposed diagnostic and monitoring systems [6-8]. Prospective areas of development of these systems are the use of databases of monitoring systems and expert knowledge in decision-making systems for service personnel, as well as elements of artificial intelligence for systems of automatic control of the technological process.

**The aim of the work** – development of elements of the decision-making system based on fuzzy logic for the cold rolling mill diagnostic system, which will increase the effectiveness of the diagnosis results of the existing system.

### Description of the existing diagnostic complex.

To solve the task of researching the electromechanical parameters of the training single-stand cold rolling mill of the cold rolling shop No. 1 of Zaporizhstal OJSC, a multi-channel complex is used, which is designed for monitoring and archiving the received data [6].

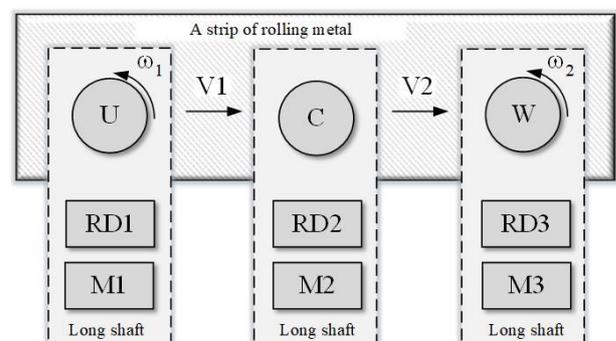


Fig. 1. Layout of rolling mill equipment

The layout of the equipment is shown in Figure 1, where U is the unwinder (unwinding device); C – cage (stand) with pressure devices; W – winder (winding

device); RD – reducers of motors of unwinding and winding mechanisms, cages; D - motors of the electric drives of the unwinding mechanism, the cage and the winding mechanism;  $\omega_1, \omega_2$  – angular speeds of the unwinder and winder;  $V_1, V_2$  - linear speeds of the strip at the entrance and exit of the cage. The complex uses information obtained from speed, current and voltage sensors. The following coordinates are monitored for

each of the four electric drives [7]: motor voltage, excitation current, armature current, as well as the cage speed, which is taken taking into account the calibration coefficient proportional to the tachogenerator voltage.

Thus, a fairly thorough database of the rolling of each roll is created every day, which is available both in graphical display and in tabular form, which expands the possibilities of using and analyzing the data obtained.

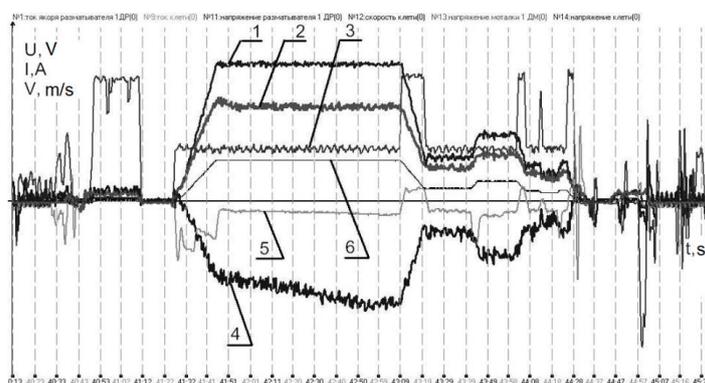


Fig.2 Graphs of electromechanical processes during normal roll rolling

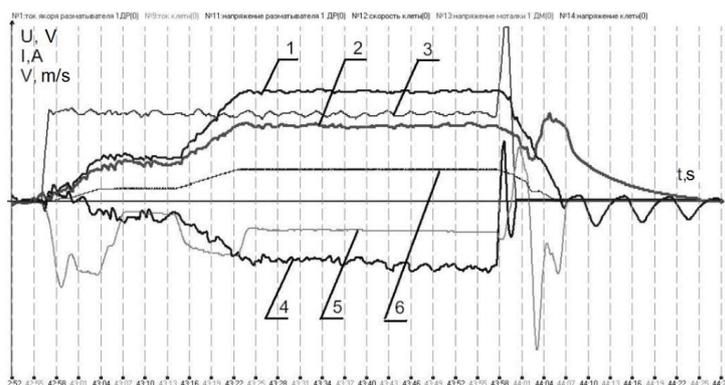


Fig. 3. Graphs of electromechanical processes during emergency rolling - lane break

Figure 2 shows the electromechanical processes (1 - cage voltage, 2 - winder voltage, 3 - unwinder armature current, 4 - unwinder voltage, 5 - cage current, 6 - cage speed) during strip rolling in normal mode. Figure 3 shows similar curves for the case of an accident - a lane break. The results of the development and analysis of the obtained monitoring results showed the directions of research, in which the following main stages can be distinguished: analysis of technological equipment; detection of "problematic" modes; research of rolling modes and their improvement. With the help of this monitoring, it is possible to optimize the settings of the control systems, both for individual control channels and for the multi-parameter system in general.

For the most part, electromechanical, electro-technical and electric power facilities are non-linear and interconnected systems, which determines the complexity of regulating the processes that occur in them. The problems of effective management of the specified objects are becoming more and more urgent,

they are among the fundamental scientific and technical problems. It is known that classical control methods are effective for a limited number of objects, or for objects to which certain simplifications are applied in the mathematical description of this object [2]. Among the most common problems of using traditional control methods, the following can be highlighted: the use of linear regulators for objects with unstable states, loads, nonlinearities, disturbances; fixity of regulator parameters; work in extreme conditions; parametric uncertainty of the electric power system, etc. Most of these problems can be solved by applying synergistic control algorithms, fuzzy neural networks and fuzzy logic methods.

The relevance of using the principles of artificial intelligence in electric power systems is to ensure the necessary level of information exchange between the constituent elements of the system based on intelligent methods. Currently, one of the ways to solve the problem of building an effective automatic control

system or making a decision is the use of intelligent methods based on the mathematical apparatus of fuzzy logic, which implement control based on expert information and do not require a mathematical description of the system's behavior [2]. Fuzzy logic makes it possible to widely use expert knowledge in the construction of decision-making systems and automatic control systems due to the presence of quantitatively fuzzy parameters. Therefore, when developing management systems for objects that are difficult to formalize, it is advisable to use models and methods based on the principles of fuzzy logic [8]. Such situations occur in the presence of the participation of operators in the functioning of the technological object or in the absence of accurate knowledge about this control object. The object of improvement of the existing information and measurement diagnostic complex is the section of the unwinding mechanism - rolling cage (stand). The main task of the improvement is the development of a diagnostic system that will warn about the pre-emergency condition regarding the break of the rolling metal strip. Other defects and sections of the rolling condition are not considered.

#### Development of a fuzzy decision-making system.

Thus, to build an element of improvement of the diagnostic system, it is suggested to use the principles of fuzzy logic. The following values were set at the input of this fuzzy system for making a decision about the diagnostic object: voltage of the armature circuit of the motor of the unwinding mechanism; current of the armature circuit of the motor of the unwinding mechanism; the tension of the strip of rolled metal in the area between the unwinder and the rolling cage. At the output, the general state of the system is obtained, which directly depends on the values of the input data [8]. Figure 4 shows the general view of the developed fuzzy system.

Next, belonging functions are created for each of the input variables, as well as for the output. For the inputs and outputs, the "trimf" type functions were chosen, because it allows you to visually show the change of values quite easily. Next, the limits of values in which fluctuations of input and output data are expected are set [8].

According to the technological instructions, the nominal current of the armature circuit is 1100 A, the nominal voltage of the armature circuit is 600 V, the maximum tension force is 1500 N. The angular speed of the electric drive of the unwinding mechanism can be adjusted in two zones: the first zone - by increasing the voltage of the armature circuit to the nominal value, the second zone - weakening of the magnetic flux. At the nominal load, the electric drive must reach the nominal voltage values. Reduced voltage values cannot be attributed to incorrect operation of the electric drive,

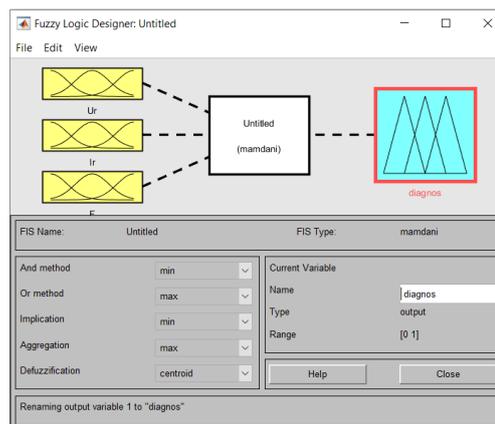


Fig. 4. General view of the developed fuzzy system

because rolling can be carried out at a reduced speed when feeding the metal strip into the rolls of adjacent electric drives, as well as increasing the speed to the working speed with subsequent braking and tightening of the strip. Similarly, the current values of the armature circuit of the unwinding mechanism vary. Values from zero to the nominal value of the current are considered acceptable during the operation of the electric drive, however, during acceleration and braking, the dynamic component must be taken into account, which is acceptable within about 1.5-2 times of the nominal value.

The maximum allowable value of the current is determined by a two-fold excess of the nominal value and is calculated when choosing protective equipment against exceeding the starting currents. The tension force is regulated by the tension diagram of the rolled metal strip. This chart has several sections.

The first section has a linear character and is called the elastic zone, here the strip of metal is subject to Hooke's law. The second section is a small horizontal line, called the zone of general fluidity, here there is a significant change in the length of the strip without a significant increase in the load. The third zone is the strengthening zone, here the elongation of the strip is accompanied by an increase in load, but more slowly than in the elastic area.

The highest point of the curve of this diagram is the ratio of the maximum force that the strip of metal can withstand to its initial cross-sectional area, called the strength limit. The last part of the curve corresponds to the destruction of the properties of the metal and the destruction of the metal band, which corresponds to the band gap.

Having analyzed the electromechanical processes of two interconnected electric drives of the unwinding mechanism and the drive cage, limits were assigned for the inputs, namely for the voltage of the unwinding mechanism ( $U_r$ ) from 0°V to 600°V:

- less than 200°V - the voltage is low;
- from 200°V to 620°V - normal voltage;
- from 620°V to 700V - the voltage is above the norm.

For the current of the armature circuit of the unwinding mechanism from 0 A to 2200 A:

- from 0 A to 1100 A is a normal current;
- from 1100 A to 1600 A - the current is increased;
- from 1600 A to 2200 A - the current is high.

For the tension of the rolled metal strip from 0 N to 1500 N:

- from 0 N to 1200 N - the tension is less than normal;
- from 1200 N to 1500 N - normal tension;
- from 1500 N - the tension exceeds the norm.

A scale from 0 to 1 was conventionally set for the general state of the system:

- from 0 to 0.3 - excellent condition (excellent);
- from 0.3 to 0.8 is a normal state (normal);
- from 0.8 to 1 - pre-emergency state (bad).

The belonging functions of voltage, current, tension, as well as the final state of the system are shown in Figures 7-8, respectively.

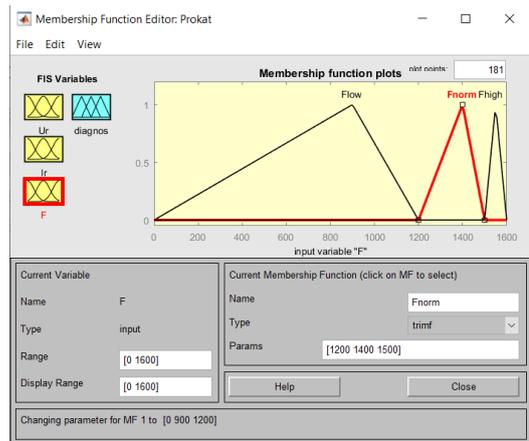


Fig. 7. Functions belonging to the tension of the rolling metal strip in the area between the unwinding mechanism and the rolling cage

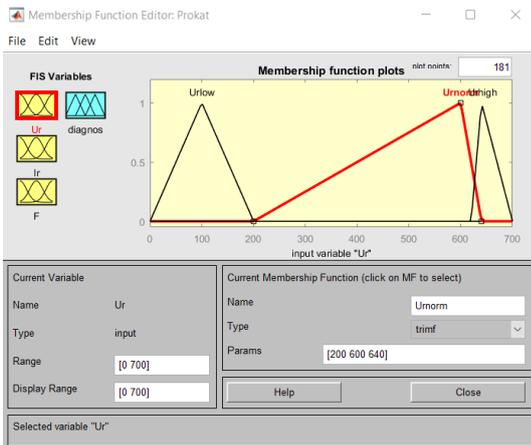


Fig. 5. Functions belonging to the tension of the unwinding mechanism

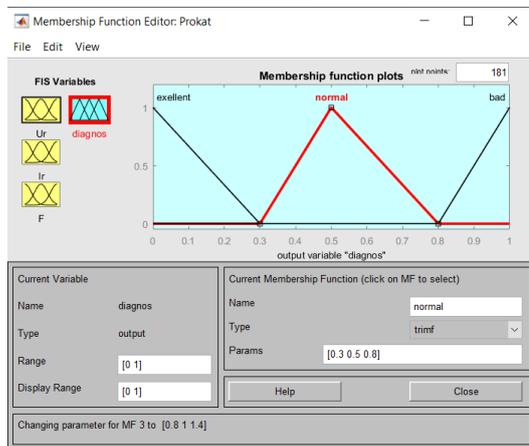


Fig. 8. Functions belonging to the system state

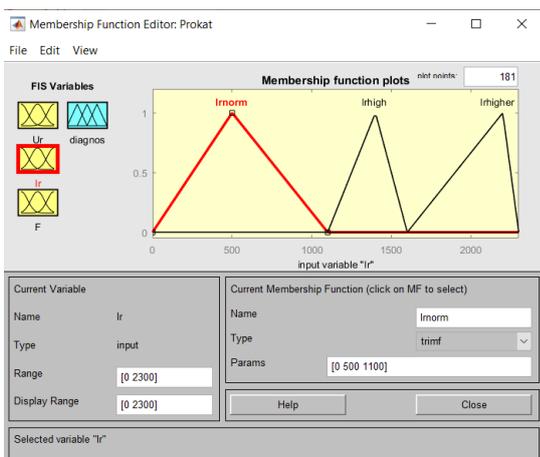


Fig. 6. Functions of current belonging to the armature circuit of the unwinding mechanism

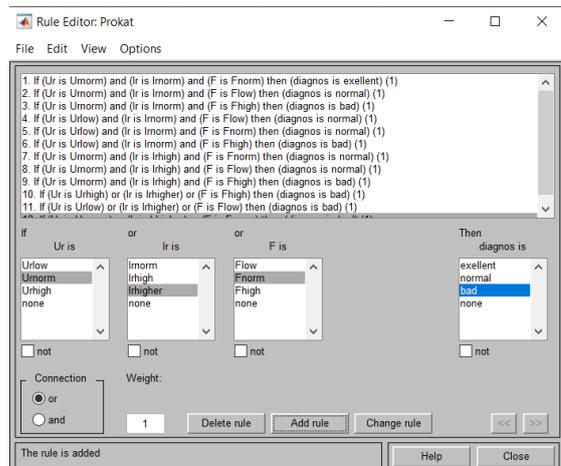


Fig. 9. List of rules in the rules editor window Fuzzy Matlab

A base of fuzzy rules was developed with the use of given belonging functions. To build this base of rules, an "if-then" type model is used, with the help of which connections are established between input and output parameters of the system.

The main purpose of the base of fuzzy rules is to convey in a formal form the knowledge of experts or the results of experiments obtained empirically in a certain problem area.

To confirm the correctness of the created fuzzy system, a data table with simulation results is presented (Table 1), using a graphical representation of the fuzzy output of the decision-making model regarding the state of two interconnected electric drives (uncoiling mechanism and rolling cage) of the cold rolling mill.

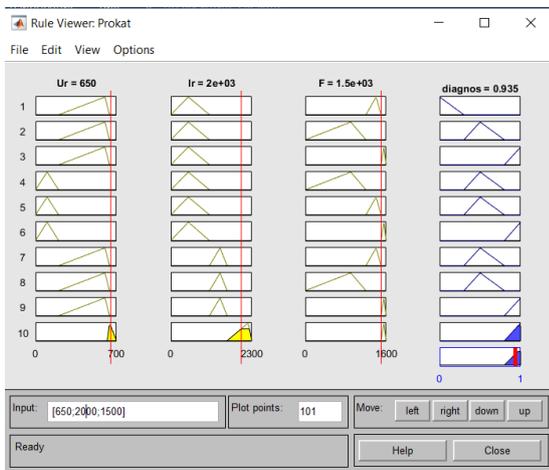


Fig. 10. A graphic representation of the fuzzy output of the decision-making model regarding the state of two interconnected electric drives (the unwinding mechanism and the rolling cage) of the cold rolling state

Table 1

Input values			Вихідне значення		
Armature circuit voltage (Ur), V	Armature current (Ir), A	Metal strip tension (F), N	System status (diagnos), c.u.		
100	500	1570	0.928		
660	1400	1570	0.857		
600	1400	1400	0.653		
500	1000	1500	0.523		
600	1100	1400	0.289		
200	1100	1400	0.587		
300	1100	1200	0.551		
600	2000	1400	0.839		
600	2290	1400	0.812		
670	2290	1400	0.847		
690	2290	1580	0.858		
650	2000	1500	0.935		

So, as a result of the verification of the decision-making element based on the fuzzy logic of the improved automated system for monitoring and diagnosing the electromechanical processes of the cold rolling mill, various situations with input and output data were simulated and it was concluded that the system works correctly, in accordance with the established requirements, and also to the developed base of fuzzy rules.

### Conclusions

1. The system for diagnosing the electro-mechanical processes of the state of cold rolling has been improved by supplementing it with a fuzzy system for making a decision about the diagnosis object based on the database of electromechanical processes of two interconnected electric drives: the unwinding mechanism and the rolling cage. At the input of this system, the voltage of the armature circuit of the motor of the unwinding mechanism, the current of the armature circuit of the motor of the unwinding mechanism, the tension of the rolled metal strip in the area between the unwinder and the rolling cage are set. At the output, the general state of the system is obtained, which directly depends on the values of the input data.

2. Data from current and voltage sensors, which are already installed on the industrial equipment of the cold rolling shop No. 1 of Zaporizhstal PJSC, are used to obtain measurement information about diagnostic parameters. Information about the value of the tension force of the rolling metal strip can be obtained both by installing additional measuring devices and indirectly, using mathematical models of the current radius of the roll and the linear speed of the metal strip.

3. The simulation of the system for making decisions about the state of the diagnostic object based on fuzzy logic, taking into account various situations with input and output data, showed that the system works correctly, in accordance with the established requirements, as well as the developed base of fuzzy rules and can be used for pre-emergency diagnostics the state associated with the breaking of the rolling metal strip.

### References (Literature)

1. Шушура, О. М. Методологічні основи побудови інформаційних технологій для автоматизації управління складними системами на принципах нечіткої логіки [Текст] : дис. докт. техн. таук : 05.13.06 : захищена 11.03.18 : утв. 24.09.18 / Шушура Олександр Миколайович. Київ, 2018. 322 с.
2. Кирик, В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник [Текст] / В.В. Кирик. Київ : КПІ ім Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2019. – 224 с.
3. Крот, П.В. Методи і технічні засоби автоматизованого моніторингу динамічних навантажень та діагностики зносу ліній приводу прокатних станів

- [Текст] / П.В. Крот, В.В. Вереньов // 36. статей проєктів за програмою «РЕСУРС» НАН України, 2009. С. 123-129.
4. Karandaev, A. S. Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel / A.S. Karandaev, R.G. Mugalimov, M.Y. Petushkov, S.I. Lukyanov, A.S. Sarvarov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. pp. 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.
5. Orcajo, G. A. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills / G. A. Orcajo et al. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. Vol. 52. No. 3. pp. 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.
6. Назарова, Е. С. К вопросу разработки систем диагностирования электромеханических систем станов холодной прокатки / Е. С. Назарова // Электротехника та електроенергетика. 2013. № 1. С. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6>.
7. Sadovoi, O. Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Monograph. / O. Sadovoi, O. Nazarova, V. Bondarenko, A. Pirozhok, T. Hutsol, T. Nurek, Sz. Glowacki – Krakow: Traicon, 2020. – 138 p.
8. Назарова, О.С. Удосконалення системи діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів / О.С. Назарова, Б.В. Васильєв, Д.Р. Шокуров // Электротехника та електроенергетика, 2023. №1. С.7-18. DOI 10.15588/1607-6761-2023-1-1
2. Kyryk, V.V. Matematychnyy aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk [Tekst] / V.V. Kyryk. Kyiv : KPI im Ihorya Sikors'koho, Vyd-vo «Politehnika», 2019. – 224 s.
3. Krot, P.V. Metody i tekhnichni zasoby avtomatyzovanooho monitorynhu dynamichnykh navantazhen' ta diahnostyky znosu liniy pryvodu prokatnykh staniv [Tekst] / P.V. Krot, V.V. Veren'ov // Zb. statey proektiv za prohramoyu «RESURS» NAN Ukrayiny, 2009. S. 123-129.
4. Karandaev, A.S. Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel / A.S. Karandaev, R. G. Mugalimov, M.Y. Petushkov, S.I. Lukyanov, A.S. Sarvarov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. - pp. 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.
5. Orcajo, G. A. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills / G. A. Orcajo et al. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. - Vol. 52. No. 3. pp. 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.
6. Nazarova, Ye. S.K voprosu razrabotki sistem diagnostirovaniya elektromekhanicheskikh sistem stanov kholodnoy prokatki [Tekst] / Ye. S. Nazarova // Yelektrotekhnika ta yelektroyenergetika. 2013. № 1. S. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6>
7. Sadovoi, O. Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Monograph. / O. Sadovoi, O. Nazarova, V. Bondarenko, A. Pirozhok, T. Hutsol, T. Nurek, Sz. Glowacki – Krakow: Traicon, 2020. – 138 p.
8. Nazarova, O.S. Udoskonalennya systemy diahnostyky stana kholodnoyi prokatky na osnovi bazy danykh yoho elektromekhanichnykh protsesiv / O.S. Nazarova, B.V. Vasyly'ev, D.R. Shokurov // Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka, 2023. №1. S.7-18. DOI 10.15588/1607-6761-2023-1-1

#### References (transliterated)

1. Shushura, O. M. Metodolohichni osnovy pobudovy informatsiynykh tekhnolohiy dlya avtomatyzatsiyi upravlinnya skladnymy systemamy na pryntsypakh nechtikoyi lohiky [Tekst] : dys. dokt. tekhn. nauk : 05.13.06 : zakhyshchena 11.03.18 :utv. 24.09.18 / Shushura Oleksiy Mykolayovych. Kyiv. 2018.322 s.

## An approach to automated selection of servos for mobile robots

**Vladimir Kotlyarov**, PhD

NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, E- mail: vok2kaf@gmail.com

**Yaroslav Anischenko**,

NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, E-mail: workmailyar@gmail.com

**Annotation.** The study is aimed at solving the problem of a large space of possible design solutions in the conceptual design of electric drives for robots. In the implemented computer-aided design process, clustering of servo drive parameters is used, the resulting clusters are used in the design rules of the expert system knowledge base. Examples of design rules are given and an expert system software architecture is proposed.

**Keywords:** Servomotors, design process, expert system, clustering, system requirements, semantic networks

**Introduction.** Electric servos (servo actuators, servomotors) are the basic elements of many electromechanical devices and systems. Often it is servos that implement most important functional requirements and largely determine system properties and characteristics, such as the robots operational and energy efficiency. Low-power servo drives are widely used in industrial and service wheeled and walking mobile robots [1-6], in mobile manipulators, performing a number of functions in different operating modes. For example, in [1] Dynamixel MX-106R and Dynamixel PRO H-42-20-S300 types servos were used to drive the limbs of walking robots. Servo drives may account for more than 90% of the electricity consumed in such robot. Therefore, optimization of energy consumption by robot devices is achieved, among other things, by choosing the types of servos used. The procedure for such a choice involves the analysis of a large space of technical solution options, characterized by a significant variety of technical characteristics and design features.

The characteristics of servo drives in robots during their design are largely determined by the purpose and type of robot, the design of its mechanisms, by system requirements for the robot as a whole and technical requirements for its individual subsystems. Moreover, the influence of different requirements on the design process and its results can be both consistent and contradictory. It is known, for example, that the indicators of cost and reliability of design solutions, manifested in particular in the choice of materials for the servo drive mechanism, are significantly contradictory. Required control accuracy can influence not only the choice of parametric characteristics of the servo drive, but also its functional features: the presence or absence of a built-in encoder and other sensors, the availability of internal zero position correction and a type of modulation of the control signal, sometimes even up to the choice of control algorithm in electric drive firmware. The large number and variety of such factors and the complexity of their relationships largely determine the difficulty of selection a specific servo drive model when designing an electromechanical system.

The servo drive itself includes several closely interconnected subsystems - a mechanical transmission

with a gearbox and bearings, an electric motor, a controlled power electrical converter (motor driver) and an information subsystem, including regulators, sensors and signal converters. The electrical, mechanical and thermal interaction of these subsystems, the specific technical requirements for them, and the design layout also significantly influence the complexity of designing servo drives. In the practice of designing electric drives for robots, in the simplest cases, the requirements for the nominal characteristics of the servo drive are first determined based on an analysis of the operating modes of the movement mechanism. And then, based on the reference data, a suitable servo drive model with the required moving speed and torque is selected. The process of such selection can be described by the mathematical apparatus of relational algebra and automated by means of database management systems and the SQL programming language, as in the eDrive CAD system [7].

But by initially choosing a servo drive only according to its main technical characteristics, as a result of this choice we also receive a set of its many other characteristics, which may or may not be satisfactory. Next, the motion control system is synthesized and its microprocessor implementation is designed. At the same time, additional factors begin to be taken into account, for example, the type of servo control signal, the need to correct the zero position, which depends on temperature, and others. The type of control signal, in turn, is associated both with the complexity of the implementation of the microprocessor platform (presence of PWM, DAC, etc.) and with the quality of control, which is influenced by the width of the dead zone, dynamic processes in the power part of the system, delays in processing control signal. The rate of rise of motor current with digital control is usually greater than with analog control, and additional current limiting via soft starting may be required [8].

As a result, the algorithm for such a design is three-stage and iterative: 1) determining the basic requirements for the power part of the electric drive, 2) selecting a servo model based on reference data, 3) analyzing the obtained servo properties. The third stage distributed over almost all subsequent stages of designing the entire robot. The number of design

iterations is not known in advance and this greatly affects the design time. Such initial choice of servo may turn out to be not the best possible. The reason is the lack of a systematic approach.

However, another approach is also possible, when at the first stage we determine most of the necessary system properties that affect the technical characteristics of the servo drive. And then, at the second stage of design, the search space for technical solutions immediately turns out to be significantly limited by these properties. System requirements in this case have a two-level structure (design goals and corresponding technical system requirements). The latter depend on the former in complex ways, and are determined by numerous well-known design rules. This is the so-called rule-based design [9]. For example, if high operational efficiency and mobility of a walking robot are required, then it must be ensured by a stable gait, which in turn depends on the delay in the processing of movements by servos, and these delays must be limited when choosing the type of servo. In addition, the degree of autonomy of the robot is determined by its energy efficiency, which also depends on the properties of the servo.

Making design decisions in this case no longer requires relational algebra, but a more complex mathematical apparatus, which can be borrowed from various theories of artificial intelligence. The knowledge model for choosing an electric drive can be a product system, decision trees, Petri nets and other knowledge models. To implement such models, appropriate artificial intelligence software will be required.

**Purpose of the work.** This research is aimed at developing a methodology for selecting servo drives based on system requirements for robots and their subsystems. Such a methodology will include a description of the servo drive design process and software tools needed to automate it. Similar methodologies are known for other elements of electric drives, for example, mechanical transmissions.

**Research results.** The creation of a methodology for selecting servomotors began with the compilation of conceptual graphs (semantic networks) describing the space of design solutions options. Diagrams in the SysML language [10] were chosen as a form of representation of such graphs. An example of such diagrams is shown in Fig. 1 and Fig.2.

A feature of the presented knowledge model is that servos with similar properties are combined into clusters. This allows for decision-making to determine missing design data by analogy. If needed data are absent in the solution under consideration, but are known for other servos from the same cluster.

A typical case is the use of friction characteristics in a mechanism of one type of servo to simulate another type, similar in purpose and main characteristics of the mechanism. For example, viscous damping and static friction values proposed for an AX-12A servo in may be used for all alternative variants of servos; because there

is no other rigorous analysis of such data. In Fig. 1 such a logical conclusion is represented by the “property inference” link. An example of clusters obtained from the analysis of design data for various servos is shown in Fig. 2.

Thus, to automate servo selection, it is necessary to solve the following problems:

- 1) Identify system requirements for robots that influence the choice of functions and parameters of the servo drives of their mechanisms;
- 2) Present explicit and implicit logical connections between the requirements of different levels and the corresponding design variants and their known properties;
- 3) Provide the derivation of implicit connections between elements of the design model, including through logical inferences by analogy, based on the proximity of technical solutions;
- 4) Perform clustering of known design solutions to identify the degree of their proximity and determine typical ranges of changes in the parameters of close solutions. Clustering known servo reference data makes it possible to replace all elements of a cluster with its representative closest to the cluster center, or the center itself. First identifying suitable clusters and further considering only their elements when designing allows us to limit the space for further search for solutions.

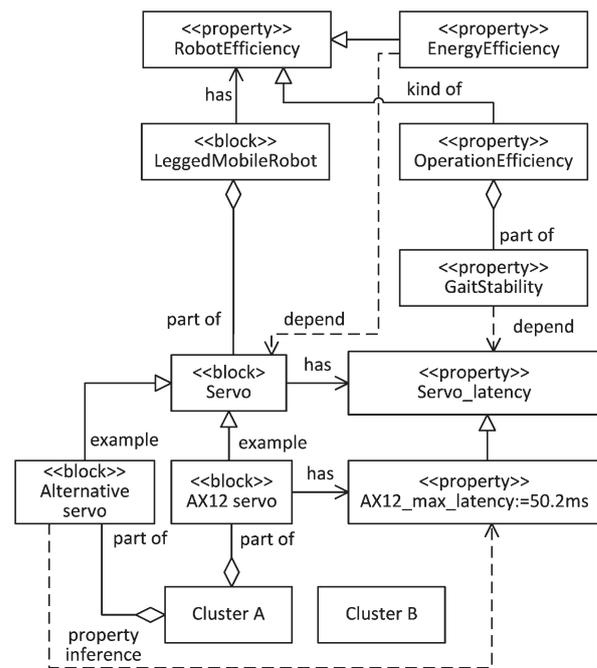


Fig. 1. An example of describing design options

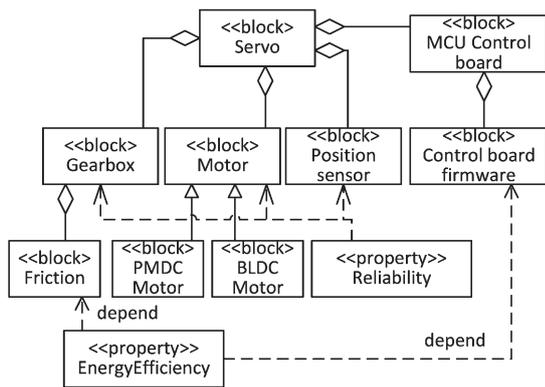


Fig. 2. SysML servomotor model

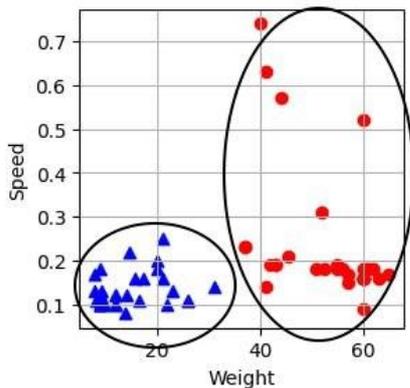


Fig. 3. Example of clustering of servo parameters

In particular, Fig.3 shows the parametric space of two servo parameters - nominal speed and weight. The graph shows the nominal values of these parameters for many known types of servos on these axes. All values shown are derived from manufacturers' reference data. In the created generalized database, we have collected information about several dozen types of servos.

Pairs of parameters (weight, speed) are not located randomly on the plane, but form several well-defined groups - clusters. Depending on the design tasks and the desired degree of detail in the consideration of parameters during conceptual design, a different number of such clusters can be identified, and the boundaries between them can also be drawn in different ways.

In this case, to design a first approximation, it was enough to select only two clusters - servos with "low weight" and servos with "heavy weight". Further, each such cluster can be considered in a simplified manner at the early stages of design. Specific values of the parameters of the servomotors included in the cluster can be replaced in the design rules by their generalized average value, taken, for example, from the center of the cluster.

In Fig. 4 it can be seen that this approach is also applicable to other parameters, for example, to the width of the servo drive structure, highlighting the "small size"

and "large size" of the servo drive. Such linguistic meanings make it possible to formulate general rules for the design of electric drives that underlie design decisions. Let us obtain a possible structure of such a design process by presenting it graphically.

The traditional process of selecting servos is shown in Fig. 5. The constructed diagram is essentially a design data flow diagram. Sources of design information can be: a) the designer or customer, b) design documents and existing variants of design solutions, c) applied design methods and tools. The design results are also the adopted design decisions and design documents. Project stages and procedures act as converters of design information. Symbols meanings for all listed diagram elements are shown in Fig. 6. The connections between them show the use of design data.

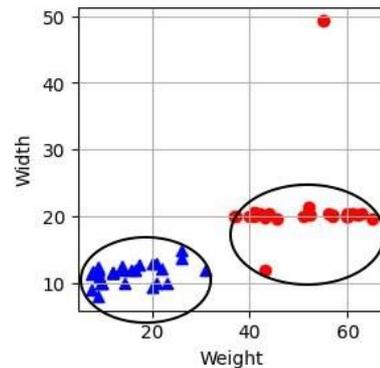


Fig. 4. Clusters of mass and dimensional parameters

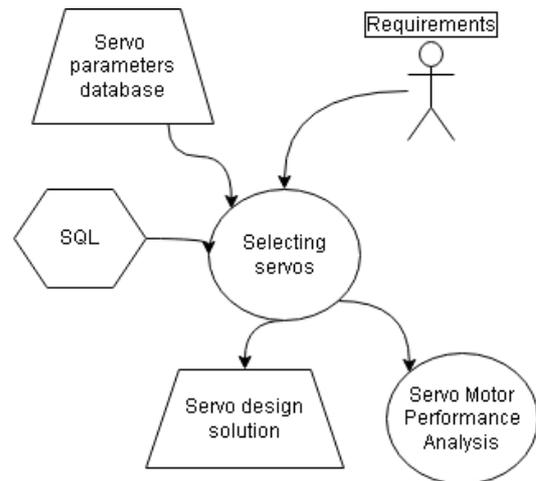


Fig. 5. Traditional design process

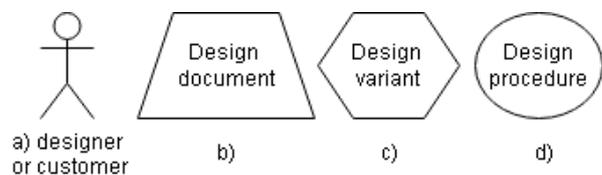


Fig. 6. Meanings of symbols in the diagram

In design automation, the parameters of servo motor options are stored in a database and retrieved from it by generating and issuing queries in SQL, as implemented, for example, in the eDrive CAD system [7]. The initial requirements in this case are also technical and parametric. The designer determines their connection with the system requirements independently. A typical requirement is, in particular, that the rated torque of the servomotor exceeds the required torque value. And only after preliminary selection of the servomotor according to the main nominal parameters, its analysis begins for compliance with other system characteristics - reliability, cost, weight and size indicators and others.

The use of clustering makes it possible to apply an analysis of system requirements for servomotors immediately, even before selecting them based on their nominal parameters. System requirements in this case act as restrictions that set acceptable ranges of parameters in the further search for servo motor options, as shown in Fig. 7:

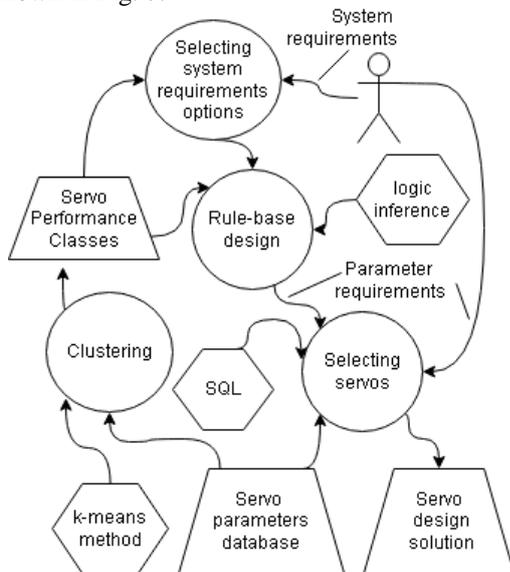


Fig. 7. Clustering in the design process

Design rules in this case can take the form of logical production rules, the left side of which indicates the system requirements, and the right side is the result of logical inference and includes restrictions on the servo parameters that meet the system requirements. For example, a rule might look like this:

requirement(reliability)->motor(blcd).

This means that if high reliability is required, then only servos based on the BLDC motor will be selected from the database. In this case, the names of parameter ranges selected during clustering can be used on the left side:

requirement(weight, small)->weight (C1).

The belonging of the servomotors to the cluster C1 will in turn be further verified when retrieving the servo parameters from the database. It can be seen that design

data with this approach is stored in two forms - in a conventional relational database and in a product knowledge base. This design process was implemented in the form of a distributed computer expert system, accessed by a number of modern information technologies. Its architecture is shown in Fig. 8.

**Conclusions.** The main result of the work is the proposed structure of the process of selecting servomotors, taking into account system requirements, and the architecture of the software of the expert system, which provides support for making design decisions in the process of selecting servomotors. This process includes a servo parameter clustering stage and an artificial intelligence inference procedure.

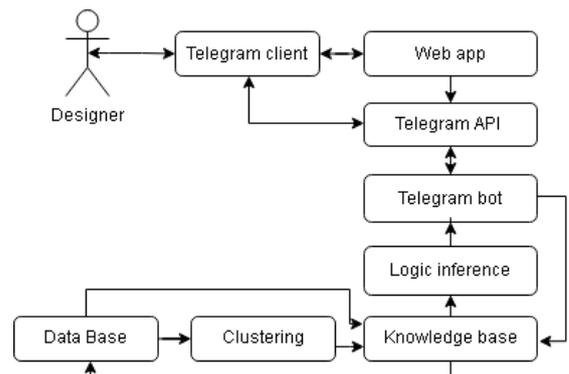


Fig. 8. Expert system architecture

### References (Literature)

1. Folgheraiter, M., Aubakir, B. "Design and Modeling of a Lightweight and Low Power Consumption Full-Scale Biped Robot," International Journal of Humanoid Robotics Vol. 15, No. 5 (2018) DOI: 10.1142/S0219843618500226.
2. Bae, B., Lee, D-H. "Design of a Four-Wheel Steering Mobile Robot Platform and Adaptive Steering Control for Manual Operation," Electronics 2023, 12, 3511. <https://doi.org/10.3390/electronics12163511>.
3. Hashim A. S., Gramescu, B., Captal A.L., Nitu C. "Modeling and identification of a high resolution servo, for mobile robotics," U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 2, 2020. ISSN 1454-2358.
4. Bernardini F.A. et al. "Analysis of the displacement of terrestrial mobile robots in corridors using paraconsistent annotated evidential logic Et," Computer Science & Information Technology (CS & IT) pp. 167-175, 2020. DOI: 10.5121/csit.2020.101115.
5. Alit Swamardika I.B. et al. "Design of Mobile Robot with Robotic Arm Utilising Microcontroller and Wireless Communication," International Journal of Engineering and Technology, Vol. 9, No. 2, 2017. pp.838-846.DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902170.

6. Elfasakhany A. et al. "Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom," Modern Mechanical Engineering. 2011. 1. pp.47-55. doi:10.4236/mme.2011.12007.
7. Vodovozov V., Raud Z., Egorov M., "A toolbox to design and study electric drives," Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC2010, Ohrid, Macedonia, 2010, T5, pp.142-148, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606686.
- 8 Ross, R. "Investigation into soft-start techniques for driving servos," Mechatronics. 24(2), 2014, pp.79-86. DOI:10.1016/j.mechatronics.2013.11.014.
9. Huet A. et al. "Design rules application in manufacturing industries: a state of the art survey and proposal of a context-aware approach," International Journal on Interactive Design and Manufacturing, March 2022. 16(9). DOI:10.1007/s12008-021-00821-w
10. A Practical Guide to SysML. The System Modeling Language. A volume in The MK/OMG Press Book. Third Edition. 2015.

## An implementation example the monitoring energy parameters of the vessel electric power system

**Mykola Mukha**, Educational and Scientific Institute of Automation and Electromechanics  
 National University Odessa Maritime Academy, Odessa, Ukraine, E-mail: [n.mukha52@gmail.com](mailto:n.mukha52@gmail.com)

**Alla Drankova**, Educational and Scientific Institute of Automation and Electromechanics National University Odessa Maritime Academy, Odessa, Ukraine, E-mail: [drankova64@gmail.com](mailto:drankova64@gmail.com)

**Abstract.** The paper proposes an approach and principle of technical implementation monitoring parameters for generators and the most powerful consumers of electricity (bow thrusters and refrigerated containers) using the example of high-voltage systems equipped with HIMAP / SYMAP type automatic control and protection devices. It is about the use of the ship's Rina Cube System and Modbas RTU communication network to transmit monitoring results from the ship to the shore computer center for their further processing and presentation for use by the ship and the company's shore department and services.

**Keywords:** electricity parameters monitoring, ship electric power system, digital communication technologies, Modbus RTU communication network.

### Introduction

Reducing operating costs, reducing energy costs per unit of transported cargo, reducing emissions into the atmosphere are among the priorities of the shipping industry today.

An overall picture of energy consumption and energy savings, as well as an understanding of the energy balance of ships, is needed to solve the problems of managing the main consumers of ships, identifying ways to reduce energy consumption and more detailed calculation of the savings potential.

The energy balance can be calculated from the ship's design documentation and verified using onboard measurements and monitoring of key energy consumption parameters. An onboard energy estimate will allow each source of energy consumption to be calculated with sufficient accuracy to be used in a ship's energy balance diagram.

Energy efficiency as defined by the IMO The Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) [1] is a possible approach to monitoring ship and fleet performance over time. This is also an option to consider when looking to optimize ship performance. The goal of SEEMP is to provide a mechanism by which a company and/or a ship can improve the energy efficiency of ship operation. A ship-specific SEEMP should be linked to the broader corporate energy management policy for the company that owns, operates or controls the ship. The goal of SEEMP is to increase energy efficiency, reduce overall fuel costs and, consequently, reduce emissions into the atmosphere. Energy assessment (energy audit) is the necessary knowledge when making investment decisions. Fuel savings and emission reductions, investment costs and payback times should be analysed. The report on these analyses provides a sound basis for evaluating relevant benefits and making investment decisions.

### I. SHIP ENERGY EFFICIENCY IMPROVING WAYS

There are some ways to improve energy efficiency. One of these ways to increase the ships energy efficiency and

reduce energy consumption is managing the flow of electric energy. It's this part of the energy from the total ship energy flow (Fig. 1) is considered by the authors in this paper.

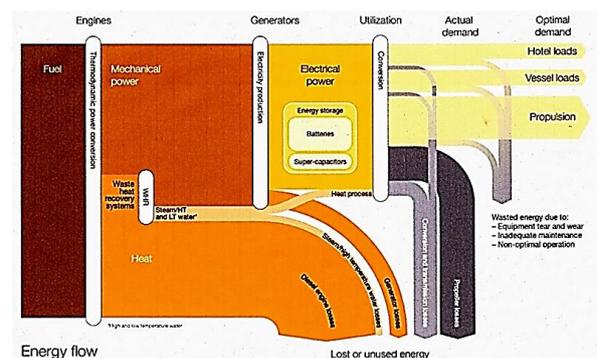


Fig. 1. Ship's Energy Flow [1]

Undesirable losses occur during the production, distribution, conversion, and use of electricity in the ship's autonomous electrical system. In addition, ship electricity consumers mainly have an active inductive load, that is, the total current of generators, transformers and cable lines should be increased relative to the required active load by a value that is inversely proportional to the value of the power factor, which is proportional to the increase in the number of electricity consumers. Therefore, generating plants must provide additional reactive power, which, in turn, reduces their efficiency due to the increased fuel consumption of primary engines (diesel engines).

Thus, one of the ways to increase an energy efficiency of the ship's operation and reduce a power consumption along with improving the operation modes of the ship's propulsion and optimizing the operation of an auxiliary equipment and mechanisms is an implementation of the methods managing flows electric energy.

In our opinion, there are two ways or two areas to solve this problem: 1) optimal control of the electrical energy flow at the stage of generation and distribution; 2) optimization of energy flows at the consumption stage, i.e., at the stage of electro-mechanical electricity conversion (ship electric drives).

In the first area we can offer a proven solution [2,3] that can be used to improve the energy efficiency of ship autonomous power systems by dynamic compensation of reactive power in load circuits depending on changes in the reactive conductivity of loads, which will increase the speed, accuracy of the reactive power compensation process in transient switching modes of loads and voltage stability of the autonomous ship electrical system, and thereby reduce energy costs and carbon dioxide emissions into the atmosphere by sea vessels. In addition, on ships equipped with modern excitation systems for synchronous generators, which make it possible to organize an additional channel for controlling the power factor, it is possible to increase the efficiency of electricity production in this way.

The second direction of solving the energy efficiency problem relates to the reasonable introduction of frequency-controlled electric drives (VFD) for different ship mechanisms [1,4], for example, for turbo mechanisms, cargo complex mechanisms, anchor-mooring mechanisms.

A typical ship's situation and example. Ships' pumps and fans applications are typically over-dimensioned for the actual needs in question. Over dimensioning results from design criteria set to meet a vessel's extreme operating conditions. However, such conditions rarely meet in everyday operation. As a rule, pumps and fans constantly run at full speed and the flow is controlled by valves and dampers. Such control methods are wasted energy. By equipping these mechanisms with frequency converters (VFD), significant energy savings can be made, and as a result, lower energy consumption reduces CO2 emissions [1,2, 4].

## II. SHIP ENERGY PARAMETERS MONITORING SYSTEM

The energy parameters monitoring process of the ship's propulsion plant (the main engine and its systems), ship's generator sets, and the main consumers of electricity - thrusters and reefer containers - is provided and transmitted to shore using the Rina Cube Optimum system, which is installed on each company ship. The basic layout of the Rina Cube System (hardware kit installation): ENZA PC, signal converter, switch, Serial to Ethernet converter, power supply is shown in Fig. 2.

In addition to the indicated ship energy-converting facilities for monitoring, the Rina Cube System is connected to Exhaust Gas Scrubbers, which provides cleaning of the ship's exhaust gases, as well as to the ship's navigation system and the marine radio communication and telecommunications system.

The functional diagram of the Monitoring System (MS) for the ship's equipment main parameters is shown in Fig. 3.

The main goals of creating an MS for monitoring the regime parameters of ship power plants are:

1. Optimization of ship's equipment energy consumption and the ship, i.e., reduction of energy consumption per unit of transported cargo by increasing the

energy efficiency of ships, which, on the one hand, will reduce the shipping cost, and on the other, will help reduce air pollution from ships and help reduce of the green-house gases marine emissions.

2. Obtaining quantitative estimates of the energy consumption by the company's ships to develop a strategy and methods for energy efficient and energy save management.



Fig. 2. Rina Cube System

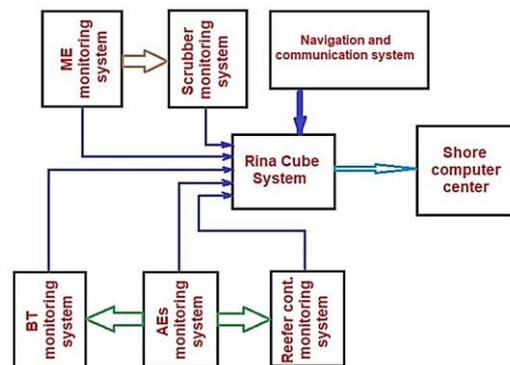


Fig. 3. Functional diagram of the Monitoring System

What are the main indicators and criteria for that optimization and improvement of the ship equipment performance?

In our opinion, this can be, for example, the efficiency, the power factor of ship's power electrical installations and systems, the operational parameters (characteristics), for example, of ship main and auxiliary power plants, bow thrusters, reefer containers, as well a specific measured parameter that directly or indirectly determines energy consumption, for example, fuel consumption (VAF fuel meters), exhaust gas utilization (Scrubbers System).

As noted, one of the possible ways to improve the energy efficiency of ship operation and reduce energy consumption is the following: optimizing the operation of ship auxiliary equipment, i.e., development of rational methods for managing electric energy flows in the ship electric power plant in general.

This paper discusses approaches and principles for obtaining the necessary information about the ship's generators electrical parameters and the most powerful load of a ship power plant - thrusters and refrigerated containers (which is 70-80% of the ship's consumers power on board). In this context, as an example, the proposed variant of monitoring the generators electrical values of vessel high-voltage systems, which are equipped with such generator automation and protection devices as SYMAP and HIMAP, is considered.

When determining the rational configuration of the system for monitoring the generating sets parameters, it should be noted that for high-voltage vessel electrical systems, the control of electrical quantities is possible only with the help of the indicated electronic devices SYMAP, HIMAP, using installed (standard) high-voltage current transformers.

As the practical implementation of such systems shows, when choosing a rational structure (connection method, communication interface, communication network, etc.), one should also consider the processing and presenting method of received data (software, PC tools).

A possibility option for connecting all input signals of the main board, as well as digital outputs of SYMAP-BCG automation devices (using their RS-485 interface and terminals 26-27) of each of the ship's generators to the Rina Cube system (through a free port of the Moxa Server) via the Modbus RTU network [5] and using the straight-line topology is shown in Fig. 4.

The corresponding settings for this connection option can be obtained by entering the SYMAP-BCG system settings. The implementation of the above links will allow selecting (or developing additionally) appropriate software and PC tools for processing and using monitoring results in future both for the ship and for the company's departments and services.

With the analogous inputs for measurement (Fig. 4), the following values can be measured and displayed [5,6]:

- 3 phase-to-phase and line voltages of feeder and BUS1 and BUS2;
- 3 phase feeders current (average/max. value);
- 3 phase differential current (max. value);
- Frequencies of all systems (min./max. value);
- Ground current and voltage (max. value);
- Active and reactive power of each phase;
- Active and reactive ground power;
- Power factor of each phase;
- Active and reactive power counter (reverse and forward, constant, and temporary);
- Operating hours;
  - Breaker cycles (lifetime);
  - Harmonic waves of feeder current and voltage (up to 5th harmonic wave).

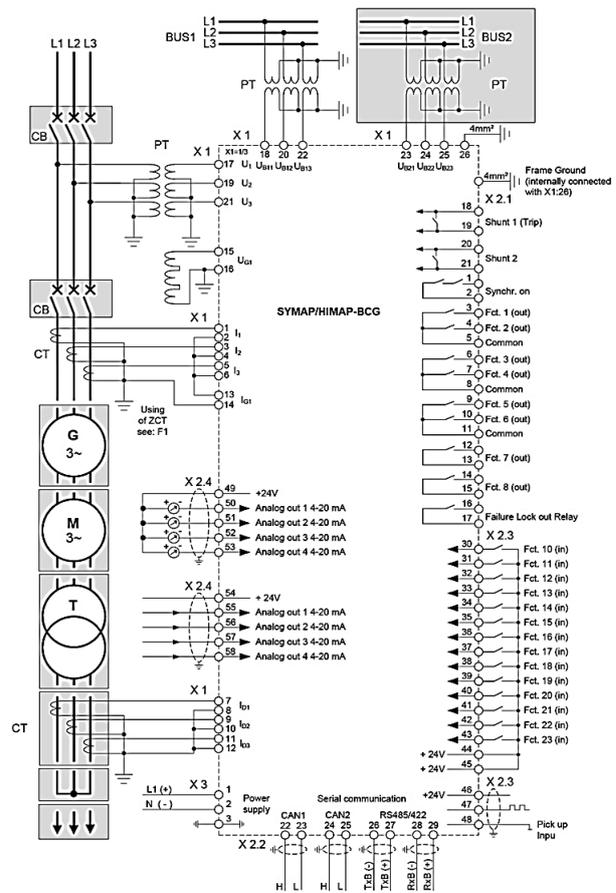


Fig. 4. Configuration of SYMAP/HIMAP-BCG series. Connection of main board

The wiring of the SYMAP RS422/485 communication ports of generator sets (diesel generator DG, shaft generator SG) with the master system - Rina Cube is shown in Fig.5. After transmission of each message SYMAP set the communication lines into high impedance state. Thus, the communication lines (TxD-A, TxD-B, RxD-A and RxD-B) can be connected in parallel of all SYMAP devices. The master system selects the SYMAP slave according to its slave address.

The receive lines of the SYMAP slave with the longest distance to the master system should be terminated with a 120 Ohm resistor. The same resistor will be required for the receive lines of the master system.

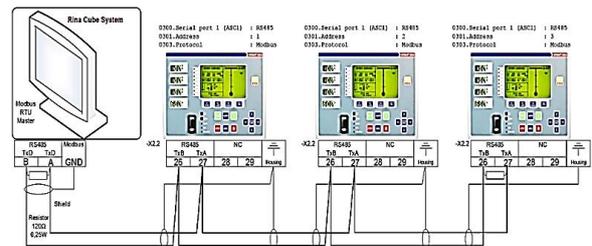


Fig. 5. Connection diagram for RS 485 communication

The RS422/485 communication parameter [0300] to [0303] serve the adjustment of the RS422/485 communication port and protocol.

The adjustment possibilities for the communication are shown in Tabl.

Parameter settings of the communication [5]  
 Table

Parameter	Function	Selection [range]
[0300]	Port selection	Selection of physical communication standard. <b>RS485:</b> physical standard of RS485 active.
[0301]	Slave address	This parameter defines the slave address of the device (SYMAP RS422/485 communication ports of generator sets). <b>1-255:</b> Possible address selection.
[0302]	Baudrate of communication	Baudrate for the communication. <b>9600...57600</b> Possible baud rate selection.
[0303]	Protocol selection	This parameter defines the protocol standard: PC-Tools: reserved for all PC applications. MODBUS: activates the MODBUS protocol.
fixed	Transmission mode	<b>RTM mode:</b> SYMAP allows only the Remote Terminal Mode and thus a 8 bit coding system and a CRC 16 error checking.
fixed	Start bit	<b>1</b>
fixed	Stop bits	<b>1 or 2</b> (depends on parameter [0054])
fixed	Parity	<b>None</b>

Briefly about the opportunities that the company office and the ship receive based on computer processing and analysis of monitoring data [7,8]:

- Monitoring of values such as voltage levels, harmonic distortion, voltage unbalance, residual current (measures the leakage current flowing in the network), dips and swells (measures and captures the waveform in case of voltage dips and surges in the network).

- Ensuring the correct operation and maintenance of ship electrical networks and equipment.

- Basic power quality control: to prevent adverse events such as heating of transformers, capacitors, motors, generators and failure of electronic equipment and protective devices.

- Alarm: notification of any abnormal behavior in the electrical network at present.

- Cost management: assessment of the cost of electricity for various ship consumers of electricity.

The implementation of these functions is possible with the help of service software.

An example implementation of the MS capability for a ship:

1) MS can be used to control load currents of the ship's generators during parallel operation, and if the difference in load current readings exceeds the allowable (critical) value, then the ship should turn on an alarm that will facilitate timely actions of the crew;

2) with the help of appropriate software, it is possible, for example, to diagnose the state of the electric motor by the instantaneous values of the power consumption of the electric motor, and when using neural networks to predict emergency modes.

### Conclusions

The approaches and principles for the technical implementation of remote monitoring of the parameters of ship power supply systems which are proposed, considered on the example of ship high-voltage systems with their automation and protection devices of the SIMAP/HIMAP types with using the network communication technologies, make it possible to obtain the necessary electrical quantities for a quantitative assessment of the company's ships energy consumption.

After receiving the data, the choice of which is determined by the objective function of optimizing the energy consumption of the company's ships, the onshore computer centre, using the appropriate software and PC tools, will processes and presents the monitoring results for using separately by the ship and by the company's onshore departments and services.

### REFERENCES

1. Energy efficiency handbook. Toward zero emission ship operations. Helsinki: ABB Marine & Ports, 2020. 196 p. 9AKK107680A8255 1.9.2020. <https://new.abb.com/marine/energy-efficiency-handbook>
2. Mukha M. Dynamic compensation of reactive power in ship-based autonomous electric power systems: Dr. tech. sci. diss: 05.09.03/ Lviv Polytechnic National University. Lviv. 2018. 404 p. (Ukr)
3. Vyshnevsky L.V. Start of asynchronous electric motors with reactive power compensation / Vyshnevsky L.V., Mukha N.Y., Pavlenko S.S. - Monograph - Odesa: NU "OMA". 2016. - 161 p. (Rus)

IV საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია "ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები", თბილისი, საქართველო, 2023 წლის 20-22 ნოემბერი  
IV<sup>1</sup> International Scientific and Technological Conference "Modern problem of power engineering and ways of solving them", Tbilisi, Georgia, November 20-22, 2023

---

4. Energy efficiency and renewable energy sources / Under general ed. A.K. Shidlovsky - K.: "Ukrainian encyclopedic knowledge". 2007. - 559 p. (Ukr)
5. SYMAP UsersManual v4.2 GB.docx User's Manual/STUCKE ELEKTRONIK GMBH. 02.09.2015 (JH). – 110 p.
6. Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships. Final Report to the International Maritime Organization. Issue no. 2 – 31 March 2000. – 169 p.
7. DNV GL. 2015. EFFICIENCY FINDER. Accessed Feb 2015.  
<http://www.dnvgl.com/maritime/enhanceperformance/efficiency-finder.aspx>.
8. How to Optimize Time-Synchronization and Data Recording for EcoStruxure™ Power Digital Applications. Technical Guide. Ref: ESXP2TG001EN 11/2019.  
<https://www.se.com/ww/en/download/document/ESXP2TG001EN>

## Dynamic Identification of Synchronous Motor Stator's Resistance by Starting Characteristics

**Tityuk Valeriy Kostyantynovich**, Doctor of Science (Eng)

Kriviy Rih National University, Kriviy Rih, Ukraine, E-mail: [dinalt2006@gmail.com](mailto:dinalt2006@gmail.com)

**Chornyi Oleksii Petrovych**, Doctor of Science (Eng)

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, E-mail: [alekseii.chornyi@gmail.com](mailto:alekseii.chornyi@gmail.com)

**Kurliak Petro Omelyanovich**, Candidate of Technical Sciences (Eng)

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, E-mail: [pkurlyak@gmail.com](mailto:pkurlyak@gmail.com)

**Annotation.** An expression is substantiated for determining the resistance of the stator phase of a synchronous motor as the ratio of the average value of the integral voltage function to the average value of the integral current function when integrating currents and voltages from the start of the start to the steady state of operation. The possibility of using this method for identifying the resistance of the SD stator during direct asynchronous starting of the SD, as well as in the mode of synchronizing the SD with the supply network during acceleration startup, is substantiated.

**Key words:** synchronous motor, identification, resistance, asynchronous start, soft-start.

**Introduction.** The task of identification of synchronous motor parameters has an important practical significance for realization of control tasks both by the synchronous motor itself and by technological equipment [1]. Problems of identification of parameters of DC and asynchronous electric drives are considered in a significant number of scientific works.

Analysis of the state of the problem and previous studies. Various methods for determining the AD parameters have been proposed in known works: using the current and voltage components of the stator winding and rotor angular velocity [2], using the energy method for determining the AD parameters [3]. The extended Kalman filter is applied in [4]. In [5], the frequency response method is used to solve the identification problem. The theory of adaptive systems with a setting model is applied in [6]. In [7-9], a method of identification of the active resistance of the stator of an AC motor by its starting characteristics is proposed.

Process control can be significantly improved by using data on the current utilization level of process equipment. This task can be successfully solved by determining the instantaneous value of the drive torque. To solve the problem of determining the electromagnetic torque of the drive, it is sufficient to determine only one parameter- stator active resistance,  $R_s$ , [7].

The method of determining the stator active resistance based on the starting characteristics of SMs proposed in [7] was developed in [8]. In [8], experimental studies of this method of  $R_s$  determination were carried out, which confirmed the possibility of its practical application.

However, the problem of identifying the parameters of the substitution scheme of SMs in the modern scientific and technical literature is not sufficiently covered.

**Problem statement.** The purpose of the present work is to study the possibility of application of the method proposed in [7,8] for determining the active resistance of the stator of the AD motor by its starting characteristics to solve the problem of identification of the active resistance of the SM stator.

Method for determining the active resistance of the stator of the SM. According to [10], the equation of electrical equilibrium of the stator winding can be represented in the form of

$$\frac{d\psi_s}{dt} = u_s - i_s \cdot R_s; \quad (1)$$

Assuming that the SM is demagnetized at the moment of start-up, under zero initial conditions we obtain

$$\psi_s = \int_0^t (u_s(t) - i_s(t) \cdot R_s) dt; \quad (2)$$

Since after completion of start-up in the steady-state mode of operation of SM, the voltages, currents and current-circuit of SM are sinusoidal quantities, then for any two moments of time related by the relation  $t_2 = t_1 + T/2$ , where  $T$  is the period of the line voltage, the identity will be fulfilled.

$$\psi_s(t_1) + \psi_s(t_2) = 0 \quad (3)$$

Taking into account (3), the active resistance of the stator phase can be calculated by the expression

$$R_s = \frac{i u_s(t_1) + i u_s(t_2)}{i i_s(t_1) + i i_s(t_2)}; \quad (4)$$

where

$$i u_s(t) = \int_0^t u_s(t) dt; i i_s(t) = \int_0^t i_s(t) dt \quad (5)$$

$i u_s(t)$ ,  $i i_s(t)$  - integral functions of phase voltage and stator current.

Formula (4) can be significantly simplified by considering that the integral functions of phase voltages and currents in steady-state operation can be represented as the sum of a constant component and a sinusoidal component with the frequency of the supply voltage.

For example, for the stator voltage at zero initial conditions, we obtain

$$i_{us}(t) = \int_0^t U_0 \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{U_0}{\omega} \cos \varphi - \frac{U_0}{\omega} \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Thus, the constant component of the function  $i_{us}(t)$  depends on the initial phase of the supply voltage. Attention should be paid to the special case corresponding to the condition  $\varphi = \pi/2 + 2\pi \cdot N$ , when the constant component of  $i_{us}(t)$  becomes identically equal to zero.

The mechanism of occurrence of the constant component of the stator current integral function is much more complicated and is related to the action of the aperiodic component of the stator inrush current.

Substituting the expressions for the integral functions of the supply voltage and stator current, presented in the form (6), into equation (4), and considering that the sum of the periodic components shifted by half a period is equal to zero, we obtain the following expression for determining the active resistance of the stator phase:

$$R_1 = \frac{iU_{s=}}{iI_{s=}}; \quad (7)$$

where  $iU_{s=}$ ,  $iI_{s=}$  are, respectively, constant components of integral functions of stator voltage and current of the stator, which can be calculated as the average value of these functions in the steady-state operation mode.

This approach significantly simplifies the practical implementation of measurement procedures and contributes to the increase of their accuracy, reduces the influence of measurement noise, provided that their average value is equal to zero.

Mathematical model of SR. From all variety of known mathematical models of SR, for modeling of processes of asynchronous starting of SR it is enough to use well known, approved system of SR equations in orthogonal coordinate system d, q, 0, stationary relative to the rotor (Park-Gorev equations). The system of differential equations of electrical equilibrium of stator and rotor windings in the orthogonal coordinate system d, q, 0 for instantaneous values of voltages, currents and flux-currents has the form:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= u_d - R_d \cdot i_d + \omega \cdot \Psi_q; & \frac{d\Psi_q}{dt} &= u_q - R_q \cdot i_q - \omega \cdot \Psi_d; \\ \frac{d\Psi_{ed}}{dt} &= -R_{ed} \cdot i_{ed}; & \frac{d\Psi_{eq}}{dt} &= -R_{eq} \cdot i_{eq}; \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= u_f - R_f \cdot i_f; & \frac{d\omega}{dt} &= p \frac{T_E - T_L}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega; & T_E &= \frac{3}{2} \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d); \\ u_d &= U_{\max} \cos(\omega_c \cdot t - \gamma); & u_q &= U_{\max} \sin(\omega_c \cdot t - \gamma), \end{aligned} \quad (8)$$

where -  $\Psi_d$ ,  $\Psi_q$  - stator flux-coupling of the stator of the SM along the d and q axes, respectively;  $\Psi_f$  - flux-coupling of the excitation winding of the SM;  $\Psi_{ed}$ ,  $\Psi_{eq}$  - flux-coupling of the damping windings of the SM along the d

and q axes, respectively;  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $u_f$  - components of the stator supply voltage along the d and q axes, respectively, and the excitation voltage of the SM;  $\omega$ ,  $\omega_c$  - rotor angular velocity and synchronous velocity respectively;  $T_E$ ,  $T_L$  - electromagnetic moment of SM and working machine resistance moment respectively;  $p$  - number of pole pairs of SM;  $\gamma$  - rotation angle of SM rotor;  $R_d$ ,  $R_q$ ,  $R_f$ ,  $R_{ed}$ ,  $R_{eq}$  - active resistances of stator windings in d and q axes, excitation winding and damping windings in d and q axes respectively.

These equations were implemented as a subsystem in MATLAB/Simulink.

The stator phase currents can be determined through the orthogonal components of the currents by applying the inverse Park-Goreff transform.

Fig. 1 shows the realization of the mathematical model of SR according to equations (10), (12) in Matlab/Simulink program.

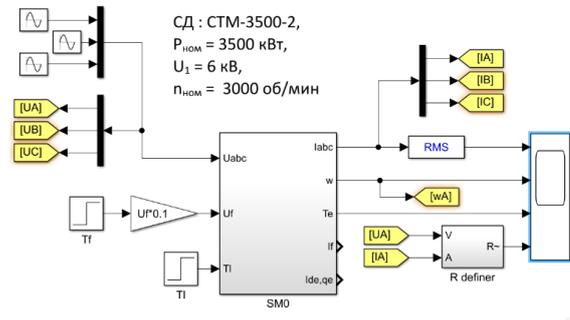


Fig. 1. Structural diagram of the mathematical model of SM in Matlab/Simulink

Determination of the active resistance on the mathematical model. As an experimental motor was selected SM type STM-3500-2 with power 3500 kW and speed 3000 rpm, with the following parameters: stator active resistance  $R_d = 0.069112$ ;  $R_q = 0.069112$ ; active resistance of the field winding  $R_f = 0.010591$ ; active resistance of damping circuits  $R_{ed} = 0.074429$ ;  $R_{eq} = 0.048766$ ; stator winding dissipation inductance 0,0011309 Gn; magnetizing circuit inductance 0, 067499 Gn.

Fig. 2. shows the structural scheme of the subsystem for calculating the active resistance for the stator phase of SM in accordance with expression (7), realized in the form of the subsystem R definer shown in Fig.1.

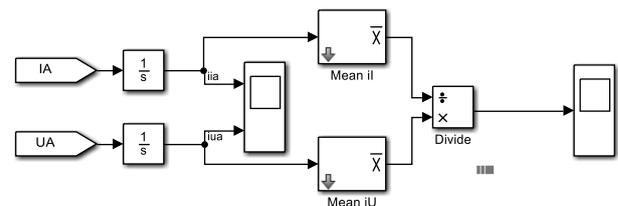


Fig. 2. Structural diagram of the subsystem for calculating the active resistance for the stator phase of the SM stator

The main methods of SM start-up are direct asynchronous start-up with discharge resistance in the field winding circuit, as well as acceleration start-up with the help of auxiliary motor and subsequent synchronization with the network.

On the proposed mathematical model in order to verify the proposed method of identification of the active resistance of the stator phase of the SR stator, a cycle of experimental studies was carried out to determine the active resistance of the SR stator phase in other significant operating modes.

Fig. 3 shows the time diagrams of electromechanical processes at direct asynchronous start of SM, as well as determining the active resistance of SM stator phase during start-up.

The given diagrams confirm the correctness of the developed model and the possibility of studying the operation of the SM with its help. The value of the active resistance obtained during the experiment coincides exactly with the value given in the technical specifications of the SM

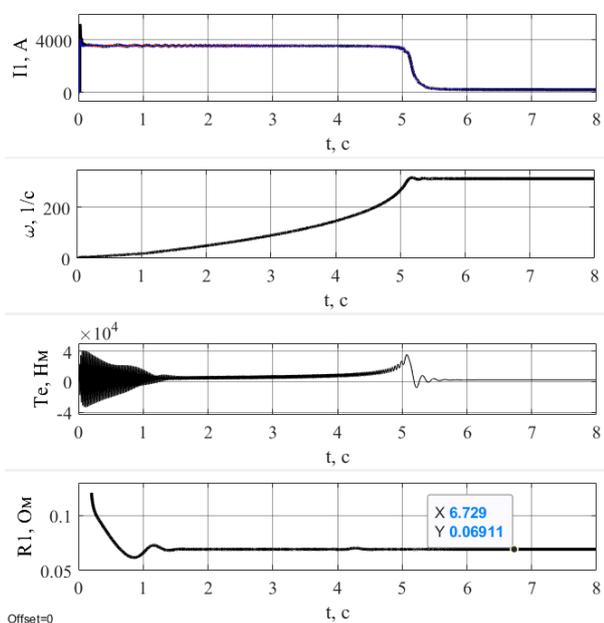


Fig. 3. Time diagrams of the electromechanical processes of SM start-up and the process of determining the active resistance of the stator phase at direct asynchronous SM start-up

Fig. 4 shows the time diagrams of electromechanical processes during the acceleration start of the SM, as well as determining the active resistance of the stator phase of the SM during the start-up process.

The value of the active resistance obtained during the experiment exactly coincides with the value given in the technical specifications of the SM.

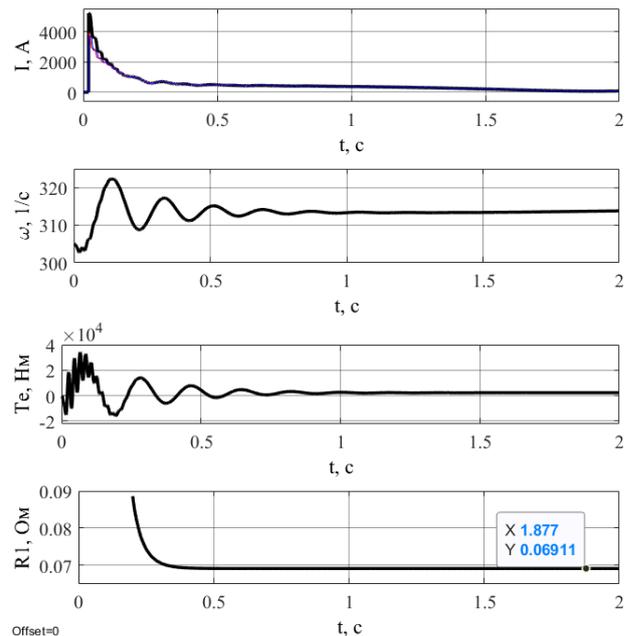


Fig. 4. Time diagrams of the electromechanical processes of the SM start-up and the process of determining the active resistance of the stator phase during the accelerated start-up of an SM

## Conclusions

The method for determining the stator active resistance based on the analysis of starting characteristics of a synchronous motor has been improved. It is shown for the first time that the active resistance of the stator phase winding can be determined as the ratio of average values of integral functions of voltage and current of the synchronous motor phase determined from the moment of start-up. The possibility of using this method for direct asynchronous start and accelerating start of a synchronous motor is considered

## REFERENCE

1. Valentine R. Motor Control Electronics Handbook / R. Valentine New York, McGraw-Hill, 691 p. ISBN-10: 0070668108
2. Peresada S. Identification of stator and rotor resistances of induction motor / S. Peresada. Peresada, S. Lyshevsky, S. Kovbasa, M. Konoplinsky // Electrotechnic and computer systems. № 9. 2013. - pp. 7-15. 7-15.
3. Energy method identification of asynchronous motors: monograph / M. V. V. Zagirnyak, D. I. Rodkin, I. V. Romashykhin, A. P. Chorny - Kremenchug: PE 2013. Shcherbatykh A.V. 2013. - 166 p.
4. Stephan Jennifer, Bodson Marc. Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors // IEEE Transactions on Industrial Applications. 1994.may/june. Vol. 30. N 3. P. 746-759.
5. Marino R., Peresada S., Tomei P. On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors // IEEE, Transaction on control system technology. 2000. Vol. 8. - P. 248-253.

6. Bilate A., Grottstollem H. Parameter identification of inverter fed induction motor at standstill with correlation method, Proc. of 5th European Conference on Power Electronics and Applications. 1993. Vol.5. - P. 97-102.
7. Hurst, K.D., Habetler, T.G., Griva, G, Profu-mo.F., "Zero Speed tachless IM Torque Control: Simply a matter of Stator Voltage Integration," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 34. No. 4. Ju-ly/August 1998. pp. 790-795.
8. Pozigun O.A., Tytiuk V.K., Chorniy O.P. Determination of stator resistance of induction motors on starting characteristics, Electromechanical and energy saving systems. Kremenchuk , 2017. Issue 1/2017 (37). -8-14 p. [in Ukrainian].
9. Tytiuk V., Pozigun O., Chorniy O., Berdai A. Identification of The Active Resistances of The Stator of An Induction Motor With Stator Windings Dissymmetry. 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine. 2017. P. 48-51.
10. Sivokobylenko V.F. Mathematical modeling of synchronous machine with multicircuit rotor in phase coordinates. Technical Electrodynamics. No1. 2015. p. 51-58

**ელექტრომომარაგების ქსელის 35 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა და დაზიანების მიზეზების დადგენა**

**ბადურ ჭუნაშვილი**, ტექნ. მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [btchunashvili@yahoo.com](mailto:btchunashvili@yahoo.com);  
**მამუკა ქობალია**, ტექნ. მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com);  
**თეიმურაზ გამრეკელაშვილი**, აკადემიური დოქტორი, საქართველოს ტექნიკ. უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [t.gamrekelashvili@telasi.ge](mailto:t.gamrekelashvili@telasi.ge);  
**ნათია რთველაძე**, აკადემიური დოქტორი, მოწვეული მასწავლებელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [natia.rtveladze@gmail.com](mailto:natia.rtveladze@gmail.com).

**ანოტაცია.** ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების ქსელის 35 ძაბვის ერთძარღვა კაბელებით აღჭურვილი საკაბელო ხაზის „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ დაზიანების მიზეზების დადგენის მიზნით, ჩატარებულია ქსელში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა ეკრანის სხვადასხვა სქემით დამიწების პირობებში. დადასტურებულია, რომ დაზიანების მაღალი რისკით განსაკუთრებით ცივი დასმის ქუროები გამოირჩევა, რადგან ხაზზე წარმოქმნილი თითქმის ყველა ავარია დაწყებულია და განვითარებულია ქუროს დაზიანებით. შემოთავაზებულია კაბელის მუშაობის საიმედოობის ამაღლებისა და ავარიების აღმოფხვრისათვის გასატარებელი ღონისძიებები. კერძოდ, გამოკვლეულ იქნას საკაბელო ხაზის ეკრანის „ორმხრივ დამიწებული“ და „ტრანსპოზირებული“ სქემებით მუშაობის შედეგად კაბელების მდგრადობის მოსალოდნელი გაუარესება, შეფასებულ იქნას ხაზის არსებული ტექნიკური მდგომარეობა და დადგენილ იქნას მისი რემონტის მიზანშეწონილობა. შესაბამისად, კაბელების გამოკვლევის დადებითი დასკვნის შემთხვევაში, ეტაპობრივად, განხორციელდეს არსებული ცივი დასმის ქუროების მაღალი ხარისხის მდგრადი ქუროებით ჩანაცვლება. დასაბუთებულია, რომ ერთძარღვა კაბელებით აღჭურვილ ქსელებში მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნას: ეკრანის დამიწების „ერთმხრივ დამიწებული“ სქემა მოკლე ხაზებისათვის, ეკრანის დამიწების „შუადამიწებული“ სქემა საშუალო სიგრძის ხაზებისათვის და ეკრანის დამიწების „დასექციონირებული და შუადამიწებული“ სქემა გრძელი ხაზებისათვის.

**საკვანძო სიტყვები:** ერთძარღვა, საკაბელო ხაზი, ეკრანის დამიწება, ელექტრომაგნიტური პროცესები, დაზიანებები, დაზიანებები.

**Investigation of the electromagnetic processes taking place in the 35 kV cable lines of the power supply network and determination of the causes of damage**

**Badur Tchunashvili**, Doctor of Science, Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [b.chunashvili@gtu.ge](mailto:b.chunashvili@gtu.ge);  
**Mamuka Kobalia**, Candidate of Science, Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com);  
**Teimuraz Gamrekelashvili**, PhD, Associate Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [temo.gamrekelashvili@gmail.com](mailto:temo.gamrekelashvili@gmail.com);  
**Natia Rtveladze**, PhD, Associate Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [natia.rtveladze@gmail.com](mailto:natia.rtveladze@gmail.com).

**Annotation.** To investigate the causes of damage to the cable line 'K/s Navtlughi - Airport,' equipped with 35-voltage single-core cables in the Tbilisi electricity supply network, an examination of the electromagnetic processes under various grounding conditions of the screen was conducted. It has been demonstrated that cold-laying roofs pose a high risk of damage, as nearly all incidents on the line are initiated and developed by roof damage. Proposed measures aim to enhance cable reliability and prevent accidents. Specifically, an assessment will be made regarding the anticipated deterioration of cable stability resulting from 'double-grounded' and 'transposed' schemes of the cable line screen. The existing technical condition of the line will be evaluated, and the necessity of repairs will be determined. Upon a positive examination conclusion of the cables, a phased replacement of existing cold-laying cores with high-quality, sustainable cores is recommended. For networks equipped with single-core cables, it is advisable to employ the 'one-way grounded' scheme for short lines, the 'middle ground' scheme for medium-length lines, and the 'sectioned and middle grounded' scheme for long lines.

**Key words:** Key words: single core, cable line, screen grounding, electromagnetic processes, obstacles, damage.

**შესავალი.** ქ.თბილისის ელექტრო-მომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის გამანაწილებელი ქსელი ძირითადად 6-10 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებითაა შესრულებული და 2022 წლის მონაცემებით მათი ჯამური სიგრძე 1800 კმ-ს აღემატება [1].

მნიშვნელოვანია, რომ, ბოლო პერიოდში, მრავალსართულიანი შენობების ინტენსიური მშენებლობისა და ელექტრომომარაგების ქსელში თანამედროვე მძლავრი, ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების ჩართვამ, განსაკუთრებით კი ქალაქის ცენტრალურ რაიონებში, მნიშვნელოვნად გაზარდა ქალაქის ხვედრითი ელექტრული დატვირთვები ფართის ერთეულზე [2]. ამის გამო, გაზრდილი დატვირთვების უზრუნველყოფა 6-10 კვ ძაბვის საკაბელო ქსელით პრაქტიკულად შეუძლებელი გახდა და დღის წესრიგში დადგა მათი 35 კვ ძაბვის ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული (ნპიშ) ერთძარღვა კაბელებით აღჭურვილი საკაბელო ხაზებით ჩანაცვლება [3].

ამ გამოწვევის კვალდაკვალ, ბოლო პერიოდში, სს „თელასმა“ ქ. თბილისის ელექტრო-მომარაგების ქსელში ნპიშ ერთძარღვა კაბელებით აღჭურვილი 35 კვ ძაბვის სამი საკაბელო ხაზი ააგო: 1080 მ ჯამური სიგრძის ორი მონაკვეთით შესრულებული, „საბურთალო - 1/3“; 3,8 კმ სიგრძის „ჩუღურეთი - 1/2“ და 8.068 კმ სიგრძის „ქს ნავთლული-აეროპორტი“

აღსანიშნავია, რომ საკაბელო ხაზი „ნავთლული-აეროპორტი“ უკიდურესად დაბალი მდგრადობითა და საიმედოობით გამოირჩევა [4]. იგი ექსპლუატაციაში შესვლის დღიდან (2018წ) დაზიანების გამო 9 - ჯერ ავარიულად იქნა გამორთული. ავარიული გამორთვის უმრავლესობა ტრანსპოზიციისა და შემაერთებელ ქუროების დაზიანებაზე მოდის, რომელიც ქსელში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების (ემპ) მიერ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებებითაა (ემდ) გამოწვეული [5].

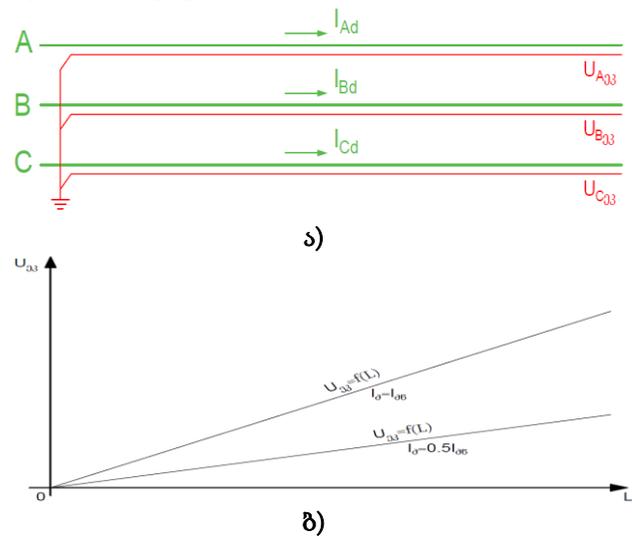
**სამუშაოს მიზანი**

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის 35 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებში, ეკრანის სხვადასხვა რეჟიმში მუშაობის პირობებში განვითარებული ემპ-ის გამოკვლევა, მათ მიერ წარმოქმნილი ემდ-ის ხასიათისა და პარამეტრების განსაზღვრა და კაბელების დაზიანებების მიზეზების დადგენა.

ამავდროულად, კვლევებით მიღებული შედეგების ანალიზისა და შეფასების საფუძველზე, კაბელების ემპ-ებით განპირობებული დაზიანებების აღმოფხვრის ღონისძიებების დამუშავება, ელექტრო-მომარაგების ქსელის მუშაობის მდგრადობისა და საიმედოობის ამაღლების უზრუნველყოფა.

**ნაშრომში ჩატარებული კვლევები**

ცნობილია, რომ 35-110 კვ ძაბვის ქსელებში გამოყენებული ერთძარღვა კაბელები აუცილებლად უნდა იქნას აღჭურვილი მეტალის ეკრანით, რომლის ძირთადად დანიშნულებას წარმოადგენს კაბელის მთავარ იზოლაციაზე (ძარღვი-ეკრანი), ძარღვში გამავალი დენის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის თანაბრად განაწილება. ამასთან ერთად, ამ ფუნქციის შესასრულებლად, ეკრანი აუცილებლად უნდა იყოს დამიწებული (ნახ. 1) [6].



ნახ. 1. ეკრანის დამიწების „ერთმხრივდამიწებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი ა) და ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება ბ)

მნიშვნელოვანია, რომ 6-500 კვ ძაბვის ქსელებში გამოყენებული ნპიშ ერთძარღვა კაბელების ეკრანი დამზადებულია კარგი ელექტროგამტარებლობის მასალისაგან (სპილენძი), ამიტომ ეკრანის ორმხრივი დამიწებისას (თუ არაა მიღებული სპეციალური ზომები) ძარღვში გამავალი დენის მიერ ეკრანში დაინდუქტირებული დენის მნიშვნელობა, საშუალო სიგრძის ხაზებში, ძარღვში გამავალი დენის 30-50%-ს შეადგენს და გრძელი ხაზების

შემთხვევაში დენმა შეიძლება ძარღვში გამავალი დენის მნიშვნელობას მიაღწიოს [7].

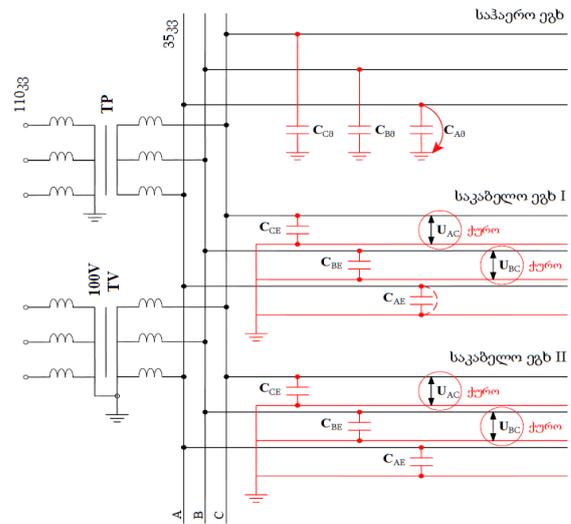
ცნობილია, რომ ნპიშ ერთფაზა კაბელებით აღჭურვილი საკაბელო ხაზების დაზიანებების ზრდის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს წარმოადგენს ეკრანის კვეთისა და დამიწების სქემის არასწორი შერჩევა. შედეგად, ეკრანში დაინდუქტირებული დენების მიერ წარმოქმნილი დიდი რაოდენობის სითბური ენერგია იწვევს კაბელის გადახურებას და მწყობრიდან გამოსვლას [8].

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, გამოკვლეულ იქნა ნპიშ ერთმარღვა კაბელებით აღჭურვილ 35 კვ ძაბვის „ქ/ს ნავთლული-აეროპორტის“ საკაბელო ხაზში ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირებული“ და „ორმხრივ დამიწებული“ სქემებით მუშაობის დროს მიმდინარე ემპ-ბი.

მნიშვნელოვანია, რომ 35 კვ ძაბვის ერთფაზა კაბელების ძარღვსა და ეკრანს შორის, მუშაობის ნორმალურ რეჟიმში ძაბვა არ არსებობს (ნახ. 2). ასევე, „ქ/ს ნავთლული 220“-ის 35 კვ ძაბვის სალტის II სექციის (საკაბელო ხაზ „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ მიერთების სექციის) ქსელის გამარტივებული ელექტრული სქემიდან (ნახ. 2) ნათლად ჩანს, რომ ქსელის ნებისმიერი ელემენტის (საჰაერო ეგბ, საკაბელო ეგბ, ძაბვის ტრანსფორმატორი) ერთი ფაზის დამიწების შემთხვევაში, კაბელების დაუმიწებელი ფაზების ძარღვებსა და ეკრანს შორის გაჩნდება ხაზური ძაბვა. შესაბამისად, კაბელებისა და ქუროების არამდგრადი იზოლაციის პირობებში წარმოიქმნება მათი გარღვევისა და ერთფაზა დამიწების ორაზა მოკლედშერთვად გარდაქმნის საშიშროება.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, 35 კვ ძაბვის ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული ერთმარღვა კაბელებით აღჭურვილი საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების შესწავლისას, აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას ქსელის ყველა ელემენტის თავისებურებანი, მათი მუშაობის რეჟიმებისა და პარამეტრების გავლენა ქსელში მიმდინარე ერთიან ემპ-ებზე.

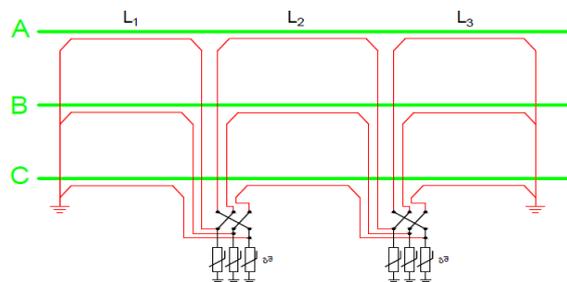
უნდა აღინიშნოს, რომ საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ემპ-ის წარმოქმნა და განვითარება დიდმნიშვნელოვნად ეკრანის დამიწების სქემაზეა დამოკიდებული. შესაბამისად, საკაბელო ხაზების დაპროექტებისას, გათვალისწინებული უნდა იქნას ეკრანის დამიწების სქემების თავისებურებანი.



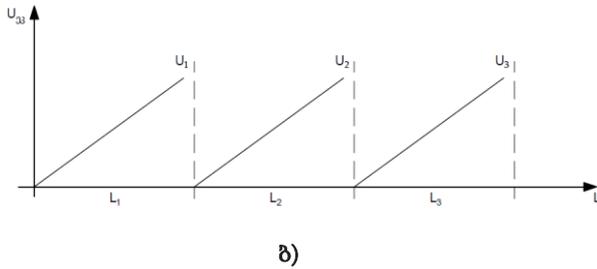
ნახ. 2. „ქ/ს ნავთლული 220“-ის 35 კვ ძაბვის სალტის სექციის გამარტივებული ელექტრული სქემა

### ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი

მნიშვნელოვანია, რომ 35კვ ძაბვის „ქ/ს ნავთლული-აეროპორტის“ საკაბელო ხაზზე ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირების“ სქემით მუშაობისას, ხაზის ყოველი მონაკვეთის ( $L_1, L_2, L_3$ ) ბოლოს (ნახ. 3,ა) ეკრანსა და მიწას შორის ძაბვა დასაშვებ მნიშვნელობას არ აღემატება (ნახ. 3ბ). მიუხედავად ამისა, განვითარებული ავარიებს უმრავლესობა ტრანსპოზიციონირების ქუროებზე მოდის. ე.ი. ქსელში ადგილი ჰქონდა რომელიმე ელემენტის ერთი ფაზის დამიწებას (შესაძლებელია გარდამავალი აღდურცხავი), მან გამოიწვია კაბელის ძარღვსა და ეკრანს შორის ხაზური ძაბვის გაჩენა, იზოლაციის გარღვევა და ერთფაზა დამიწების ორაზა მოკლედშერთვად გარდაქმნა. მასასადამე, დაზიანების განვითარება ქუროს უხარისხობითა და არამდგრადობითა განპირობებული.



ა)

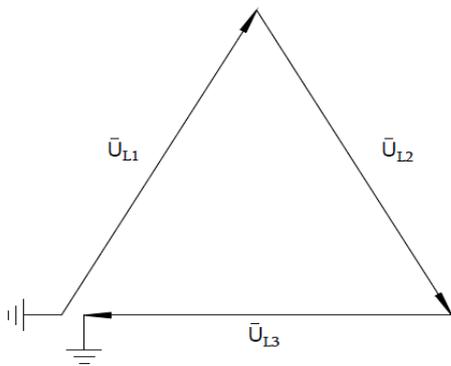


ნახ. 3. ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი ა) და ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება ბ)

უნდა აღინიშნოს, რომ ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირებული“ სქემის დროს ეკრანის თვითოეულ მონაკვეთის ბოლოს (ტრანსპოზიციის წიგნი) დაინდუქტირებული ძაბვა (ნახ. 3,ბ) იგივეა რაც „სამსექციანი დასექციონირებული“ სქემის შემთხვევაში.

„ტრანსპოზიციონირებული“ ხაზის ერთი ფაზის კაბელის ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვების ვექტორული დიაგრამა წარმოდგენილია ნახ. 4-ზე.

ვექტორულ დიაგრამაზე  $U_{L1}$  (ნახ. 4.) A ფაზის მიერ  $L_1$  მონაკვეთში (ნახ. 3,ა)  $U_{L1}$  B ფაზის მიერ  $L_2$  მონაკვეთში და  $U_{L3}$  C ფაზის მიერ  $L_3$  მონაკვეთში დაინდუქტირებული ძაბვების ვექტორებია.



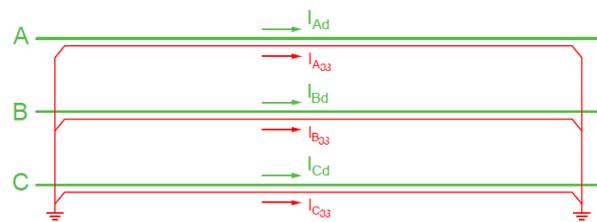
ნახ. 4. „ტრანსპოზიციონირებული“ საკაბელო ხაზის ერთი ფაზის კაბელის ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის ვექტორული დიაგრამა

ვექტორულ დიაგრამაზე  $U_{L1}$  (ნახ. 4.) A ფაზის მიერ  $L_1$  მონაკვეთში (ნახ. 3,ა),  $U_{L1}$  B ფაზის მიერ  $L_2$  მონაკვეთში და  $U_{L3}$  C ფაზის მიერ  $L_3$  მონაკვეთში დაინდუქტირებული ძაბვების ვექტორებია.

ნახ. 3,ა და ნახ. 4-დან ნათლად სჩანს, რომ სამივე ფაზის კაბელების ეკრანის შუა მონაკვეთები დაუმიწებელია (ნახ. 3,ა, ნახ. 4). ამის გამო, ეკრანები  $L_2$  მონაკვეთში მათდამი წაყენებულ ძირითად დანიშნულებას ვერ ასრულებენ.

**ეკრანის დამიწების „ორმხრივდამიწებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი.**

მნიშვნელოვანია, რომ საკაბელო ეგზ „ქ/ს ნავთლული-აეროპორტი“, თავდაპირველად (პროექტის მიხედვით) ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიციონირებული“ სქემით იყო შესრულებული, ხოლო 2023 წ., ხაზზე მომხდარი ხშირი ავარიული გამორთვების გამო, დაზიანებების აღმოფხვრის და საიმედოობის ამაღლების მიზნით, „ტრანსპოზიციის“ სქემა შეიცვალა და ხაზი გადაყვანილ იქნა ეკრანის „ორმხრივდამიწებული“ სქემით მუშაობის რეჟიმზე (ნახ. 5).



ნახ. 5. ეკრანის დამიწების „ორმხრივდამიწებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი ა) და ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება ბ)

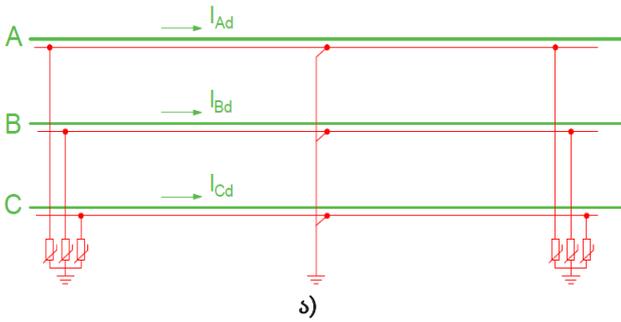
მნიშვნელოვანია, რომ ჩართვისთანავე საკაბელო ხაზი ავარიულად გამოირთო. აღმოჩნდა, რომ კაბელი ეკრანში დასაშვებზე დიდი სიდიდის დენმა გაირა, რამაც გამოიწვია ეკრანის ტემპერატურის მნიშვნელოვანი გაზრდა, კაბელის გადახურება და მწყობრიდან გამოსვლა [4].

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ეკრანის დამიწების „ორმხრივ დამიწებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზების გამოყენება კატეგორიულად მიუღებელია, განსაკუთრებით გრძელი საკაბელო ხაზების შემთხვევაში.

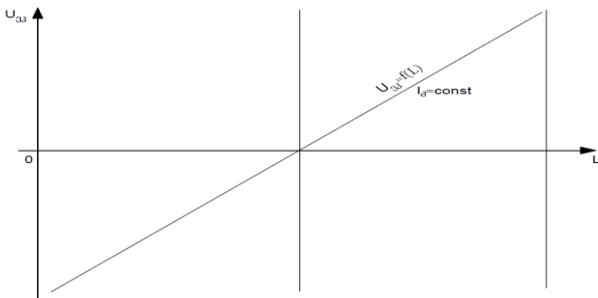
**ეკრანის დამიწების „შუადამიწებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი**

საკაბელო ხაზი ეკრანის შუა დამიწებული სქემით (ნახ. 6) განსახორციელებლად, შედარებით მარტივია. იგი გამოირჩევა მუშაობის მაღალი საიმედოობით, მდგრადობით, საექსპლუატაციო უსაფრთხოებით, მაღალი ენერგეტიკული მაჩვენებლებითა და გამტარუნარიანობით.

ეკრანის „შუადამიწებული“ სქემის გამოყენება მიზანშეწონილი და ეფექტურია საშუალო სიგრძის საკაბელო ხაზების შემთხვევაში.



ა)



ბ)

ნახ. 6. ეკრანის დამიწების „შუადამიწებულ“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი ა) და ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება ბ)

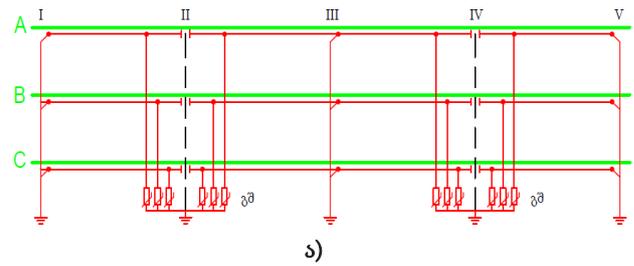
**ეკრანის დამიწების „დასექციონირებული შუადამიწებულ“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი**

ეკრანის დამიწების „დასექციონირებული და შუა დამიწებულ“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი (ნახ. 7), არ საჭიროებს ძვირადღირებულ ელექტრომოწყობილობებს, ადვილია მათი საექსპლუატაციო მომსახურება, მოხერხებულია განსახორციელებლად. სქემა გამოირჩევა მუშაობის მაღალი საიმედოობით და მდგრადობით. ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვები I და II სექციის ბოლოს (ეკრანის გახსნის ადგილებში) (ნახ. 7,ა) იგივე სიდიდისაა, რაც ოთხსაფეხურიანი დასექციონირებული სქემის შემთხვევაში (ნახ. 7,ბ).

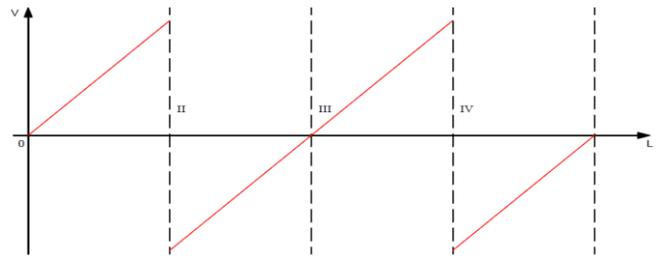
ეკრანის დამიწების „დასექციონირებული და შუა დამიწებულ“ სქემის გამოყენება მიზანშეწონილი და ეფექტურია გრძელი საკაბელო ხაზების შემთხვევაში.

**დასკვნები**

1. დასაბუთებულია, რომ ერთფაზა კაბელებით აღჭურვილ საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ემპ-ებს გამანაწილებელი მოწყობილობის ყველა მინაერთის (გამავალი ხაზები, რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობები, ხელოვნური ნეიტრალი და ა.შ.)



ა)



ბ)

ნახ. 7. ეკრანის დამიწების „დასექციონირებული შუადამიწებულ“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზი ა) და ეკრანში დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება ბ)

ჯამური ტევადობა განაპირობებს, სადაც ძირითადად საკაბელო ხაზების ტევადობა დომინირებს. აქედან გამომდინარე, ნპიმ ერთფაზა კაბელების დაზიანების რისკი ფაზებსა და მიწას (ეკრანს) შორის ასევე ძაბვაზე ანუ ქსელის ჯამურ ტევადობაზე დამოკიდებული.

2. დადგენილია, რომ ნპიმ საკაბელო ხაზებში წარმოქმნილი და განვითარებული დაზიანებები კაბელის მარღვსა და ეკრანს შორის იზოლაციის ხაზური ძაბვის მიერ გარღვევითაა გამოწვეული. შესაბამისად, მოსალოდნელი დაზიანების მაღალი რისკით განსაკუთრებით საკაბელო ქუროები (შუალედური, ტრანსპოზიციის, სექციათა შორისი) გამოირჩევა.

3. 35 კვ ძაბვის „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ ერთმარღვა კაბელებით შესრულებული საკაბელო ქსელში გამოყენებული ქუროები უხარისხოა. ისინი ვერ აკმაყოფილებენ ქსელში განვითარებული ემპ-ის შედეგად წარმოქმნილი ემდ-ის მიმართ მდგრადობისა და საიმედოობის პირობას. ამის დასტურია ის, რომ ქსელში წარმოქმნილი და განვითარებული თითქმის ყველა ავარია იწყება და ვითარდება ქუროს დაზიანებით.

4. დასაბუთებულია, რომ ნპიმ ერთმარღვა კაბელებით აღჭურვილი ეკრანის „ორმხრივ

დამიწებული“ სქემებით შესრულებული საკაბელო ხაზების გამოყენება კატეგორიულად მიუღებელია, რადგან ამ დროს დიდია მარღვეში გამავალი დენის მიერ ეკრანში დაინდუქტირებული დენი, გამოწვეული დანაკარგები და მაღალია კაბელის ტემპერატურული დაზიანების რისკი.

4. დადგენილია, რომ ნპიმ ერთმარღვა კაბელიებით აღჭურვილი და ეკრანის „ტრანსპოზიცირებული“ სქემით შესრულებული საკაბელო ხაზების გამოყენება კატეგორიულად მიუღებელია, რადგან ძალიან დაბალია მუშაობის საიმედოობა და მდგრადობა ელექტრომაგნიტური პროცესების მიმართ. ასევე, საკაბელო ხაზის ტრანსპოზიციის ჭეხს შორის არსებულ მონაკვეთში დარღვეულია ეკრანის ძირითადი დანიშნულების პრინციპი, რადგან არსებულ მონაკვეთში კაბელების ეკრანები დაუმიწებელია.

#### რეკომენდაციები

ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული ერთმარღვა კაბელიებით აღჭურვილ 35 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზების მდგრადობისა და მუშაობის საიმედოობის ამაღლების უზრუნველყოფისათვის მიზანშეწონილია გატარდეს შემდეგი ღონისძიებები:

1. საშუალო ძაბვის საკაბელო ხაზების დაპროექტებისა და ექსპლუატაციისას გათვალისწინებულ იქნას საერთაშორისო გამოცდილება, რომ 35 კვ ძაბვის ნპიმ ერთფაზა საკაბელო ხაზების გაზრდილი დაზიანების ძირითად მიზეზს წარმოადგენს ეკრანის კვეთისა და დამიწების სქემის არასწორი შერჩევა. ასევე, ქსელის მუშაობის საიმედოობას და მოსალოდნელ დაზიანებების რისკს საკაბელო ქსელში გამოყენებული დაბალი ხარისხის არამდგრადი ქუროები განაპირობებს.

2. ნპიმ ერთმარღვა კაბელიებით აღჭურვილ 35 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებში კატეგორიულად აიკრძალოს ეკრანის დამიწების „ტრანსპოზიცირებული“ და „ორმხრივ დამიწებული“ სქემების გამოყენება;

3. გამოკვლეულ იქნეს 35 კვ ძაბვის საკაბელო ეგზ „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ ეკრანის „ტრანსპოზიცირებული“ და „ორმხრივ დამიწებული“ სქემებით მუშაობის შედეგად, კაბელის პარამეტრებისა და მდგრადობის მოსალოდნელი გაუარესება. შეფასებულ იქნას

ხაზის არსებული ტექნიკური მდგომარეობა და დადგენილ იქნეს მისი რემონტის მიზანშეწონილობა;

4. გამოკვლეულ იქნას „ქ/ს ნავთლული 220“-ის 35 კვ ძაბვის სალტის, საკაბელო ხაზ „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ მიერთების სექციის ქსელის ჯამური ტევადობა და მოსალოდნელი ჯამური ტევადური დენის მნიშვნელობა ერთფაზა დამიწებისათვის;

5. „ქ/ს ნავთლული 220“-ის 35 კვ ძაბვის ქსელისა და ეგზ „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ ტექნიკური პარამეტრების საფუძველზე, დადგინდეს ეკრანის მუშაობის ოპტიმალური სქემა;

6. ეგზ „ქ/ს ნავთლული - აეროპორტის“ კაბელების მდგრადობის გამოკვლევის დადებითი დასკვნის შემთხვევაში, ეტაპობრივად განხორციელდეს არსებული ქუროების მაღალი ხარისხის ქუროებით ჩანაცვლება.

7. საშუალო და მაღალი ძაბვის ნპიმ ერთმარღვა კაბელიებით აღჭურვილ ქსელებში მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნას: ეკრანის „ერთმხრივ დამიწებული და მეორე მხარეს გადაძაბვის შემზღუდავით აღჭურვილი“ სქემა მოკლე ხაზებისათვის, ეკრანის „შუადამიწებული“ სქემა საშუალო სიგრძის ხაზებისათვის და „დასექციონირებული და შუადამიწებული“ სქემა გრძელი ხაზებისათვის.

#### ლიტერატურა

1. Отчет о результатах производственной деятельности АО "Теласи" в 2022 год // Тбилиси, 2023. 59 с.
2. სს „თელასის“ გამანაწილებელ ქსელში მიერთებული სიმძლავრეების ზრდის ანალიზი და ახალი სიმძლავრეების განსაზღვრა/სს „თელასის“ ქსელის განვითარების 5 წლიანი გეგმა (2023-2024 წ.), თავი 15, გვ. 146-151.
3. ანგარიში სს „თელასის“ ქსელის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ - ქსელის განვითარებისა და ტექნიკური მდგომარეობის ანალიზის განყოფილების 2020 წლის ანგარიში. <http://www.telasi.ge/ge/shareholders/accounting> უკანასკნელად გადამოწმებულია 06.06.2022.

4. სს „თელასის“ 35 კვ ძაბვის „ქ/ს ნავთლული-აეროპორტის“ საკაბელო ხაზის ავარიული გამორთვების მიზეზების გამოკვლევის კომისიის 2022-2023 წლის აქტები.
5. Чунашвили Б., Кобалия М., Петросян А., Гамрекелашвили Т., Ртвеладзе Н. Исследование электромагнитных процессов проходящих в однофазных и трехфазных кабельных линиях в направлении определения потери мощности/ ენერგია. 2020. №4(96), ნაწილი I, გვ. 74–77.
6. Дмитриев М.В., Кияткина М.П. Транспозиция экранов кабелей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование 2–1, 2012. с. 202–206.
7. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 152 с.
8. Н.П. Бадалян, Г.П. Колесник, Е.А. Чашин Заземление экрана однофазных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Вестник ПНИПУ №30. 2019. .с. 63–78.
3. Angarishi SS “Telasis” qselis teqnikuri mdgomareobis shesakheb – qselis ganvitarebisa da teqnikuri mdgomareobis analizis gankofilebis 2020 tslis angarishi. <http://www.telasi.ge/ge/shareholders/accounting> Ukanasknelad gadamotsmebulia 06.06.2022.
4. SS “Telasis” 35 kv dzabvis “q/s navtlugi - aeroportis” sakabelo xazis avariuli gamortvebis mizezebis gamokvlevis komisiis 2022-2023 tslis aqtebi.
5. TChunshvili B., Kobalia M., Gamrekelashvili T., Rtvrladze N., Iccledovanie eleqtromagnitnikh prothcecov protceccov prokhodiashchikh v odnofaznikh i triokhfaznikh ksabelnikh liniakh v napravlenii opredeleniya poteri moshchnosti. “Energia”, 2020, #4(96), natsili I, gv. 74–77.
6. Dmitriev M.B., Kiatkina M.P., Transpozitsia ekranov kabelei // Nauchno-tekhnichtckie vedomosti SPbGPU. Nauka I obrozovanie 2–1, 2012. s. 202–206.
7. Dmitriev M.B., Zazemlenie ekranov silovikh kabelei 6–500 kV. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. 152 s.
8. N. P. Badalian, G.P. Kolesnik, E.A. Chashin Zazemlenie ekrana odnofaznikh silovikh kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena // Vtstnik PNIPU №30, 2019. s. 63–78.

#### References (transliterated)

1. Otchet o rezultatach probzvodstvennoi deyatelnosti AO “Telasi” v 2022 god // Tbilisi, 2023. 59 s.
2. SS “Telasis” gamanawilebel qselshi miertebuli simdzlavreebis zrdis analizi da akhali simdzlavreebis gansazgvra // SS “Telasis” qselis ganvitarebis 5 tsliani gegma (2023-2024 ts.), tavi 15, gv. 146-151.

## მზის ფოტოელექტროსადგურების მიერ ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა და ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფა

**ბადურ ჭუნაშვილი**, ტექნ. მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [btchunashvili@yahoo.com](mailto:btchunashvili@yahoo.com);  
**მამუკა კობალია**, ტექნ. მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com);  
**თეიმურაზ გამრეკელაშვილი**, აკადემიური დოქტორი, სს „თელასი“, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [t.gamrekelashvili@telasi.ge](mailto:t.gamrekelashvili@telasi.ge);  
**ნათია რთველაძე**, აკადემიური დოქტორი, მოწვეული მასწავლებელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [natia.rveladze@gmail.com](mailto:natia.rveladze@gmail.com).

**ანოტაცია.** ჩატარებულია მზის ფოტოელექტროსადგურების მუშაობის რეჟიმების შედეგად ელექტრომომარაგების ქსელის გამანაწილებელ მოწყობილობებში განვითარებული სტატიკური და დინამიკური ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, დადგენილია მზის ელექტროსადგურის მიერ წარმოქმნილი და ქსელში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების ხასიათი და სიმძლავრე. დასაბუთებულია, რომ დაბრკოლებებს შორის ძირითადად მე-3, მე-5, მე-7 კენტი რიგის ჰარმონიკები გამოირჩევიან.

დასაბუთებულია, რომ მზის ელექტროსადგურები მაღალი მგრძობიარობით გამოირჩევა ქსელში სხვა აგრესიული ელექტროტექნოლოგიური დაბრკოლებების მიერ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების მიმართ და დადგენილია, რომ ფოტოელექტროსადგურის მუშაობის მდგრადობაზე განსაკუთრებით მწვავედ მოქმედებს ქსელის ძაბვის ჩავარდნა. კერძოდ, ძაბვის ჩავარდნის შედეგად უმართავი ხდება ინვერტორის მუშაობის რეჟიმი, ირღვევა გენერირებული ძაბვის სიხშირე, ელექტროსადგურისა და ქსელის ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე (პარალელური მუშაობის პირობები), ელექტროსადგურის მუშაობის მდგრადობა და ადგილი აქვს ელექტროსადგურის ქსელიდან ავარიულ გამორთვას.

**საკვანძო სიტყვები:** მზის ელექტროსადგური, ელექტრომაგნიტური პროცესები, ჰარმონიკები, ძაბვის ჩავარდნა, მუშაობის მდგრადობა, ავარიულ გამორთვა.

### Investigation of electromagnetic processes generated by solar photovoltaic plants in the power supply network and ensuring electromagnetic compatibility

**Badur Tchunashvili**, Doctor of Science, Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [b.chunashvili@gtu.ge](mailto:b.chunashvili@gtu.ge);  
**Mamuka Kobalia**, Candidate of Science, Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com);  
**Teimuraz Gamrekelashvili**, PhD, Associate Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [temo.gamrekelashvili@gmail.com](mailto:temo.gamrekelashvili@gmail.com);  
**Natia Rveladze**, PhD, Associate Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [natia.rveladze@gmail.com](mailto:natia.rveladze@gmail.com).

**Annotation.** The study of static and dynamic electromagnetic processes developed in the distribution devices of the power supply network as a result of the operational modes of solar photovoltaic power plants has been carried out. The character and power of the electromagnetic disturbances generated by the solar power plant and distributed in the network have been determined. It is justified that the 3rd, 5th, and 7th harmonics of the odd order stand out among the obstacles.

It is established and substantiated that solar power plants are highly sensitive to electromagnetic disturbances caused by other aggressive electro-technological factors in the network. Furthermore, it is found that the stability of the photovoltaic plant's operation is particularly acutely affected by the failure of the network voltage. Specifically, a voltage drop renders the inverter operation mode uncontrollable, affecting the frequency of the generated voltage, the angle of shift between the power plant and network voltage vectors (in parallel operation conditions), and the stability of the power plant's operation. As a consequence, the power plant may become disconnected from the network.

**Keywords:** Solar power plant, electromagnetic processes, harmonics, voltage drop, stability of operation, emergency shutdown.

## შესავალი

ბოლო პერიოდში, ელექტრომომარაგების სისტემაში შექმნილი ენერგეტიკული კრიზისის პირობებში, ელექტროენერჯის წარმოებისა და მოხმარების ბალანსის უზრუნველყოფისათვის ერთ-ერთ უმთავრეს ამოცანას, გენერაციის ახალი ეკოლოგიურად სუფთა და ენერგოეფექტური სიმძლავრეების ათვისება წარმოადგენს [1]. მნიშველოვანია, რომ ელექტრომომარაგების სისტემაში, განსაკუთრებით მაღალი ინტენსივობით, სხვადასხვა ტიპისა და სიმძლავრის მზის ელექტროსადგურების (მეს) ჩართვა ხორციელდება, რომელთა შორის წამყვანი ადგილი ფოტოელექტრული მოდულის ბაზაზე დაფუძნებულ მზის ფოტოელექტროსადგურებს (მფეს) უჭირავთ [2].

## სამუშაოს აქტუალობა

აღსანიშნავია, რომ მფეს-ებს, მათი მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, მუშაობის რთული სტატიკური და დინამიკური რეჟიმებით ხასიათდებიან. ამ მხრივ, განსაკუთრებით აგრესიულობით გამოირჩევიან მზის ფოტოელექტროსადგურები, რადგან ამ სადგურებში, განსხვავებით მზის სხვა ელექტროსადგურებისგან, სხივური ენერჯია, პირდაპირ შუალედური გარდაქმნის გარეშე, მუდმივი დენის ელექტროენერჯიად გარდაიქმნება და შემდგომ იგი ქსელის სიხშირის შესაბამისი ცვლადი დენის ენერჯიად ინვერტირდება [3]. შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები ვითარდება და ქსელში ელემენტებში სხვადასხვა სახის ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები (ემდ) წარმოიქმნება. შედეგად, რადიკალურად იცვლება გამანაწილებელი მოწყობილობის სალტეებზე არსებული ელექტრომაგნიტური გარემო (ემგ) და ირღვევა ქსელში ჩართული მომხმარებელზე მიწოდებული საერთაშორისო ნორმებით დადგენილი ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლები (ეეხმ). აქედან გამომდინარე, რიგ შემთხვევებში, შეუძლებელი ხდება მზის ელექტროსადგურსა და ქსელში ჩართული სხვა ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებს შორის ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (ემთ) უზრუნველყოფა. შედეგად, მნიშვნელოვნად იზრდება ელექტროენერჯის დანაკარგები ელექტრომომარაგების ქსელსა და ქსელში ჩართული ელექტრომომხმარებლების

ელემენტებში, უარესდება მათი ენერგეტიკული მაჩვენებლები და ენერგოეფექტურობა.

## სამუშაოს მიზანი

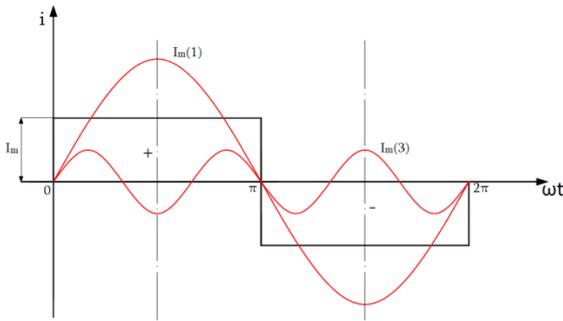
სამუშაოს მიზანია ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო და დაბალი ძაბვის გამანაწილებელ ქსელთან მიერთებული მზის ფოტოელექტროსადგურების მუშაობის რეჟიმების, მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის გამანაწილებელ მოწყობილობებში განვითარებული სტატიკური და დინამიკური ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, გამანაწილებელი მოწყობილობის სალტეებზე შექმნილი ემგ-ს განსაზღვრა, წარმოქმნილი და ქსელში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების (ემდ) ხასიათისა და ამპლიტუდის დადგენა. წარმოქმნილი დაბრკოლებების ქსელის ელემენტებზე და ელექტრომომხმარებელთა ეტდ-ზე ზემოქმედების შეფასება. ამავდროულად, კვლევებით მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე, მომხმარებლებზე მიწოდებული ეეხმ-ის, ელექტრომაგნიტური თავსებადობისა და ელექტრომომარაგების საიმედოობის, უზრუნველყოფის პირობებში, ქსელსა და ცალკეულ ელემენტებში ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირების, ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების გასატერებელი ღონისძიებების დამუშავება.

## ნაშრომში ჩატარებული კვლევები

მფეს-ის გამანაწილებელ მოწყობილობასთან მიერთების შედეგად, რადიკალურად იცვლება მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები და სალტეზე არსებული ემგ. შესაბამისად, ელექტროსადგურსა და ქსელში ჩართულ სხვა ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებს შორის ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფისათვის საჭიროა დეტალურად იქნას გამოკვლეული მფეს-ის მიერ წარმოქმნილი ემდ-ბი და ქსელში მგრძნობიარობა, ასევე მდგრადობა ქსელში არსებული ემდ-ბის მიმართ.

## მფეს-ის მიერ ქსელში განვითარებული ემგ-ები და წარმოქმნილი ემდ-ები

მნიშვნელოვანია, რომ მფეს-ში ფოტოელექტრული მოდულიდან მიღებული მუდმივი დენის ელექტროენერჯია ინვერტორის საშუალებით ცვლადი სამრეწველო სიხშირის (50 ჰც) ძაბვად გარდაიქმნება [4]. მნიშვნელოვანია, რომ ინვერტირებული ძაბვის მრუდი



ნახ. 1. მართკუთხა ფორმის დენის და მისი ჰარმონიკულ მდგენელებად გაშლა:  $I_m(1)$  – პირველი რიგის ჰარმონიკა (ძირითადი სიხშირე);  $I_m(3)$  – მესამე რიგის ჰარმონიკა

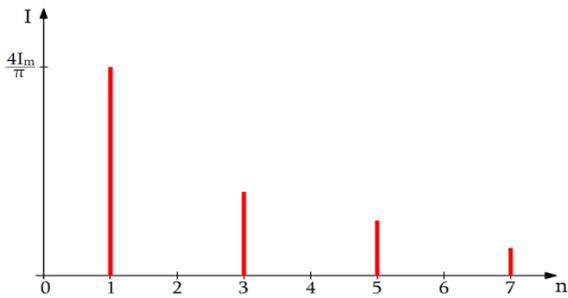
დამახინჯებულია და კვაზი მართკუთხა ფორმა გააჩნია (ნახ. 1).

ფურიეს მწკრივების საშუალებით, იდეალური მართკუთხა ფორმისა და აბსცისთა ღერძის მიმართ სიმეტრიული დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკული სპექტრი შემდეგი სახით ჩაიწერება [5]:

$$i_{\Sigma}(\omega t) = \frac{4I_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right), \quad (1)$$

სადაც  $I_m$  – დენის ძირითადი ჰარმონიკის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა,  $\omega$  – ქსელის კუთხური სიხშირე, რად/წმ.

(1) გამოსახულების საშუალებით აგებულ მართკუთხა ფორმის დენის ჰარმონიკული სპექტრს ნახ. 2-ზე წარმოდგენილი სახე აქვს.



ნახ. 2. მართკუთხა ფორმის დენის ჰარმონიკული სპექტრი

მაღალი რიგის ჰარმონიკული სპექტრიდან (ნახ. 2) ნათლად ჩანს, რომ სპექტრი ძირითადად კენტი რიგის ჰარმონიკებს მოიცავს. სპექტრის მე-3 რიგის ჰარმონიკის ამპლიტუდა ძირითადი ჰარმონიკის დაახლოებით 1/3-ს შეადგენს, მე-5

რიგის 1/5-ს აღმატება და მე-7 რიგის 1/7-ს შეადგენს. აღნიშნული მაღალი რიგის ჰარმონიკები, ქსელისა და მომხმარებლების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების ძალოვან და მართვის ელემენტებში გავრცელების შედეგად, იწვევენ მგრძობიარე ელემენტების (საკაბელო ხაზები, სტატიკური კონდენსატორების შემცველი ეტდ-ები, ძალოვანი ტრანსფორმატორები) გადახურებას და მწყობრიდან გამოსვლას. შესაბამისად, რიგ შემთხვევებში, მაღალი რიგის ჰარმონიკები ელექტრომოწყობილობების დაზიანების კერას წარმოადგენს.

მამასადამე, მფეს ელექტრომაგნიტური თავსებადობის თვალსაზრისით, ელექტრო-მომარაგების ქსელის აგრესიულ ელემენტს წარმოადგენს. ამავდროულად, მათ მუშაობის რთული რეჟიმები გააჩნიათ და რადიკალურად აუარესებენ გამანაწილებელი მოწყობილობის ელექტრომაგნიტურ გარემოს.

#### მფეს-ის მგრძობიარობა ემდ-ის მიმართ და რელეური დაცვის თავისებურებანი

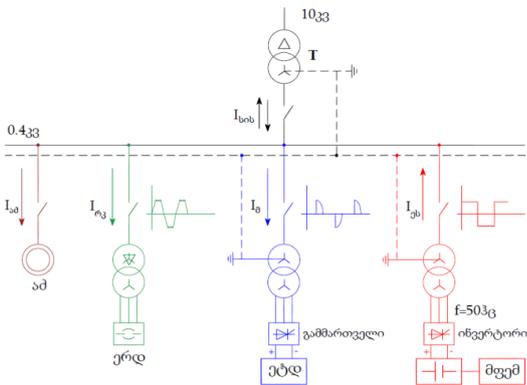
ცნობილია, რომ ელექტრომომარაგების სისტემასთან პარელელური მუშაობისათვის გათვალისწინებული მფეს-ის მიერ გენერირებული ელექტროენერჯის პარამეტრებისა (ინვერტირებული ძაბვის სიხშირე, ქსელთან სინქრონიზაციის უზრუნველყოფა, ქსელისა და ელექტროსადურის ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე, ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა) და მუშაობის რეჟიმების მართვა ხორციელდება ქსელის ძაბვის მიხედვით [4]. შესაბამისად, მფესეები ქსელში სხვა ეტდ-ის მიერ წარმოქმნილი ემდ-ის მიმართ, მაღალი მგრძობიარობით გამოირჩევა. მნიშვნელოვანია, რომ მფეს-ების მუშაობის მდგრადობაზე განსაკუთრებით მწვავედ, სხვადასხვა მიზეზით გამოწვეული ქსელის ძაბვის მკვეთრი ჩავარდნა მოქმედებს. კერძოდ, ძაბვის სიღრმისეული ჩავარდნისას, რთულდება მფეს-ების მუშაობის რეჟიმების მართვა და რელეური დაცვის სელექტიურობის უზრუნველყოფა.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, მფეს-ების ქსელთან მიერთებისას, აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას ქსელში ჩართული ყველა ეტდ-ის მუშაობის რეჟიმების შედეგად მოსალოდნელი ძაბვის ჩავარდნები. ამ მხრივ, განსაკუთრებით მძიმე მუშაობის რეჟიმითა და აგრესიულობით გამოირჩევიან ცვლადი დენის ერთფაზა და სამფაზა ელექტრორკალური

დანადგარები და განივ იმპულსურ რეგულირებაზე დაფუძნებული მართვადი ეტდ-ბი [6].

ელექტრომომარაგების ქსელის 0.4 კვ ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობის ტიპური (გამარტივებული) ცალხაზოვანი სქემა მფეს-ის გათვალისწინებით წარმოდგენილია ნახ. 3-ზე.

სქემა შედგენილია ყველაზე უფრო ფართოდ გავრცელებული ტიპური ელექტრომიმღებების გათვალისწინებით: არამართვადი ასინქრონული ელექტროამძრავი, სამფაზა ელექტრორკალური ღუმელი და მართვადი გარდამქმნელებით აღჭურვილი ტექნოლოგიური დანადგარი.



ნახ. 3. 0.4 კვ ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობის ცალხაზოვანი სქემა

აღსანიშნავია, რომ სამფაზა ელექტრორკალური ღუმელები მოკლედშერთვის საექსპლუატაციო რეჟიმში მუშაობის პირობებში დატვირთვის დენის მკვეთრი ბიძგები წარმოიქმნება და იგი არასიმეტრიული ხასიათისაა [6]. შედეგად, გამანაწილებელი მოწყობილობის სალტების ცალკეულ ფაზებზე ადგილი აქვს ძაბვის მკვეთრ ჩავარდნას, რომელიც ხშირ შემთხვევაში, მფეს-ის მუშაობის რეჟიმის დარღვევას განაპირობებს. ამის გამო, ირღვევა მფეს-ის ინვერტორის მუშაობის რეჟიმი, გენერირებული ძაბვის სიხშირე, ქსელისა და ელექტროსადგურის ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე (პარალელური მუშაობის პირობები) და მფეს-ის მუშაობის მდგრადობა, შესაბამისად, მოქმედებაში მოდის რელეური დაცვის სისტემა, რომელიც მფეს-ს ქსელიდან გამორთავს.

### დასკვნები

1. ჩატარებულია ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო და დაბალი ძაბვის გამანაწილებელ ქსელთან მიერთებული მფეს-ების მუშაობის რეჟიმებისა და მათ მიერ

ელექტრომომარაგების ქსელის გამანაწილებელ მოწყობილობებში განვითარებული ემპ-ის გამოკვლევა და შეფასებულია ქსელში არსებული ელექტრომაგნიტური გარემო;

2. დადგენილია მფეს-ების მიერ წარმოქმნილი და ქსელში გავრცელებული ემდ-ის ხასიათი, სიმძლავრე. დასაბუთებულია, რომ მათ შორის ძირითადად კენტი (მე-3, მე-5, მე-7) რიგის ჰარმონიკები გამოირჩევიან;

3. დასაბუთებულია, რომ მფეს-ები მაღალი მგრძობიარობით გამოირჩევა ქსელში არსებული ემდ-ების მიმართ.

4. დადგენილია, რომ მფეს-ის მუშაობის მდგრადობაზე განსაკუთრებით მწვავედ ძაბვის ჩავარდნა მოქმედებს. კერძოდ, ძაბვის ჩავარდნის შედეგად ირღვევა ინვერტორის მუშაობის რეჟიმი, ქსელსა და მფეს-ს შორის პარალელური მუშაობის პირობა.

### ლიტერატურა

1. Ершов А.М. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. «Системы электроснабжения»: 1962–2012/А.М.Ершов. Челябинск: Издательский центр ЮурГУ. 2012. –116с
2. Презентация и реферат "Солнечные электростанции-энергия будущего" - <https://infourok.ru/prezentaciya-i-referat-solnechnye-elektrostantsii-energiya-budushhego-4462495.html>
3. Выбор инвертора для солнечной электростанции. URL: <http://www.solnechnye.ru/inventory-220v/vybor-invertora.htm>
4. Солнечные электростанции для обеспечения системной надежности - <https://renen.ru/solar-power-plants-to-ensure-system-reliability/>
5. Управление качеством электроэнергии// И.И. Карташев, В.Н. Тульский, З.Г. Шаманов и др.// Под ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. – 320 с. : ил.
6. ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ., ქობალია მ. ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის რეჟიმების გამოკვლევა და ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების საკომპენსაციო მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავება. V საერთაშ. სამეცნ. კონფერენციის „ენერგეტიკა: რეგიო პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“-ს მოხსენებათა კრებული. ქუთაისი. 2018. გვ. 62–67.

#### References (Transliterated)

1. Ershov A.M. Elektrosnabjenie promishlennich predpriatii I gorodov – “sistemi Elektrosnabjenia”: 1962-2022 / A.M. Ershov. – Cheliabinsk: Izdatelskii tsentr IIUrGU, 2012.-116 s.
2. Prezentatsia i referat “s=Solnichnie elektrostantsii – energია budushhego”  
<https://infourok.ru/prezentatsiya-i-referat-solnechnye-elektrostancii-energiya-budushhego-4462495.html>
3. Vibor invertora dlia solnechnoi elektrostantsii. URL: <http://www.solnechnye.ru/inventory-220v/vybor-invertora.htm>
4. Solnechnie elektrostantsii dlia obespechenia sistemnoi nadiojnosti - <https://renen.ru/solar-power-plants-to-ensure-system-reliability/>
5. Upravlenie kochestvom elektroenergii // I.I. Kartashev, V.N. Tulskaa, Z.G. Shamanov i dr. pod red. I.U. Sharova. -M.: Izdatelskii dom MEI, 2006.-320 s. il.
6. Tchunashvili B., Petrosiani A., Gamrekelashvili T., Kobalia M. Elektrorkalurigumelebis mushaobis gamokvleva da qselshi warmoqmnili magalirigis harmonikebis sakompensacio mowyobilobis martvis sistemis damushaveba. V saertash. Sametsn. Konferentsiis “Energetika: regionaluri problemebi da ganvitarebis perspeqtivebi”-s mokhsenebata krebuli . Kutaisi, 2018. Gv. 62-67.

## ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების ეკონომიური ეფექტურობა ენერგოსისტემაში

ტენგიზ მუსელიანი, პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [museliani@yahoo.com](mailto:museliani@yahoo.com)

ბორის ჯინჭველიშვილი, II კურსის დოქტორანტი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი საქართველო, E-mail: [jinchveleishvili.boris22@gtu.ge](mailto:jinchveleishvili.boris22@gtu.ge)

**ანოტაცია.** მსოფლიოში ამჟამად აქტიურად მიმდინარეობს ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების საკითხების კვლევა. ელექტროენერჯის დამაგროვებლები მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ იზოლირებული ენერგოსისტემების ელექტრომომარაგებაში. წინამდებარე სტატიის მიზანია ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების ეკონომიური ეფექტურობის შეფასება ელექტროენერგეტიკული სისტემების ფუნქციონირებისას. ელექტროენერჯის დამაგროვებლის ძირითადი თვისებაა ელექტროენერჯის აკუმულირებისა და შემდგომში საჭირო დროს მისი გაცემის უნარი. აქვს განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენერგოსისტემების ოპტიმალური მართვის პრინციპულად ახალი მეთოდის შექმნისათვის.

**საკვანძო სიტყვები:** ელექტროენერჯია, ელექტროენერჯის დამაგროვებელი, პიკური დატვირთვა, ელექტროსისტემები, სიხშირისა და ძაბვის რეგულირება, გენერაცია.

### Economic efficiency of the use of electricity accumulators in the power system

Tengiz Museliani, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [museliani@yahoo.com](mailto:museliani@yahoo.com)

Boris Jintchveleishvili, Phd student,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [jinchveleishvili.boris22@gtu.ge](mailto:jinchveleishvili.boris22@gtu.ge)

**Annotation.** It is determined that the use of battery energy storage system to solve the applied tasks of balancing load schedules in the power system can be one of the most effective incentives for the further development of electricity collector technologies. An assessment of the economically feasible value of capital investments in the technical system of electricity accumulation has been carried out, the purpose of which is to solve the problem of adjusting the daily load schedule for the given value indicators of generation. The comparison of the obtained value of production of the accumulator with the cost of the known technologies on the basis of the known technologies confirms the perspective of the given direction of scientific-applied research.

**Keywords:** Electricity, Battery energy storage system, peak load, electrical systems, frequency and voltage regulation, generation.

**შესავალი.** ბატარეას ელექტროენერჯის დამაგროვებელ სისტემას ენერჯის მართვის სისტემის საშუალებით ექნება შესაძლებლობა სისტემის მოხმარება მიწოდების ბალანსის დაცვის მიზნით გასცეს და მიიღოს ელექტროენერჯია, არეგულიროს სიხშირე და ძაბვა სისტემაში, რაც მეტ ეკონომიურ სარგებელს და სტაბილურობას მოუტანს ქვეყნის ელექტროენერგეტიკულ სისტემას.

კომპანია BloombergNEF (BNEF)-ს მკვლევარების უკანასკნელი პროგნოზის თანახმად, 2030

წლის ბოლოსათვის მსოფლიოში ელექტროენერჯის დამაგროვებლების სისტემის ერთობლივი დადგმული სიმძლავრე მიაღწევს 411 გიგავატს, ხოლო ტევადობა 1194 გიგავატ.სთ-ს, რაც 15-ჯერ აღემატება 2021 წლის ბოლოსათვის მომუშავე (27 გვტ/56 გვტ.სთ) დამაგროვებლების სიმძლავრე/ტევადობას [1].

ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების ძირითად სფეროს მიეკუთვნება პიკური დატვირთვების დაფარვა, სიხშირისა და ძაბვის რეგულირება, ელექტროგადაცემის ხაზების

დატვირთვის შემცირება და მათი მოდერნიზაციის საჭიროების გადავადება, ელექტრომომარაგების საიმედოობისა და ხარისხობრივი მაჩვენებლების ამაღლება, სისტემაში ელექტროენერჯის განახლება და წყაროების ინტეგრაციის უზრუნველყოფა [3,6].

თითოეულ ზემოთნაჩვენებ გამოყენებისათვის მნიშვნელობა აქვს დამაგროვებლის ენერგოტევადობას, განმუხტვის მთელი პერიოდის განმავლობაში დროის ერთეულში გაცემულ სიმძლავრეს, განმუხტვის ხანგრძლივობას და დამაგროვებლის მქვ-ს.

ძირითადი პრობლემა, რომელიც ხელს უშლის ელექტროენერჯის დამაგროვებლის მასშტაბურ გამოყენებას არის მისი მაღალი ღირებულება. ამასთანავე ამჟამად მთელ რიგ ქვეყნებში (აშს, იაპონია, ინდოეთი, ბრაზილია, რუსეთი) ახალი ტიპის დამაგროვებლების შექმნისათვის აღინიშნება კვლევებისა და პრაქტიკული დამუშავების აქტივიზაცია, რომლებიც მიმართულია ღირებულების შემცირებისა და ენერჯის სისტემების მართვის ოპტიმიზაციის გამოყენებითი ამოცანების გადასაწყვეტად.

პროგნოზის მიხედვით 2025 წლისათვის ელექტროდამაგროვებლების შექმნისათვის ხარჯები შემცირდება საშუალოდ 75%-ით.

მასალების ანალიზი, რომლებიც მიეკუთვნება ელექტროენერჯის გამოყენების ეკონომიური ეფექტურობის შეფასებას მოწმობს, რომ მიუხედავად იმ მოწყობილობების მრავალრიცხოვანი ამოცანებისა, რომელთაც გააჩნიათ უნარი ენერჯის სისტემაში დააგროვონ ელექტროენერჯია, მოცემულ ეტაპზე მათი გამოყენების სტიმულს წარმოადგენს მოთხოვნის შემცირების პერიოდში ელექტროენერჯის დაგროვების შესაძლებლობა და შემდგომ მაქსიმალური მოხმარების შემთხვევაში მისი შემდგომი გაცემა.

ელექტროენერჯის დამაგროვებლების გამოყენების ეფექტურობის წინასწარი შეფასების უმარტივესი მეთოდიკა მოყვანილია ნაშრომებში [3,6,7]. მისი ილუსტრაციისათვის განვიხილოთ მაგალითი, რომელიც დაფუძნებულია აშშ-ს კალიფორნიის შტატის მოხმარებლების ელექტროენერჯის ღირებულების დღეღამურ ცვლილებაზე [8].

- 00.00-8.30 – 0,13840 \$/კვტ.სთ;

- 8.30-12.00- 0,22498 \$/კვტ.სთ;
- 12.00-18.00- 0,43995 \$/კვტ.სთ;
- 18.00-21.30- 0,22498 \$/კვტ.სთ;
- 21.30-24.00- 0,13840 \$/კვტ.სთ.

ელექტროენერჯის მინიმალური ღირებულების საათებში მისი აკუმულირების შემთხვევაში (როგორც წესი, უმცირესი დატვირთვების დროს) დამაგროვებელში, რომლის მქვ 80%-ია და ამორტიზაციაზე და მომსახურებაზე კუთრი დანარიცხები 0,02 \$/კვტ.სთ-ზე [3.7] 1 კვტ.სთ ელექტროენერჯის შენახვის ღირებულება  $C_{შენახ.}$  შეიძლება განისაზღვროს მარტივი ფორმულით:

$$C_{შენახ.} = \frac{C_{აგ}}{\eta} + C_{აგ} = \frac{0,13840}{0,8} + 0,02 = 0,193 \text{ \$/კვტ.სთ} \quad (1)$$

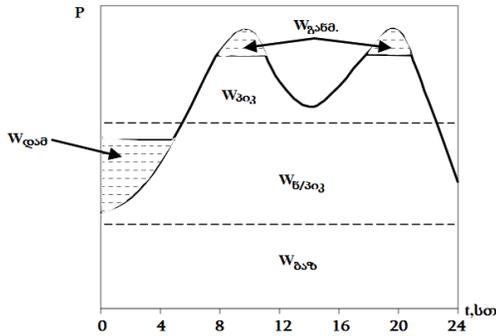
$C_{აგ}$  - ელექტროენერჯის ღირებულებაა ღამის მინიმუმის საათებში (21.30-8.30);  $C_{აგ}$  = კუთრი დანარიცხები ენერჯის დაგროვებისათვის მოწყობილობების ამორტიზაციაზე და მომსახურებაზე;  $\eta$  - ენერჯის დაგროვებისათვის მოწყობილობების მქვ.

დამაგროვებლის მიერ შენახული ელექტროენერჯის პიკური დატვირთვის საათებში გაცემის დროს მოგება შეიძლება შეფასებული იქნეს როგორც სხვაობა პიკურ საათებში ელექტროენერჯის ღირებულებას  $C_{მაქს.}$  და შენახვის ღირებულებას  $C_{შენახ.}$  შორის.

$$C_{მაქს.} - C_{შენახ.} = 0,43995 - 0,193 = 0,24695 \text{ \$/კვტ.სთ.}$$

ზოგადად დამაგროვებლების გამოყენების ეფექტურობის ანალიზი წარმოადგენს რთულ მრავალკრიტერიუმულ ამოცანას. ზემოთმოყვანილი მიდგომა ატარებს მხოლოდ შეფასებით ხასიათს, რადგანაც უპირველესად მხედველობაში არ იღებს მთელ რიგ ფაქტორებს, როგორებიცაა: დანახარჯები შექმნაზე, დამაგროვებლის დაყენება და მომსახურება, დანადგარის გავლენა ენერჯის სისტემის პარამეტრებზე, ენერჯის სისტემის მაგენერირებელი სიმძლავრეების შემადგენლობა და სხვ. მეორე რიგში ზემოთმოყვანილი განხილვები ძირითადად მიეკუთვნებიან მომხმარებელთა თვალსაზრისს. მიუხედავად ამისა მსგავსი მიდგომა თვალნათლივ უკეთეს დემოსტრაციას დამაგროვებლის გამოყენების ერთ ერთ ძირითადი პირობის მიზანშეწონილობას-ელექტროენერჯიაზე მინიმუმ ორი დღეღამური ტარიფის არსებობას.

მაგენირებელი კომპანიის თვალსაზრისით ელექტროენერჯის დაგროვების მოწყობილობების გამოყენების ეფექტურობის ანალიზის მიდგომის დამუშავებისათვის მაგალითის სახით განვიხილოთ ნახაზზე მოყვანილი დატვირთვის დღეღამური გრაფიკი.



ნახაზი. ენერგოსისტემის მუშაობის დღეღამური გრაფიკი

დღეღამის განმავლობაში სადგურების მიერ ელექტროენერჯის გამომუშავება გრაფიკების ბაზისურ, ნახევრადპიკურ და პიკურ ნაწილებში ტოლია შესაბამისად  $W_{ბაზ}$ ,  $W_{ნ/პიკ}$ ,  $W_{პიკ}$ . 1 კვტ.სთ გამომუშავების ღირებულებითი მაჩვენებლები  $C_{ბაზ}$ ,  $C_{ნ/პიკ}$ ,  $C_{პიკ}$ . ენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობა ნახევრადპიკურ ზონაში მუშაობს დამუხტვის რეჟიმში, პიკურ ზონაში - განმუხტვის რეჟიმში, ამ დროს  $W_{განმ.} = \eta W_{დამუხტ.}$ , სადაც  $\eta$  - ენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის მქ;  $W_{დამუხტ.}$  - მოწყობილობის დამუხტვის ენერჯია;  $W_{განმ.}$  - მოწყობილობის განმუხტვის ენერჯია.

ენერგოსისტემაში, რომელიც დღეღამის განმავლობაში ფუნქციონირებს ელექტროენერჯის დამაგროვებლის გარეშე 1 კვტ.სთ გენერაციის საშუალო ღირებულება შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$C_{საშ} = \frac{W_{ბაზ} C_{ბაზ} + C_{ნ/პიკ} W_{ნ/პიკ} + W_{პიკ} C_{პიკ}}{W_{ბაზ} + W_{ნ/პიკ} + W_{პიკ}} = \frac{C_{\Sigma}}{W_{\Sigma}} \quad (2)$$

ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის ჩართვის შემთხვევაში, რომლის დამუხტვა ხდება დღეღამური გრაფიკის ნახევრადპიკურ, ხოლო განმუხტვა - პიკურ ზონებში, (2) ფორმულა გარდაქმნის შემდეგ მიიღებს სახეს:

$$C_{საშ}^{დამ} = \frac{C_{\Sigma} + W_{დაა} (C_{ნ/პიკ} - \eta C_{პიკ})}{W_{\Sigma} + W_{დაა} (1 - \eta)} \quad (3)$$

(2) და (3) ფორმულებიდან შეიძლება განისაზღვროს ელექტროენერჯის დამაგროვებლის მოწყობილობის გამოყენების შემთხვევაში 1 კვტ.სთ გენერაციის საშუალო ღირებულება

$$C_{საშ} - C_{საშ}^{დამ} = \frac{C_{\Sigma} W_{დაა} (1 - \eta) - W_{\Sigma} W_{დაა} (C_{ნ/პიკ} - \eta C_{პიკ})}{W_{\Sigma} [W_{\Sigma} + W_{დაა} (1 - \eta)]} > 0 \quad (4)$$

(4) პირობა ყოველთვის სრულდება, თუ  $C_{პიკ} > (C_{ნ/პიკ} / \eta)$ . სხვა შემთხვევაში  $[C_{პიკ} < (C_{ნ/პიკ} / \eta)]$  საჭიროა  $C_{საშ}$ ,  $C_{ნ/პიკ}$  და  $C_{პიკ}$  შორის დაცული იქნეს თანაფარდობა:

$$C_{პიკ} < C_{საშ} (1 - \eta) : \frac{C_{ნ/პიკ}}{C_{პიკ}} - \eta \quad (5)$$

ელექტროენერჯის პიკური და ნახევარპიკური გენერაციის ღირებულებებს შორის თანაფარდობა პირველ რიგში დამოკიდებულია ელექტროსისტემის სახეობაზე. თუ ენერგოსისტემის მაგენირებელი სიმძლავრეები წარმოდგენილია სადგურის სხვადასხვა სახეობებით, მაშინ  $C_{პიკ}$  და  $C_{ნ/პიკ}$  ღირებულებები ერთმანეთისაგან შეიძლება განსხვავდებოდნენ 1,5-2-ჯერ და მეტჯერ [9]. ამ შემთხვევაში ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის გამოყენება, რომელიც მუშაობს პიკურ და ნახევარპიკურ ზონებში ყოველთვის უზრუნველყოფს (4) პირობის შესრულებას. (5) დამოკიდებულების მხედველობაში მიღების საჭიროება შეიძლება წარმოიშვას მხოლოდ ისეთ ენერგოსისტემაში ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის ეფექტურობის ანალიზის დროს, რომელიც შედგება ერთი ტიპის სადგურებისაგან, რომელთა 1 კვტ.სთ გენერაციის კუთრი ღირებულება ერთმანეთისაგან უმნიშვნელოდ განსხვავდებიან.

საბოლოო მსჯელობა ენერგოსისტემის მაგენირებელი კომპანიის მიერ ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის გამოყენების დაინტერესების შესახებ შეიძლება გაკეთებული იქნეს მხოლოდ მოწყობილობის გამოყენების ეფექტის, (რომელიც მდგომარეობს (4-ს თანახმად 1 კვტ.სთ გენერაციის ღირებულების შემცირებაში), შედარებით ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის გამოყენებასთან დაკავშირებულ კუთრ დანახარჯებთან. შევაფასებთ, რა მათ [2,19]-ში მოყვანილი მეთოდის მიხედვით ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობი-

ლობაში დანაკარგების ღირებულების გათვალისწინებით, მივიღებთ პირობას, რომელიც ახასიათებს თანაფარდობას ენერგოსისტემის მუშაობის დღელამური გრაფიკის პარამეტრებსა და ელექტროენერჯის ღირებულებას შორის პიკურ, ნახევარპიკურ და ბაზისურ ზონებში ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის შექმნაში კუთრი კაპიტალდაბანდების  $k_{კუთ.}$  შესაბამისი დიაპაზონით, რომლის დროსაც ენერგოსისტემის დატვირთვის დღელამური გრაფიკის გასწორებისათვის ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის გამოყენება ეკონომიურად გამართლებული იქნება

$$k_{კუთ} < 2 \frac{N t_{დამ} \eta^2 C_{პიკ} - C_{ბაზ}}{E + a} \cdot \frac{1}{1 + \eta} \quad (6)$$

სადაც N - წლის განმავლობაში ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის მუშაობის დღელამის რაოდენობაა და თანახმად [9]-ს მიღებულია 300-ის ტოლად;  $t_{დამ}$  - ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის დღელამის განმავლობაში დამუხტვის დროა და მიღებულია 6-8 სთ; E - დისკონტრირების კოეფიციენტი და მიღებულია 0,1 [3]; a - ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის ამორტიზაციის ნორმა და მიღებულია 0,033 [2,3,9].

გამოსახულება (6) ატარებს შეფასებით ხასიათს. უფრო ზუსტი ანგარიშისათვის საჭიროა გათვალისწინებული იქნეს ელექტროენერჯის დამაგროვებელი მოწყობილობის მუშაობით სისტემაში გამოწვეული სიმძლავრის დანაკარგების ცვლილება, სხვადასხვა ტიპის ელექტროსადგურების ზუსტი თანაფარდობა, დატვირთვის დღელამური გრაფიკის დაფარვაში, მათი წილი ამ გრაფიკში და სხვა ინფორმაცია. მიუხედავად ამისა, (6) გამოსახულების მიხედვით შესაძლებელია წინასწარ შეფასდეს ელექტროენერჯის დამაგროვებელ მოწყობილობაში კუთრი კაპიტალდაბანდების სიდიდე, რომლის დროსაც ელექტროენერჯის დაგროვებისათვის მოწყობილობის გამოყენებას მიყვავართ 1 კვტ.სთ გენერაციის ღირებულების შემცირებასთან.

ასე, მაგალითად, ამ სტატიაში მოყვანილი სიდიდეების:  $C_{პიკ.} = 0,43995$  \$/კვტ.სთ და  $C_{ბ/პიკ} = 0,22498$  \$/კვტ.სთ (6) ფორმულაში ჩასმით მივიღებთ, რომ ელექტროენერჯის დამაგროვებელი

ბელი მოწყობილობის კუთრი ღირებულება  $k_{კუთ.}$ , რომლის დროსაც დამაგროვებლის გამოყენების შემთხვევაში ხდება 1კვტ.სთ გენერაციის კუთრი ღირებულების შემცირება უნდა იყოს არანაკლებ 0,2129 \$/კვტ.სთ.

აღსანიშნავია, რომ ამ სტატიაში მაგალითის სახით მიღებული ელექტროენერჯის დამაგროვებლის მოწყობილობის ეკონომიურად მიზანშეწონილი კაპიტალდაბანდება პრაქტიკულად აღმოჩნდა ყველა ცნობილი და დამუშავებული ტექნოლოგიების მისაღები. ეს ფაქტი კიდევ ერთხელ ამტკიცებს დიდ ენერგეტიკაში დაგროვების ტექნოლოგიების შექმნის, დახვეწისა და დანერგვის სამუშაოების პერსპექტიულობას.

### ლიტერატურა

1. <https://renew.ru/moshhnosti-sistem-nakopleniya-energii-v-mire-dostignut-411-gvt-k-2030-g/>
2. Electricity Energy Storage Technology Options. A White Paper Primer on Applications, Costs and benefits//EPRI,Pali Alto, CA:December 2010, 1020676.-P.170.
3. Eyer,J.Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market PotentialAssessment Guide. Study for the DOE Energy Storage Systems Program/ J.Eyer, G.Corey//SAND 2010-0815. -2010. -P.232.
4. Butler,P.C.Innovative Business Cases for Energy storage in a Restructured Electricity marketplace , Study for the DOQ Energy storage Systems Program/P.C,Butler,J.Iannucci, J. Eyer// SAND REPORT SAND 2000362. 2003. -P.84.

### References (Transliterated)

1. <https://renew.ru/moshhnosti-sistem-nakopleniya-energii-v-mire-dostignut-411-gvt-k-2030-g/>
2. Electricity Energy Storage Technology Options. A White Paper Primer on Applications, Costs and benefits//EPRI,Pali Alto, CA:December 2010. 1020676.-P.170.
3. Eyer,J.Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market PotentialAssessment Guide. Study for the DOE Energy Storage Systems Program/ J.Eyer, G.Corey//SAND 2010-0815. 2010.-P.232.
4. Butler,P.C.Innovative Business Cases for Energy storage in a Restructured Electricity marketplace , Study for the DOQ Energy storage Systems Program/P.C,Butler,J.Iannucci, J. Eyer// SAND REPORT SAND 2000362. 2003. -P.84.

## გემის ელექტროენერჯის ხარისხისა და ელექტროენერგეტიკული სისტემის ოპტიმიზაციის გზები

**მაია ტუღუში**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი

სსიპ ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო, E-mail: [m.tugushi@bsma.edu.ge](mailto:m.tugushi@bsma.edu.ge)

**ლუიზა სიხარულიძე**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი

სსიპ ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო, E-mail: [l.sikharulidze@bsma.edu.ge](mailto:l.sikharulidze@bsma.edu.ge)

**გოჩა გოგიტიძე**, აკადემ. დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი

სსიპ ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო, E-mail: [g.s.gogitidze@bsma.edu.ge](mailto:g.s.gogitidze@bsma.edu.ge)

**ფირუზა ვარშანიძე**, აკადემ. დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი

სსიპ ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო, E-mail: [f.varshanidze@bsma.edu.ge](mailto:f.varshanidze@bsma.edu.ge)

**მადონა ლორია**, აკადემ. დოქტორი, ასოც. პროფესორი

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ბათუმი, საქართველო,

E-mail: [madona.loria@bsu.edu.ge](mailto:madona.loria@bsu.edu.ge)

**ანოტაცია:** ელექტროენერჯის წარმოება დაკავშირებულია რიგი ეკოლოგიური პრობლემების წარმოქმნასთან. შესაბამისად, მისი ოპტიმალური მოხმარება მნიშვნელოვნად შეამცირებს არასასურველ ეფექტს. დღეისათვის უმნიშვნელოვანესია ყველა ღონისძიება, რომელიც მიმართულია ეკოლოგიური პრობლემის მოგვარებისაკენ. ამ მხრივ მნიშვნელოვანია ემისიების შემცირება. მსოფლიო ფლოტი მრავალრიცხოვანია და შესაბამისად, თითოეულ გემზე ელექტროენერჯის წარმოებისათვის მიღებული გამონაბოლქვის მოცულობა დიდია. ელექტროსისტემაში დანაკარგების შემცირება ერთ-ერთი გზაა ემისიების შემცირებისათვის. ეს მიღწევადაა რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით ელექტროენერგეტიკული სისტემის რეჟიმების ოპტიმიზაციით.

**საკვანძო სიტყვები:** ელექტროენერჯის ხარისხი, რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები

### Ways to optimize the quality of the ship's electricity and the power system

**Maia Tugushi**, Candidate of technical science, Professor

Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, E-mail: [m.tugushi@bsma.edu.ge](mailto:m.tugushi@bsma.edu.ge)

**Luiza Sikharulidze**, Candidate of technical science, Associate Professor

Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, E-mail: [l.sikharulidze@bsma.edu.ge](mailto:l.sikharulidze@bsma.edu.ge)

**Gocha Gogitidze**, PhD, Associate Professor

Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, E-mail: [g.s.gogitidze@bsma.edu.ge](mailto:g.s.gogitidze@bsma.edu.ge)

**Firuz Varshanidze**, PhD, Associate Professor

Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, E-mail: [f.varshanidze@bsma.edu.ge](mailto:f.varshanidze@bsma.edu.ge)

**Madona Loria**, PhD, Associate Professor

Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia, E-mail: [madona.loria@bsu.edu.ge](mailto:madona.loria@bsu.edu.ge)

**Annotation:** Producing of Electricity is related to the occurrence of a number of environmental problems. Therefore, its optimal consumption will significantly reduce the undesirable effect. Today, all the measures for at solving the ecological problem are very important. In this regard, it is important to reduce emissions. The world fleet is numerous and therefore the volume of emissions obtained for the production of electricity on each ship is large. Reducing losses in the electrical system is one of the way to reduce emissions. This can be achieved by optimizing the modes of the electric power system according to the reactive power.

**Keywords:** power quality, reactive power losses, reduce emission.

### შესავალი

თანამედროვე გემების ენერგეტიკული დანადგარებისა და მამრავი მექანიზმების ავტომატიზაციის ხარისხის ამაღლების ფონზე იზრდება მოთხოვნა გამომუშავებული

ელექტროენერჯის სიმძლავრეზე და ხარისხზე. ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლად მიღებულია ისეთი პარამეტრები, როგორცაა: ელექტროენერგეტიკული ქსელის მოცემულ უბანზე დამყარებული რეჟიმის დროს ძაბვის

ხანგრძლივი გადახრა  $\Delta U = \frac{U-U_n}{U_n} \cdot 100\%$ , სადაც  $U$  - ძაბვის მნიშვნელობაა ქსელის მოცემულ უბანზე, ხოლო  $U_n$  - ელექტროქსელის ნომინალური ძაბვა; ელექტროქსელის სიხშირის ( $f$ ) ხანგრძლივი გადახრა ნომინალური მნიშვნელობიდან ( $f_n$ ) -  $\Delta f = \frac{f-f_n}{f_n} \cdot 100\%$ ;

გარდამავალი რეჟიმის დროს რამდენიმე წამიანი ხანგრძლივობით ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობიდან ხანმოკლე გადახრა; სიხშირის ნომინალური მნიშვნელობიდან ხანმოკლე გადახრა; სამფაზა სისტემაში ძაბვის არასიმეტრიულობის კოეფიციენტი; სინუსოიდური ძაბვის მრუდის ფორმის დამახინჯების კოეფიციენტი; მუდმივი დენის მოხმარებელთა ძაბვის პულსაციის კოეფიციენტი.

გემის ელექტროენერგეტიკული სისტემა არის ავტონომიური სისტემა, რომელიც მოიცავს გენერატორების შეზღუდულ რაოდენობას და დიდი რაოდენობის დატვირთვას. ყოველი კილოვატი ელექტროენერჯის გამომუშავება საჭიროებს 100 მლ-მდე დიზელის საწვავის დახარჯვას, რის შედეგადაც წარმოიქმნება 3-ჯერ მეტი მასის ნახშირორჟანგი  $CO_2$  [1]. ეს პირდაპირ აისახება ემისიების ზრდაზე. აქედან გამომდინარე ყოველი კილოვატი ელექტროენერჯის ეფექტიანი გამოყენება მნიშვნელოვანია, რადგან მსოფლიო ფლოტი მრავალრიცხოვანია და თითოეულ გემზე ელექტროენერჯის წარმოებისათვის მიღებული გამონახოლქვის მოცულობა დიდია.

აღნიშნული პრობლემის მოგვარების ერთ-ერთი გზაა ელექტროენერგეტიკული სისტემების რეჟიმების ოპტიმიზაცია.

### ძირითადი ტექსტი

დღეისათვის ელექტრული ქსელის რეჟიმების ოპტიმიზაციისათვის მიმართავენ აქტიური სიმძლავრით ( $P$ ), ქსელის ძაბვით ( $U$ ), ელექტროქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ( $Q$ ) და მანაწილებელი ქსელის ტრანსფორმატორების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის ( $K$ ) მიხედვით ოპტიმიზაციის მეთოდებს, რომლებიც ერთიანად მოიხსენიება როგორც „კომპლექსური ოპტიმიზაციის რეჟიმი“ [8]. ქსელის მუშა რეჟიმის ოპტიმიზაცია გულისხმობს:

- ქსელში ჩართულ მუშა გენერატორებს შორის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ოპტიმალურ განაწილებას;

- გემის ენერგოქსელში ჩართული მუშა აგრეგატების (ტურბოგენერატორების, ქვაბების,) ოპტიმალურ შერჩევას;

- ელექტროქსელის ძაბვისა და სიხშირის ოპტიმალურ რეგულირებას;

- ელექტრულ სისტემაში სიმძლავრის ოპერატიული რეზერვის ოპტიმიზაციას;

- ელექტროსისტემის სქემის ოპტიმიზაციას.

ელექტროქსელის ოპტიმიზაციის ერთ-ერთი მაჩვენებელია ელექტროენერჯის დანაკარგების მნიშვნელობა. ელექტროენერჯის დანაკარგები ძირითადად გამოწვეულია: აქტიური სიმძლავრის ( $I^2R$ ) დანაკარგებით, ენერჯის ( $I^2Rt$ ) დანაკარგით, კაბელების გახურებით და ძაბვის ვარდნით ( $IR$ ) გამოწვეული დანაკარგებით. ყველა ეს დანაკარგი ძირითადად დამოკიდებულია ქსელში ცირკულირებადი დენის ძალაზე. ასევე, თანამედროვე ელექტროქსელი წარმოუდგენელია ნახევარგამტარული გარდამქმნელებისა და რეგულატორების გარეშე. ეს თავის მხრივ იწვევს სინუსოიდური დენის დამახინჯებას (მაღალი ჰარმონიკების შემცველობის ზრდას), სიმძლავრის კოეფიციენტის შემცირებას, ანუ იზრდება არააქტიური სიმძლავრეები. დღეისათვის არააქტიური სიმძლავრეების კომპენსაციის საკითხის მოგვარების ორ გზას განიხილავენ [2,3]: რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია; დამახინჯების სიმძლავრის კომპენსაცია. რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსატორი (რსკ) და აქტიური ფილტრი (აფ) წარმოადგენს საკომპენსაციო მოწყობილობის საბაზო ელემენტებს.

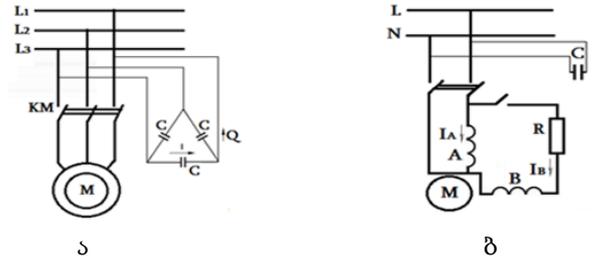
არააქტიური სიმძლავრის კომპენსაციის ტრადიციული მიდგომები ვერ აკმაყოფილებს თანამედროვე მოთხოვნებს დიდი მასა-გაბარიტული მაჩვენებლების, დაბალი მქკ-ის, სიხშირის რეგულირების მცირე დიაპაზონის და სხვა ფაქტორების გამო. ჩვეულებრივ ელექტროენერჯის ხარისხის გასაუმჯობესებლად ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში რომელიმე დანადგარის შეცვლა რიგ სირთულეებთან არის დაკავშირებული. ზოგადად, უპირატესობა ენიჭება საკომპენსაციო მოწყობილობების გამოყენებას, რომელთა განლაგებაც შესაძლებელია ელექტროენერგო-სისტემის ნებისმიერ წრეტილში.

ასევე, გასათვალისწინებელია რომ ზოგადად ელექტროსისტემებში და მათ შორის გემზეც,

ხშირად აქვს ადგილი ასიმეტრიულ დატვირთვებს. ამ შემთხვევებში სტატიკური კონდენსატორული ბატარეების ბაზაზე შესრულებული სამფაზა საკომპენსაციო მოწყობილობის გამოყენება მიუღებელია. რეაქტიული დატვირთვის ასიმეტრიულობიდან გამომდინარე მიზანშეწონილია ცალკეული ფაზებისათვის საკომპენსაციო სიმძლავრის ინდივიდუალურად განისაზღვრა [4].

გემის ელექტროენერგოსისტემებში, სადაც მოქმედებაშია ლილვგენერატორები რეაქტიული სიმძლავრეების საკომპენსაციოდ იყენებენ სინქრონულ კომპენსატორებს. სინქრონული კომპენსატორი არის სინქრონული ძრავა, რომელზეც არ არის მოდებული დატვირთვა და მიერთებულია ელექტრომომარაგების სისტემასთან პარალელურად. სინქრონული გენერატორების მსგავსად მათი რეაქტიული სიმძლავრე რეგულირდება ძაბვის ავტონომიურ რეგულატორთან დაკავშირებული ამგზნებით, რომლითაც რეგულირდება როტორის გრაგნილის აგზნების დენი. ამ შემთხვევაში კომპენსატორი მოქმედებს როგორც რეაქტიული ენერჯის წყარო ან როგორც ინდუქტორი, რომელიც შთანთქავს რეაქტიულ სიმძლავრეს [5].

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის ყველა მეთოდთან შედარებით საუკეთესო საშუალებად ითვლება რეაქტიული სიმძლავრის სწორი გადანაწილება ელექტროქსელში [6]. ელექტროქსელის დიდი დატვირთვების რეჟიმში რეაქტიული სიმძლავრის გადანაწილებისას მოსალოდნელი ცვლილებები უმნიშვნელოა. მცირე დატვირთვების შემთხვევაში მნიშვნელოვანი ეფექტი არ მიიღება. ეს აიხსნება შემდეგი გარემოებებით: დიდი დატვირთვების შემთხვევაში რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვი შედარებით მცირეა; რეაქტიული სიმძლავრის ქსელში გადაცემა დაკავშირებულია ძაბვის დანაკარგის ზრდასთან. გარდა აღნიშნულისა რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა უკავშირდება აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების დანაკარგების ზრდას. ამიტომ რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემის ამოცანა არსებითად დაიყვანება მომხმარებლებთან უახლოესი საკომპენსაციო მოწყობილობის გამოყენებაზე, რის შედეგადაც გადამცემი ხაზები დაცული იქნება გადატვირთვისაგან [7].



ნახ. 1.

ა – სამფაზა ძრავა რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო კონდენსატორული ბატარეით;  
 ბ – ერთფაზა ძრავა რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო კონდენსატორული ბატარეით

პრობლემის შესწავლის მიზნით ჩატარებულია ცდებმა ცხადყო კონდენსატორული ბატარეის სწორად შერჩევის მნიშვნელობა [9]. აუცილებელია ის შერჩეული იყოს ინდივიდუალურად ყოველი ინდუქციური დატვირთვისათვის.

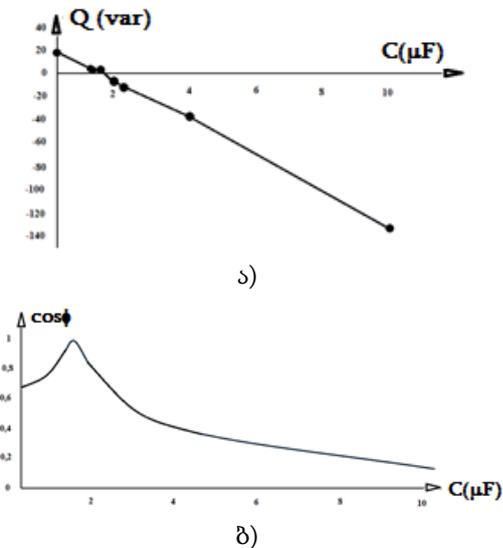
კონკრეტულად, თუ სამკუთხედად ჩართულ სამ 10 მკვ ტევადობის კონდენსატორს პარალელურად მივაერთებთ 3 ფაზა ძრავასთან, რეაქტიული სიმძლავრე გაიზარდება და სიმძლავრის კოეფიციენტი მცირდება – ნომინალური დატვირთვის დროს ( $M=1,57Nm$ ) 0,77–დან 0,37–მდე. იმავე ძრავასთან 2 მკვ ტევადობის კონდენსატორების მიერთების შემთხვევაში მნიშვნელოვნად შემცირდა რეაქტიული სიმძლავრე, ხოლო სიმძლავრის კოეფიციენტი მაქსიმალურად გაიზარდა – ნომინალური დატვირთვის დროს ( $M=1,57Nm$ ) 0,77–დან 0,86–მდე. შემცირდა ქსელში ცირკულირებადი დენის ძალის მნიშვნელობაც 087A–დან 0,66A–მდე. ასევე ეფექტურია ერთფაზა ძრავასთან კონდენსატორული ბატარეის ჩართვა, სიმძლავრის კოეფიციენტი გაიზარდა 0,68–დან 0,86–მდე, დენის ძალა შემცირდა 0,12A–დან 0,1A–მდე [9].

გემის საყოფაცხოვრებო სექტორსა და კამბუზში მრავლად არის მცირე სიმძლავრის ერთფაზა ძრავებიანი ხელსაწყოები. მათი რეაქტიული სიმძლავრეების კომპენსირება ასევე შესაძლებელია კონდენსატორების გამოყენებით. ცხრილში მოცემულია ქსელის პარამეტრების ცვლილებები სხვადასხვა ტევადობის კონდენსატორის ძრავასთან პარალელურად მიერთებისას. გრაფიკზე 1 ნაჩვენებია რეაქტიული სიმძლავრისა და სიმძლავრის კოეფიციენტის დამოიდებულება კონდენსატორის ტევადობაზე.

ცხრილი

N	P	Q	S	C	cosφ
	W	VAR	VA	μF	
1	18	18	27	-	0,67
2	18	4	20	1	0,9
3	18	3	19,5	1,07	0,92
4	18	2,69	18,2	1,3	0,989
5	17	- 7	21	1,7	0,81
6	18	- 12	24	2	0,73
7	18	- 38	48	4	0,39
8	19	-135	153	10	0,13

მცირე სიმძლავრის ინდუქციური მომხმარებლების შემთხვევაში მიზანშეწონილი იქნება სათანადო ტევადობის კონდენსატორული ბატარეის შესაბამის მანაწილებელ ფარში დამონტაჟება.



ნახ. 2.

ა – რეაქტიული სიმძლავრის კონდენსატორის ტევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი;  
 ბ – სიმძლავრის კოეფიციენტის კონდენსატორის ტევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი

რეაქტიული სიმძლავრის (Q) ოპტიმალური განაწილება, ტექნიკური შეზღუდვების გათვალისწინების გარეშე, შესაძლებელია გაანგარიშებული იქნეს ფარდობითი ნაზრდის მეთოდით ანუ ლაგრანჟის მეთოდით [8]. დავუშვათ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია არ არის დაკავშირებული რაიმე ხარჯებთან.

მაშინ რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილების ერთადერთი მიზანი უნდა იყოს აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება. დავუშვათ, აქტიური სიმძლავრეები მოცემულია და უცვლელია. ასეთი დაშვება მიახლოებითია, რადგანაც ქსელში დანაკარგების ცვლილება გამოწვეულია ელექტროსადგურში აქტიური სიმძლავრის ცვლილებით. აღნიშნული დაშვებიდან გამომდინარე დანაკარგები დამოკიდებული იქნება Q რეაქტიულ სიმძლავრეზე.

ნებისმიერი ელექტრული ქსელის სწორად დაპროექტების შემთხვევაში დაცული უნდა იქნეს სრული სიმძლავრეების ბალანსი ნომინალური რეჟიმის შენარჩუნების პირობების შესრულების შემთხვევაში.

ამასთან, აუცილებელია რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის უზრუნველყოფა როგორც მთლიანად სისტემისათვის, ასევე მკვებავი ქსელის ცალკეული კვანძებისათვის მათში საჭირო რაოდენობის რეაქტიული სიმძლავრის არსებობის შემთხვევაში.

რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი გემის ელექტრული ქსელის ცალკეული დამახასიათებელი რეჟიმისთვის უნდა იქნეს გათვალისწინებული. ეს რეჟიმებია:

1. უდიდესი რეაქტიული დატვირთვის რეჟიმი (რეაქტიული სიმძლავრის უდიდესი მოხმარებისა და მაკომპენსირებელი დანადგარების აუცილებელი სიმძლავრის შემთხვევაში), გემზე ასეთია მანევრირების და სატვირთო ოპერაციების რეჟიმი;

2. უდიდესი აქტიური დატვირთვის რეჟიმი, რომელიც გენერატორების აქტიური სიმძლავრით მაქსიმალურ დატვირთვასთანაა დაკავშირებული მათი მინიმალური რეაქტიული სიმძლავრის შემთხვევაში. გემზე ეს ხდება განათების ქსელსა და კამბუზის ელექტრომომარაგების ქსელში;

3. უმცირესი აქტიური დატვირთვის რეჟიმი, რომელიც გენერატორების ნაწილის ამორთვასთან და სათანადოდ, მათ მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერირების შეუძლებლობასთანაა დაკავშირებული. ასეთ შემთხვევას ადგილი ექნება გემის პორტში ნაპირთან დგომის დროს;

4. ავარიისშემდგომი და სარემონტო რეჟიმები, რომელიც ქსელში გადაცემული რეაქტიული სიმძლავრის მაქსიმალურ შეზღუდვასთანაა დაკავშირებული.



3. Sergiy Dudko "Digital control by the discrete systems of reactive power compensation in ship electrical power plants", 4th International Scientific Conference SEA-CONF 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **172** (2018) 012011 doi :10.1088/1755-1315/172/1/012011;
4. ბ. ჭუნაშვილი, ა. პეტროსიანი, მ. ტუღუში, ა. გვიმრაძე "არასიმეტრიული რეაქტიული დატვირთვის მქონე ელექტრომომხმარებლების რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გამოკვლევების შედეგები", "ენერჯია" 4(80) 2016, ISSN 1512-0120;  
B. Chunashvili, A. Petrosyan, M. Tugushi, A. Gvimradze "Results of Reactive Load Compensation Investigations of Electricity Users with Asymmetric Reactive Load", "Energy" 4 (80) 2016, ISSN 1512-0120;
5. JM Prousalidis, E Xanthopoulos and K Voutzoulidis „Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators“, Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science, and Technology. Part A, Journal of marine engineering and technology · January 2009, DOI: 10.1080/20464177.2009.11 02 0216;
6. J M Prousalidis (2011) "The necessity of reactive power balance in ship electric energy systems", Journal of Marine Engineering & Technology, 10:1, 37-47, DOI:10.1080/20464177.2011.11020242;
7. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში. ენერჯია, 4(16). 2000;  
Makharadze G., Kikalishvili M. Optimal compensation of reactive load in main and radial electrical networks. Energy, 4 (16). 2000;
8. В.И. Идельчик, «Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем», Энергоатомиздат 1988г. ISBN 5-283-01103-8.  
V.I. Idelchik, "Calculation and optimization of the modes of electrical networks and systems", Energoatomizdat 1988. ISBN 5-283-01103-8.
9. M. Tugushi, Kakha Karanadze Gocha Gogitidze, Firuza Varshanidze, Madona Loria "Optimization of ship electrical power system modes according to reactive power", Proceedings of The International Association of Maritime Universities (IAMU) conference 2022, ISSN: 2706-6754 (Print), ISSN: 2706-6762 (online)

## სს „თელასის“ გამანაწილებელი ქსელისათვის ელექტროენერჯის ტექნიკური დანაკარგების სტრუქტურის ფორმირება და მისი ანალიზი

ირაკლი შაველაშვილი, აკადემ. დოქტორი, წამყვანი ინჟინერი

სს „თელასი“, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [irakli.shavelashvili@telasi.ge](mailto:irakli.shavelashvili@telasi.ge)

გივი შაველაშვილი, ტექნ მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [givi.shavelashvili@gtu.ge](mailto:givi.shavelashvili@gtu.ge)

დავით ტურძელაძე, ტექნ მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [turdzeladze59@gmail.com](mailto:turdzeladze59@gmail.com)

ნინო გოგინაშვილი, ტექნ მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [ninogoginashvili@mail.ru](mailto:ninogoginashvili@mail.ru)

**ანოტაცია.** განხილულია 2016-2018 წლებში შემუშავებული თელასის ელექტროენერჯის შემოდინების, სასარგებლო გაცემის და ძაბვების საფეხურების მიხედვით ელექტროენერჯის დანაკარგების სტრუქტურა, შერჩეული სათანადო რტპ-3 პროგრამული კომპლექსის გამოყენებით მიღებული ტექნიკური დანაკარგების სტრუქტურა (შესაბამისი ცხრილები და ანალიზები). და წარმოდგენილია სათანადო დასკვნები.

**საკვანძო სიტყვები:** ტექნიკური დანაკარგები, სტრუქტურა, მეთოდისა, პროგრამა, რეკომენდაცია.

### Structure of electricity losses for JSC "Telasi" distribution to form and analysis

**Irakli Shavelashvili**, PhD, Lead engineer

JSC "Telasi", Tbilisi, Georgia; E-mail: [irakli.shavelashvili@telasi.ge](mailto:irakli.shavelashvili@telasi.ge)

**Givi Shavelashvili**, Candidate of Technical Sciences, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [givi.shavelashvili@gtu.ge](mailto:givi.shavelashvili@gtu.ge)

**David Turdzeladze**, Candidate of Technical Sciences, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [turdzeladze59@gmail.com](mailto:turdzeladze59@gmail.com)

**Nino Goginashvili**, Candidate of Technical Sciences, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [ninogoginashvili@mail.ru](mailto:ninogoginashvili@mail.ru)

**Annotation.** In this proceeding is reviewed JSC Telasi useful electric power delivery, inflow according to given voltage levels loss structure, extracted with RTP-3 software. The corresponding tables and analysis, relevant conclusions are outcome,

**Keywords:** technical loss, structure, method, software, recommendations.

### შესავალი

ყველა ქვეყანაში ელექტროენერჯის დანაკარგები წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას, განსაკუთრებით კი ეს პრობლემა მწვავედ დგას ახალი დამოუკიდებელი სახელმწიფოების ქვეყნებში. ელექტრულ ქსელში ელექტრული დანაკარგები ჩვეულებრივი მოვლენაა. როგორც წესი, ეს მოვლენა მნიშვნელოვანი ხდება ძაბვის დაწვევისას იმ დონემდე, რომელიც მისაღებია მომხმარებლისათვის, ან ქსელში ენერჯის ტრანსპორტირებისას.

ამრიგა, დანაკარგები ელექტრულ ქსელში უფრო მნიშვნელოვანია მომხმარებლებისათვის დაბალი სიდიდის ძაბვით ელექტროენერჯის მიწოდებისას (ეს არის ერთ-ერთი მიზეზი იმისა, რის გამოც მცირე რაოდენობის ელენერჯის მომ-

ხმარებლებისათვის უნდა დგინდებოდეს უფრო მაღალი ტარიფები, ვიდრე ელ.ენერჯის დიდი მოცულობის მომხმარებლებისათვის).

რაც უფრო მეტია დაუტვირთავი ტრანსფორმატორები, მველია საჰაერო და საკაბელო ხაზები მაშინ, მით მეტია ელექტრულ ქსელში დანაკარგები, ამიტომ შესაბამისმა ორგანოებმა ეს დანაკარგები უნდა გაითვალისწინონ ენერჯომომარაგების წესის განსაზღვრისას (ტარიფების დადგენისას).

დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ელექტროენერჯის დანაკარგების სრულფასოვნად და სწორად დათვლას. სრულყოფილი მეთოდის და პროგრამის შემუშავებას და შეთანხმებას (დამტკიცებას) მარეგულირებელ ორგანოებთან [2].

ნორმატიული დანაკარგების მეთოდოლოგია ჯერ-ჯერობით არ არის საბოლოოდ ჩამოყალიბებული. მისი ჩამოყალიბების პრინციპებიც კი არ არის ნორმირებული.

ელექტროენერჯის დანაკარგების ანალიზის ანგარიშის მეთოდის შემუშავება და მისი შემცირებისათვის ეკონომიკურად დასაბუთებული ღონისძიებების შემუშავება წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან და აუცილებელ საკითხს. აღნიშნული მიმართულებით 30 წელზე მეტია მუშაობს სხვადასხვა ორგანიზაციები და ინსტიტუტები [3]. თუმცა საბოლოო გადაწყვეტილებები ჯერ მიღწეული არ არის.

ენერგომომარაგებელმა ორგანიზაციებმა უნდა დაასაბუთონ ელექტროენერჯის დანაკარგების დონე, რომელსაც ისინი თვლიან მიზანშეწონილად რათა ჩართული იყოს შესყიდვის ტარიფში. ენერგეტიკული კომისიები ახდენენ წარდგენილი დასაბუთებების ანალიზს, ახდენენ (საჭიროების შემთხვევაში) მის კორექტირებას და ჩართვას შესყიდვის ტარიფში. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ელექტროენერჯის დანაკარგების სრულფასოვნად და სწორად დათვლას [2].

### სამუშაოს მიზანი

მეტად მნიშვნელოვანი და საგრძნობია ელექტროენერჯის უქმი სვლის და დატვირთვის დანაკარგები დამკვლევებელი მოწყობილობებში (ტრანსფორმატორებში, რეაქტორებში, დამკვლევებელ საჰაერო ხაზებში და მიწის ქვეშა საკაბელო ხაზებში).

ასეთი უზნებისათვის უნდა მოხდეს ელექტროენერჯის დანაკარგების ანალიზის ანგარიშის მეთოდის შემუშავება და მისი შემცირებისათვის ეკონომიკურად დასაბუთებული ღონისძიებების შემუშავება. აღნიშნული მიმართულებით დღეისათვის [6] საბოლოო გადაწყვეტილებები ჯერ მიღწეული არ არის. საჭიროა შემუშავდეს მეთოდიკა და დადგინდეს რეალური დანაკარგები.

ამდენად სამუშაოს ძირითად მიზანს შეადგენს ასეთი შემთხვევისათვის ელექტროენერჯის ტექნიკური დანაკარგების ანალიზი, კვლევა, დანაკარგების ანგარიშის მეთოდის და პროგრამული კომპლქსის შერჩევა და რეალიზება სს „თელასის“ ქსელისათვის.

სს „თელასის“ გამანაწილებელი ქსელისათვის ელექტროენერჯის დანაკარგების სტრუქტურის ფორმირება და მისი ანალიზი

ჩვენს მოერ 2016-2018 წლებში პირველად შემუშავებული იქნა სს „თელასი“-ს ქსელისათვის ელექტროენერჯის შემოდინების, სასარგებლო გაცემის და დანაკარგების [3] სტრუქტურა, რომელიც დაიხვეწა და სრულყოფილად წარმოდგენილია სურ. 1-ზე, საიდანაც ნათლად ჩანს სრული ტექნოლოგიური პროცესი [3].

ტექნიკური დანაკარგების ანგარიშის ერთ-ერთ აუცილებელ ამოცანად ითვლება ელექტროენერჯის ზუსტი კონტროლი და აღრიცხვა შესყიდვისა და განაწილების დროს.

ქსელში გვაქვს მუდმივი და ცვალებადი კარგვები. ცვალებადი კარგვები დამოკიდებულია დამოკიდებულია ელემენტის დატვირთვაზე (იგი შეიცავს დატვირთვის კარგვებს გადამცემ საჰაერო ხაზებში, კაბელებში, ძალოვან ტრ-რებში; ავტოტრანსფორმატორებში; დენშემზღვრავ რეაქტორებში; დენის ტრ-რებში; შემაერთებელ გამტარებში; ქვესადგურის გამანაწილებელი მოწყობილობების სალტებში და სხვ.).

მუდმივი კარგვები - ეს არის კარგვები, რომლებიც უმნიშვნელოდ იცვლება ელექტრული ქსელის ელემენტებში დატვირთვის ცვლილებისას და შეიძლება ეს ცვლილება უგულველყოთ. მათ მიეკუთვნება კარგვები: ძალოვან ტრანსფორმატორებში და ავტოტრანსფორმატორებში; მაკომპენსირებელ მოწყობილობებში; ელექტროენერჯის აღრიცხვის სისტემების მოწყობილობებში; ვენტილურ მცველებში; გადაძაბვის შემზღვრველებში. დანაკარგები გათვალისწინებულია ამინდის პირობებით: დანაკარგები გვირგვინზე 110 კვ საჰაერო ელექტროგადამცემ ხაზებში.

პირობითად მუდმივი კარგვები

1. კარგვები ძალოვან ტრანსფორმატორებში: ძალოვან ტრანსფორმატორებში და ავტოტრანსფორმატორებში კარგვები განისაზღვრება ცნობილი საპასპორტო მონაცემების საფუძველზე. ტრ-რის სიმძლავრის უქმი სვლის კარგვები გამოითვლება ფორმულით:

$$\Delta W_x = \Delta P_x \sum_{i=1}^m \Delta T_i \left( \frac{U_i}{U_{60\text{მვ}}} \right)^2 * 10^{-3} \text{ [კვტ]} \quad (1)$$

$U_i$  - ძაბვა ტრანსფორმატორის შემყვანებზე  $i$ -ს რეჟიმში.

2. გამანაწილებელი მოწყობილობების შემკრებ სალტებზე და შემაერთებელ გამტარებში კარგვები განისაზღვრება გამტარების კვეთების და სიგრძეების მიხედვით მათი დენური დატვირთვის შესაბამისად. მათი

შეფასება მოხერხებულია და ხდებდა გასაშუალებული მონაცემებით და ანგარიშებში აიღება პირობითად-მუდმივი კარგვები.

ელექტროენერჯის დანაკარგები ფიდერების მიხედვით განისაზღვრება მთავარი აღრიცხვის უბანზე გატარებული ელექტროენერჯის მოცულობის მიხედვით [6]:

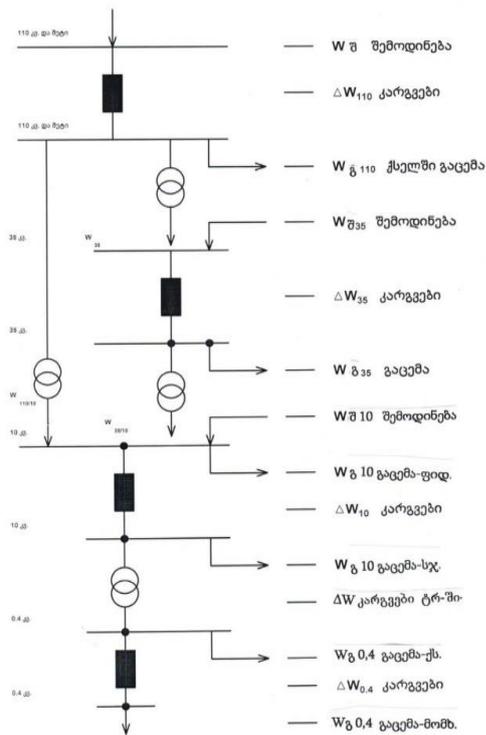
$$\Delta W = (W_2 \cdot K_2 + W_2 \cdot K_2 \cdot R) \cdot R / U^2 T, \quad (2)$$

სადაც  $W_2$  - აქტიური ელექტროენერჯა;

$R$  - რეაქტიული ელექტროენერჯა;

$R$  - ქსელის გახსნილი უბნის ექვივალენტური წინაღობა, რომელიც შედგება ეგზ-სა და ტრანსფორმატორებისაგან.

სს „თელასის“ ქსელისათვის ელექტროენერჯის დანაკარგების ანგარიში და ანალიზი ამ შემთხვევისათვის უნდა მოხდესა (1) და (2) გამოსახულებისა და რტპ-3 პროგრამული კომპლექსის მიხედვით.



სურ. 1. თელასის ელექტროენერჯის შემოდინების, სასარგებლო გაცემის და ძაბვების საფეხურების მიხედვით დანაკარგების სტრუქტურა

საშუალო დატვირთვის მეთოდით ანგარიში მოხდა გამოსახულების მიხედვით:

$$\Delta W_{Hj} = k_{\pi} k_K \Delta P_{cp} T_j k_{\phi}^2 \quad \text{კვტ.სთ} \quad (3)$$

სადაც  $\Delta P_{cp}$  - კვანძებში დატვირთვის საანგარიშო ინტერვალისათვის ქსელში საშუალო სიმძლავრის კარგვები, კვტ;

$k_{\phi}^2$  - ქსელის ჯამური დატვირთვის საანგარიშო ინტერვალისათვის, ძირითადი ელემენტის, გრაფიკის ფორმის კოეფიციენტის კვადრატი;

$k_K$  - ქსელის განსხვავებული შტოების აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტი, რომელიც მხედველობაში ღებულობს გრაფიკების კონფიგურაციის განსხვავებას, აიღება ძირითადი ელემენტის 0,99 -ის ტოლი;

$T_j$  - j-რი საანგარიშო ინტერვალის ხანგრძლივობა სთ.

ქსელის ჯამური დატვირთვის გრაფიკის ფორმის კოეფიციენტი საანგარიშო ინტერვალისათვის განისაზღვრება ფორმულით:

$$k_{\phi}^2 = \sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i / (P_{cp}^2 T) \quad (4)$$

, დ.ე.

სადაც  $P_i$  - i-ურ საფეხურზე დატვირთვის მნიშვნელობა ხანგრძლივობით  $\Delta t_i$ , კვტ;

$m$  - საანგარიშო ინტერვალში გრაფიკის საფეხურების რიცხვი;

$P_{cp}$  - საანგარიშო ინტერვალში ქსელის საშუალო დატვირთვა, კვტ.

6-20 კვ ქსელისათვის და 35 კვ რადიალური ხაზებისათვის მნიშვნელობების ნაცვლად  $P_i$  და  $P_{cp}$  ფორმულაში (2) შეიძლება გამოყენებული იქნას მთავარი უბნის დენის მნიშვნელობა  $I_i$  და  $I_{cp}$  ამ შემთხვევაში კოეფიციენტი  $k_K$  ფორმულაში (1) აიღება ტოლი 1,02. დატვირთვის გრაფიკის არ

არსებობის შემთხვევაში მნიშვნელობა  $k_{\phi}^2$  განისაზღვრება ფორმულით:

დანაკარგების ანალიზის საბოლოო მიზანია გამოვლენილი იქნას ქსელის კონკრეტული ელემენტები, სადაც მნიშვნელოვნად მომატებულია ტექნიკური კარგვები, რათა მოხდეს მათი შემცირება.

ზემოთ აღნიშნულის რეალიზებისათვის სრული ანალიზის შემდეგ, ჩვენს მიერ შერჩეული იქნა რტპ-3 პროგრამული მისი გამოყენებით შესაძლებელია დასახული მიზნის რეალიზება [5].

ელექტროენერჯის დანაკარგები ფიდერების მიხედვით განისაზღვრება [4] მთავარი

აღრიცხვის უზანზღე გატარებული ელექტრო-ენერჯის მოცულობის მიხედვით:

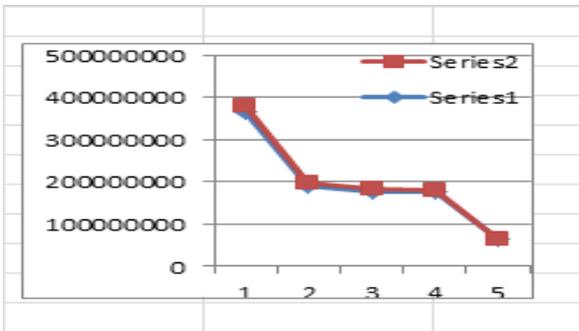
$$\Delta W = (W_2a * K_2ფა + W_2რ * K_2ფრ) * R_გ / U^2 T$$

სადაც  $W_a$  - აქტიური ელექტროენერჯია;

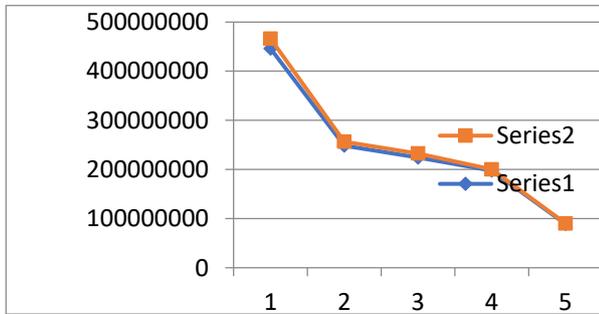
$W_r$  - რეაქტიური ელექტროენერჯია;

$R_გ$  - ქსელის გახსნილი უბნის ექვივალენტური წინაღობა, რომელიც შედგება ეგზ-სა და ტრანსფორმატორებისაგან.

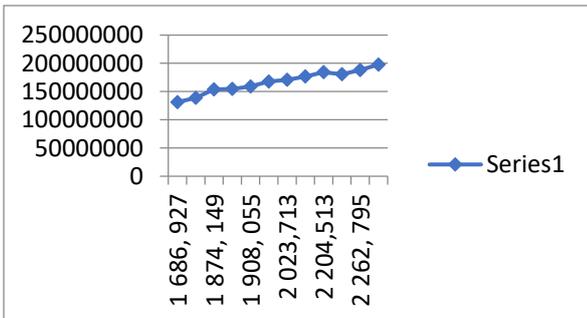
სს „თელასის“ ქსელისათვის ელექტრო-ენერჯის დანაკარგების ანგარიში და ანალიზი მოხდა PTH-3 პროგრამული კომპლექსის მიხედვით. პრაქტიკულად გაანგარიშებულია და მიღებული დანაკარგების სტრუქტურა 2017-2022 წწ.



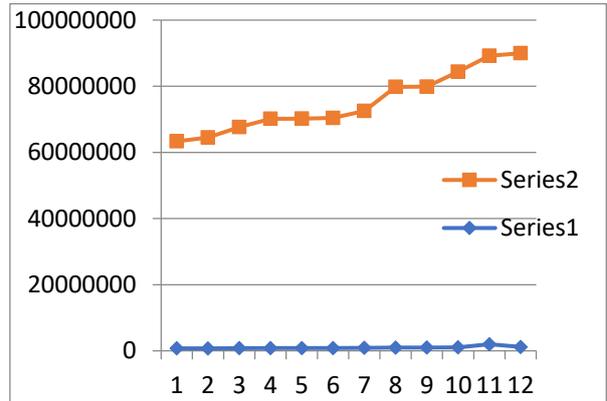
სურ. 2. 2017 წლის დეკემბერი. ტექნიკური დანაკარგები %-ში



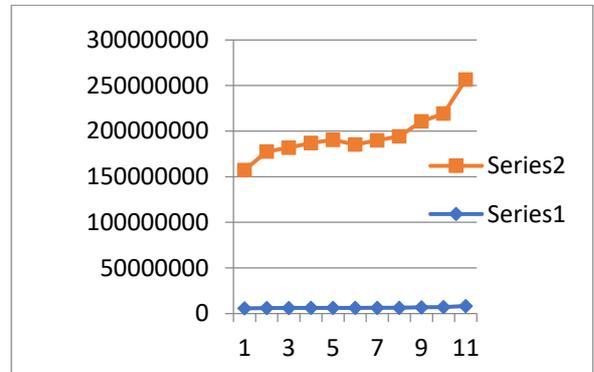
სურ. 3. 2022 წლის დეკემბერი. ტექნიკური დანაკარგები %-ში



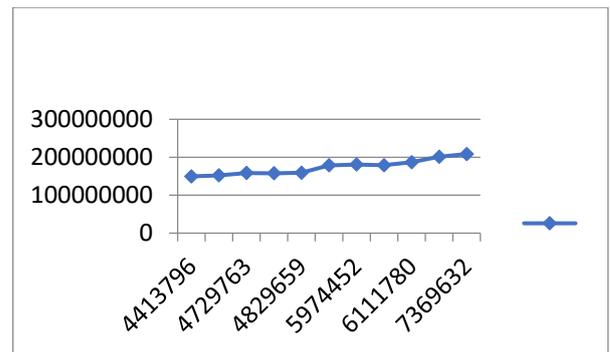
სურ. 4. 110კვ. 2022 წელი (12 თვე). ტექნიკური დანაკარგები



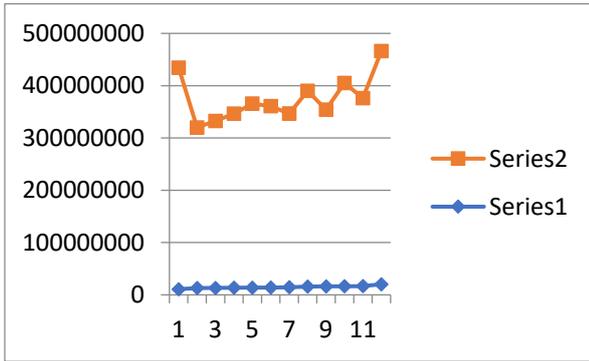
სურ. 5. 35კვ. 2022 წელი (12 თვე). ტექნიკური



სურ. 6. 6-10 კვ 2022 წელი (12თვე). ტექნიკური დანაკარგები



სურ. 7. 0,4 კვ 2022 წელი (12თვე). ტექნიკური დანაკარგები



სურ. 8. ამური ჯამური 2022 წელი. ტექნიკური დანაკარგები

2017 და 2022 წლის დანაკარგების სტრუქტურის ანალიზმა (სურ. 2. და 3) და მათმა შედარებამ დაგვანახა, რომ 2022 წ. მდგომარეობით გაზრდილია საერთო მოხმარებული ელექტროენერგია და დანაკარგები. გამოიკვეთა, რომ ტექნიკური დანაკარგები 2022 წლისთვის მომატებულია 0,5-0,8%-ით. ამის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად შეიძლება ჩაითვალოს ის, რომ მნიშვნელოვნად გაიზარდა ქსელი. დამონტაჟდა ახალი ძალოვანი ტრანსფორმატორები, რომლებიც არა არის სრულყოფილად დატვირთული. ამსთან დანაკარგების ვარდნა 1,3-1,4%-იან ზონაში (სურ. 2 და 3) ვარდნა შესასწავლია. დანაკარგები 110 კვ ძაბვაზე მეტ ნაკლებად სწორადაა აღრიცხული, თუმცა გადასამოწმებელია 10 თვის შედეგები. დანაკარგები 35კვ ძაბვაზე (სურ. 5) გვიჩვენებს, რომ **6,7,9** თვის მაჩვენებლები არ ჯდება კანონზომიერებაში და ანგარიშები გადასამოწმებელია. დანაკარგები 6-10კვ ძაბვაზე (სურ. 6) 6,7,8,9,10 თვის მაჩვენებლები გადასამოწმებელია. ჯამურ დანაკარგებში (სურ. 8) **6,8,10** თვეების შედეგები გადასამოწმებელია.

### დასკვნები

1. ელექტროენერჯის ფაქტიური და ტექნიკური დანაკარგების დონის ანალიზისათვის რეკომენდირებულია ელექტროენერჯის ტექნიკური დანაკარგების ანგარიში რტკ-3 პროგრამის გამოყენებით ჩატარდეს საანგარიშო პერიოდისათვის-თვე.

2. იმ უზნებზე სადაც დამონტაჟებულია ძველი გამოშვების (დამველებული) ელექტრო-ტექნიკური დანადგარები (ძირითადად ტრანსფორმატორები, რეაქტორები და სხვა)

უნდა მოხდეს შესაბამისი გაზომვები (მ.შ და უქმი სვლის დანაკარგების) და მიღებული შედეგების მიხედვით მოხდეს საბაზისო მონაცემების შესწორება.

3. პროგრამის გამოყენებით გამოვლენილი იქნეს ქსელის კონკრეტული ელემენტები (ტრანსფორმატორები, კაბელები, ხაზები) სადც მნიშვნელოვნად მომატებულია ტექნიკური დანაკარგები და გატარდეს შესაბამისი ონისპიებები მათი შემცირებისათვის.

ყურადღება მიექცეს, რათა ახლად დამონტაჟებული ტრანსფორმატორების დატვირთვები მიყვანილი იქნას ოპტიმალურ მნიშვნელობამდე.

### 4. დაბალი ძაბვის ქსელებში;

- შერჩეული ლოკალური უბნისათვის, ჩატარდეს ძაბვის დანაკარგების გაზომვა და შეჯერდეს (შედარდეს) იგი საანგარიშო მონაცემების მნიშვნელობებთან.

5. სასურველია ყოველ 6 თვეში ერთხელ მოხდეს ფორმირებული დანაკარგების სტრუქტურის ანალიზი და მოხდეს გამოვლენილი უზუსტობების, (გადარხრები რეალურ ტექნიურ დანაკარგებიდან, სუბიექტური ფაქტორები ან პროგრამაში არასწორად შეტანილი ინფორმაცია) აღმოფხვრა.

### ლიტერატურა

1. საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალ-მომარაგების მარეგულირებელი კომისიის დადგენილებები. დადგენილება #24. 18.10. 2008.
2. ირაკლი შაველაშვილი, გივი შაველაშვილი. სს თელასის ელექტროენერჯის დანაკარგების სტრუქტურის შედგენა/ ენერჯია. 2(86). 2018. თბილისი. 11 გვ.
3. ირაკლი შაველაშვილი, გივი შაველაშვილი. ელექტროენერჯის ტექნიკური დანაკარგების ანგარიში სს“თელასის“ ქსელისათვის/ ენერჯია. #4(92). 2019. თბილისი. 5 გვ.

4. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. М;Энергоатомиздат. 1989.
5. Воротницкий В.Э., Заслонов С.В., Калинкина М.А. Программа расчета технических потерь мощности и электроэнергии в распределительных сетях 6-18кВ. Электрические станции. №8. 1999.
3. Irakli Shavelasvili, Givi Shaveliashvili. „Eleqtroenergiis teqnikuri danakargebis angrishi SS“tealasis qselisatvis“. Tbilisi. jurnali „energia“ #4(92).2019, 5 gverdi.
4. Jelezko U.S. Vibor meropriatii po snieniu poter elektroenergii v elektricheskix setiax. M; Elektpoatomizdat, 1989.
5. Vorotnickii V.E., ZaslonoV S.V., Kalinkina M.A. «Programma rascheta texnicheskix poter moshnosti i elektroenergii v raspredelitelnix cetiax 6-10kV». Elektricheskije stancii , №8, 1999.

#### **Rtfereces (Transliterated)**

1. Saqartvelos energetikisa da wyalmomaragebis maregulirebeli komisiis dadgenilebebi. Dadgenileba #24. 18.10.2008.
2. Irakli Shavelasvili, Givi Shavelasvili. „SS telasis eleqtroenergiis danakargebis struqturis shedgena“. Tbilisi. jurnali “energia“ 2(86). 2018. 11 gverdi.

## ნეიტრალის რეზისტორული დამიწების ეფექტურობის ანალიზი 6-10კვ ქსელში და მისი გაზრდის ღონისძიებების დამუშავება

**მალხაზ ქვრივიშვილი**, აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, სს „თელასის“ საწარმო-ტექნიკური სამსახურის წამყვანი ინჟინერი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge](mailto:malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge)  
**გივი შაველაშვილი**, ტექნიკურ მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [givi.shavelashvili@telasi.ge](mailto:givi.shavelashvili@telasi.ge)  
**ნიკოლოზ ლაშკაური**, აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, სს „თელასის“ საწარმო-ტექნიკური სამსახურის წამყვანი ინჟინერი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [nukri.lashskauri@telasi.ge](mailto:nukri.lashskauri@telasi.ge)  
**ნიკოლოზ ქვრივიშვილი**, აკადემიური დოქტორი. ტელემექანიკის და ავტომატური სისტემების მიმართულების წამყვანი ინჟინერი, სს „თელასი“, E-mail: [n.kvrivishvili@telasi.ge](mailto:n.kvrivishvili@telasi.ge)

**ანოტაცია:** 6-10 კვ ელექტრული გამანაწილებელი ქსელის მუშაობასთან დაკავშირებული მთავარი პრობლემა არის ელექტრომომხმარებლის საიმედო და უწყვეტი მუშაობა მის ნორმალურ და გარდამავალ რეჟიმებში. ერთ-ერთი მთავარი მიზეზი, რომელიც ხელს უშლის ამ მიზნის სტაბილურ შესრულებას, არის ერთფაზიანი მოკლე ჩართვა და მასთან დაკავშირებული პრობლემები, რომლებიც იწვევს ელექტროენერჯის დაუგეგმავ გათიშვას და ზიანს აყენებს ძირითად ელექტრომოწყობილობას.

ქსელში გრძელდება ნეიტრალური რეჟიმების მოდერნიზაცია და სარელეო დაცვის მოწყობილობების სრულყოფა. ქსელის გარკვეული ნაწილი გადადის ნეიტრალის რეზისტორული დამიწების რეჟიმზე, რაც საშუალებას მოგვცემს შევამციროთ გადაძაბვის დონეები და მასთან დაკავშირებული დაზიანებები საგანგებო გარდამავალ რეჟიმებში, ერთის მხრივ, ხოლო მეორეს მხრივ, გაზარდოთ დაცვების სელექტივობა, მგრძობელობა და სწრაფმოქმედება. სამუშაოების გასაგრძელებლად და სწორი გადაწყვეტილებების მისაღებად აუცილებელია მიღებული ნეიტრალის რეჟიმების ეფექტურობის შეფასება. დამუშავებულია ნეიტრალის რეზისტორული დამიწების ეფექტურობის შეფასების მეთოდოლოგია, შეფასებულია ეფექტივობა.

**საკვანძო სიტყვები:** ნეიტრალური, დამიწება, წინააღმდეგობის დამიწება, დამიწების ხარვეზი, ელექტროგამანაწილებელი ქსელი

### Analysis of the effectiveness of neutral resistive grounding in the network 6-10 kV and elaboration of measures to raise it

**Malkhaz Kvrivishvili**, PhD, Leading engineer of Production and Technical Service of JSC “Telasi”, Tbilisi, Georgia, E-mail: [malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge](mailto:malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge)

**Givi Shavelashvili**, Candidate of technical sciences, Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [givi.shavelashvili@telasi.ge](mailto:givi.shavelashvili@telasi.ge)

**Nikoloz Lashkhauri**, PhD, Leading engineer of Production and Technical Service of JSC “Telasi”, Tbilisi, Georgia, E-mail: [nukri.lashskauri@telasi.ge](mailto:nukri.lashskauri@telasi.ge)

**Nikoloz Kvrivishvili**, PhD, Leading engineer of telemechanics and automatic sistem direction JSC “Telasi”, E-mail: [n.kvrivishvili@telasi.ge](mailto:n.kvrivishvili@telasi.ge)

**Annotation.** The main problem related to the operation of the 6-10kV electrical distribution network is the reliable and uninterrupted operation of the electrical user in its normal operational and emergency transient modes.

One of the main reasons that prevent the stable performance of this goal is single-phase short-circuits and related concerns that cause unplanned power outages and damage to major power equipment. In the network, works are carried out and continue on a serious scale in connection with the modernization of the neutral modes of the network and the improvement of the operation of the relay protection devices. A certain part of the network is transferred to the resistive grounding mode of the neutral, which should allow us to reduce the overvoltage levels and related injuries in emergency transient modes on the one hand, and on the other hand to increase the selectivity, sensitivity and quick action of electrical relay protections. In order to continue the works and make the right decisions, it is necessary to evaluate the correct direction of the works and the efficiency of the received neutral modes.

The efficiency assessment methodology is discussed and the optimal one is selected based on the actual state of the e-network and priorities.

**Keywords:** neutral, grounding, resistance grounding, earth fault, electrical distribution network.

**Introduction.** Since 2015, JSC "Telas" has been working to convert the existing isolated neutral 6-10kV network to a resistor-grounded neutral network configuration.

Work has been done on a number of network substations and distribution points, including:

- KS Navtlughi-2;
- x bugs;
- KS Didube-220;
- KS Sololak;
- KS Mtatsminda;
- KS Avshniani.

Considerable experience has been accumulated in the operation of network areas operating in such a mode.

The purpose of this paper is to investigate the effectiveness of neutral resistive earthing and the corresponding evaluations.

The work is based on theoretical and practical researches in this field, existing real network operation modes, statistical data of emergency shutdowns, research and design materials for modernization of neutral modes, operational data, extracted from emergency process recorders before modernization and after modernization, etc.

To date, in a number of European countries and in the territory of the former Soviet Union, in 6-35 kV networks, the necessity has matured in connection with the transition from the isolated neutral to the resistor-grounded neutral mode.

The reason why this problem is receiving increased attention in 6-35 kV networks is the following:

1. Increase in capacity of networks and complication of their configuration.
2. Increased requirements for continuity of electricity supply.
3. Increasing demands on network reliability and security.
4. Intensive introduction of new modern means of energy distribution
5. Growing requirements for overvoltage limiting devices and electromagnetic compatibility.
6. Growing requirements for tamper protection, sensitivity and speed of relay protection devices.

According to today's standards [1] networks are divided into isolated and grounded neutral networks. According to the rules of electrical arrangement, the efficiency of the neutral grounding is normalized by the coefficient of short circuit to the ground, which means the ratio of the phase voltages to the undamaged phases in the case of single-phase grounding and in the undamaged network. This coefficient should not be greater than 1, 4.

The desirability of the grounded neutral network is clearly proven from numerous scientific and technical works in 110 and higher voltage networks.

As for 6-35 kV networks, the requirements for their neutral, in our opinion, are not correct and obvious.

Accordingly, in [2], the operation of the electrical network at the voltage of 6-35 kV should be performed in the neutral mode with an isolated or arcing coil, while the threshold values of the capacitive current are determined according to the rules for the arrangement and technical operation of electronic devices.

As for the relay protections, in the isolated neutral network, zero sequence protection is provided, which works on the signal. When it is necessary for the safety requirements, then this protection works on the shutdown without time delay.

As a rule, when the protection works on the signal, it is permissible to operate the network with grounding for 2 hours.

The requirements, which are formed according to the normative documents, are the result of some advantages caused by the possibility of working in the emergency mode of the network. This advantage usually includes:

1. Maintaining the continuity of electricity consumption in single-phase grounding mode.
2. Maintaining the working resource of circuit breakers by reducing the number of shutdowns.
3. Low requirements for grounding devices in the presence of grounding protections.

At the same time, according to many years of experience, there are many imperfect neutrals in the case of this mode.

Consider the possible modes of net neutrality and their advantages and disadvantages.

#### **Networks with resistively grounded neutral**

Authors of scientific papers all over the world mention the resistor-neutral grounded network as a promising alternative. Resistive grounding of the neutral has been shown to provide at least two advantages in 6-10kV networks, allowing us to dramatically increase line reliability and safety to the level of 110kV and above networks.

These are the advantages:

1. Complete reduction of ferroresonance overvoltages and reduction of arc overvoltages (2-2.5) to the level of U.N.
2. The possibility of creating a simple and reliable DC during power outages, which is based on the formation of an active current collector in the grounded direction. This increases the safety of the network and completely eliminates additional resulting double short-circuits to ground.

#### **Advantage:**

1. Reduction of overvoltage to a safe level of the electronic network.
2. The possibility of creating a simple selective and reliable RDA, which is based on the passage of an active EMS detector only in the damaged joint.

3. Insignificant expenses for the production of resistors.

4. There is no need to match the parameters of the resistors and automatically change their parameters.

5. Low neutral voltage.

6. Short duration (when protection works on shutdown).

7. Selective determination of the damaged compound.

8. Maintaining the advantage of the isolated neutral network, which is due to relatively low ground currents (during high-impedance grounding).

Disadvantage:

1. Increasing the EMF current compared to the isolated neutral network.

2. Maintaining the mode when the protection works on shutdown;

It should be noted that the defects of the resistively grounded neutral network are not considered as defects but as objective factors, depending on the given method.

We discussed all the advantages and disadvantages of 6-35 kV networks, the following can be done.

### Conclusions:

1. The isolated neutral mode in 6-35 kV networks has significant drawbacks that negatively affect the operation of the network and it is necessary to abandon it.

2. Grounding the neutral of the network with an arc extinguishing coil is a means of prolonging the emergency mode. In addition, its technical implementation is quite difficult and cannot be solved by selective determination of the damaged area.

3. Resistive grounding of the neutral has an undoubted advantage between the isolated neutral and the neutral grounded by the arcing coil.

4. The grounding of the neutral with a resistor can be carried out both at the power facilities under construction and at the existing ones. Goals and objectives of work performance.

Purpose of work

a) Researching the effectiveness of resistive grounding of the neutral of the network area and developing appropriate conclusions and decisions.

b) Elaboration of measures to increase efficiency

### Tasks of work performance are:

1. Study and general analysis of the works performed in the direction of modernization of neutral modes in the electric network.

2. Researching and establishing modern criteria for ensuring reliable, safe and continuous operation of the network.

3. Investigation and characterization of the network configuration and electrical parameters in question.

4. Discussion and assessment of the project of modernization of the neutral mode of the given area of the network.

5. Collection and analysis of network performance data during the pre-modernization period of research network neutral.

6. Data collection and analysis of the operational period after the modernization of the network neutral mode.

7. Elaboration of the method of evaluation of the efficiency of the neutral mode of the network area with the resistor grounded.

8. Comparison of data, analysis and evaluation of the effectiveness of the received mode of neutrality and conclusions.

9. Development of measures to increase efficiency.

### Expected results of the research

The results of the work carried out in terms of the modernization of the neutral modes should be reflected in the network performance data, in particular

The following should be reflected in the data of the accident recorder:

1. Necessary disconnection of single-phase earthed unit with appropriate protection.

2. Reduction of voltages on healthy phases during emergency transient process.

3. Exclusion of single-phase grounding transition in multi-phase and multi-location faults.

4. Exclusion of ferroresonance mode and displacements.

5. Exclusion of non-linearities characteristic of arc protection from control and emergency oscillograms, as well as exclusion of single-phase arc grounding.

6. Increasing single-phase grounding zero-sequence currents.

7. Increasing the zero voltage level in single-phase grounding mode.

### Calculation studies of arcing overvoltages in the conditions of existing isolated neutral

The mentioned mode will be checked for the disconnected state of the sections.

The main parameter that characterizes the process of ignition and extinguishing of the arc is the value of the total current of the short circuit to the ground.

Below we bring the calculation (computer) oscillograms for the neutral isolated mode in accordance with KS Avshnian parameter

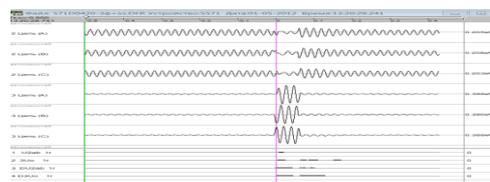


Fig. 1. Three phase fault

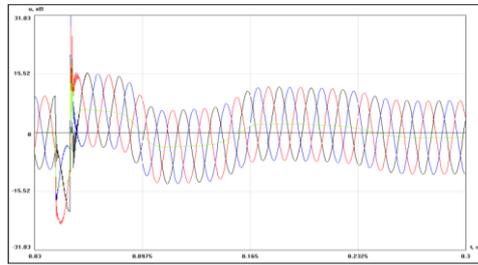


Fig. 2. EMF reporting oscillogram of SS Avshnian's isolated neutral network

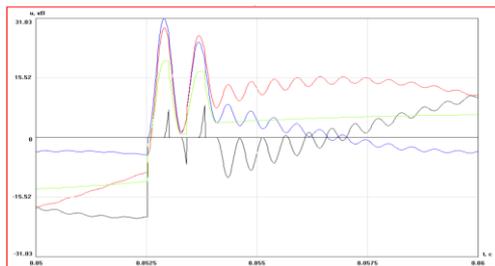


Fig. 3. The reference oscillogram of the isolated neutral network of Ks Avshnian on a locally enlarged time scale

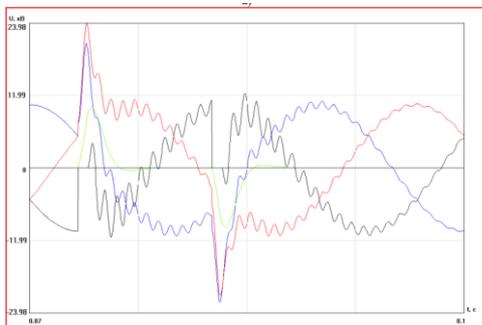


Fig. 4. Oscillograms of phase and neutral voltages in single-phase arc short-circuit mode in the 10 kV

**Study of the efficiency of neutral resistor grounding  
 Elaboration of the methodology for evaluating the effectiveness of resistive grounding**

Today, in connection with the reconstruction of the neutral modes of the network areas in the JSC Telas network, it represents an important strategic step in the development and full functioning of the network.

This process is primarily aimed at increasing the level of electrical supply expected by electrical consumers and perfecting the electrical modes of the network, especially during electromagnetic transient processes during single-phase short circuit

As it is known, the modernization of the neutral grounding mode with the principle of resistive grounding is primarily aimed at:

To reduce the overvoltage levels to the values allowed by the standards during emergency situations.

2. To increase the sensitivity and selectivity of single-phase short-circuit protection.

3. Reducing the number and volumes of emergency shutdowns and equipment damage in the network

In order to correctly evaluate the effectiveness of the neutral mode change, it is necessary to first analyze the presence and volumes of the above three factors and compare them before and after the change of the network neutral.

In order to accumulate the necessary and sufficient information for conducting a comparative analysis, we consider it necessary to organize the works in the following order:

To determine and collect the existing information regarding emergency shutdowns and single-phase short-circuits during the past years before the modernization of the neutral mode, approximately 2-3 years.

Sources of such information can be used:

1. Operational journals and reporting information of various energy facilities.
2. Computer reports of dispatch services.
3. Files of emergency processes from digital terminals of various protections. Both feeders and neutral connections.
4. From the terminals of line farms and sections connections.
5. Oscillograms and error logs extracted from emergency process recorders.
6. Periodically, once a month, collect information on emergency shutdowns and single-phase short-circuits in substations.

The obtained information should be presented in the form of the following table 1:

Substation"-----"

Table 1

data, time	section joint	caze	selectiv trip yes/no	reason elec/mec	interval of power failure

In addition, it is necessary to note:

The number of multiple injuries (accidental disconnection of two or more cables).

Severity of emergency shutdowns and consequences.

Number, types, and dispatch names of damaged devices.

A summary table of accidents is made later.

10 kV network adjacent to KS "Avshnian".

Analysis of work according to emergency shutdown tables in 2019, 2020 and 2021

Network performance analysis was performed according to emergency shutdown tables for Avshnian substation in 2019, 2020 and 2021.

We need to consider the following:

1. Information on short-term self-liquidating short-circuits to earth can be obtained from the fault file (feeder protection terminals or fault recorders).

In the operational logs and in the computer programs of the dispatching service, these short-term self-eliminating short circuits to the ground are usually not recorded, because in such cases the EMF time can be shorter than the 3U0 setting signal. Such information is recorded only by automatic devices.

2. Operating personnel must record all blinker failures to "ground to grid", even when no shutdown has occurred and the blinker is successfully reset.

**Conclusions:**

1. On the basis of the received information, a conclusion can be made about the increase of EMF on inter-phase short circuits, the share of self-eliminating EMF, the amount and frequency, the influence of resistors on the damage of devices.

2. As a rule, even after small observations and accumulation of information, it becomes clear that the inclusion of resistors reduces the damage of devices in single-phase short-circuit modes.

3. The results of the analysis will allow us to evaluate the selectivity of the protection work from EMF both at the head substations and at the distribution points.

**10kV network adjacent to KS "Avshnian".**

**Analysis of work according to emergency shutdown tables in 2019, 2020 and 2021**

Network performance analysis was performed according to emergency shutdown tables for Avshnian substation in 2019, 2020 and 2021

Results of the network emergency shutdown tables are summarized in the table below

nine Comparison of emergency shutdown tables for 2019, 2020, 2021

Years of emergency shutdown. Number of disabled users Total number of disabled users Total power-re-disabled. Reason note, comment



Fig. 5 Comparison graph of SS "Avshniani" outages

**Classification and analysis of oscillograms after grounding the neutral with a resistor**

Table 2

№№№	Type of damage	Before reconstruction		After reconstruction	
		quantity	share%	quantity	share%
1	Steady sfsc	47	28%	15	13%
2	Self liquidating SFSC	25	15%	5	5%
3	ARC SC	5	3%	1	1%
4	Unsteady SFSC	3	3%	1	1%
5	Non sinusoidal SFSC	3	2%	1	1%
6	Transfer to the 2nd SC	39	24%	7	7%
7	Transfer to the 3rd SC	26	16%	5	5%
8	2 faze SC	5	3%	7	7%
9	3 faze SC	9	5%	10	10%

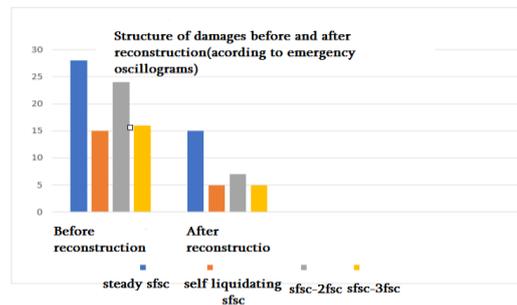


Fig. 6. Structure of damages

**Measures to increase the effectiveness of neutral resistive grounding**

In order to achieve the maximum result of the implementation of resistive grounding and to increase the effectiveness, it is necessary to observe the following, in addition to the measures carried out and described:

1. Operation of substation and line-cable farm with full compliance with technical inspection.
2. Control of cargoes of cable farming, taking into account passport data and capabilities of cables.
3. Production of operational documentation of the cable farm in accordance with the rules of technical operation.
4. Control of correct coordination and operation of surge protection devices in the 10kV network.
5. Correct coordination of protections, protection of parameters and control in accordance with the working modes of the network.
6. Appropriate fixation of protection work, documentary production in accordance with operational rules.
7. Ensuring full operation of the accident recorder installed and operating in KS Avshnian, time recording control.
8. Collection of oscillogram records, analysis and regular presentation of results.
9. Proper operation and control of SDA devices operating in this area of the network, by production and analysis of recording oscillograms.
10. Expanding and perfecting the park of automatic switching on of the reserve in the network, because the existing earthing protections work in full force during shutdowns.

11. By obtaining full management and control of resistive grounding, the methodical guidelines for efficiency evaluation should be fully implemented. Carrying out the above measures will allow us to fully use the advantages of neutral resistive grounding and increase their efficiency.

#### Conclusions:

1. The 10 kV network of JSC "Telas" distribution network near KS "Avshnian" was studied in terms of its technical equipment and architecture.
2. Modes of neutral grounding of 6-10kV networks are discussed by analyzing their reliability and technical compliance.
3. The literature in the direction of the analysis of the effectiveness of neutral resistive grounding has been reviewed and analyzed, and relevant conclusions have been drawn.
4. The goals, tasks and possible results of the research are established.
5. The measures and the working project to improve the reliability of the 10 kV network adjacent to KS "Avshnian" were discussed and studied, on which relevant conclusions regarding the decisions made were presented.
6. The method of evaluating the effectiveness of resistive grounding of the network has been developed.
7. Collected and studied the material on the accident data of the given area of the line for the years 2019, 2020 and 2021. The structure and quantitative data of the emergency shutdown before and after the modernization of the neutral were studied and processed, presenting the relevant tables, graphs and diagrams.

8. Accidental oscillograms are revealed and analyzed by accident registrar records, oscillogram classification of transient processes; analysis with comparison diagrams before and after modernization; the obtained results indicate the efficiency of the planned works;

9. Appropriate conclusions are made based on the processed material.

10. Measures to increase the effectiveness of neutral resistive grounding have been established.

11. The direction of modernization of the blocked working neutral gives real results in terms of increasing the reliability of the network and requires the implementation of measures that will increase its efficiency.

#### References

1. Evminov L.I., Alferova T.V. Rezistornoe zazemlenie heitrali v raspredelitelnix setiakh 6-35 kV. Agrotexnika I Energoobespechenie. 2019. №4(25).
2. Vilgeim R., Yoters M. Zazemlenie neitrali v visokovoltnix sistemax. I.: Gosenergoizdat. 1969. 415s.
3. Peters E., Slepian J. Voltage induced by arcing ground. Trans. AIEE. 1923. AΓ® 42. p. 478-497.
4. Petersen W. Erdschlussstrom in Hochspannungsnetzen. Elektrotechn. Z. 1916. n. 37. H. 37. s. 493-51.

## კუთხით რხევითი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მუშაობის პრინციპი

**გელა ჯავახიშვილი**, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი

საქართველოს უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [gela.javakhishvili@ug.edu.ge](mailto:gela.javakhishvili@ug.edu.ge)

**ალექსანდრე დიდებულიძე**, ტექნ. მეცნ. დოქტორი,

საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემია, თბილისი, საქართველო,

E-mail: [adidebulidze@yahoo.com](mailto:adidebulidze@yahoo.com)

**ანოტაცია:** განხილულია ავტორების მიერ შექმნილი კუთხით რხევითი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მუშაობის პრინციპი, რომელშიც ენერგეტიკული და საექსპლუატაციო მაჩვენებლების გაუმჯობესება მიიღწევა იმით, რომ ვიბრატორის სტატორისა და ღუზის მაგნიტური გამტარები სიმეტრიულია მათ ცენტრებზე გამავალი ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ღერძის მიმართ. სტატორის დამატებითი პოლუსების ზედაპირის სიგანე ისეთნაირადაა შერჩეული, რომ ღუზის კუთხით რხევითი მოძრაობისას, ღუზის ჰორიზონტალურ და სტატორის დამატებით პოლუსებს შორის მუშა ფართის მყისა მნიშვნელობა უცვლელი რჩება. კუთხით რხევითი მოძრაობა მიიღწევა შემოთავაზებული ვიბრატორის სტატორის და ღუზის პოლუსების განლაგებით და ცვლადი დენის გრაგნილის კოჭების შეერთების ელექტრული სქემით, რაც უზრუნველყოფს ნიშანცვლადი მომენტის სიმეტრიულობას.

**საკვანძო სიტყვები:** ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, კუთხითრხევითი მოძრაობა, პოლუსი, ღუზა, სტატორი.

## The working principle of electromagnetic vibrator with angular oscillations

**Gela Javakhishvili**, Doctor of Sciences, Professor

University of Georgia, Tbilisi, Georgia, E-mail: [gela.javakhishvili@ug.edu.ge](mailto:gela.javakhishvili@ug.edu.ge)

**Alexandre Didebulidze**, Doctor of Sciences

Academy of Agricultural Sciences of Georgia, E-mail: [adidebulidze@yahoo.com](mailto:adidebulidze@yahoo.com)

**Annotation.** The operation principle of our patented electromagnetic vibrator with angular oscillations of the armature is considered; improvement in energy and operational indicators is achieved due to the fact that the magnetic circuits of the stator and the armature of the vibrator are at the same time symmetrical relative to the horizontal and vertical axes passing through the center, and the width of the surface of the additional stator poles is selected in such a way that during oscillatory motion of the armature, the area of the working zone between the armature and the additional poles of the stator remains constant. Angular oscillatory motion is achieved by a special arrangement of the stator and armature poles and an electrical circuit for connecting the windings, ensuring symmetry of the alternating torque.

**Keywords:** Electromagnetic vibrator, angular motion, pole, armature, stator.

**შესავალი.** ვიბრაციული მანქანები და ტექნოლოგიები ფართოდ გამოიყენება მრეწველობასა და სოფლის მეურნეობაში, თანაც ზოგიერთი ტექნოლოგიური პროცესის განხორციელება შესაძლებელია მხოლოდ ვიბრაციის გამოყენებით, ხშირ შემთხვევაში ვიბრაციით მიიღწევა პროცესების ინტენსიფიკაცია და ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესება.

დიდია ვიბრაციული მანქანების ზომების და სიმძლავრეების დიაპაზონი, მრავალფეროვანია მათი დანიშნულება და კონსტრუქციები, განსხვავებულია ვიბრაციის აგზნების მეთოდები და საშუალებები. ვიბრაციული მანქანების

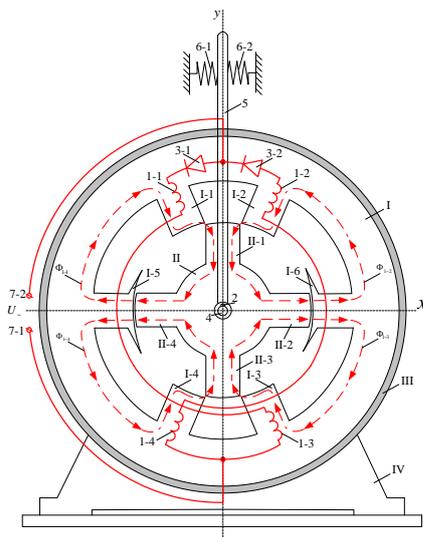
კონსტრუქციული სქემები, როგორც წესი, არაა რთული, მაგრამ მათი გამართული მუშაობისათვის აუცილებელია ზუსტად განისაზღვროს ის პარამეტრები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მუშაობის ოპტიმალურ რეჟიმებს, რაც შესაძლებელია მხოლოდ ვიბრაციული მანქანების და მათ მიერ შესრულებული ტექნოლოგიური პროცესების კვლევის საფუძველზე [1].

**სამუშაოს მიზანი.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ჩვენი მონაწილეობით შექმნილი მცირე ლითონტევადობის მქონე კუთხით რხევითი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების კონსტრუქციების [2, 3] ანალიზის საფუძველზე

შექმნილი ისეთი მცირე ლითონტევადობის მქონე ვიბრატორის მუშაობის პრინციპის გაცნობა, რომელსაც აქვს მაღალი საექსპლოატაციო, ენერგეტიკული და მექანიკური მაჩვენებლები [4].

**კუთხით რხევითი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მუშაობის პრინციპი.**

შემოთავაზებული ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი (ნახ. 1) შედგება ფურცლოვანი ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან აწყობილი სტატორისა II და ღუზისაგან II. სტატორის II I-1, I-2, I-3 და I-4 პოლუსებზე შესაბამისად განთავსებულია ცვლადი დენის გრაგნილის იდენტური კოჭები 1-1, 1-2, 1-3 და 1-4. ამასთან 1-1, 1-3-თან და 1-2, 1-4 -თან მიმდევრობითაა ჩართული. სტატორი შეიცავს აგრეთვე ორ დამატებით I-5 და I-6 პოლუსს. 1-1 და 1-2 კოჭასთან მიმდევრობით ჩართულია 3-1 და 3-2 ნახევრადგამტარი დიოდი. კოჭების 1-3, 1-4 და ნახევრადგამტარი დიოდების 3-1, 3-2 შეერთების წერტილები მიერთებულია ცვლადი დენის მომჭერებთან 7-1, 7-2. ბერკეტის 5 ერთი მხარე მოთავსებულია დრეკადი სისტემის ზამბარებს 6-1, 6-2 შორის, ხოლო მეორე მხარე სოგმანით 2 მიერთებულია ლილვთან 4, რომელზეც დასმულია ღუზა. სტატორი მოთავსებულია კორპუსში III, რომელიც ხისტადაა დამაგრებული დგარზე IV.



ნახ. 1. კუთხით რხევითი ელექტრო-მაგნიტური ვიბრატორი

სტატორი და ღუზა სიმეტრიულია ვერტიკალური y და ჰორიზონტალური x ღერძის მიმართ. სტატორის დამატებითი პოლუსების ფორმა

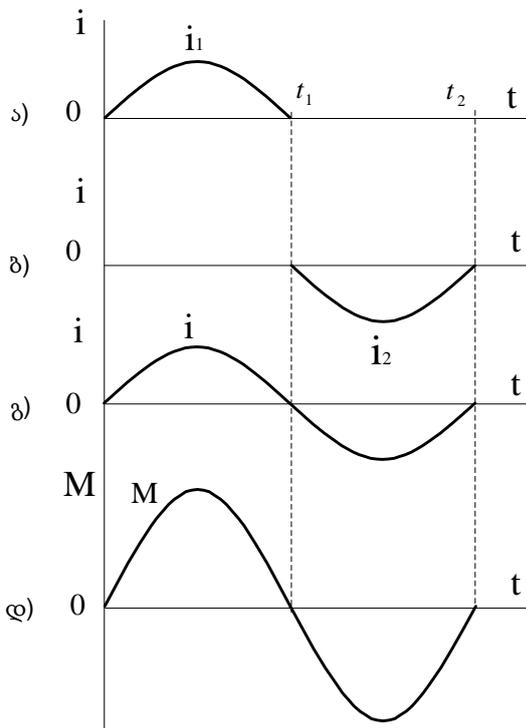
ისეთნაირადაა შერჩეული, რომ ღუზის კუთხით რხევითი მოძრაობისას, ღუზის ჰორიზონტალურ და სტატორის დამატებით პოლუსებს შორის მყისა მუშა ფართის და საპაერო ღრწოს სიდიდე უცვლელია.

ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი მუშაობს შემდეგნაირად: როდესაც მომჭერები 7-1, 7-2 მიუერთდება ცვლადი დენის ქსელს, დროის მონაკვეთში 0-დან  $t_1$ -მდე (ნახ. 2,ა),  $i_1$  დენი გაივლის შტოში, სადაც მიმდევრობით მიერთებულია 3-1 ნახევრადგამტარი დიოდი, 1-1 და 1-3 კოჭა. ამ დროს წარმოიქმნება მაგნიტური ნაკადი  $\Phi_{1-1}$  და  $\Phi_{1-3}$ , რომლებიც შესაბამისად სტატორის I-1 პოლუსის, დამატებითი პოლუსის I-5 და ღუზის II-1 და II-4 პოლუსის და სტატორის I-3 პოლუსის, დამატებითი პოლუსის I-6 და ღუზის II-2 და II-3 პოლუსის გავლით. სტატორის I-1 და I-3 პოლუსი ერთნაირი ძალით იზიდავს ღუზის ვერტიკალურ II-1 და II-3 პოლუსს, ხოლო ჰორიზონტალური პოლუსი II-2 და II-4 გადაადგილდება სტატორის დამატებითი I-5 და I-6 პოლუსის მიმართ ისე, რომ მათ შორის გადაფარვის მუშა ფართის მყისა მნიშვნელობა ყოველთვის მუდმივი სიდიდეა, რის შედეგადაც ადგილი აქვს ღუზის მოძრაობას საათის ისრის მოძრაობის საჭინააღმდეგო მიმართულებით. ამ დროს შეიკუმშება ზამბარა 6-1, ხოლო 6-2 გაიჭიმება.

შემდეგ ნახევარპერიოდში, დროის მონაკვეთში  $t_1$ -დან  $t_2$ -მდე (ნახ. 2,ბ)  $i_2$  დენი გაივლის შტოში, სადაც მიმდევრობით მიერთებულია 3-2 ნახევრადგამტარი დიოდი, 1-2 და 1-4 კოჭა. ამ დროს წარმოიქმნება მაგნიტური ნაკადი  $\Phi_{1-2}$  და  $\Phi_{1-4}$ , რომელიც შესაბამისად სტატორის I-2 პოლუსის, დამატებითი პოლუსის I-6 და ღუზის II-1 და II-2 პოლუსის და სტატორის I-4 პოლუსის, დამატებითი პოლუსის I-5 და ღუზის II-3 და II-4 პოლუსის გავლით, სტატორის I-2 და I-4 პოლუსი ერთნაირი ძალით იზიდავს ღუზის ვერტიკალურ II-1 და II-3 პოლუსს, ხოლო ჰორიზონტალური პოლუსი II-2 და II-4 გადაადგილდება სტატორის დამატებითი I-5 და I-6 პოლუსის მიმართ ისე, რომ მათ შორის გადაფარვის მუშა ფართის მყისა მნიშვნელობა ყოველთვის მუდმივი სიდიდეა, რის შემდეგაც ადგილი აქვს ღუზის მოძრაობას საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით. ამ დროს შეკუმშება ზამბარა 6-2, ხოლო 6-1 გაიჭიმება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, მკვე-ბავი ქსელის ერთ ნახევარპერიოდში ღუზა მოძრაობს საათის ისრის მოძრაობის

საწინააღმდეგო, ხოლო მეორე ნახევარპერიოდში საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით, ე.ი. ადგილი აქვს კუთხით რხევით მოძრაობას. ამასთან რხევის სიხშირე ტოლია მკვებავი ცვლადი დენის სიხშირისა, ხოლო ქსელში გამავალი დენის ძალა  $i$  სიმეტრიულია (ნახ. 2,გ).  
 ნახ.2-ზე წარმოდგენილია დენის  $i$  (ნახ. 2,ა, ბ, გ) და ელექტრომაგნიტური მაბრუნე მომენტის  $M$  (ნახ. 2,დ) ცვლილებების გრაფიკები დროის ფუნქციაში.



ნახ. 2. დენის  $i$  (ა, ბ, გ) და ელექტრომაგნიტური მაბრუნე მომენტის  $M$  (დ) ცვლილებების გრაფიკები დროის ფუნქციაში.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე მკვებავი ქსელის ერთ ნახევარპერიოდში ღუზა მოძრაობს საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგო, ხოლო მეორე ნახევარპერიოდში საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით ე.ი. ადგილი აქვს კუთხით რხევით მოძრაობას. ამასთან რხევის სიხშირე ტოლია მკვებავი ცვლადი დენის სიხშირისა, ხოლო ქსელში გამავალი დენის ძალა  $i$  სიმეტრიულია (ნახ. 2,გ).

ელექტრომაგნიტური მაბრუნე მომენტის მნიშვნელობა შეიძლება გამოისახოს შემდეგნაირად [5]:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{dL_{1,3}}{d\theta} \cdot i_1^2 + \frac{dL_{2,4}}{d\theta} \cdot i_2^2 \right),$$

სადაც  $L_{1,3}$ ,  $L_{2,4}$  - შესაბამისად 1-1, 1-3 და 1-2, 1-4 კოჭების ჯამური ინდუქციურობაა, ჰნ;

$\theta$  - ღუზის შემობრუნების კუთხე სტატორის მიმართ, რად;

$i_1$ ,  $i_2$  - შესაბამისად 1-1, 1-3 და 1-2, 1-4 კოჭებში გამავალი დენი, ა.

ასეთი სქემით ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის შესრულება უზრუნველყოფს მკვებავი ქსელის სიმეტრიულ დატვირთვას.

შემოთავაზებული ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი ხასიათდება ნიშანცვლადი მომენტის სიმეტრიულობით და გაუმჯობესებული ენერგეტიკული, მექანიკური და საექსპლუატაციო მახასიათებლებით.

### დასკვნები

1. კუთხით რხევით ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორში ენერგეტიკული, მექანიკური და საექსპლუატაციო მაჩვენებლების გაუმჯობესება მიიღწევა იმით, რომ მაგნიტური გამტარი სტატორი და ღუზა სიმეტრიულია მათ ცენტრებზე გავლებული ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ღერძების მიმართ. სტატორის დამატებითი პოლუსების ზედაპირის სიგანე ისეთნაირადაა შერჩეული, რომ ღუზის კუთხით რხევითი მოძრაობისას, ღუზის ჰორიზონტალურ და სტატორის დამატებით პოლუსებს შორის მუშა ფართის მყისა მნიშვნელობა უცვლელი სიდიდეა;

2. კუთხით რხევითი მოძრაობა მიიღწევა სტატორის და ღუზის პოლუსების ჩვენს მიერ შემოთავაზებული განლაგებით და ცვლადი დენის გრაგნილის კოჭების შეერთების ელექტრული სქემით, რაც უზრუნველყოფს ნიშანცვლადი მომენტის სიმეტრიულობას.

### ლიტერატურა

1. ზვიადური ვ. სამთო საწარმოთა ტრანსპორტის სპეციალური სახეობები ვიბრაციული მანქანები და მოწყობილობები, თბილისი. სტუ. 2013. - 125 გვ.
2. Ksovrel R., Didebulidze A., Gaseev A., Kochiev V. Electromagnetic Oscillation Motor. USA Patent # 4885487, 06.12.1989.

3. Didebulidze A., Javakhishvili G. Theoretical Principles of Electromagnetic Oscillation Motor with Asymmetrical Stator. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, vol. 17. # 2. 2023. pp 35-42.
4. ჯავახიშვილი გ. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, საქართველოს პატენტი P 5978, საქპატენტის ბიულეტენი. #15. 2013.
5. ჯავახიშვილი გ. სამფაზა უკუქცევით-წინსვლითი მოძრაობის ელექტრო-მაგნიტური ვიბროამძრავი სოფლის მეურნეობაში. თბილისი. 2008. -110 გვ.
3. Didebulidze A., Javakhishvili G. Theoretical Principles of Electromagnetic Oscillation Motor with Asymmetrical Stator. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, vol. 17. # 2. 2023. pp 35-42.
4. Javakhishvili G. eleqtromagnituri vibratori, saqartvelos patenti P 5978, gamoqveynebis biuleteni. #15. 12.08.13.
5. Javakhishvili G. samfaza ukuqceviT-winsvliTi modzraobis eleqtromagnituri vibroamdzravi soflis meurneobaSi. Monografia. Tbilisi. 2008. -110 gv.

#### References (transliterated)

1. Zviadauri V. samto sawarmota transportis specialuri saxebobi vibraciuli manqanebi da mowyobilobebi, Tbilisi, stu, 2013, 125 gv.
2. Ksovreli R., Didebulidze A., Gaseev A., Kochiev V. Electromagnetic Oscillation Motor. USA Patent # 4885487, 06.12.1989.

## ენერგომომხმარებლის მენეჯმენტის IoT სისტემა

**ლევან იმნაიშვილი**, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [L.imnaishvili@gtu.ge](mailto:L.imnaishvili@gtu.ge).

**მაგული ბედინეიშვილი**, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge).

**თეა თოდუა**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [tea\\_todua@gtu.ge](mailto:tea_todua@gtu.ge).

**კახაბერ ქასოშვილი**, დოქტორანტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [k.kasoshvili@gmail.com](mailto:k.kasoshvili@gmail.com)

**ანოტაცია.** განხილულია ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის სისტემის განხორციელების საკითხები. ამ მიზნით მიზანშეწონილად არის მიჩნეული სისტემის აგება განხორციელდეს IoT ტექნოლოგიაზე დაყრდნობით, გამზომი და აქტუატორული კვანძების სახით გამოყენებული იქნას მულტიფუნქციური მოწყობილობები.

**საკვანძო სიტყვები:** ელექტროენერჯის მოხმარების კომპიუტერული მენეჯმენტი, IoT სისტემა, ელექტროენერჯის მრავალფუნქციური მრიცხველი.

## IoT system for energy consumption management

**Levan Imnaishvili**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering Department, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [L.imnaishvili@gtu.ge](mailto:L.imnaishvili@gtu.ge).

**Maguli Bedineishvili**, Academic Doctor of Informatics, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge).

**Tea Todua** Academic Doctor of Informatics, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [tea\\_todua@gtu.ge](mailto:tea_todua@gtu.ge)

**Kakhaber Kasoshvili**, PhD student, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [k.kasoshvili@gmail.com](mailto:k.kasoshvili@gmail.com)

**Annotation.** Issues of implementation of the electricity consumption management system are discussed in this paper. For this purpose, it is considered expedient to build a system based on IoT technology, to use multifunctional devices as measuring and actuator nodes.

**Keywords:** Computer management of electricity consumption, IoT system, multifunctional electricity meter.

**შესავალი.** ელექტროენერჯის მომჭირნობით გამოყენების მიზნით მომხმარებლისთვის მნიშვნელოვანია იცოდეს მისი მოხმარების დინამიკა. მნიშვნელოვანია ასევე ინფორმაცია იმის შესახებ, ელექტროენერჯის ჯამური მოხმარების მიხედვით, რომელ სატარიფო ზონაშია მომხმარებელი. სადღეღამისო ტარიფების შემოღების შემთხვევაში ასევე მნიშვნელოვანი იქნება მომხმარებელმა დროის კონკრეტულ მომენტში იცოდეს შესაბამისი სატარიფო ზონა.

ადამიანის თანამედროვე საცხოვრისი დატვირთულია ელექტროენერჯის მომხმარებე-

ბელი მრავალფეროვანი მოწყობილობებით, როგორცაა: კონდიციონერი, ელექტროქურა, უთო, მაცივარი, სარეცხი მანქანა, მულტსახარში, ტოსტერი, კომპიუტერი, ტელევიზორი და ა.შ.

სამუშაოში [1] ექსპერიმენტალურად არის შესწავლილი ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის სისტემის (HEMS) გავლენა ელექტროენერჯის მოხმარებაზე. საგულისხმოა, რომ ექსპერიმენტები ჩატარდა ისეთ ცივ ქვეყანაში, როგორცაა ფინეთი. რეალურმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ ზამთრის თვეებში ელექტროენერჯის სწორმა მენეჯმენტმა ენერჯის მოხმარება შეამცირა 30%-ით.

მოხმარებული ენერჯის შემცირება მოხდა ასევე სახლებში, სადაც კომფორტს უფრო აფასებენ, ვიდრე ეკონომიას ან ეკოლოგიაზე ზრუნვას.

გამოვთქვამთ იმედს, მენეჯმენტის სწორი სცენარის პირობებში ჩვენს მიერ შემოთავაზებული სისტემების არქიტექტურები ელექტროენერჯის მომხმარებელს საშუალებას მისცემს შეამციროს ელექტროენერჯის მოხმარება. ეს ეკონომია მნიშვნელოვანია მომხმარებლისთვის როგორც ფინანსურად, ასევე გლობალურად ენერჯის დაზოგვისთვის.

**სამუშაოს მიზანი.** თანამედროვე ინფორმაციულ და ციფრულ ტექნოლოგიებზე დაყრდნობით ენერგომომხმარებლის ეფექტური მონიტორინგისა და მართვის სისტემის შექმნა: არქიტექტურის დამუშავება, სისტემის პროექტირება, ანალიზი. საუბარია უნიფიცირებული არქიტექტურების – პლატფორმის შექმნაზე, რომელიც გამოყენებადი იქნება:

- ელექტროენერჯის მოხმარების სხვადასხვა სტრუქტურულ ჭრილში.
- კონკრეტული მოხმარების გარემოში ელექტროენერჯის მენეჯმენტის ეფექტური ალგორითმების კვლევისა და დამუშავებისათვის.

#### **IoT ტექნოლოგიის ენერჯის სისტემებში გამოყენების უპირატესობა**

IoT ტექნოლოგია, შეიძლება ითქვას, სულ რაღაც ორი ათეული წლის თუ იქნება. ამ პერიოდის განმავლობაში მისი პოპულარობა გაიზარდა უსაზღვროდ და აგრძელებს ზრდას. რა საფუძველი შეიძლება ქონდეს ამას?

ცხადია, არსებობს სხვა ციფრული ტექნოლოგიები (მაგალითად, SCADA, „ჭკვიანი სახლი“ და სხვა), რომლებიც ენერგომომხმარებლის მენეჯმენტის ამოცანებს წყვეტს და წარმატებითაც. IoT-ის წარმატება როგორც ყოფით, ასევე საწარმო პირობებში, პირველ რიგში, განაპირობა ინტერნეტის და უკაბელო ტექნოლოგიების განვითარებამ [2,3]. აქედან გამომდინარე:

- უკაბელო ტექნოლოგიის გამოყენების გამო მარტივია მისი ობიექტზე მონტაჟი;
- ინტერნეტის საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების გამოყენების გამო მისი მოქმედების არეალი მანძილით შეზღუდული არ არის;
- ეფექტური აპარატურული და პროგრამული საშუალებების გამო მარტივია მისი მასშტაბირება სამართავი ტექნოლოგიური პროცესების სივრცეში განაწილების დროსაც კი;

- მისი ადმინისტრირება შეუძლია ტექნოლოგს, რომელმაც კარგად იცის ტექნოლოგიური პროცესი;

- IoT-ს სხვა სისტემებთან შედარებით კარგად აქვს განვითარებული მონაცემთა ანალიზის შესაძლებლობები და ინსტრუმენტები;

- და, რაც მთავარია, დაბალია მისი ღირებულება.

რა შეიძლება ჩაითვალოს მის ნაკლად:

- უკაბელო ტექნოლოგიის და ინტერნეტის გამოყენების გამო, დაბალი ინფორმაციული დაცულობა;

- IoT-ის არქიტექტურაში მნიშვნელოვანი როლი აკისრია გამომთვლელ „ღრუბელს“. სისტემის დაბალი ბიუჯეტის შემთხვევაში გამოყენებული უნდა იქნას სხვა იურიდიული პირის „ღრუბელი“. აქედან გამომდინარე, IoT სისტემა დამოკიდებული ხდება სხვა იურიდიულ პირზე.

თუ კარგად გავანალიზებთ, მივალთ დასკვნამდე, რომ IoT ტექნოლოგიის გამოყენებისას საწარმოო ენერჯის სისტემებში და განსაკუთრებით ყოფითი დანიშნულების ენერჯის სისტემებში ტექნოლოგიური პროცესის მართვისთვის ჩამოთვლილი უარყოფითი მხარეები დიდად აქტუალური არ არის.

#### **ენერგომომხმარებლის მენეჯმენტის IoT სისტემის არქიტექტურა და ფუნქციონირება**

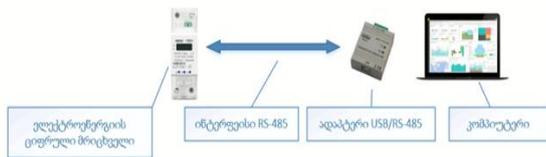
მიმდინარე ეტაპზე შემუშავებული გვაქვს სისტემის სამი სხვადასხვა არქიტექტურა:

- სისტემა პერსონალური კომპიუტერით და საკაბელო კავშირით (ნახ.1);
- სისტემა პერსონალური კომპიუტერით და Wi-Fi კავშირით (ნახ.2);
- სისტემა სმარტფონით და Wi-Fi კავშირით (ნახ.3).

ასევე, შესაძლებელია ამ არქიტექტურების კომბინაციებიც.

ზოგადად, მოცემული სისტემის არქიტექტურები არ არის სიახლის მატარებელი. თუ გავითვალისწინებთ, რომ SCADA წარმოდგენილ არქიტექტურაში ელემენტის სახით შემოტანილია ციფრული მრიცხველი (მრავალი მომხმარებლის შემთხვევაში – მრავალი მრიცხველი), რომელსაც დამატებით ექნება ელექტროენერჯის მომხმარებლის მართვის ფუნქცია, მაშინ არქიტექტურა იძენს სიახლის თვისებასაც. სიახლის თვისებას აძლიერებს ის, რომ არქიტექტურა საშუალებას იძლევა დამუშავებული იქნას ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის ალგორითმები. უფრო

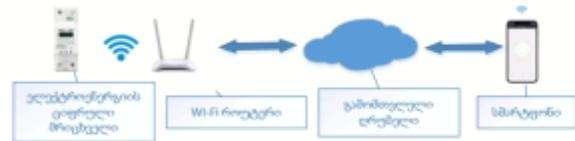
მეტიც, მომხმარებელს საშუალება ექნება თვითონ მოახდინოს ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის ალგორითმების კონფიგურირება – მოდიფიცირება. თითქოს ბუნებრივად ჩანს, რომ სისტემას უნდა ქონდეს „ინტელექტუალური“ თვისებებიც, რომლის დროსაც ის „აღიქვამს“ ელექტროხელსაწყოებს, „სწავლობს“ მომხმარებლის მოთხოვნებს და აძლევს მას „რჩევებს“.



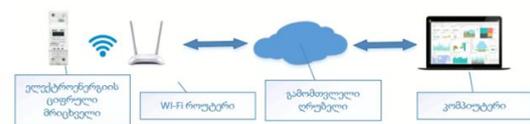
ნახ. 1. ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის SCADA სისტემის განზოგადოებული არქიტექტურა

ნახ. 1-ზე წარმოდგენილი არქიტექტურა არის ტიპური SCADA სისტემა, რომელიც ფუნქციონირებს ლოკალურ გარემოში და გეოგრაფიულად არ ცდება კონკრეტული ბინის ან საწარმოს ფარგლებს. სისტემის ამ ტექნოლოგიით აგება საიმედოა, მაგრამ ძვირია. თუ გავითვალისწინებთ დღევანდელი მომხმარებლის ცხოვრების მობილურ წესს, მაშინ ნაკლებად მომხიბვლელი ხდება. ასეთი არქიტექტურა წარმატებით შეიძლება იქნას გამოყენებული იურიდიული პირის მიერ ტექნოლოგიური პროცესების ენერგომომჭირნეობით მართვის მიზნით.

ნახ. 2,3-ზე წარმოდგენილი არქიტექტურებით აგებულ IoT სისტემებს შეუძლიათ პროცესის კონტროლი დისტანციურად – დედამიწის ნებისმიერი წერტილიდან. აქედან გამომდინარე, მეორე და მესამე ტიპის სისტემისათვის აუცილებელია ინტერნეტის არსებობა როგორც ადგილზე (ბინაში, საწარმოში, ოფისში), ასევე საკონტროლო წერტილშიც. ტექნოლოგიის თავისებურებიდან გამომდინარე, მეტი ზრუნვა გვიწევს სისტემის უსაფრთხოების უზრუნველყოფაზე, ან ამ ნაწილში შეიძლება კოპრომისებზეც წავიდეთ. ზოგადად IoT სისტემა ადვილად მასშტაბირებადი და იაფია [4].



ნახ. 2. ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის IoT სისტემის განზოგადოებული არქიტექტურა (სმარტფონით მართვის ვარიანტი)



ნახ. 3. ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის IoT სისტემის განზოგადოებული არქიტექტურა (კომპიუტერული მართვის ვარიანტი)

მოტანილ არქიტექტურებში განხილვას საჭიროებს ქსელური ციფრული მრიცხველი. დღეისათვის არსებობს მრავალრიცხოვანი ციფრული მრიცხველები Wi-Fi, Zigbee, Lan თუ RS-485 ინტერფეისებით, ასევე ჩამუშავებული რელეთი დატვირთვის მართვისთვის. ეს ბოლო პარამეტრი ძალიან მნიშვნელოვანია, რადგან ჩვენ ვსაუბრობთ ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტზე.

ნახ.4-ზე ნაჩვენებია DDS238-2 მრავალ-ფუნქციური ცალფაზა წრედის ელექტრო-ენერჯის მრიცხველის გარეგნული სახე [5]. მისი მრავალფუნქციურობიდან გამომდინარე დასახელება „მრიცხველი“ პირობითია. მრიცხველის ფუნქციებია:

- იმპულსების გამომუშავება kWh-ზე;
- მოხმარებული ჯამური ენერჯის kWh გაზომვა;
- მიღებული ენერჯის +kWh გაზომვა;
- გაცემული ენერჯის -kWh გაზომვა;
- აქტიური დენის I გაზომვა;
- რეალური ძაბვის V გაზომვა;
- აქტიური სიმძლავრის W გაზომვა;
- რეაქტიული სიმძლავრის Var გაზომვა;
- Cosφ-ს გაზომვა;
- დენის სიხშირის Hz გაზომვა;
- ყველა ჩამოთვლილი პარამეტრის ინდიცირება;
- RS-485 ინტერფეისის არსებობა;
- MODBUS-RTU პროტოკოლის არსებობა;

- WIFI 802.11b/g/n ინტერფეისის და ქსელური პროტოკოლის არსებობა.  
 მრიცხველი არ არის გამიზნული ელექტროენერჯის კომერციული აღრიცხვი მისი კლასი შეადგენს 1-ს.



ნახ. 4. ელექტროენერჯის მრავალფუნქციური მრიცხველის გარეგნული სახე

სამივე ტიპის სისტემის პროგრამული პროდუქტი შეიძლება აგებული იქნას ისე, რომ მომხმარებელმა შეძლოს ელექტროენერჯის მოხმარების სამიზნე ნიშნულების დაყენება, ხოლო სისტემამ აკონტროლოს მოხმარება სამიზნე ნიშნულთან მიმართებაში და მომხმარებელს შეატყობინოს ამოცანის გადაწყვეტის რეალობა.

ჩვენ მიერ განხორციელებული იქნა მე-2 და მე-3 ტიპის IoT სისტემა ელექტროენერჯის მოხმარების და მართვის ერთი საკონტროლო წერტილისთვის. სისტემის გარეგნული სახე ნაჩვენებია ნახ. 5-ზე. სისტემამ აჩვენა თავისი ღირსებები როგორც კომპიუტერის, ასევე სმარტფონის ვარიანტისთვის.



ნახ. 5. ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის სისტემა ერთი საკონტროლო წერტილისთვის

ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია განხორციელებული პროგრამული პროდუქტის სამომხმარებლო ინტერფეისი, როგორც ერთი მაგალითი. სისტემა ახდენს მოხმარებული ენერჯის კონტროლს მხოლოდ ერთ წერტილში, რომელიც შეიძლება იყოს ოფისში შემავალი ხაზის კონტროლი. გამოთვლების სიზუსტის გაზრდის მიზნით უპირანია იგივე მონაცემების კონტროლი მოხმარების რამდენიმე წერტილში, მაგალითად, შემავალ ხაზზე და კონდიციონერის მკვებავ ხაზზე და ა. შ. ამდენად, კონკრეტული გადაწყვეტები ერთი ტიპის სისტემისთვის შეიძლება იყოს მრავალფეროვანი.

დასაწყისი	საბუღ. კვტ	ტარიფი	საბუღ. ლარი	
25.09.2022	ჯამური	75	18,041	44,33
დასასრული	კონდიციონერი	0		0
6.10.2022	მაცივარი	17		16,54
	უიო	7		5,96
	სხვა	7		5,96

ნახ. 6. ელექტროენერჯის მოხმარების მენეჯმენტის სისტემის სამომხმარებლო ინტერფეისი.

### დასკვნები

- ელექტროენერჯის მენეჯმენტის სისტემის განხორციელებისთვის უპირატესობა ენიჭება IoT ტექნოლოგიას, როგორც უფრო მოქნილს დღევანდელ მოთხოვნებთან მიმართებაში.
- შემოთავაზებულია ელექტროენერჯის მენეჯმენტის SCADA და IoT სისტემების არქიტექტურები.
- შემოთავაზებულია მიდგომა - გამზომი და აქტუატორული მოწყობილობები გამოყენებული იქნას მრავალფუნქციური მოწყობილობის სახით ინტეგრირებული ქსელური ინტერფეისებით.
- ელექტროენერჯის მენეჯმენტის სამომხმარებლო ინტერფეისის აგებისთვის შემოთავაზებულია ზოგიერთი რეკომენდაცია.

### ლიტერატურა

1. Mauricio de Castro Tomé, Netta Iivari, Rauli Svento. Impacts of home energy management systems on electricity consumption. Applied Energy, Volume 299, 1 October 2021, 117310.
2. Mehmet Güçyetmez, Husham Sakeen Farhan. Enhancing smart grids with a new IOT and cloud-based smart meter to predict the energy consumption with time series. Alexandria Engineering Journal, Volume 79, 15 September 2023, Pages 44-55.
3. იმნაიშვილი ლ., ბედინეიშვილი თ., თოდუა. IoT სისტემა სასწავლო დაწესებულებაში მაღალი ტენიანობის წინააღმდეგ. ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ნიკო ბერძენიშვილის ინსტიტუტი, შრომები XVI, ბათუმი, 2023 წ., გვ.1296–1305.
4. იმნაიშვილი ლ., ბედინეიშვილი თ., თოდუა თ., ჭილაძე თ. SCADA თუ IoT? III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“. ჟურნალი „ენერჯია“. №2(98), სტუ. თბილისი, 2021 წ. გვ. 111-115.
5. DDS238 type multi-function smart energy meter, <https://electromes.gr/pegasus/download01/download00.php?file=99110058>

### References (transliterated)

1. Sanna Tuomela, Mauricio de Castro Tomé, Netta Iivari, Rauli Svento. Impacts of home energy management systems on electricity consumption. Applied Energy, Volume 299, 1 October 2021, 117310.
2. Mehmet Güçyetmez, Husham Sakeen Farhan. Enhancing smart grids with a new IOT and cloud-based smart meter to predict the energy consumption with time series. Alexandria Engineering Journal, Volume 79, 15 September 2023, Pages 44-55.
3. Imnaishvili L., Bedineishvili T., Todua. IoT System against High Humidity in Educational Institution. Batumi Shota Rustaveli State University, Niko Berdzenishvili Institute, TRANSACTIONS XVI, Batumi, 2023, pp. 1296-1305.
4. Imnaishvili L., Bedineishvili T., Todua T., Chigladze T. SCADA or IoT? III International Scientific-Technical Conference "Modern Problems of Energy and Ways to Solve Them". "Energy" magazine. No. 2(98), Stu. Tbilisi, 2021 p. 111-115.
5. DDS238 type multi-function smart energy meter, <https://electromes.gr/pegasus/download01/download00.php?file=99110058>

## სინქრონიზაციის პრობლემები ქსელური ინვერტორების დაგეგმარებისას

**პეტრე ბოჩიკაშვილი**, ასოცირებული პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [petreboch@yahoo.com](mailto:petreboch@yahoo.com)

**ზაალ აზმაიპარაშვილი**, პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [z.azmaiparashvili@gtu.ge](mailto:z.azmaiparashvili@gtu.ge)

**გურამ მურჯიკნელი**, პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [gurami.murjikneli@gtu.ge](mailto:gurami.murjikneli@gtu.ge)

**იური მოდებაძე**, პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [iurimodebadze@yahoo.com](mailto:iurimodebadze@yahoo.com)

**ანოტაცია.** განხილულია ერთფაზა ქსელური ინვერტორის აგების თავისებურებები. კერძოდ, გაანალიზებულია ინვერტორის ქსელის დაბვასთან სინქრონიზაციის საკითხები. ჩატარებული ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზე შემუშავებულია ინვერტორის ქსელთან სინქრონიზაციის ციფრული მოდელი, რომლის ბაზაზე რეალიზებულია მართვის მიკროპროცესორული სისტემა.

მართვის მოდული უზრუნველყოფს ყველა იმ მოთხოვნას რაც აუცილებელია ინვერტორის ნორმალური ფუნქციონირებისათვის და ქსელში ნომინალური ენერჯის გადაცემისათვის.

**საკვანძო სიტყვები:** ქსელური ინვერტორი, სინქრონიზაცია, მიკროპროცესორული სისტემა, მართვის მოდული.

## Synchronization problems in grid inverter planning

**Petre Bochikashvili**, Assoc. Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [petreboch@yahoo.com](mailto:petreboch@yahoo.com)

**Zaal Azmaiparashvili**, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [z.azmaiparashvili@gtu.ge](mailto:z.azmaiparashvili@gtu.ge)

**Guram Murjikneli**, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [gurami.murjikneli@gtu.ge](mailto:gurami.murjikneli@gtu.ge)

**Yuri Modebadze**, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [iurimodebadze@yahoo.com](mailto:iurimodebadze@yahoo.com)

**Annotation.** The article discusses the construction of a single-phase grid inverter Peculiarities In particular, the grid voltage of the inverter is analyzed Synchronization issues. Conducted experimental investigations Digital synchronization of the inverter with the grid has been developed A model on the basis of which a microprocessor control system is implemented. The management module provides all the requirements that are necessary for the normal functioning of the inverter and nominal in the network for energy transfer.

**Key words:** grid inverter, synchronization, microprocessor system, control module.

**შესავალი,** განახლებადი ელექტროენერჯის წილის მნიშვნელოვანმა ზრდამ საერთო გამომუშავებული ელექტროენერჯის მოცულობაში გამოიწვია ე. წ. ქსელური ინვერტორების შემუშავებისა და დანერგვის აუცილებლობა, რაც წარმატებით განხორციელდა უკანასკნელი ათწლეულის განმავლობაში. მიუხედავად მიღწეული შედეგებისა, ქსელური ინვერტორების განვითარების პროცესი დღესაც გრძელდება.

ეს გამოწვეულია იმით, რომ ჯერ კიდევ არ არის ამოწურული მათი გაუმჯობესებისა და სრულყოფის შესაძლებლობები. ეს შეეხება როგორც ქსელურ, ასევე ჰიბრიდულ გარდამქმნელებს. ქსელში არსებული ეალური მდგომარეობა (წყვეტები, მაღალი რიგის ჰარმონიკები და სხვ.) მოითხოვს ინვერტორის ქსელთან ადაპტაციის, სინქრონიზაციისა და სხვადასვა დაცვითი ფუნქციების თანამედროვე

მეთოდებით რეალიზაციას.

**სამუშაოს მიზანი.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ერთფაზა ქსელური ინვერტორის მართვის მიკროპროცესორული სისტემის შემუშავება ქსელთან ადაპტაციის, კერძოდ სინქრონიზაციის, პრობლემების განხილვა ქსელში რეალური სხვადასხვა ტიპის ხელშეშლების პირობებში,

ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზის საფუძველზე სინქრონიზაციის ციფრული მოდელის შემუშავება და რეალიზაცია Atmega-ტიპის მიკროკონტროლერზე.

**სინქრონიზაციის პრობლემები.** ინვერტორის ქსელთან სინქრონიზაცია ერთ-ერთი აუცილებელი პირობაა იმისათვის, რომ მოვახდინოთ განახლებადი ენერჯის წყაროებიდან მიღებული ელექტოენერჯის ქსელში გადაცემა. ამ პროცესის განსახორციელებლად აუცილებელია ქსელის ძაბვის ყველა პარამეტრის კონტროლი. ასეთებია: ქსელის მიმდინარე ძაბვა, სიხშირე და სხვ. განსხვავებით სხვა ნაშრომებისაგან [1], ქსელიდან სრული გალვანური განმხოლოება უსაფრთხოების მიზნით მოითხოვს განმხოლოების ძალური ტრანსფორმატორის გამოყენებას, რაც აუარესებს სისტემის მასურ-გაბარიტულ პარამეტრებს. მაგრამ სამაგიეროდ სისტემა უკეთ არის დაცული სხვადასხვა ავარიული შემთხვევებისაგან და მაღალსიხშირული ხელშეშლებისაგან. მიუხედავად ამისა, რეალურ ქსელში გვხვდება მთელი რიგი ხელშეშლები, რომელთაც შეუძლიათ მწყობრიდან გამოიყვანონ, ან მოახდინონ უარყოფითი გავლენა სხვადასხვა მოწყობილობის მუშაობაზე. მათ მიეკუთვნება:

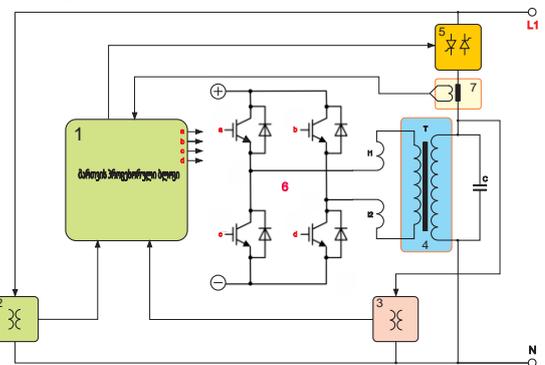
- იმპულსური ხელშეშლები ქსელში გარდამავალი პროცესების დროს;
- ხანმოკლე წყვეტები ქსელის ძაბვის მოწოდებისას;
- კომუტაციური პროცესები ქსელში;
- ძრავები ტირისტორული მართვით;
- ელექტროშედულების აპარატები და სხვ.
- განსაკუთრებით ეს მოვლენები სახიფათოა ქსელური ინვერტორების შემთხვევაში;

➢ უსაფრთხოების მიზნით ქსელური ინვერტორები აღჭურვილია სხვადასხვა ტიპის დაცვით;

➢ მაგალითად, აუცილებელია ინვერტორის გამორთვა ქსელიდან:

- ქსელის გათიშვისას;
- ქსელის ძაბვის დასაშვები ზღვრებიდან გამოსვლისას;
- სინქრონიზაციის დარღვევისას;
- ინვერტორის საკუთარი დაცვის სისტემის აქტივაციის დროს და სხვ.

ნახ. 1-ზე მოცემულია ქსელური ინვერტორის ზოგადი ბლოკ-სქემა. რომელშიც განხორციელებულია ქსელიდან სრული გალვანური განმხოლოება, როგორც ძალური ნაწილის ასევე გამზომი წრედებისათვის. ამ მიზნით გამოყენებულია ძაბვისა და დენის გამზომი ტრანსფორმატორები. ძალური ტირისტორული გასაღების მართვა ხდება ოპტოდრავერების საშუალებით, რომლებიც მიკროპროცესორიდან მიღებული სიგნალების მიხედვით ახორციელებენ მათ ჩართვას ან გამორთვას.



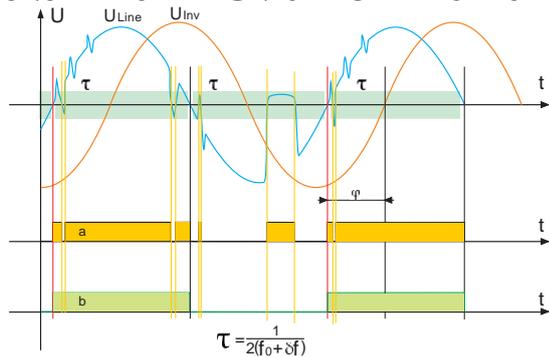
ნახ. 1. ქსელური ინვერტორის ზოგადი ბლოკ-სქემა:

- 1 - მართვის მიკროპროცესორული ბლოკი; 2 - ქსელის ძაბვის გამზომი განმხოლოების ბლოკი;
- 3 - ინვერტორის ძაბვის გამზომი განმხოლოების ბლოკი; 4 - ძალური ტრანსფორმატორი;
- 5 - ინვერტორის ქსელთან მიერთების ძალური გასაღები; 6 - ინვერტორის ძალური ბოგირი;
- 7 - დენის გამზომი წრედი

ქსელის ძაბვასთან სინქრონიზაციის პროცესი მოიცავს ქსელისა და ინვერტორის სინუსოიდური ძაბვებიდან სინქრონიზაციის

კორექტულ გამოყოფას და მათ წინასწარ ფილტრაციას მაღალსიხშირული ხმაურებისაგან. რაც თავის მხრივ იწვევს იმპულსების ფრონტების დაგლუვებას დასაშვებ ფარგლებში. მიუხედავად ამისა, სინქრონიზაციის პროცესი მაინც არ არის სრულყოფილი, იგი არ არის დაცული სხვა ტიპის ხელშემშლელისაგან. მაგალითად, როგორცაა ქსელში ხანმოკლე წყვეტები ნახევარპერიოდის განმავლობაში (მიახლოებით, 3-7 მლწ. ხანგრძლივობის). ამ დროს მოსალოდნელია სინქრონიზაციის დარღვევა, ფაზის რყევა (ე.წ. ჯიტერი), რაც თავის მხრივ იწვევს ძალური გასაღების გამორთვას, ე.ი. წარმოიქმნება ავარიული სიტუაცია.

ნახ. 2-ზე მოცემულია ქსელის და ინვერტორის ძაბვაზე დადებული ხელშემშლელის და წყვეტების შესაძლო ვარიანტები და მათი გავლენა სინქრონიზაციის ფორმირებაზე.



ნახ. 2 ქსელის ძაბვაზე დადებული ხელშემშლელის და წყვეტების გავლენა სინქრონიზაციის ფორმირებაზე:

- a) პროგრამული დამუშავების გარეშე;
- b) მახლოკირებელი ალგორითმის გამოყენებით

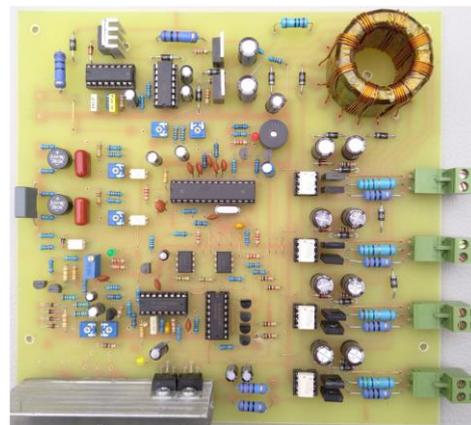
აღწერილი პრობლემების მინიმიზაციის მიზნით გამოყენებულია სინქრონიზაციის მართვის ალგორითმი მიკროპროცესორის ბაზაზე. რიგორც ცნობილია [2], სინქრონიზაციის პროცესი აგებულია **ფაზით სიხშირის თვითაწყობის** პრინციპზე (PLL). ამ დროს ხდება შესასვლელი ორი ძაბვის შესაბამისი სინქრონიზაციის შედარება ფაზურ დეტექტორში, სადაც გადამწყვეტ როლს ასრულებს იმპულსების ფრონტები [3,4]. ნორმალურ სიტუაციაში ფრონტებს შორის ინტერვალი 10 მილიწამის (50 ჰერცის დროს) ტოლი უნდა იყოს, მაგრამ

რეალურად სხვადასხვა ხმაურების ან წყვეტების დროს შეიძლება დაირღვეს ეს ინტერვალი და შესაბამისად მივიღოთ ფაზური რყევები. ამ აპრიორული ინფორმაციის გამოყენებით შემუშავდა მახლოკირებელი ალგორითმი, რომელიც სიგნალის პირველი ფრონტის მიღების შემდეგ  $\tau$  დროით უკეთებს ბლოკირებას ხელშემშლელი ფრონტების მოქმედებას ფაზურ დეტექტორზე. სიხშირის დასაშვები მაქსიმალური გადახრის გათვალისწინებით:

$$\tau = \frac{1}{2(f_0 + df)}$$

სადაც  $f_0$  - ნომინალური სიხშირეა, ხოლო  $df$  - სიხშირის დასაშვები გადახრაა.

ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეიქმნა ქსელური ინვერტორის მართვის ბლოკი.



სურ. 1 ქსელური ინვერტორის მართვის პროცესორული ბლოკი

### დასკვნები

1. გაანალიზებულია ქსელური ინვერტორის აგების თავისებურებები, კერძოდ განხილულია ქსელთან სინქრონიზაციის პრობლემები სხვადასხვა წარმოშობის ხელშემშლელის პირობებში.
2. განხილულია სინქრონიზაციის გაუმჯობესების შესაძლებლობები აპრიორული ინფორმაციის არსებობის შემთხვევაში მახლოკირებელი ალგორითმის გამოყენებით.
3. ექსპერიმენტული ცდების გათვალისწინებით დამზადებულია ქსელური ინვერტორის მართვის ბლოკი Atmega ტიპის მიკროკონტროლერის ბაზაზე.

#### ლიტერატურა

1. Teke A., and Latran M.B. "Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems," Journal of Power Electronics, Vol. 14, No 2, pp. 324-340, Mar. 2014.
2. Collins, Ian. "Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals" Analog Dialogue 52-07, July 2018.
3. Kraitser I.I., Nikonova G.V., Ermolenko A.V. Reducing phase noise by increasing the filtering capacity of the PLL system // Modern problems of science and education. 2014. No. 3.
4. Kuhteckij S. V. Sposoby podstrojki chastoty laboratornogo invertora. Krasnoyarsk: IHKHT SO RAN. 2011. №1. P. 1–18.

#### References (transliterated)

1. Teke A., and Latran M.B. "Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems," Journal of Power Electronics, Vol. 14, No. 2, pp. 324-340, Mar. 2014.
2. Collins, Ian. "Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals" Analog Dialogue 52-07, July 2018.
3. Kraitser I.I., Nikonova G.V., Ermolenko A.V. Reducing phase noise by increasing the filtering capacity of the PLL system // Modern problems of science and education. 2014. No 3.
4. Kuhteckij S. V. Sposoby podstrojki chastoty laboratornogo invertora. Krasnoyarsk: IHKHT SO RAN. 2011, № 1. P. 1–18.

## ქსელური ინვერტორების გამოყენების თავისებურებანი მიკრო და მინი ჰიდროელექტროსადგურებში

**პეტრე ბოჩიკაშვილი**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პოფესორი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [petreboch@yahoo.com](mailto:petreboch@yahoo.com)  
**ზაალ აზმაიპარაშვილი**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [z.azmaiparashvili@gtu.ge](mailto:z.azmaiparashvili@gtu.ge)  
**გურამ მურჯიკნელი**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [gurami.murjikneli@gtu.ge](mailto:gurami.murjikneli@gtu.ge)  
**ომარ ტომარაძე**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [o.tomaradze@gtu.ge](mailto:o.tomaradze@gtu.ge)

**ანოტაცია:** განხილულია ქსელური ინვერტორის გამოყენების თავისებურებები მიკრო ელექტროსადგურებში. კერძოდ განალიზებულია ცალფაზა და სამფაზა ინვერტორების ქსელთან მიერთების შედარებითი უპირატესობები. განხილულია მუდმივმაგნიტებიანი სინქრონული მრავ-გენერატორების გამოყენების შემთხვევა. სადაც გენერირებული სამფაზა ძაბვა წინასწარი გამართვის და შემდგომი შუალედური გარდაქმნის შემდეგ მიეწოდება ქსელურ ინვერტორს. განხილული შეფასებების მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ ქსელური ინვერტორების გამოყენება შედარებით ეფექტურია კლასიკურ სისტემასთან, განსაკუთრებით არასტაბილური გენერაციის შემთხვევაში.  
**საკვანძო სიტყვები:** ქსელური ინვერტორი, მუდმივმაგნიტებიანი გენერატორი, ძალური ამომრთველით, გარდამქმნელი.

## Peculiarities of using grid inverters in micro and mini hydroelectric power stations

**Petre Bochikashvili**, PhD, Assoc. Professor,  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [petreboch@yahoo.com](mailto:petreboch@yahoo.com)  
**Zaal Azmaiparashvili**, PhD, Professor,  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [z.azmaiparashvili@gtu.ge](mailto:z.azmaiparashvili@gtu.ge)  
**Guram Murjikneli**, PhD, Professor,  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [gurami.murjikneli@gtu.ge](mailto:gurami.murjikneli@gtu.ge)  
**Omar Tomaradze**, PhD, Professor,  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [o.tomaradze@gtu.ge](mailto:o.tomaradze@gtu.ge)

**Annotation:** The article discusses the features of using the network inverter in micro power plants. In particular, the relative advantages of connecting single-phase and three-phase inverters to the network are analyzed. The case of using permanent magnet synchronous motor-generators is discussed, where the generated three-phase voltage after pre-rectification and subsequent intermediate conversion is supplied to the grid inverter. According to the considered evaluations, it can be concluded that the use of grid inverters is more efficient than the classical system, especially in the case of unstable generation.

**Key words:** grid inverter, permanent magnet generator, circuit breaker, converter.

**შესავალი.** ელექტროენერჯის გენერაცია მიკრო და მინი ელექტროსადგურებში დაკავშირებულია მრავალ პრობლემასთან, როგორცაა სადერივაციო სისტემის დაპროექტება, ეფექტური ტურბინის შერჩევა, გენერატორის შერჩევის პროცესი მოიცავს ბრუნთა რიცხვების შეთანხმებას, რისთვისაც შესაძლებელია აუცილებელი გახდეს მექანი-

კური რედუქტორის შერჩევა ან სპეციალურად დამზადება საჭირო რედუქციის კოეფიციენტით. გარდა ამისა აუცილებელია ბრუნთა რიცხვის.

**სამუშაოს მიზანი.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ცალფაზა და სამფაზა ქსელური ინვერტორების [1] გამოყენების შესაძლებლობის განხილვა მიკრო ელექტროსადგურების

ქსელში მათი ჩართვის მიზნით. მათი დადებითი და უარყოფითი თვისებების შედარებითი ანალიზის ჩატარება.

**ქსელური ინვერტორი.** როგორც ცნობილია, ქსელური ინვერტორების შექმნის აუცილებლობა გამოიწვია მზის ენერჯის მიღები ნახევარგამტარული პანელებიდან მიღებული მუდმივი ძაბვის ქსელში გადაცემის პრობლემამ. შედგომომ პერიოდში ქსელურმა ინვერტორებმა გამოყენება ჰპოვეს ნებისმიერი წარმოშობის მუდმივი დენის ენერჯის გარდაქმნისათვის. ქარის ელექტროსადგურებისა და მიკრო ჰესების მიერ გამოქმნილი ცვლადი სამფაზა დენის გამართვის შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ქსელური ინვერტორის გამოყენება ამ ტიპის წყაროებიდანაც ქსელში ენერჯის გადაცემა. როგორც ვიცით არსებობს როგორც ერთფაზა ასევე სამფაზა ინვერტორები. საწარმოო ინვერტორები ენერჯის გადასაცემად იყენებენ სამფაზა ქსელს მათი სიმძლავრე განისაზღვრება რამდენიმე ასეული კილოვატით. შედარებით დაბალი სიმძლავრის შემთხვევაში მიზანშეწონილია ერთფაზა ინვერტორების გამოყენება. მათი უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ შესაძლებელია მოდულური სისტემის შექმნა და შესაბამისად საჭირო სიმძლავრის მიღება და ძაბვის მართვა. როგორც ერთფაზა ასევე სამფაზა კონფიგურაციით.

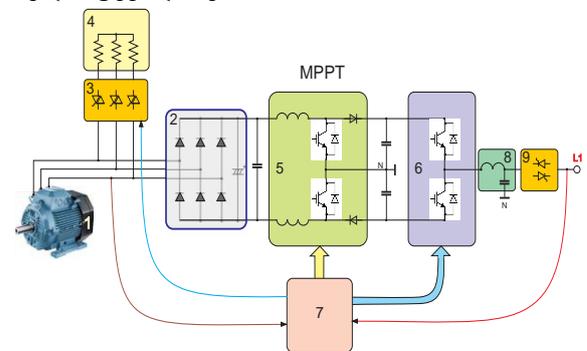
კლასიკური სინქრონული გენერატორის გამოყენების შემთხვევაში კი აღზნების სისტემის მართვა. ყოველივე ჩამოთვლილი მნიშვნელოვნად ზრდის ჰეს-ის თვითღირებულებას. ასეთი მოთხოვნები მარტივდება ქსელური ინვერტორის გამოყენების შემთხვევაში, თუმცა საჭირო ხდება განსხვავებული მართვის ალგორითმის გამოყენება, განსხვავებული მართვის ელემენტებით.

მუდმივმაგნიტებიანი სინქრონული გენერატორების [2] გამოყენების შემთხვევაში სისტემის ფუნქციონალური სქემის შემუშავება. მისი ცალკეული კვანძების ეფექტურობის

გამოკვლევა და მთლიანი სისტემის მოქმედების ალგორითმის განხილვა.

მუდმივმაგნიტებიანი სინქრონული გენერატორის გამოყენებას მიკრო ჰეს-ში გააჩია რიგი თავისებურებები. იმის გამო რომ ამ შემთხვევაში შეუძლებელია აღზნების მაგნიტური ველის ნაკადის მართვა (ფიქსირებული სიდიდით) შესაბამისად შეუძლებელია გენერირებული ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის მართვა. ასეთ სიტუაციაში აუცილებელი ხდება ქსელური ინვერტორის გამოყენება. გარდა ამისა ამ შემთხვევაში საჭირო ხდება დამატებითი ფუნქციონალური კვანძების გამოყენება.

ნახ. 1 -ზე წარმოდგენილია ასეთი ტიპის მიკრო ჰეს-ის სტრუქტურული სქემა. გენერატორის (1) მიერ გენერირებული სამფაზა ძაბვა მიეწოდება ძალურ სრულპერიოდთან სამფაზა გამმართველს(2), რომლის გამოსასვლელზე ფორმირდება ორპოლარული მუდმივი ძაბვა ნეიტრალური გამომყვანის მიმართ შესაბამისი დამაგლუვებელი ტევადობებით.



ნახ. 1. მიკრო ჰეს-ის სტრუქტურული სქემა ქსელური ინვერტორის გამოყენებით:

1 - სინქრონული ძრავ-გენერატორი მუდმივი მაგნიტებით; 2 - ძალური სამფაზა გამმართველი; 3 - ბალასტური დატვირთვის მაკომუტირებელი ტრისტორული ვენტილები; 4 - ბალასტური სამფაზა დატვირთვა; 5 - მუდმივი ძაბვის მუდმივში გარდამქნელი ამამალე-ბელი კონვერტორი; 6 - ქსელური ინვერტორი; 7 - პროცესორული მართვის მოდული; 8 - გამოსასვლელი მაღალი სიხშირეების ფილტრი; 9 - ქსელთან კომუტაციის ძალური გასაღები.

გენერატორის ძაბვა აგრეთვე მიეწოდება სამფაზა მაკომპიუტერებელ ტირისტორულ ბლოკს (3), რომლის გამოსასვლელზე მიერთებულია ბალასტური სამფაზა აქიური დათვირთვა (4).

მუდმივმაგნიტებიანი სინქრონული ძრავ-გენერატორის გამოყენებისა და არასტაბილური ბრუნთა რიცხვის პირობებში, პირველადი ძაბვა და სიხშირე წარმოადგენენ არასტაბილურ პარამეტრებს.

ამიტომ მიკრო ჰესის სტრუქტურულ სქემაში აუცილებელი გახდა დამატებითი კვანძების დამატება ქსელურ ინვერტორთან ადაპტაციისათვის. ამჟამინდელი კონვერტორი (5) აუცილებელია გამართული დაბალი ძაბვის ამჟამინდელისათვის ინვერტორისათვის სასურველ ძაბვის სიდიდემდე, გარდა ამისა, ამ მოდულზე რეალიზებული მაქსიმალური სიმძლავრის ქსელში გადაცემის ალგორითმი MPPT [3] (მაქსიმალური სიმძლავრის წერტილის ტრეკერი), რომლის არსი მდგომარეობს სიმძლავრის გადაცემის მახასიათებელზე მაქსიმუმის წერტილის მონახვა.

MPPT ალგორითმი ფართოდ გამოიყენება მზის სისტემებში, [4] კერძოდ, აკუმულატორების დამუხტვის კონტროლერებში. ავარიული რეჟიმების წარმოქმნის შემთხვევებში აუცილებელი ხდება ქსელური ინვერტორის ამორთვა ქსელიდან ძალური ამომრთველით (9), რაც გამოიწვევს გენერატორის ბრუნთა რიცხვის მკვეთრ ზრდას. ამ შემთხვევისათვის გათვალისწინებულია ბალასტური დატვირთვის (4) მიერთება გენერატორის გამომყვანებზე, რასაც ანხორციელებს ტირისტორული კომუტატორი (3).

**დასკვნა.** გაანალიზებულია ქსელური ინვერტორების გამოყენება მიკრო ჰეს-ში. შემოთავაზებულია სტრუქტურული სქემა MPPT ალგორითმის გამოყენების შესაძლებლობით.

### ლიტერატურა

1. Teke A., and Latran M.B. "Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems," Journal of Power Electronics, Vol. 14. N. 2. pp. 324-340, Mar. 2014.
2. Lokhnin V.V. Non-contact traction motor in the structure of a valve electric drive // Collection of articles. scientific tr. "Electromechanical systems" /ed. A.V. Lepesh-kina. M: MSTU "MAMI". 1995. pp. 38 - 43.
3. Edouard M. and Njomo D. Mathematical Modeling and Digital Simulation of PV Solar Panel using MATLAB Software, I vol. 3, no. 9, pp. 24-32, 2017.
4. Shen W., Ding Y., Choo F.H., Wang P.; Loh P.C. and K., "Mathematical model of a solar module for energy yield simulation in photovoltaic systems," International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 336-341, Nov. 2015.

### References (transliterated)

1. A. Teke, and M. B. Latran, "Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems," Journal of Power Electronics, Vol. 14, No. 2, pp. 324-340, Mar. 2014.
2. Lokhnin V.V. Non-contact traction motor in the structure of a valve electric drive // Collection of articles. scientific tr. "Electromechanical systems" / ed. A.V. Lepesh-kina. M: MSTU "MAMI", 1995. pp. 38 - 43.
3. M. Edouard and D. Njomo, —Mathematical Modeling and Digital Simulation of PV Solar Panel using MATLAB Software, I vol. 3, no. 9, pp. 24-32, 2017.
4. W. Shen, Y. Ding, F. H. Choo, P. Wang; P. C. Loh and K., "Mathematical model of a solar module for energy yield simulation in photovoltaic systems," International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 336-341, Nov. 2015

## გაზის დეტექტორების საერთაშორისო სერტიფიცირების აუცილებლობის შესახებ

ნუგზარ იაშვილი, საქართველოს საინჟინრო აკადემია, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
ევსეი ლევბარგი, სახ.საწარმო „უკრმეტრტესტსტანდარტი“, ქ. კიევი, უკრაინა, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
იური კოვალ, კომპანია SEA, ქ. კიევი, უკრაინა, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**ანოტაცია:** ყოველივე ახალი გამზომ-საკონტროლო ხელსაწყო და მოწყობილობის დამუშავებისა და შემდეგ მისი სერიული წარმოების ლოგიკური სტადიას წარმოადგენს მისი სერტიფიცირება, რომლითაც დასტურდება მოწყობილობის შესაბამისობა გარკვეული ტექნიკური რეგლამენტისადმი, მაგალითად, ქვეყანაში მოქმედი სახელმწიფო და საერთაშორისო სტანდარტებისადმი.

სტუ-ს ავტომატიზაციის სამეცნიერო კვლევითი ცენტრში შექმნილი მავნე გაზების აღმოჩენისა და იდენტიფიცირების ახალი, ინოვაციური მოწყობილობა - გაზის დეტექტორი, წინასწარი ლაბორატორიული გამოცდების შედეგებით ძირითადად აკმაყოფილებს დღეისათვის ევროპაში მოქმედ ორ რეგიონალური საერთაშორისო სტანდარტების 50194 და 50291-ის მოთხოვნებს.

**საკვანძო სიტყვები:** გაზის დეტექტორი, საგამოცდო კამერა, მეტროლოგიური სტენდი, დეტექტორის ტესტირება, სერტიფიცირება.

### About the need for international certification of gas detectors

**Nugzar Iashvili**, Engineering Academy of Georgia, Tbilisi, Georgia, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
**Evsei Levbarg**, Private enterprise "Ukrmeterteststandart", Kyiv, Ukraine, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
**Yuriy Koval**, SEA Company, Kyiv, Ukraine, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**Abstract:** Certification is the logical conclusion of the process of creating a new measuring and control device. Certification of the device confirms its compliance with current technical regulations and standards.

The gas detector, designed and manufactured by us, mainly complies with the requirements of European standards EN 50194 and EN 50291.

**Key words:** Domestic gas. Gas detector. Certification. Device testing. Metrological stand.

**შესავალი.** ყოველივე ახალი საზომ-საკონტროლო ხელსაწყო და მოწყობილობის დამუშავებისა და შემდეგ მისი სერიული წარმოების ლოგიკური სტადიას წარმოადგენს მისი სერტიფიცირება, რომლითაც დასტურდება მოწყობილობის შესაბამისობა გარკვეული ტექნიკური რეგლამენტისადმი, მაგალითად, ქვეყანაში მოქმედი სახელმწიფო და საერთაშორისო სტანდარტებისადმი.

ზოგადად, ხელსაწყოს (მოწყობილობის) სერტიფიცირება წარმოადგენს მისი ხარისხისა და უსაფრთხოების შესაბამისობის დადასტურებას ამ ტიპის პროდუქციისათვის დაწესებული კონკრეტული მოთხოვნებისადმი.

ცხადია, რომ ასეთი პროცედურის ჩატარება შეუძლია მხოლოდ მწარმოებლისაგან და მომხმარებლისაგან დამოუკიდებელ

სპეციალიზირებულ სასერტიფიკაციო ორგანიზაციას, რომელსაც მინიჭებული აქვს შესაბამისი უფლებამოსილება ჩაატაროს გამოცდები და ტექნიკური რეგლამენტის (სახელმწიფო სტანდარტის) ყველა მოთხოვნის დაკმაყოფილების შემთხვევაში გასცეს შესაბამისობის სერტიფიკატი.

სტუ-ს ავტომატიზაციის სამეცნიერო კვლევითი ცენტრში შექმნილი მავნე გაზების აღმოჩენისა და იდენტიფიცირების ახალი, ინოვაციური მოწყობილობა - გაზის დეტექტორი, წინასწარი ლაბორატორიული გამოცდების შედეგებით ძირითადად აკმაყოფილებს დღეისათვის ევროპაში მოქმედ ორ რეგიონალური საერთაშორისო სტანდარტების 50194 და 50291-ის მოთხოვნებს.

**ძირითადი ნაწილი.** გაზის დეტექტორის შექმნის პროცესში გამოირკვა, რომ ჩვენ ქვეყანაში დასვე მეზობელ ქვეყნებში არ არსებობენ გაზის დეტექტორების სერტიფიცირების სპეციალური ორგანოები, ამიტომ იძულებული გავხდით ასეთი დაწესებულება მოგვეძებნა ევროპაში.

მთავარი მიზეზი - თუ, რატომ არ ფუნქციონირებს ჩვენთან მასერტიფიცირებული ორგანო არის ის, რომ არ არსებობს ლაბორატორია რომელიც აღჭურვილი იქნება საჭირო საზომი-საკონტროლო ციფრული ხელსაწყოებით და შესაბამისად ტესტირების სპეციალური მეტროლოგიური სტენდით. ჩინეთიდან და თურქეთიდან ჩვენთან შემოტანილი გაზის დეტექტორები არ შეესაბამებინან საერთაშორისო ევროპულ დონეს და მათ პასპორტებში არც კი არის მითითებული თუ, რა სახის სერტიფიკატები გააჩნია მათ ხელსაწყოებს.

სტუ-ში დამზადებული იქნა 10 ცალი დეტექტორი საერთაშორისო სერტიფიკატის გაცემის უფლების მქონე უკრაინული ორგანიზაციის - სახელმწიფო "უკრმეტატესტ-სტანდარტის" სამეცნიერო საგამოცდო ცენტრში გასაგზავნად.

აღნიშნული უკრაინული ორგანიზაცია აკრედიტებულია საერთაშორისო სტანდარტის Iშ /I B 17065, ხოლო მისი ლაბორატორია და საგამოცდო სამსახური აკრედიტებულია Iშ /I B 17025 სტანდარტით. გარდა ამისა, ის წარმოდგენილია საერთაშორისო ელექტრო-ტექნიკურ კომისიაში, როგორც მაღალი დონის საგამოცდო ლაბორატორია, რომელიც აღჭურვილია თანამედროვე მოწყობილობებითა და დანადგარებით. მაგრამ ცნობილმა ობიექტურმა გარემოებებმა (ჯერ კოვიდის ეპიდემიამ, შემდეგ კი - უკრაინაში მიმდინარე ომმა) ჩაშალა ჩვენს მიერ დაგეგმილი პროცესი.

როგორც ვიცით, სერტიფიცირების ობიექტები იყოფა ორ ჯგუფად: ობიექტები სავალდებულო სერტიფიცირებით და ობიექტები ნებაყოფლობითი სერტიფიცირებით. ცხადია, რომ სერიულად წარმოებული გაზის აღმომჩენი ხელსაწყოები და მათი

ტექნიკური მომსახურება და რემონტი განეკუთვნებიან სავალდებულო სერტიფიცირების ობიექტებს. სხვანაირად, რომ ითქვას ჩვენ მიერ შექმნილმა ახალმა ინოვაციურმა მოწყობილობამ აუცილებლად უნდა გაიარონ სერტიფიცირების პროცესი. ასევე სერტიფიცირებას ექვემდებარება გაზის დეტექტორის ტექნიკური მომსახურებაც.

იმის გამო გაზის დეტექტორები წარმოადგენს გამზომ-საკონტროლო ტექნიკის საშუალებებს, აუცილებელია მათი ძირითადი ტექნიკური მახასიათებლების შეფასება. ამ მოწყობილობებს წაყენებათ მთელი რიგი მოთხოვნები. მათ შორის:

- გაზომვის მექანიკური, ელექტრო-მაგნიტური და კლიმატური პირობები;
- გაზომვის დასაშვები ცდომილება;
- დეტექტორის კონსტრუქციის შემოწმება;
- მოთხოვნები მოწყობილობის გამომავალი სიგნალებისადმი;
- საექსპლუატაციო დოკუმენტების სრული კომლექტის არსებობა.

ეს ჩამონათვალი შეიძლება დაზუსტდეს და მას დაემატოს სპეციალური მოთხოვნები, რომლებსაც შეიცავს საერთაშორისო, თუ ეროვნული მოქმედი სახელმწიფო სტანდარტები დ ტექნიკური რეგლამენტები.

გაზის დეტექტორის შექმნისას, გამოირკვა, რომ არსებული მეტროლოგიური სტენდები ვერ უზრუნველყოფენ მოქმედი საერთაშორისო სტანდარტების შესაბამისად მოწყობილობის შემოწმებასა და მის გამოცდას. ამის გამო მიღებული იქნა გადაწყვეტილება დაგვემუშავებინა და დაგვეზადებინა სპეციალური საგამოცდო ლაბორატორიული სტენდი.

სწორედ აღნიშნულ ლაბორატორიულ სტენდზე, ჩვენ მიერ ჩატარებულ იქნა გაზის დეტექტორის შემოწმება და გამოცდა ევროპული სტანდარტების ძირითადი მუხლების მიხედვით. გარდა ამისა, ჩვენ მიერ გამოყენებულ იქნა იაპონური კომპანია „ფიგაროს“ საგამოცდო კამერაც (იხ. ნახ. 1).



ნახ. 1. იაპონური კომპანია „ფიგაროს“ გამოსაცდელი კამერა

იაპონური გამოსაცდელი კამერის ძირითადი მახასიათებლები მოტანილია ცხრილში:

მახასიათებელი	მნიშვნელობა
კამერის ტევადობა, მლ	5 400
ელექტროკვება, ვოლტი	200
მოხმარებული სიმძლავრე, ვატი	10
მასა, კგ	2,2
გაზარტილი ზომები, მმ	235x180x210

ორ საგამოცდო კამერაზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა გვიჩვენეს, რომ ახალი დეტექტორები ძირითადად აკმაყოფილებენ მოქმედ რეგიონალური (ევროპული) საერთაშორისო სტანდარტების მოთხოვნებს. მაგრამ აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ევროპული სტანდარტების ზოგიერთი მუხლის ტესტირება ჩვენ სტენდზე ვერ მოვახერხეთ.

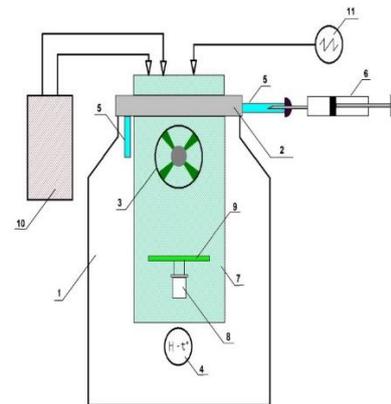
გარდა ათი ცალი საცდელი მოწყობილობის დამზადებისა ჩვენთვის მეტად მნიშვნელოვანი იყო სერტიფიცირების თანმხლები და აუცილებელი დოკუმენტების მომზადება ჯერ ქართულ, შემდეგ კი რუსულ და ინგლისურ ენებზე.

აქვე უნდა ითქვას, რომ თვით სერტიფიცირებას სჭირდება დაახლოებით რვა-თვემდე, რადგან სერტიფიცირებისათვის

საჭირო გამოცდები ითვალისწინებს გაზის დეტექტორის ჩართულ მდგომარეობაში შესწავლასა და ტესტირებას გარკვეული დროის განმავლობაში. ასევე მოითხოვება მოწყობილობის ტესტირება მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმში და რეალურ პირობებში. უნდა დადგინდეს გარემოს ტემპერატურისა და ტენიანობის გავლენა დეტექტორის მუშაობაზე, უნდა მოხდეს გაზის ნაკადის სხვადასხვა სიჩქარით მიწოდება ხელსაწყოზე, ხელსაწყოს რეაგირება სხვა გაზებზე და სხვ.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულიდან ცხადი ხდება, რომ გაზის დეტექტორის სერტიფიცირება მეტად შრომატევადი, რთული და ხანგრძლივი პროცესია.

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია ავტომატიზაციის ცენტრში დამუშავებული და დამზადებული ლაბორატორიული საგამოცდო სტენდი



ნახ. 2. გაზის დეტექტორის გამოსაცდელი ახალი სტენდის სტრუქტურა:

- 1 - ჭურჭელი; 2 - სახურავი; 3 - ვენტილატორი;.
- 4 - თერმომეტრის და ფსიხრომეტრის კომბინირებული ხელსაწყო; 5 - შესამოწმებელი გაზის მიწოდების მილი; 6 - შპრიცი; 7 - გამზომი სქემა
- 8 - სენსორი; 9 - ხაზოვანი გარდამქმნელი; 10 - კვების ბლოკი; 10 - ციფრული ოსცილოგრაფი

**დასკვნა.** გაზის გაჟონვის აღმოსაჩენი და გაზების იდენტიფიცირების მოწყობილობა - გაზის დეტექტორის სერტიფიცირება, განსაზღვრავს მომხმარებლის ნდობას გარკვეული კონკრეტული მოწყობილობის მიმართ და განაპირობებს მის უპირატესობას ბაზარზე

არსებული მსგავსი დანიშნულების ხელსაწყოებზე.

აუცილებელია სერტიფიცირების პროცესის ჩატარების წინ მოწყობილობის შემქმნელს და დამამზადებელს გააჩნდეს გარკვეული დანადგარი - სტენდი და გამზომ-საკონტროლო ციფრული ხელსაწყოები გაზის დეტექტორის სხვადასხვა პარამეტრების წინასწარი შემოწმებისათვის.

#### ლიტერატურა

1. იაშვილი ნ. ბუნებრივი აირის გაუნვის პრობლემებისადმი სისტემური მოდგომის შესახებ. თბილისი, სტუ, მარტვის ავტომატიზებული სისტემები. 2017. №1(23).
2. ფრანგიშვილი ა., იაშვილი ნ., ხუტაშვილი ი. გაზის მომხმარებლის უსაფრთხოების სისტემა. თბილისი //ბიზნეს-ინჟინერინგი. 2020. 21-2.
3. ბალიაშვილი მ., მენაბდე თ. თბილისი, სტუ, სერტიფიცირება. დამხმარე სახელმძღვანელო. 2006.
4. ზედგენიძე ი. თბილისი. სტუ, სერტიფიკაცია შესავალი სპეციალობაში (სახელმძღვანელო). 1999.
5. Гиндикин А., Левбарг Е. и др. Испытания и сертификация газоанализаторов и газосигнализаторов в Украине. Тбилиси/І международная научно-техническая конференция «Современные проблемы энергетики и пути их решения». 2019.
6. Смирнов Ю.А. Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации. М., Лань. 2021. 252 с.
7. Сергеев А.В., Терегеря В.А. Сертификация. М.: Литрес. 2022.
8. Мишин В.М. Метрология. Стандартизация. Сертификация. М. ЮНИТИ-ДАНА, 2009.

#### References

1. Iashvili N. On a systematic approach to the problems of natural gas leakage. Tbilisi. GTU. Journal of Automated Control Systems. 2017. # 1(23).
2. Prangishvili A., Iashvili N., Khutashvili I. System Safe Gas Consumption. Tbilisi. GTU. Jurnal of Business Enjineering. 2020. #20
3. Baliashvili M., Menabde T. Certifikation. Tbilisi.GTU. 2006.
4. Zedgenidze I. Sertifikation. Tbilisi. GTU. 1999.
5. Gindikin A., Levbarg E. et al. Testing and certification of gas analyzers and gas alarms in Ukraine. –Tbilisi, /I international scientific and technical conference “Modern energy problems and ways to solve them”. 2019.
6. Smirnov Yu.A. Control and metrological support of automation equipment and systems. M. Lan. 2021. 252 p.
7. Sergeev A.V., Teregerya V.A. Certification. M.: Litres. 2022.
8. Mishin V.M. Metrology. Standardization. Certification. M.. UNITY-DANA. 2009.

## გაზის გაჟონვის დეტექტორების ტესტირების ლაბორატორიული მეტროლოგიური სტენდის დამუშავება

ნუგზარ იაშვილი, საქართველოს საინჟინრო აკადემია, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
სერგეი ორლოვი, კომპანია ტემიო, ქ. კიევი, უკრაინა, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
კონსტანტინე აგეევი, კომპანია კრისტალი, ქ. ხმელნიცკი, უკრაინა, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**ანოტაცია:** მოხსენებაში განხილულია საყოფაცხოვრებო გაზის გაჟონვის აღმოსაჩენი და გაზების იდენტიფიცირების დეტექტორების გამოცდებისათვის განკუთვნილი სპეციალური სტენდის შექმნის საკითხები. დღეისათვის არსებული სტენდები პრაქტიკულად ვერ აკმაყოფილებენ ევროპული სტანდარტებით განსაზღვრულ საგამოცდო და სასერტიფიკაციო მოთხოვნებს. ამიტომ დადგა საკითხი დამუშავებულყოფიერ ახალი მეტროლოგიური, ლაბორატორიული სტენდი. სტუ-ს ავტომატიზაციის სამეცნიერო-კვლევით ცენტრში დამუშავებული და დამზადებული იქნა საგამოცდო კამერის სხვადასხვა სტრუქტურისა და ფუნქციების ორი მოქმედი ეგზემპლარი. რომელთა გამოყენებითაც ჩატარებული იქნა გაზის დეტექტორის ტესტირება მოქმედი ევროპული სტანდარტების მოთხოვნებით.  
**საკვანძო სიტყვები:** გაზის დეტექტორი, საგამოცდო კამერა, დეტექტორის ტესტირება, მეტროლოგიური სტენდი.

### Laboratory, metrological testing of gas leak detectors processing of the stand

**Nugzar Iashvili**, Engineering Academy of Georgia, Tbilisi, Georgia, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
**Sergey Orlov**, Temio company, Kyiv, Ukraine E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)  
**Konstantine Ageev**, Crystal Company, Khmelnytsky, Ukraine, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**Annotation:** The report discusses the issues of creating a special stand for household gas leak detection and gas identification detector tests. Currently, the existing stands practically cannot meet the examination and certification requirements defined by European standards. Therefore, the question arose to develop a new metrological, laboratory stand. Two working copies of the test chamber with different structures and functions were developed and manufactured at the Automation Scientific Research Center of GTU using which the gas detector was tested according to the requirements of the current European standards.

**Key words:** gas detector, test chamber, detector testing, metrology stand.

**შესავალი.** მიუხედავად ბუნებრივი გაზის საყოფაცხოვრებო მიზნით გამოყენების კომფორტულობისა და სარგებლობისა, ვიცით, რომ მას თან ახლავს მეტად მნიშვნელოვანი უარყოფითი მხარეც: საცხოვრებელ ბინაში ბუნებრივი საყოფაცხოვრებო გაზის (მეთანი) შესაძლო გაჟონვა და დაგროვება, რასაც მოჰყვება აფეთქება და შენობის ნგრევა, ხოლო ტოქსიკური გაზის (CO) გაჟონვის და დაგროვებისას ხდება ადამიანთა მოწამვლა. ასეთ დროს მატერიალური ზარალის გარდა მოსალოდნელია ადამიანთა მსხვერპლიც.

ბუნებრივი და მხუთავი გაზებით გამოწვეული აფეთქებების და მოწამვლის დროს დაშვებულთა და გარდაცვლილთა რიცხვი

წლიდან წლამდე იზრდება. მეტად სავალალოა და დამაფიქრებელი სტატისტიკური მონაცემები. ასევე, უნდა ითქვას, რომ მსგავსი შემთხვევები ხდება საზღვარგარეთ, მათ შორის განვითარებულ ქვეყნებშიც (ინგლისი, საფრანგეთი, იტალია, გერმანია, აშშ და სხვ.). სულ ახლახანს, საფრანგეთში გაზის აფეთქების გამო დაიღუპა 3 და დაშავდა 150 ადამიანი, 2019 წლის 14 ოქტომბერს აშშ-ში, მასაჩუსეტის შტატში დაშავდა 13 და დაიღუპა 1 ადამიანი, 2018 წლის ბოლო დღეს კი რუსეთის ქ. მაგნიტოგორსკში მაღლივი საცხოვრებელი კორპუსის გაზის აფეთქების გამო დაიღუპა 39 ადამიანი.

ყოველივე ზემოთაღნიშნული ნათლად ადასტურებს თუ რამდენად აქტუალური და აუცილებელია გაზის მოწყობილობების სწორი

მონტაჟი და ექსპლუატაცია, რაც მთავარია გაზურის, წყლის გასაცხელებლად და ბინის გასათბობად გაზის დანადგარის გამოყენების წესების ცოდნა და მათი უპირობო დაცვა. უბედური შემთხვევების უმრავლესობის გამომწვევის მიზეზებია გაზის დანადგარების და მოწყობილობების არასწორი მონტაჟი და არასწორი ექსპლუატაცია. ეს კი, თავის მხრივ, განპირობებულია ბუნებრივი გაზის მოხმარების უსართობების წესების არცოდნით და მათი უგულვებლყოფით.

სწორედ საყოფაცხოვრებო გაზის უსაფრთხოდ მოხმარებისთვის არის განკუთვნილი საცხოვრებელ ბინებში გაზის გაჟონვის სიგნალიზატორები (დეტექტორები), მოწყობილობები და მონიტორინგის სისტემები. მათი გამოყენება შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც თვით ეს მოწყობილობები შეესაბამებიან არსებულ სტანდარტებს და ტექნიკურ რეგლამენტებს.. ეს კი ნიშნავს, რომ აუცილებელია მათი შემოწმება, კალიბრება, დამოწმება, მონტაჟი, გამართვა, შემდეგ კი - სწორი ექსპლუატაცია.

უნდა ითქვას, რომ გაზის სიგალიზატორების და დეტექტორების შემოწმება, კალიბრება და დამოწმება მეტად რთული პროცესია, რომელიც შედგება რამდენიმე სხვადასხვა ოპერაციებისგან. ცხადია, გასათვალისწინებელია ისეთი ფაქტორები, როგორცაა წნევა, ტენიანობა და ტემპერატურა. გარდა ამისა, აუცილებელია შესამოწმებელი მოწყობილობის ფუნქციების შესაბამისად მომზადდეს სხვადასხვა კონცენტრაციის გაზი. მაგ. მეთანი - CH<sub>4</sub>, მხუთავი გაზი - CO, წყალბადი - H<sub>2</sub> და ა.შ.



ნახ. 1. გაზის ანალიზატორების შემოწმების სტენდის საერთო ხედი

გაზის გაჟონვის აღმოსაჩენი და გაზის იდენტიფიცირების მოწყობილობის შექმნა

შეუძლებელია გარკვეული ექსპერიმენტული სამუშაოების ჩატარების გარეშე. დღეისათვის არ არსებობს უნივერსალური სტენდი, რომელიც გამოდგება ყველა სახის, დანიშნულების და ტიპის სიგნალიზატორებისა და დეტექტორებისათვის. ამიტომ, თითქმის ყველა კვლევითი ორგანიზაცია და მოწყობილობების დამამზადებელი ქარხანა იძულებული არიან დაამუშავონ და დაამზადონ მხოლოდ მათთვის აუცილებელი და მათ პირობებს მორგებული მეტროლოგიური სტენდები. აქედან გამომდინარე, ჩვენ მიერ დამუშავებული დეტექტორისთვის აუცილებელი გახდა მეტროლოგიური ლაბორატორიული სტენდის შექმნა.

**ძირითადი ნაწილი.** ექსპერიმენტული მეტროლოგიური სტენდის მთავარი დანიშნულებაა სტუ-ს ავტომატიზაციის სამეცნიერო-კვლევით ცენტრში დამუშავებული და დამზადებული გაზის ახალი დეტექტორის ძირითადი ტექნიკური პარამეტრების შემოწმება და მისი მეტროლოგიურგი პარამეტრების მნიშვნელობის დადგენისთვის ექსპერიმენტის ჩატარება. ასევე აუცილებელია ექსპერიმენტული სტენდისადმი ძირითადი ტექნიკური მოთხოვნების ჩამოყალიბება. შემოთავაზებული ახალი, ინოვაციური დეტექტორის ფუნქციები და პარამეტრები განისაზღვრება მოქმედი ევროპული EN 50194 და EN 50291 სტანდარტების მიხედვით. ამიტომ, ამ სტანდარტებით გათვალისწინებული გამოცდები განსაზღვრავენ ექსპერიმენტული სტენდისადმი ძირითად ტექნიკურ მოთხოვნებს.

ახალი ექსპერიმენტული საგამოცდო სტენდის დამზადებამდე, ჩვენ მიერ შესრულებული იყო შემდეგი სამუშაოები:

- არსებული, ანალოგიური საგამოცდო სტენდების დადებითი და უარყოფითი მხარეების ანალიზი;
- კონკრეტული მეტროლოგიურგი სტენდისადმი წაყენებული ტექნიკური მოთხოვნების ჩამოყალიბება;
- მეტროლოგიური სტენდის ფუნქციების განსაზღვრა;
- სტენდის სტრუქტურული და ფუნქციონალური სქემების დამუშავება;
- სტენდის კონსტრუქციული და მექანიკური ნახაზების დამუშავება;
- შესაძენი ნაწილების მასალების და მაკომპლექტებელი ნაწილების ჩამონათვალის შედგენა და კომპლექტაცია.



ნახ. 2. აშშ-ს ერთ-ერთი სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის ლაბორატორიული სტენდი

მხოლოდ ამ სამუშაოების შესრულების შემდეგ გახდა შესაძლებელი სტენდის ლაბორატორიული მოქმედი ნიმუშის დამზადება.

ზოგადად, მეტროლოგიური სტენდი განკუთვნილია გაზოანალიზატორების, გაზის სიგნალიზატორების და გაზის გაჟონვის მონიტორინგის სისტემების შემოწმების, კალიბრების და დამოწმებისათვის. ეს ხდება შესამოწმებელი ხელსაწყოების მგრძობიარე ელემენტზე გაზის მოცულობითი წილის ერთეულის ან გაზის კონცენტრაციის მიზნობრივი კომპონენტების მიწოდებით.

სტენდზე შემოწმების პროცესი შეიძლება განხორციელდეს:

- ხელის რეჟიმში, სადაც ხდება გაზის ბალონების საშუალებით შესამოწმებელი გაზის ნაერთის მიწოდება მოწყობილობების მგრძობიარე ელემენტზე;

- ავტომატურ რეჟიმში, გაზის ნაერთების მიწოდება გენერატორის გამოყენებით.

ჩვეულებრივი მეტროლოგიური სტენდი შედგება გაზის ნაერთების კომპუტაციის დგამისაგან, გამწოვი კარადისაგან და სამუშაო ადგილისაგან.

სტენდის ფუნქციონალურ თავისებურებებს შეადგენს:

- შემოწმებისა და კალიბრების ავტომატური/ ან ნახევრად ავტომატური პროცესი;

- გაზის ნაერთების მომზადება მიზნობრივი გაზის სხვადასხვა კონცენტრაციის განზავებით;

- გაზის ნაერთების ბალონებიდან პირდაპირი მიწოდებით ყოველგვარი შუალედური კომპუტაციის გარეშე;

- შემოწმების შედეგების (პროტოკოლის) ფორმირება და ბეჭდვა;

- შემოწმების შესახებ მონაცემების გადაცემის შესაძლებლობა;



ნახ. 3. გაზის დეტექტორის საცდელი ნიმუშის გამოცდა სტენდზე სტუ-ს ავტომატიზაციის ცენტრის ლაბორატორიაში

### ლიტერატურა

1. იაშვილი ნ. ბუნებრივი აირის გაჟონვის პრობლემისადმი სისტემური მიდგომის შესახებ. სტუ.შრ.კრ. „მას“. N 1(23). 2017.
2. იაშვილი ნ., აზმაიფარაშვილი ზ. და სხვ. ბუნებრივი აირის გაჟონვის სიგნალიზატორებით საცხოვრებელი ბინების და მონიტორინგის სისტემებით მრავალსართულიანი კორპუსების აღჭურვის აუცილებლობის შესახებ. სტუ.შრ.კრ. „მას“. N 1(17). 2014. გვ. 105-110.
3. ფრანგიშვილი ა.ი., იაშვილი ნ.გ., ხუტაშვილი ი.ბ. გაზის მომხმარებლის უსაფრთხოების სისტემა. თბილისი/ყურნალი „ბიზნეს-ინჟინერინგი“. 31-2. 2020.
4. ბალიაშვილი მ, მენაბდე თ. სერტიფიკაცია. თბილისი. სტუ. დამხმარე სახელმძღვანელო. 2006.
5. ზედგენიძე ი. სერტიფიკაცია.შესავალი სპეციალობაში. (სახელმძღვანელო). თბილისი, სტუ. 1999.
6. Гиндикин А., Левбарг Е. и др. Испытания и сертификация газоанализаторов и газосигнализаторов в Украине. Тбилиси. Первая международная конференция «Современные проблемы энергетики и пути их решения». 2019. 7-11 октября.

7. Смирнов Ю.А. Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации. М.: ЛАНЬ. 2021.
8. Шишмарев В.Ю. Метрология, стандартизация и сертификация и техническое регулирование. Москва. изд. Академия, 2016.
9. Сергеев А.В., Терегеря В.А. Сертификация. М.: Лит Рес. 2022.

#### References/(Transliterated)

1. Iashvili N. On a systematic approach to the problems of natural gas leakage. Tbilisi. GTU. Journal of Automated Control Systems. 2017. # 1(23).
2. Iashvili N., Azmaiparashvili Z. and others On the need to equip multi-storey buildings with natural gas leak alarm and monitoring systems. Tbilisi. GTU. Collection of ASU #1(17). 105-107.
3. Prangishvili A., Iashvili N., Khutashvili I. System Safe Gas Consumption. Tbilisi. GTU. Jurnal of Business Enjineering 2020. #20.
4. Baliashvili M., Menabde T. Certification. Tbilisi. GTU. 2006.
5. Zedgenidze I. Sertifikation. Tbilisi. GTU. 1999.
6. Gindikin A., Levbarg E. and others. Testing and certification of gas analyzers and gas alarms in Ukraine. Tbilisi. First international conference "Modern energy problems and ways to solve them." 2019. October 7-11.
7. Smirnov Yu. A. Control and metrological support of automation equipment and systems. Moscow. ed. DOE. 2021.
8. Shishmarev V. Yu. Metrology, Standardization and Certification and technical regulation. Moscow. ed. Academy. 2016.
9. Sergeev A.V., Teregerya V.A. Certification. M.:Lit Res. 2022.

## ლაბორატორიათაშორისი გამოცდის საკონტროლო ნიმუშის მომზადება ენერგეტიკის სფეროს აკრედიტებული საგამოცდო ლაბორატორიებისათვის

ნოდარი აბელაშვილი, ტექ. მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [n.abelashvili@gmail.com](mailto:n.abelashvili@gmail.com)

**ანოტაცია:** საკვალიფიკაციო, ლაბორატორიათაშორისი გამოცდები ორგანიზება მოითხოვს გამოსაცდელი, საკონტროლო ნიმუშისათვის მინიჭებული მნიშვნელობის განსაზღვრისა და მისი დადგენისათვის, ნორმატული დოკუმენტაციის მოთხოვნების, კერძოდ დასაშვებობის კრიტერიუმების დაკმაყოფილების პირობების უზრუნველყოფას. ნაშრომში განხილულია, ლაბორატორიათაშორისი საკვალიფიკაციო გამოცდებისათვის, სერიული წარმოების ობიექტიდან, შესამოწმებელი პარამეტრების წინასწარ ცნობილი ერთგვაროვანებების და სტაბილურობის მაჩვენებლების მქონე საკონტროლო ობიექტის მომზადება ლაბორატორიათაშორისი საკვალიფიკაციო გამოცდებისათვის, რაც მინიჭებული მნიშვნელობისათვის სტანდარტული გადახრისა და განუსაზღვრელობის შეფასებების დადგენას გულისხმობს.

**საკვანძო სიტყვები:** საკვალიფიკაციო ტესტირება, ლაბორატორიათაშორისი გამოცდები, ერთგვაროვნება, სტაბილურობა, განუსაზღვრელობა, შეფასების კრიტერიუმები.

### Preparation of inter-laboratory test control sample for accredited testing laboratories in the field of energy

Nodari Abelashvili, Tech. Candidate of Sciences, Professor  
Technical University of Georgia, Tbilisi, Georgia

**Annotation.** The organization of qualifying, inter-laboratory tests requires the determination of the value assigned to the test, control sample and the provision of conditions for meeting the requirements of normative documentation, in particular the eligibility criteria. The paper discusses the preparation of a control object with pre-known homogeneity and stability indicators of the parameters to be tested for inter-laboratory qualification tests, which involves determining the standard deviation and uncertainty estimates for the given value.

**Keywords:** Qualification testing, Interlaboratory tests, Uniformity, Stability, Uncertainty, Evaluation Criteria.

**შესავალი.** აკრედიტებული საგამოცდო ლაბორატორიების შეფასების მიზნით ჩატარებული ლაბორატორიათაშორისი საკვალიფიკაციო ტესტირების პროცესი ერთდროულად არის, როგორც კომპეტენტურობის პროფესიული შეფასების, ასევე ლაბორატორიის ტექნიკური მდგომარეობის კონტროლის საუკეთესო საშუალება. პროცედურების წარმატებით ჩატარებისათვის მნიშვნელოვანია სტაბილურობის უზრუნველყოფა, რაც გულისხმობს თითოეული მონაწილისათვის კვალიფიკაციის შესამოწმებელი ურთიერთშედარებადი გამოსაცდელი ნიმუშის მიღებას და მისი სტაბილურობის შენარჩუნებას კვალიფიკაციის შემოწმების მთელი დროის განმავლობაში. შესადარებელი პარამეტრის სტანდარტული, რეფერალური მნიშვნელობის მქონე ობიექტი, ძალოვანი ტრანსფორმატორის სახით, ტექნიკურად რთული და მატერიალურად

ძვირადღირებული პროდუქტია. ამიტომ ასეთ შემთხვევებში განიხილება საკონტროლო ნიმუშდ სერიული წარმოების ობიექტის გამოყენება, რომლის საკონტროლო პარამეტრების მნიშვნელობა წინასწარ, საკმარისი სიზუსტითაა დადგენილი და მისი აღწარმოების უზრუნველყოფა აკრედიტებული ლაბორატორიის კვალიფიკაციისა და კომპეტენციის ამოცანას წარმოადგენს.

**სამუშაოს მიზანი.** ლაბორატორიათაშორისი საკვალიფიკაციო გამოცდებისათვის სერიული წარმოების ელექტროტექნიკური მოწყობილობის (ძალოვანი ტრანსფორმატორი) საკონტროლო პარამეტრების მინიჭებული მნიშვნელობების ერთგვაროვანების და სტაბილურობის განსაზღვრის მეთოდის დადგენა, კომპეტენტურობის შეფასების კრიტერიუმის შემოწმება და პროცესის რეალიზაცია.

**ძირითადი ნაწილი.** ლაბორატორიათა-შორისი საკვალიფიკაციო გამოცდა ტარდება წინასწარ მომზადებული პროფესიული ტესტის (PT-Professional testing) სქემის მიხედვით. PT სქემა გულისხმობს წინასწარი კვლევების ჩატარებას საგამოცდო ნიმუშის სტანდარტული გადახრის და გაზომვის განუსაზღვრელობის მინიჭებული მნიშვნელობების დასადგენად, ასევე კვლევებს საგამოცდო ნიმუშების ერთგვაროვნების კრიტერიუმის დაკმაყოფილების მიზნით. კომპეტენტურობის ექსპერიმენტული შემოწმების პროგრამის სტატისტიკური მეთოდების გამოყენების ბლოკ-სქემა [1] განიხილავს საკონტროლო ნიმუშის ერთგვაროვნების გამოკვლევას, რომელიც მოიცავს საკვლევი ობიექტის მაგალითად ძალოვანი ტრანსფორმატორის გრაგნილების იზოლაციის წინააღმდეგ გამოცდას ჩართვიდან 15 და 60 წამის შემდეგ, ამასთან წინააღმდეგ მოქმედ მნიშვნელობად ეს უკანასკნელი ითვლება. გამოცდის შედეგები მიღებულია გაზომვათა სამი სერიის ჩატარებისას ექსპერიმენტში მონაწილე ორი ლაბორატორიის მონაცემების მიხედვით.

ყოველი სერიის, ჩართვის სქემის და ორივე ლაბორატორიის შედეგებისათვის ნაპოვნი გრაგნილების იზოლაციის გაზომვის დაკვირვებათა შედეგების საშუალო არითმეტიკულის (გაზომვის შედეგი) და დაკვირვებათა შედეგების საშუალო კვადრატული გადახრის შეფასებები ( $\bar{X}_{L1}, \sigma_{rL1}$ ), ( $\bar{X}_{L2}, \sigma_{rL2}$ ). ასევე განსაზღვრულია ცალკეული დაკვირვებების გასაშუალებელი მონაცემების საშუალო არითმეტიკული ჩართვის სამივე სქემისათვის, ( $\bar{X}_A = \frac{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2}}{2}$ ) ასევე ( $\bar{X}_B$ ) და ( $\bar{X}_C$ ), ასევე გაბნევის მახასიათებლებისათვის ( $\sigma_{rA}$ ), ( $\sigma_{rB}$ ), ( $\sigma_{rC}$ ). სადაც A, B, C ჩართვის სქემა.

პირობითი აღნიშვნა	ჩართვის სქემა
A	მაღალი ძაბვა - დაბალი ძაბვა+ კორპუსი
B	დაბალი ძაბვა-მაღალი ძაბვა + კორპუსი
C	დაბალი ძაბვა+მაღალი ძაბვა - კორპუსი

ლაბორატორიათაშორის გამოცდების კომპეტენტურობის შეფასების ექსპერიმენტული შემო-

წმების კრიტერიუმ ი უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას

$$u_x \leq 0.3\hat{\sigma} \quad (1)$$

სადაც  $u_x$  - ჩატარებული ექსპერიმენტის სტანდარტული განუსაზღვრელობაა [2], ხოლო  $\hat{\sigma}$  - კომპეტენტურობის შემოწმების სტანდარტული გადახრა, რომელიც გულისხმობს მონაწილე ლაბორატორიების შედეგების სტანდარტულ გადახრებს შორის გაბნევას ფორმულა (2)-ის მიხედვით:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sigma_L^2 - (\sigma_r^2/n)} \quad (2)$$

$\sigma_r$  - განმეორებადობის სტანდარტული გადახრა;  $n$  - თითოეული მონაწილე ლაბორატორიის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების რაოდენობა;  $\sigma_L$  - ლაბორატორიათაშორისი გაზომვის შედეგების სტანდარტული გადახრა, მაგრამ ის თავის მხრივ [3] თანახმაა:

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2} \quad (3)$$

$\sigma_R$  - აღწარმოებადობის სტანდარტული გადახრაა.

რადგან საკონტროლო ნიმუში უნდა აკმაყოფილებდეს (2) პირობას მაშინ (3) და (4) - ის გაერთიანება მოგვცემს რომ:

$$u_x \leq 0.3\hat{\sigma} = 0,3 \left[ \sqrt{\sigma_L^2 - (\sigma_r^2/n)} \right] = 0,3 \sqrt{(\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2})^2 - (\sigma_r^2/n)} = 0,3 \sqrt{\sigma_R^2 - \frac{\sigma_r^2(n-1)}{n}}; \quad (5)$$

ფორმულა (5)-ის გამოსათვლელად და შესაბამისად მიწერილი მნიშვნელობის შესაფასებლად ტარდება წინასწარი კვლევები საკონტროლო ნიმუშზე განმეორებადობისა და აღწარმოებადობის სტანდარტული გადახრების დასადგენად, ხოლო მათი საშუალებით მიწერილი მნიშვნელობის განუსაზღვრელობისა და კომპეტენტურობის შემოწმების სტანდარტული გადახრის შეფასების კრიტერიუმის შემოწმება.

როგორც ცნობილია გაზომვის შედეგების **განმეორებადობა** - ერთი და იგივე სიდიდის გაზომვის შედეგებს შორის სხვაობაა, რომელიც მიღებულია ერთი და იგივე მეთოდით, ერთი ოპერატორის მიერ, ერთი და იგივე საზომი საშუალებით, ერთსა და იმავე ლაბორატორიაში, გაზომვებს შორის დროის მცირე ინტერვალში. იგი **ხასიათდება განმეორებადობის სტანდარტული გადახრით** -  $\sigma_r$ .

გაზომვის შედეგების აღწარმოებადობა - ერთი და იგივე სიდიდის გაზომვის შედეგების სიახლოვის მაჩვენებელია, რომელიც მიღებულია სხვადასხვა ლაბორატორიაში, სხვადასხვა მეთოდებით, გაზომვის სხვადასხვა საშუალებებით, სხვადასხვა დროს, სხვადასხვა ოპერატორის მიერ. იგი ხასიათდება აღწარმოებადობის სტანდარტული გადახრით -  $\sigma_R$ .

ცხრილი 1

		I სერია		II სერია		III სერია	
ანგარიშის შედეგი ჩართვის სქემა		$\bar{X}_I$	$\sigma_{rI}$	$\bar{X}_{II}$	$\sigma_{rII}$	$\bar{X}_{III}$	$\sigma_{rIII}$
	A	ლაბ.1	$\bar{X}_{ლ1}$	$\sigma_{rლ1}$	$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$
		750,1	2,68	750,9	2,13	749	2,94
ლაბ.2		$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$	$\sigma_{rლ3}$	$\bar{X}_{ლ4}$	$\sigma_{rლ4}$
		790,8	2,35	742,8	3,45	743	3,68
$\frac{\bar{X}_{ლ1} + \bar{X}_{ლ2}}{2}$		743,5	3,98	742,8	3,45	743	3,68
	$\bar{X}_{AI,II,III}$	$\bar{X}_{AI} = 746,8$	$\bar{X}_{AII} = 746,85$	$\bar{X}_{AIII} = 745,9$			
	$\sigma_{r AI,II,III}$	$\sigma_{r AI} = 2,1$	$\sigma_{r AII} = 2,47$	$\sigma_{r AIII} = 2,26$			
B	ლაბ.1	$\bar{X}_{ლ1}$	$\sigma_{rლ1}$	$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$	$\sigma_{rლ3}$
		790,8	2,35	793	3,01	791,5	3,1
	ლაბ.2	$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$	$\sigma_{rლ3}$	$\bar{X}_{ლ4}$	$\sigma_{rლ4}$
		775,8	2,8	776,6	3,77	774,9	2,84
	$\frac{\bar{X}_{ლ1} + \bar{X}_{ლ2}}{2}$	783,8	2,94	784,85	2,26	783,2	2,8
	$\bar{X}_{BI,II,III}$	$\bar{X}_{BI} = 783,8$	$\bar{X}_{BII} = 784,85$	$\bar{X}_{BIII} = 783,9$			
	$\sigma_{r BI,II,III}$	$\sigma_{r BI} = 2,94$	$\sigma_{r BII} = 2,26$	$\sigma_{r BIII} = 2,5$			
C	ლაბ.1	$\bar{X}_{ლ1}$	$\sigma_{rლ1}$	$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$	$\sigma_{rლ3}$
		1091,4	2,72	1090,9	2,96	1090,8	3,12
	ლაბ.2	$\bar{X}_{ლ2}$	$\sigma_{rლ2}$	$\bar{X}_{ლ3}$	$\sigma_{rლ3}$	$\bar{X}_{ლ4}$	$\sigma_{rლ4}$
		11098,5	3,84	1201,9	1,73	1200,9	3,21
	$\frac{\bar{X}_{ლ1} + \bar{X}_{ლ2}}{2}$	1144,95		1146,4		1145,9	
	$\bar{X}_{CI,II,III}$	$\bar{X}_{CI} = 1145$	$\bar{X}_{CII} = 1147$	$\bar{X}_{CIII} = 1146$			
	$\sigma_{r CI,II,III}$	$\sigma_{r CI} = 2,85$	$\sigma_{r CII} = 2,4$	$\sigma_{r CIII} = 2,24$			

სამ სერიად ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები ჯამური სახით წარმოდგენილია ცხრილი 1-ის სახით.

მიღებული მონაცემები საშუალებას გვაძლევს გამოსაკვლევო ობიექტისა და გასაზომი პარამეტრების მიმართ დავადგინოთ როგორც მინიჭებული მნიშვნელობის, ასევე სტანდარტული გადახრის შეფასება.

განმეორებადობის სტანდარტული გადახრა I სერიისათვის ვიანგარიშით ლაბორატორიების შედეგების ჯამის ნახევრების მიხედვით ცალ-ცალკე გაზომვების სერია I-სთვის  $\sigma_{r AI}$ ,  $\sigma_{r AII}$ ,  $\sigma_{r AIII}$ , ხოლო სერიათაშორისი სტანდარტული გადახრა, როგორც სამი სერიის დაკვირვებათა სერიების გაზომვის შედეგების გაზნვის მაჩვენებელი ცხრილი 1,2,3 მონაცემების მიხედვით. [4].

$$\sigma_{rA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_A)^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

სადაც  $n$  გაზომვათა სერიების რაოდენობის მაჩვენებელია და უდრის 3.

$$\sigma_{rA} = 0.31; \quad \sigma_{rB} = 0.33; \quad \sigma_{rC} = 0.145.$$

სერიათაშორის გაზომვების საშუალო არითმეტიკული იქნება

$$\bar{X}_{rA} = 746,5; \quad \bar{X}_{rB} = 784,18; \quad \bar{X}_{rC} = 1144,97.$$

მიღებული შედეგების მიხედვით შეგვიძლია ვიანგარიშით განმეორებადობის სტანდარტული გადახრა ასეთი წესით

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sigma_{rA}^2 + \sigma_{rB}^2 + \sigma_{rC}^2}{3}} = 0.27$$

ცხრ. 1-ის მონაცემებიდან, ლაბორატორიების სტანდარტული გადახრებიდან შესაძლებელია ვიანგარიშით ჯერ სერიათაშორისი

$$\sigma_{rL1} = \sqrt{\frac{\sigma_{rAL1}^2 + \sigma_{rBL1}^2 + \sigma_{rCL1}^2}{3}} = \pm 0,54$$

$$\sigma_{rL2} = \sqrt{\frac{\sigma_{rAL2}^2 + \sigma_{rBL2}^2 + \sigma_{rCL2}^2}{3}} = \pm 0,6,$$

ხოლო შემდეგ გაერთიანებული ლაბორატორიათაშორისი სტანდარტული გადახრა .

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sigma_{rL1}^2 + \sigma_{rL2}^2}{2}} = 0,57$$

ექსპერიმენტის ჩატარებისას გამოყენებული საზომი ხელსაწყოების კალიბრების მონაცემების (B ტიპის განუსაზღვრელობა. ცხრ. 2.)

ცხრილი 2

მუდმივი დენის ბოგირი P4833	$U_{0,95} = 0.02 \Omega. k=2$
მიკროომეტრი	$U_{0,95} = \pm 0,05 \mu Om. k=2$

და ექსპერიმენტის სტანდარტული გადახრის (A ტიპის განუსაზღვრელობა) მიხედვით და (5) ფორმულით შემოწმდება (1) კრიტერიუმის შესრულების პირობა:

$u_x \leq 0.3\hat{\sigma}$  ანუ

$$\hat{\sigma}_A = 0,3 \sqrt{\sigma_R^2 - \frac{\sigma_r^2(n-1)}{n}} = 0,146.$$

შესაბამისად კომპეტენტურობის შეფასების კრიტერიუმისთვის

$$u_x = 0,027 \leq \hat{\sigma}_A = 0,3 \cdot 0,146 = 0,044$$

მინიჭებული მნიშვნელობის ნაპოვნი სიდიდეების გათვალისწინებით, დასაშვებობის (1) პირობა კმაყოფილდება.

### დასკვნა

მოხსენებაში განიხილება კონკრეტული საკვალიფიკაციო გამოცდების პრაქტიკიდან, რეალური ობიექტისათვის, როგორც საკონტროლო ნიმუშისათვის, გამოსაცდელი და კვალიფიკაციის შესაფასებელი პარამეტრების მომზადების თეორიული და პრაქტიკული საკითხები, მათ შორის განმეორებადობისა და აღწარმოებადობის სტანდარტული გადახრის და მინიჭებული მნიშვნელობის დადგენის კომპეტენტურობისა და მისაღებობის საკითხები.

ამ საკითხების უგულველყოფამ შესაძლებელია ლაბორატორიის კომპეტენციის შეფასების მცდარ დასკვნამდე მიგვიყვანოს.

შემოთავაზებული და პრაქტიკულად დასაბუთებულია შემოთავაზებული მიდგომის მართზომიერება.

### ლიტერატურა

1. ГОСТ Р ИСО 13528-2010-2010. Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний М.: Стандартиформ.
2. [GUM:1993 Guide to the expression of uncertainty in measurement BIPM; IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML2.
3. ISO 5725-2 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results-Part2; Basic method for the determination of repeatability and reproducibility f a standard measurement method;
4. Abelashvili Nodari, Nika Abelashvili. (2021) Uniformity of Results of Multiple Measurement Series.

During Preparing a Control Sample for Qualification Tests. *World Science*. 3(64). March 2021. P 57-59  
doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30032021/7513.

### References (transliterated)

1. GOST R ISO 13528-2010-2010. Statistical methods. Application in experimental testing of competence through interlaboratory comparative tests M.: Standartinform.
2. [GUM:1993 Guide to the expression of uncertainty in measurement BIPM; IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML2.
3. ISO 5725-2 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results-Part2; Basic method for the determination of repeatability and reproducibility f a standard measurement method;
4. Abelashvili Nodari, Nika Abelashvili. (2021) Uniformity of Results of Multiple Measurement Series.

During Preparing a Control Sample for Qualification Tests. *World Science*. 3(64). March 2021. P 57-59  
doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30032021/7513.

## მწვანე გამოთვლების მოთხოვნების უზრუნველყოფა ინფორმაციულ ტექნოლოგიებში

**მედია თევდორაძე**, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [medeat@gtu.ge](mailto:medeat@gtu.ge)

**თამთა რუხაძე**, აკადემიური დოქტორი, ასისტენტ-პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [tamtarukhadze@gtu.ge](mailto:tamtarukhadze@gtu.ge)

**მაია სალთხუციშვილი**, აკადემიური დოქტორი, ასისტენტ-პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, E-mail: [saltkhutsishvilimaia08@gtu.ge](mailto:saltkhutsishvilimaia08@gtu.ge)

**ანოტაცია.** განხილულია მსოფლიოსთვის უმნიშვნელოვანესი საკითხი - მდგრადი განვითარების კონცეპცია და მასთან მიმართებაში მწვანე ინფორმაციული ტექნოლოგიები. დახასიათებულია მწვანე ინფორმაციული ტექნოლოგიების ცნება, მათი განვითარების ძირითადი პრინციპები. გაანალიზებულია თანამედროვე ორგანიზაციების მიერ მწვანე ტექნოლოგიების გამოყენება, განხილულია მწვანე ინფორმაციული ტექნოლოგიების განვითარების და გამოყენების პრობლემები და ძირითადი ტენდენციები. მოყვანილია რეკომენდაციები ჩვეულებრივ ორგანიზაციებსა და იტ-კომპანიებში მწვანე იტ-ის გამოყენებასთან დაკავშირებით

**საკვანძო სიტყვები:** მდგრადი განვითარება, მწვანე ინფორმაციული ტექნოლოგიები

## Ensuring Green Computing Requirements in Information Technology

**Medea Tevdoradze**, PHD, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [medeat@gtu.ge](mailto:medeat@gtu.ge)

**TamTa Rukhadze**, PHD Assistant-Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [tamtarukhadze@gtu.ge](mailto:tamtarukhadze@gtu.ge)

**Maia Saltkhutsishvili**, PHD Assistant-Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [saltkhutsishvilimaia08@gtu.ge](mailto:saltkhutsishvilimaia08@gtu.ge)

**Annotation.** The article discusses the most important issue for the world - the concept of sustainable development and green information technologies in relation to it. The concept of green information technology, main principles of their development are characterized. The usage of green technologies by modern organizations are analyzed, the problems and main trends of the development and usage of green information technologies are discussed. Recommendations regarding the usage of green IT in organizations are given.

**Key words:** sustainable development, green information technologies

**შესავალი.** როგორც ცნობილია, მდგრადი განვითარება არის რესურსების გამოყენების, ადამიანებსა და ბუნებას შორის ურთიერთ-ქმედების მოდელი და ინოვაციებზე დაფუძნებული ცივილიზაციის განვითარების მოდელი, რომელიც გარემოს შენარჩუნებასთან ერთად აღწევს მიმდინარე თაობის სასიცოცხლო მოთხოვნილებების დაკმაყოფილებას პიროვნული და საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის გაძლიერებით, რაც მთავარია, მომავალი თაობების ამ შესაძლებლობის ჩამორთმევის გარეშე [1]. მდგრადი განვითარება მოიცავს სამ მიმართულებას: ეკონომიკას, სოციალურ სფეროს და გარემოს დაცვას. როგორც ჩანს, მოცემული განმარტებიდან, მდგრადი განვითარებისათვის ფრიად მნიშვნელოვანია ენერგოდამზოვი და გარემოს ზიანისგან თავისუფალი ტექნოლოგიების შემუშავება, განვითარება და გამოყენება

[2]. ამ თვალსაზრისით გამონაკლისს არც ინფორმაციული ტექნოლოგიები (იტ) წარმოადგენს, რომლებმაც მიიღეს დასახელება „მწვანე“.

მწვანე ინფორმაციული ტექნოლოგიები (მწვანე იტ) - წარმოადგენს იტ-ის გარემოზე ზეგავლენის შემცირების შესწავლასა და პრაქტიკას, ასევე იტ-ის გამოყენებას ინსტრუმენტის სახით მდგრადობის ამაღლების მიზნით სხვადასხვა სფეროში. მწვანე იტ-ი არის ეკოლოგიურად სუფთა, ვინაიდან ისინი ფარავენ ენერგოეფექტურობის, ჯანმრთელობის და უსფართოების, რესურსების გადამუშავების, რესურსების განახლების და კიდევ სხვა მრავალ საკითხს.

მწვანე იტ-ის მიზანს წარმოადგენს საშიში მასალების გამოყენების შემცირება, ენერგო მაქსიმალური ამაღლება პროდუქტის მთელი

სასიცოცხლო ციკლის განმავლობაში და უტილიზაციის სათანადო მიდგომების მხარდაჭერა [3].

მწვანე იტ-ის გამოყენება ხდება სულ უფრო აუცილებელი და აქტუალური ბიზნესსა და სახელმწიფო ორგანიზაციებში ციფრული ტექნოლოგიების ფართო დანერგვა-გამოყენება დაკავშირებით: კომპიუტერები, სერვერები, ღრუბლოვანი სისტემები - მოითხოვს სულ უფრო მეტ ენერჯის რესურსებს, და ასევე იწვევს ნახშირორჟანგის გამოყოფას და ელექტრონული ნარჩენების ზრდას. კვლევების შესაბამისად, იტ-ტექნოლოგიებს გააჩნიათ საკმაოდ დიდი წილი სათბურის გაზების გლობალურ გამოყოფაში. გარკვეული მონაცემებით ეს წილი 2030 წლისთვის მიაღწევს 14,5%.

**ძირითადი მიზანი.** ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს იმ რეკომენდაციების შემუშავება, რომელიც ორგანიზაციებს, კომპანიებს საშუალებას მისცემს გადავიდნენ მწვანე იტ-ზე, რაც ფრიად მნიშვნელოვანია დღევანდელი საზოგადოებისათვის ენერჯო და სუფთა ეკოლოგიის უზრუნველყოფისთვის.

**ძირითადი ნაწილი.** უნდა აღინიშნოს, რომ მწვანე IT მნიშვნელოვანია რამდენიმე მიზეზის გამო. აქ წარმოდგენილი არის სამი მათგანი:

- **კლიმატის შეცვლა.** კორპორატიული IT გამოყოფს უამრავ სათბურის გაზს და ხელს უწყობს კლიმატის ცვლილებას. ბიზნესმა უნდა აკონტროლოს და შეამციროს ემისიები გარემოში, ისევე როგორც სხვა ტოქსიკური ელექტრონული ნარჩენები, რომლებიც აბინძურებენ გარემოს;

- **რეგულაციების შესაბამისობა.** ბიზნესი სულ უფრო მეტად ექვემდებარება ზეწოლას მთავრობისა და საზოგადოების მხრიდან, რათა შემცირდეს მისი გარემოზე ზემოქმედება. მწვანე IT იძლევა რესურსების უფრო ეფექტურ გამოყენებას, ნარჩენების შემცირებას და გადამუშავების პროცენტის გაზრდას. ეს ეხმარება ბიზნესს დაემორჩილოს სამთავრობო რეგულაციებს;

- **კონკურენტული უპირატესობა.** კომპანიები იყენებენ გარემოსდაცვით, სოციალურ და მმართველობის ანგარიშებს (ESG - «Environment, Social, Governance»). ეს არის სტრატეგია, რომელიც მოიცავს ღია მენეჯმენტს, ზრუნვას ეკოლოგიასა და ადამიანებზე) მწვანე IT პრაქტიკის შესახებ ინფორმაციის გასაჯაროების მიზნით. პოზიტიური ESG მიმზიდველია კლიენტები და ინვესტორებისთვის. ორგანიზაციების IT-განყოფილებების უმეტესობა იყენებს ESG-ს,

როგორც შესყიდვის კრიტერიუმს საინფორმაციო და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების შერჩევისას

ჩნდება შეკითხვა: როგორ და რა გზებით ახდენენ ცუდ ზეგავლემას კომპანიები გარემოზე ჩვეულებრივი იტ-ის გამოყენებით? მავნე ზეგავლენის განსაკუთრებული წყაროებში შეგვიძლია განვიხილოთ შემდეგი [4]:

- **მონაცემთა დამუშავების ცენტრები** - აქ საკმაოდ რთული გარემოა რომელიც მრავალ ტექნოლოგიას მოიცავს და ხარჯავს უზარმაზარ ენერჯიას;

- **ქსელური აღჭურვილობა** - მარშრუტიზა კომპუტატორებო და სერვერები მოითხოვენ ენერჯიას ინფორმაციის შესანახად და გადასაგზავნად ქსელში;

- **მონაცემთა საცავები** - ინფორმაციის გადაადგილება ქსელში და მისი შენახვა მოითხოვს ენერჯიას. და თუ ეს შენახვა არაეფექტურად არის ორგანიზებული - ცალსახად იზრდება ელექტროენერჯიის მოთხოვნაც;

- **საბოლოო მომხმარებლების აღჭურვი** - უმრავლეს შემთხვევაში კომპანიებში სამუშაო ადგილებზე გაცილებით მეტი კომპიუტერული აღჭურვილობა გამოიყენება, ვიდრე სხვა სახის. თან მათ ძალიან ხშირად უტილიზაციას უტარებენ და ცვლიან;

- **ჩიპები** - კომპიუტერული ჩიპები მოიხმარენ ენერჯიას, ზოგიერთი მადგანი კი საკმაოდ დიდ ენერჯიას, მაგალითად, გრაფიკული პროცესორები, რომლებიც გამოიყენება სამანქანო სწავლებისთვის ხელოვნურ ინტელექტში;

- **პროგრამული უზრუნველყოფა** - ასევე დიდ გავლენას ახდენს გარემოზე. მათ შორის ის დანართები, რომლებიც დიდი მოცულობის მონაცემებს გადასცემენ ქსელში. მითუმეტეს, თუ კოდი იყენებს არაეფექტურ მეთოდებს და ფუნქციებს;

- **ხელოვნური ინტელექტი** - ხელოვნური ინტელექტი და სამანქანო სწავლება - ტექნოლოგიებია, რომლებიც მოითხოვს უდიდეს გამოთვლით რესურსებს ნახშირბადის დიდი კვალით;

- **კრიპტოვალუტა** - მაინინგი მოითხოვს დიდ რესურსებს, დაახლოებით იმავე მოცულობით, რაც მონაცემთა დამუშავების ტრადიციული ცენტრები მთელს მსოფლიოში.

როგორც ვხედავთ, ბიზნეს-კომპანიებს, სამწუხაროდ, გააჩნიათ იმ გზების საკმაოდ ფართო "არსენალი", რომლითაც შესაძლებელია

გარემოს დაზიანება. რას უპირისპირებს აღნიშნულ პრობლემებს მწვანე იტ-ი? მწვანე იტ-ი ეფუძნება რამდენიმე მნიშვნელოვან პრინციპს [5]:

**1. აღჭურვილობის ენერგოეფექტურობა:** ენერგოეფექტური კომპონენტებისა და მოწყობი გამოყენება, რომლებიც ნაკლებ ენერგიას მოიხმარენ, მაგრამ უზრუნველყოფენ მაღალ მწარმოებლობას;

**2. უტილიზაცია და გადამუშავება:** ძველი აღჭურვილობის სწორი უტილიზაცია და ელექტრონული ნარჩენების გადამუშავება გარემოზე ნეგატიური ზეგავლენის მინიმი მიზნით;

**3. ვირტუალიზაცია და ღრუბლოვანი ტექნოლოგიები:** ვირტუალური მანქანების და ღრუბლოვანი რესურსების გამოყენება იძლევა საშუალებას ეფექტურად იყოს გამოყენებული გამოთვლითი რესურსები, რაც ამცირებს ელექტროენერჯის გამოყენებას და ფიზიკური აღჭურვილობის რაოდენობას;

**4. ენერგოდაზოგვა ოფისებში:** ენერგო სისტემების და სენსორების გამოყენება რათა შემცირდეს ენერგოდანახარჯები საოფისე და საწარმოო ფართებზე;

**5. გაგრილების სისტემები:** სასერვერო და კომპიუტერული სისტემების გაგრილების რაციონალური მართვა - ოპტიმიზაცია ენერგომოხმარების შემცირების მიზნით;

**6. თანამშრომლების ცნობიერება:** თანამშრომ მიერ იტ-რესურსების ეკოლოგიურად პასუხისმგებელი გამოყენების ცნობიერების ამაღლება, ანუ სწავლება და მწვანე იტ-ის კონცეფციის პიპულარიზაცია კომპანიებში.

აღნიშნული პრინციპები სვადასხვანაირ გამოხატულებას პოულობს ბიზნესსა და მონაცემთა დამუშავების ინდუსტრიაში. ეს შეიძლება იყოს:

**1. ენერჯის მოხმარების შემცირება მონაცემთა ცენტრებში:** მონაცემთა ცენტრები, სადაც დიდი რაოდენობით მონაცემები ინახება და მუშავდება, მოიხმარენ უზარმაზარ ენერგიას სერვერებისა და გაგრილების სისტემების მუშაობისთვის. ენერგოეფექტური აღჭურვი და ვირტუალიზაციის ტექნოლოგიების გამოყენება საშუალებას იძლევა შემცირდეს ენერჯის მოხმარება და მოხდეს სერვერული რესურსების გამოყენების ოპტიმიზაცია. ამასთან ერთად, ორგანიზაციებში სულ უფრო და უფრო ხორციელდება ღრუბლებზე დაფუძნებული

სერვისების გამოყენება, რაც თავის თავად, იძლევა ეკონომიას;

**3. ოფისისა და სამუშაო ადგილის გაუმჯობესება:** ოფისებში სენსორების და კონტროლის სისტემების დანერგვამ შეიძლება შეამციროს ენერჯის მოხმარება განათებისთვის, კონდიციონერებისა და გათბობისთვის, ასევე ეფექტურად მართოს კომპიუტერების და პერიფერიული მოწყობილობების გამოყენება. მაგალითად შეგვიძლია განვიხილოთ ურთიერთდაკავშირებული უკაბელო სენსორები და ინფორმაციული სისტემები, რომლებიც ახორციელებენ შემდეგი ობიექტების კონტროლს: აღჭურვილობა, კონვეიერები, ასაწყობი აპარატები, რეაქტორები და სხვა. ასეთი ავტომატიზებული სისტემა რეალური დროის რეჟიმში ამუშავებს მონაცემებს, რომლებიც მიღებულია სენსორებიდან, ის დროულად რეაგირებს ყველანაირი მაჩვენებლების ცვლილებაზე საწარმოში, გასცემს შეტყობინებებს ავარიებსა და პრობლემური სიტუაციების შესახებ, ანალიზს უკეთებს დანადგარების გამოყენების ეფექტურობას, აფასებს გარემოს დაბინძურების დონეს და გამომუშავებული ნარჩენების მოცულობას [6];

**4. ეკოლოგიურად პასუხისმგებელი გადაწყვეტილებები მობილურ ტექნოლოგიებში:** ენერგოეფექტური მობილური მოწყობილო და პროგრამული აპლიკაციების გამოყენება და შემუშავება, ასევე გარემოზე მინიმალური ზემოქმედების მქონე მასალების გამოყენება;

**5. საქმიანობის გაციფრვა და დისტანციური მუშაობა:** დისტანციურ მუშაობაზე გადასვლა და ქაღალდზე დაფუძნებული პროცესების გაციფრვა ხელს უწყობს ქაღალდისა და ენერჯის მოხმარების შემცირებას ზოგადად და ბეჭდვისთვის, ასევე ამცირებს ტრანსპორტის გამონახობლქვს თანამშრომლების მგზავრობისას;

**6. ნარჩენების შემცირება და გადამუშავება:** ელექტრონული ნარჩენები, როგორცაა მოძველებული აღჭურვილობა და კომპონენტი შეიძლება გადამუშავდეს, რაც ამცირებს მათ უარყოფით გავლენას გარემოზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ მწვანე იტ-ის დანერგვას გააჩნია თავისი წინააღმდეგობები და პრობლემები. პირველი არის ის, რომ მწვანე ტექნოლოგიები აღიქმევა როგორც უფრო ძვირი. მართალია, ეკოლოგიური გადაწყვეტილებები თავდაპირველად ასოცირდება მაღალ საწყის დანახარჯებთან, მაგრამ ისინი გაცილებით უფრო

ეფექტურია და ეკონომიურია სამსახურის მთელი ვადის განმავლობაში.

ზოგ შემთხვევაში მენეჯერები სკეპტიკურად უყურებენ მწვანე იტ-ის. მათ არ სჯერად, რომ მწვანე იტ-ი სასურველ შედეგებს მისცემთ მათ და მათ საწარმოს ენერგოდაზოგვის და გარემოს დაცვის, წარმოების ოპტიმალურად მუშაობის თვალსაზრისით.

გარდა ამის, მწვანე იტ-ზე გადასვლამ შეიძლება მკვეთრად გაართულოს კომპანიის ოპერაციები, რაც საკმაოდ არასასურველია კონკურენტულ პირობებში. მაგრამ ეს დამახასიათებელია გადასვლის საწყისი ეტაპისთვის. როდესაც ის ჩაივლის, მწვანე იტ-ი იძლევა საშუალებას შემცირდეს დანახარჯები, გახდეს ინოვაციებისა და ახალი საბაზრო შესაძლებლობების კატალიზატორი.

**ტენდენციები.** მიუხედავად ზემოდ აღნიშნული პრობლემების, აშკარად ყალიბდება ტენდენციები, თუ რა მიმართულებებით მიმდინარეობს მწვანე იტ-ის განვითარება და მათი გამოყენება კომპანიებსა და ორგანიზაციებში. სამომავლო ტენდენციებში მწვანე იტ-ის გამოყენებასთან მიმართებაში შესაძლებელია გამოიკვეთოს შემდეგი ყველაზე მნიშვნელოვანი:

**1. ღრუბელზე მზარდი გადასვლა.**

პანდემიის პირობებში დისტანციური მუშაობა რეალობად იქცა, ფაილებისა და პროგრამების შესანახი ღრუბლოვანი გამოთვლით სისტემებზე გადასვლა დაეხმარა ბიზნესს ენერჯის მოხმარების შემცირებაში. ეს გახდა არა მხოლოდ მოსახერხებელი, არამედ ეკოლოგიურად სუფთა გადაწყვეტა;

**2. ინტელექტუალური ავტონომიური სისტემების გამოყენება,** რომლებიც დისტანს მონიტორინგისა და კონტროლის საშუალებას იძლევა. ისინი ხედავენ ტექნოლოგიის პოტენციალს ხარჯების შესამცირებლად და უსაფრთხოების გასაუმჯობესებლად;

**3. 5G ტექნოლოგიის ფართო დანერგვა და გამოყენება.** შეიძლება ითქვას, რომ 5G ტექნოლოგია უფრო დიდ როლს შეასრულებს მდგრადობისა და გარემოს დაცვაში სხვადასხვა გამოყენების შემთხვევების მეშვეობით, რაც იწვევს პოზიტიურ ცვლილებებს საზოგადო მაგალითად შეიძლება დასახელდეს ისეთი სფეროები, როგორც არის სოფლის მეურნეობა, ტელემედიცინა და განათლება. STL Partners ორგანიზაციის მოხსენებაში ნათქვამია, რომ 5G ინტენსიური გამოყენება 2030 წლისთვის

სათბურის გაზების გლობალურ გამოყოფას 1,7 მილიარდი ტონით შეამცირებს;

**4. მუშაობის მართვის ავტომატიზაციის მუდმივი ზრდა მონაცემთა შეგროვების, შენახვისა და გამოყენების გზით.** აღნიშნული გზით ყოველდღიური სამუშაო პროცესები ავტომატიზირებული იქნება დაბალი ნახშირბადის ტექნოლოგიების გამოყენებით.

**რეკომენდაციები.** სხვადასხვა სფეროს კომპანიებს შესაძლებელია მიეცეს შემდეგი რეკომენდაციები, თუ რა გზით უნდა განახორციელონ მწვანე იტ-ის მოთხოვნების დაკმაყოფილება:

- იტ-ის ცენტრალიზებული მართვის უზრუნველყოფა;
- ღრუბლების გამოყენება;
- ეკოლოგიური აღჭურვილობის შემენა;
- დაცილებული და ჰიბრიდული მუშაობა;
- ხოსტინგის მწვანე პროვაიდერის შერჩევა;

- დღეს კომპანიები აქტიურად იყენებენ ვებ-საიტებს და შესაბამისად ენერგოდაზოგვის ერთერთი წყარო არის ისეთი პროვაიდერის შერჩევა, რომელიც თავის მხრივ ზრუნავს მწვანე იტ-ის მოთხოვნების დაკმაყოფილებაზე;

- ქეშირების ეფექტიანი პოლიტიკის განსაზღვრა;

- მედიას და გამოსახულებების ოპტიმიზაცია

- სერვერსა და დანართებს შორის გადასაცემი მონაცემების მოცულობის შემცირება;

- გამოუყენებელი ფუნქციების ამოღება პროგრამული დანართებიდან;

- პროგრამული დანართების ენერგო-ეფექტურობის მოთხოვნების შესრულება;

- გეოლოკაციის სამსახურების გამოყენების ოპტიმიზაცია;

- ტაიმერების და შეტყობინებების სისტემის გამართულობა

არ შეიძლება არ გამახვილდეს ყურადღება იტ-ის განყოფილებების როლზე და საქმისადმი მიდგომაზე. ორგანიზაციებში იტ-ის განყოფილებებმა სხვადასხვა სახის მონაცემებზე დაფუძნებული პროექტების შემთხვევაში, პირველ რიგში, უნდა განსაზღვრონ მდგრადი განვითარების არსებული დონე და წარმატების მაჩვენებლები, რაც მათ მისცემთ წარმოდგენას მიმდინარე მდგომარეობის შესახებ ენერგოეფექტურობის მხრივ და საშუალებას მისცემთ ადეკვატურად შეაფასონ პროექტის წარმატება მდგრადი განვითარების კუთხით.

იტ-განყოფილებების უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა რისკებისგან თავის დაცვა და სარგებლის მიღება მწვანე იტ-ში ინვესტიციების ზრდისგან. ეს განყოფილებები უნდა ემხრობოდნენ ერთიან მიდგომას პროექტის ყველა ეტაპზე. მეორეს მხრივ ეს ნიშნავს, რომ ინვესტიციების რენტაბელურობის უზრუნველყოფის მიზნით ისინი უნდა რთავდნენ თავის სტრატეგიაში ინვესტორებს, კლიენტებს, თანამშრომლებს, უფროს ხელმძღვანელობას, ტოპ-მენეჯერებს ეკოლოგიურად სუფთა პროექტების განხორციელებაში, რომელიც იმართება მონაცემებით. იტ-განყოფილებების თანამშრომლები უნდა გადიოდნენ კონსულტაციებს იმ ორგანიზაციებთან, რომლებსაც უკვე აქვთ დახმარების გამოცდილება მდგრადი განვითარების პროექტების რეალიზაციაში. ამ გზით ისინი შეძლებენ შეაფასონ თავისი წარმატება, შეაგროვონ მოწინავე გამოცდილება და შეისწავლონ თავისი წარუმატებელი პროექტები, რაც დაეხმარება მათ ანალოგიური ინიციატივის ამოქმედებაში. ეს დაეხმარება მათ დანახარჯების ოპტიმიზაციაში, ეფექტიანობის ამაღლებასა და პროექტის რეალიზაციის დაჩქარებაში.

ცალკე უნდა იყოს განხილული მწვანე იტ-ის საკითხი იტ-კომპანიებთან მიმართებაში. უნდა აღინიშნოს, რომ ბიზნესის ბრუნვის ზრდა, საჯაროობა და ბრენდის არსებობა უყენებს იტ-კომპანიებს გარკვეულ პასუხისმგებლობას არა მარტო კლიენტების, არამედ ეკოლოგიის წინაშე. ამასთან ერთად უნდა აღინიშნოს, რომ ინფორმაციული და კომუნიკაციური ტექნოლოგიების სექტორის ზეგავლენა გარემოზე მსოფლიო ეკონომიკის სტრუქტურაში ერთერთი დაბალია - ნახშირორჟანგის მთლიანი ამოფტკვევის დაახლოებით 2 პროცენტი. მიუხედავად ასეთი დაბალი მაჩვენებლის, აუცილებელია რეკომენდაციების მოყვანა იტ-კომპანიებისათვის მწვანე იტ-ის განვითარების სფეროში [7]:

- **ეკოლოგიაზე პირდაპირი ზეგავლენის გაზომვა** - კომპანიებში თვალყური უნდა ადევნონ ენერჯის ხარჯვას განსაკუთრებულად მონაცემთა დამუშავების ცენტრებში. საჭიროა ეკოლოგიური მონაცემთა დამუშავების ცენტრების შექმნაზე ზრუნვა;

- **ეკოლოგიაზე ირიბი ზეგავლენის გაზომვა** - მოწოდების მთელი ჯაჭვის შემოწმება ვენდორების და პარტნიორების ჩათვლით ეკოლოგიურობის უზრუნველსაყოფად;

- **მიზნების დადგენა** - შესაძლებელია რამდენიმე მიმართულებით მუშაობა ეკოლოგიური საქმიანობის გასაუმჯობესებლად, ამიტომ უნდა შეირჩეს სტანდარტები და წესები, რომელსაც უნდა გაყვეს კომპანია;

- **ჰიბრიდული და დაცილებული მუშაობის გამოყენება** - ამცირებს ოფისში ენერჯის ხარჯვას და მავნე ნივთიერებების გამომუშავებას თანამშრომლების მგზავრობისას;

- **ვირტუალიზაციის გამოყენება** - ეკონომიას უკეთებს ფიზიკური სერვერების რაოდენობის შემცირების ხარჯზე;

- **სერტიფიცირებული გადამამუშავებელი ორგანიზაციების გამოყენება** - არსებობს ასეთი ორგანიზაციების ნუსხები, და კომპანიებმა ისინი უნდა გამოიყენონ უსაფრთხო გადამამუშავების განსახორციელებლად;

- **ენერჯო ხარჯვის (გამოყენების) მართვა** - ხისტი დისკების, დისპლებების და სხვა კომპონენტების მომართვა ენერჯის ეკონომიის რეჟიმში გადასასვლელად;

- **ალტერნატიული ენერგეტიკა** - ტრადიციულისგან განსხვავებით ალტერნატიული წყარების გამოყენება;

- **მწვანე დიზაინი** - მუშაობა პროდუქტების ოპტიმიზაციაზე, რითაც მიღწეული იქნება მათი სამსახურის უფრო ხანგრძლივი ვადა და შემცირდება ელექტრონული ნარჩენები და დახარჯული ენერჯია.

მაგრამ, მთავარი მაინც ის არის, რომ იტ-კომპანებს მწვანე იტ-ის შემუშავება, დანერგვა და გამოყენება სჭირდებათ, ვინაიდან ასეთი პროექტები ეხმარებიან მათ ყურადღების მიბყრობაში თავად ტექნოლოგიებთან, ხდიან ამ პროექტებს უფრო მოდურს და მიმზიდველს დანარჩენი ბაზრისთვის, რასაც, საბოლოო ჯამში, მიყვევართ „ჭკვიანი წარმოების“ იდეის გავრცელებასთან.

## დასკვნები

საბოლოო ჯამში შეგვიძლია ჩამოვყალიბოთ ის ძირითადი შედეგები, რომელიც გამომდინარეობს მწვანე იტ-ის გამოყენებიდან: ნახშირბადის ამოფტკვევის შემცირება; პროდუქციის წარმოებაში რესურსების, ნარჩენების და ენერჯის მოხმარების შემცირება; დანახარჯების შემცირება; ყველაზე გამძლე, ხანგრძლივ პერიოდის განმავლობაში გამოყენებაზე ორიენტირებული აღჭურვილობის წარმოება; რესურსების დამზოგი პროგრამული უზრუნველყოფის შემუშავება; ენერჯის მოხმარების

შემცირება IT-ის გამოყენებისას; ენერგოდამზოგი გადამუშავება და უტილიზაცია; არასავალდებულო ქალაქის ასლების აღმოფხვრა; IT-ის დანერგვა სხვა პროდუქტების მავნე ზეგავლენის შესამცირებლად; უსაფრთხო ტექნოლოგიების და მეთოდების შემუშავება; ინფორმირებულობის გაზრდა; სოციალურად შეგნებული და სამართლიანი სამუშაო პირობები წარმოებაში; კორპორაციული კულტურის გაუმჯობესება; რეპუტაციის გაუმჯობესება; კლიენტების კმაყოფილება.

### ლიტერატურა

1. IISD. Sustainable Development. <https://www.iisd.org/mission-and-goals/sustainable-development#:~:text=Sustainable%20development%20has%20been%20defined,to%20meet%20their%20own%20needs>
2. Карцан П.И. Зеленые технологии и их значение для всего мира. III Всероссийская научная конференция с международным участием «Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий» (НТО-III) при поддержке Краевого фонда науки.
3. Clifton Mark. Green IT: An Analysis of Eco-Friendly Information Technology Strategies. International Journal of Green Technology, 2019, 5, 64-67
4. [What is green IT \(green information technology\) and why is it important? \(techtaraget.com\)](#)
5. [Green IT: разбираемся в концепции зеленого IT \(zerocoder.ru\)](#)
6. Ефремов Н.А., Ефремова М.П. Мировой опыт применения «зеленых» технологий. DOI: 10.47026/2499-9636-2021-1-21-30. Экономические науки. Oeconomia et Jus. 2021. № 1.
7. <https://myqrcards.com/poleznye-statyi/tpost/o5r9v81du1-zelenie-informatsionnie-tehnologii>

### References (transliterated)

1. IISD. Sustainable Development. <https://www.iisd.org/mission-and-goals/sustainable-development#:~:text=Sustainable%20development%20has%20been%20defined.to%20meet%20their%20own%20needs>
2. P.I.Kartsan. Zelenie texnologii I ix znachenie dlia vsego mira. III Vserosiiskaia nauchnaia konferencia c mejdunarodnim uchastiem "Nauka, texnologia, obshestvo: "kologicheskii injiniring v interesax ustoičovogo razvitiia teritorii" (NTO – III). Mark Clifton. Green IT: An Analysis of Eco-Friendly Information Technology Strategies. International Journal of Green Technology, 2019, 5, 64-67
4. [What is green IT \(green information technology\) and why is it important? \(techtaraget.com\)](#)
5. [Green IT: разбираемся в концепции зеленого IT \(zerocoder.ru\)](#)
6. N.A.Efremov, M.P.Efimova. Mirovoi opit primeneniia zelenix texnologii. DOI: 10.47026/2499-9636-2021-1-21-30. Oeconomia et Jus. 2021. № 1
7. <https://myqrcards.com/poleznye-statyi/tpost/o9v81du1-zelenie-informatsionnie-tehnologii>

## საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი

გია არაბიძე, ტექ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [power@gtu.ge](mailto:power@gtu.ge)

ნათია არაბიძე, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, E-mail: [arabidze.natia@yahoo.com](mailto:arabidze.natia@yahoo.com)

სოსო მინდიაშვილი, მაგისტრი, მთავარი სპეციალისტი,

საქართველოს ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების სამინისტრო, თბილისი, საქართველო,

E-mail: [mindiashvilisoso@gmail.com](mailto:mindiashvilisoso@gmail.com)

**ანოტაცია:** ქვეყნის ენერგეტიკული უსაფრთხოების მაჩვენებლების უკეთესი შესწავლის მიზნით ენერგეტიკულ ბალანსებზე და სხვა სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით შეფასებულია ენერგეტიკული უსაფრთხოებისა და იმპორტდამოკიდებულების ინდექსი. მოცემულია ენერჯის მოხმარების სამი უდიდესი სფეროს მიერ მოხმარებული ენერჯის წილი საბოლოო მოხმარებაში. გრაფიკის სახით წარმოდგენილია ენგურჰესის დატვირთვა წლებისა და თვეების მიხედვით. 2020 წელს საქართველოში გამოიმუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერჯის რაოდენობების ანალიზით დასაბუთებულია ელექტროენერჯის იმპორტის აუცილებლობა.

**საკვანძო სიტყვები:** უსაფრთხოების ინდექსი, იმპორტდამოკიდებულების ინდექსი, გამოიმუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერჯია, ენგურჰესის დატვირთვა, ენერჯის ადგილობრივი წყაროები.

### Energy security index of Georgia

**Gia Arabidze**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Georgian Technical University, E-mail: [power@gtu.ge](mailto:power@gtu.ge)

**Natia Arabidze**, Doctor of Science, Associate Professor, Georgian Technical University,

E-mail: [arabidze.natia@yahoo.com](mailto:arabidze.natia@yahoo.com)

**Soso Mindiashvili**, Master, senior specialist, Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia,

E-mail: [mindiashvilisoso@gmail.com](mailto:mindiashvilisoso@gmail.com)

**Annotation.** The paper discusses the energy balances in order to better study the country's energy security indicators. Based on energy balances and other statistical data, the index of energy security and import dependence is estimated. The share of consumed by the three largest areas of energy consumption in the final consumption is given. In the form of a graph, the 1, ad of Engur HPP is presented according to years and months. In 2020, the analysis of the quantities of electricity produced and consumed in Georgia substantiates the need to import electricity.

**Keywords:** safety index, import dependency index, generated and consumed electricity, Load of engur HPP, local sources of energy.

**შესავალი.** საქართველოს, სამხრეთ კავკასიაში, ყველაზე მნიშვნელოვანი სტრატეგიული სატრანზიტო ადგილმდებარეობა აქვს. ქვეყნის ჩრდილოეთ საზღვარი მთლიანად კავკასიონის ქედზე გადის და რუსეთის ფედერაციას უშუალოდ ესაზღვრება, რომელიც მსოფლიოში ერთ-ერთ უმსხვილესი ენერგეტიკული მოთამაშეა. გეოგრაფიული მდებარეობა იძლევა შესაძლებლობას, რომ ქვეყანამ უზრუნველყოს სამხრეთ კავკასია ენერგორესურსებით ან პირიქით მოახდინოს მათი ტრანზიტი. გარდა ამისა საქართველო ქმნის ენერგეტიკულ დერეფანს შუა და ცენტრალური აზიისა და ევროპის ქვეყნებს შორის. აღმოსავლეთ-დასავლეთ კორიდორის გამოყენე-

ბა უკვე ხდება ბაქო-თბილისი-სუფსა და ბაქო-თბილისი-ჯეიჰანი ნავთობსადენებითა და ბაქო-თბილისი-ერზრუმის გაზსადენებით. მეორეს მხრივ, ქვეყანა ახორციელებს ტრანზიტს ჩრდილოეთ-სამხრეთ დერეფნით, ბუნებრივი გაზის გატარებით ჩრდილოეთიდან სამხრეთის (რუსეთიდან - სომხეთის) მიმართულებით. აღნიშნული პროექტები ნათელს ხდის რომ ქვეყანას აქვს დიდი პერსპექტივა იყოს რეგიონის მსხვილი სატრანზიტო დერეფანი.

საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოება წარმოადგენს ქვეყნის ეროვნული უსაფრთხოების განუყოფელ ნაწილს. ენერგეტიკული უსაფრთხოება კომპლექსური ცნებაა და, თავის მხრივ, მოიცავს: ელექტროენერჯის,

ბუნებრივი გაზისა, ნავთობის გადამცემი ინფრასტრუქტურის ტექნიკური გამართულობასა და მდგრადობას; ქვეყნის უნარს დააკმაყოფილოს მოთხოვნა ენერგიაშემცველებზე და შეძლოს მომხმარებლების საკმარისი რაოდენობისა და ხარისხის მქონე ენერჯის მიწოდების დროის ნებისმიერ მომენტში. ასევე ენერგეტიკული უსაფრთხოება არის ქვეყნის უნარი, ნაკლებად იყოს დამოკიდებული იმპორტირებულ რესურსზე, ხოლო იმ შემთხვევაში თუ გარკვეული რესურსის იმპორტი აუცილებელია, მისი ბაზარი იყოს დივერსიფიცირებული. ჩამოთვლილი კომპონენტები ძირითადია, რომლის გათვალისწინებაც მნიშვნელოვანია ქვეყნის ენერგეტიკული უსაფრთხოების შეფასებისთვის.

**სამუშაოს მიზანი.** სამუშაოს მიზანია საქართველოს ენერგეტიკულ ბალანსებზე და სხვა სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით ენერგეტიკული უსაფრთხოების შეფასება, ტრენდების გამოვლენა და მათი მეშვეობით რეკომენდაციების შემუშავება, ქვეყნის ენერგეტიკული უსაფრთხოების მაჩვენებლების უკეთესი შესწავლის მიზნით.

**ანალიტიკური ნაწილი**

ნაშრომში საბაზისო წლად განხილულია 2020 წელი, ვინაიდან აღნიშნული წლისთვის ხელმისაწვდომია სრული ენერგეტიკული ბალანსი როგორც ქართულ, ისე უცხოურ წყაროებიდან.

2020 წლისთვის ენერჯის შიდა მიწოდებაში ადგილობრივი წარმოების წილი მხოლოდ 21,11% იყო. იმპორტირებულ წიაღისეულ საწვავში ყველაზე დიდი წილი ბუნებრივ გაზზე მოდის - 57,62%. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ბუნებრივი გაზის ყველაზე მსხვილი მომხმარებელი საყოფაცხოვრებო სექტორია. ცხრ. 1-ში მოცემულია ენერჯის მოხმარების სამი უდიდესი სფეროს მიერ მოხმარებული ენერჯის წილი საბოლოო მოხმარებაში.

საქართველოს 2020 წ. აგრეგირებული ენერგეტიკული ბალანსის მიხედვით შინამეურნეობები მოიხმარენ რესურსს (ბუნებრივ გაზს), რომლის 99,67% იმპორტირებულია.

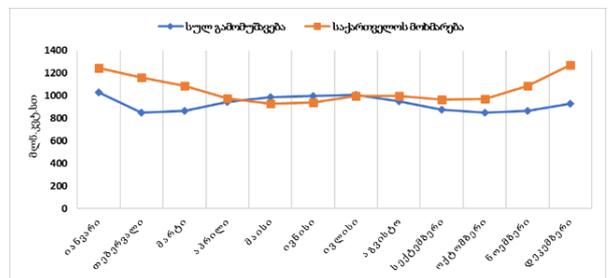
ეს კი, რა თქმა უნდა, დიდი გამოწვევაა საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოებისთვის. შედარებით უკეთესი სიტუაციაა ელექტროენერჯის მოხმარებაში, კერძოდ, 2020 წლისთვის გამომუშავებული ელექტროენერჯის

ცხრილი 1

სექტორი	წილი საბოლოო მოხმარებაში	ყველაზე მეტიად მოხმარებული რესურსი	რესურსის წილი იმპორტში	რესურსის წილი საბოლოო მოხმარებაში
თუჯი და ფოლადი	5,76%	ელექტროენერჯია	3,66%	22,00%
სავაო ტრანსპორტი	25,97%	ნავთობპროდუქტები	34,25%	29,27%
შინამეურნეო ბები	31,38%	ბუნებრივი გაზი	57,62%	38,52%

თითქმის 90% ადგილობრივი გენერაციით კმაყოფილდებოდა, იმპორტის საჭიროება ჯამურად 11,5% იყო მთელი წლის განმავლობაში. წლიურ ჭრილში ელექტროენერჯის მოთხოვნის 90%-ის საკუთარი გენერაციით დაკმაყოფილება არ ნიშნავს, რომ ელექტროენერჯის სექტორის სრულ დამოუკიდებლობას. გენერაციის სეზონურობა სერიოზულ საფრთხეს უქმნის ელექტროენერგეტიკულ უსაფრთხოებას.

ნახ. 1-ზე მოცემულია საქართველოში გამომუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერჯის რაოდენობები 2020 წ. თვეების მიხედვით. საქართველოს საკუთარი მოთხოვნის სრულად დაკმაყოფილება მხოლოდ რამდენიმე თვის განმავლობაში შეუძლია, დანარჩენი თვეებში ელექტროენერჯის იმპორტის საჭიროება კვლავ არსებობს.

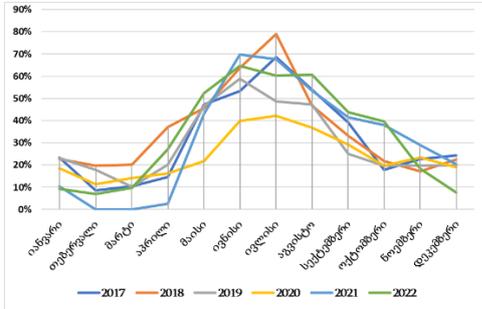


ნახ. 1. 2020 წ. საქართველოში გამომუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერჯის რაოდენობები

მიუხედავად იმისა, რომ ჰიდროელექტროსადგურებს შეუძლიათ ელექტროენერჯის მოთხოვნის, დაახლოებით 80% ადგილობრივი გენერაციით დააკმაყოფილონ, მათი გამომუშავება ცვალებადია და წყალსიმცირის პერიოდში მინიმალური. ნახ. 2-ზე მოცემულია ენერჯის დატვირთვა თვეებისა და წლების მიხედვით. ნახაზიდან ჩანს იანვარი-მარტის პერიოდში ჰიდრო-ელექტროსადგურის დატვირთვა არ აღემატება 30%-ს.

2020 წ. საქართველომ 1 610,1 მლნ. კვტ.სთ ელექტროენერჯის იმპორტი მოახდინა. აქედან

45,11% აზერბაიჯანიდან, 19,45% - თურქეთიდან, ხოლო 35,44% - რუსეთიდან იყო. აქვე უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ რუსეთიდან იმპორტირებული ელექტროენერჯის 50%-ს საქართველო აფხაზეთს აწვდიდა.



ნახ. 2. ენგურჰესის დატვირთვა თვეებისა და წლების მიხედვით

ცხრილი 2

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
წარმოება, ტჯ	59	57	55	57	55	52	45	43
816,60	444,30	701,70	623,30	837,10	391,60	730,50	680,60	
იმპორტი, ტჯ	118	135	159	156	160	162	174	168
549,00	206,80	963,90	380,70	059,00	641,20	731,60	435,70	
ექსპორტი, ტჯ	4	5	17	10	14	6	2	1
639,20	069,50	086,10	451,40	143,60	874,90	316,80	609,70	
IDR	68%	72%	81%	77%	79%	78%	80%	80%

ცხრ. 2-ში მოცემულია საქართველოში წარმოებული, იმპორტირებული და ექსპორტირებული ენერჯის მნიშვნელობები (ტჯ) და იმპორტ-დამოკიდებულების ინდექსი (%-ში).

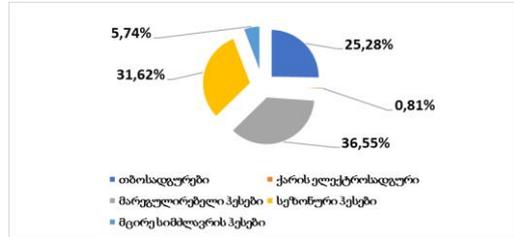
ნახ. 3-ზე წარმოდგენილია ელექტროენერჯის გამომუშავების გადანაწილება გენერაციის წყაროების მიხედვით (2020 წ.). როგორც ნახაზიდან ჩანს დომინანტი ჰიდროენერგეტიკაა, მათ შორის, მარეგულირებელი ჰიდროელექტრო-სადგურები. ისინი არა მარტო უზრუნველყოფენ სისტემის უსაფრთხო მუშაობს, განსაკუთრებით პიკის საათებში, არამედ, სამწუხაროდ, ბაზისურ რეჟიმშიც მუშაობენ.

ბაზრის კონცენტრაციის - ჰერფინდალ-ჰირშმანის ინდექსის მიხედვით საქართველოს იმპორტის წყაროები ძლიერად პოლარიზებულია. ზუსტი ანგარიშით მისი მნიშვნელობაა 3,669-ია, რაც ძლიერ კონცენტრირებულ ელექტროენერჯის იმპორტის ბაზარზე მიუთითებს.

$$HHI = (45,11)^2 + (19,45)^2 + (35,44)^2 = 3,669$$

უნდა აღინიშნოს, რომ ასევე ძლიერად კონცენტრირებულია ელექტროენერჯის მიწოდების ბაზარიც, სადაც მხოლოდ ორი ელექტრომომწოდებელი ოპერირებს. ენერჯის

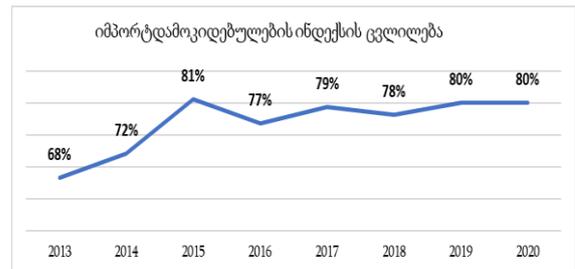
იმპორტზე დამოკიდებულების გამოსათვლელად შეგვიძლია გამოვიყენოთ მარტივი ფორმულა, რომელიც განსაზღვრავს თუ მოხმარებული ენერჯის, რა ნაწილი იყო იმპორტირებული.



ნახ. 3. ელექტროენერჯის გამომუშავების გადანაწილება გენერაციის წყაროების მიხედვით (2020 წ.)

$$IDR_{(2013-2020)} = \frac{\text{იმპორტირებული ენერჯის რაოდენობა (ტჯ)}}{\text{ადგილობრივი წარმოება (ტჯ) + იმპორტი(ტჯ) - ექსპორტი(ტჯ)}} * 100\%$$

ნახ. 4-ზე მოცემულია იმპორტ-დამოკიდებულების ინდექსის ცვლილება 2013-2020 წწ. როგორც ნახაზიდან ჩანს, განსაკუთრებით 2015 წლიდან, იმპორტდამოკიდებულების ინდექსი მკვეთრად იზრდება და მისი საშუალო მნიშვნელობა 80%-ის ფარგლებშია. ვფიქრობთ ამის ძირითადი მიზეზი ქვეყნის გაზიფიკაციის პროცესის დაჩქარებაა და შესაბამისად საყოფაცხოვრებო მიზნებისათვის გაზის მოხმარების ზრდაა.



ნახ. 4. იმპორტდამოკიდებულების ინდექსის ცვლილება

არსებული მასალის ანალიზიდან გამომდინარე, ენერგეტიკული უსაფრთხოების გაძლიერების მიზნით აუცილებელია: ენერჯის ადგილობრივი წყაროების ათვისება და შესაბამისად საბოლოო მოხმარებაში მათი წილის გაზრდა; იმპორტზე დამოკიდებულების შემცირება და იმპორტის წყაროების დივერსიფიკაცია.

**ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსის გამოთვლა**

ენერგეტიკული უსაფრთხოების კონკრეტული მნიშვნელობის მისაღებად გამოიყენება ორი მეთოდი. პირველი, ქვეყნის ენერგეტიკულ უსაფრთხოებაზე მოქმედი პარამეტრებისთვის ქულების მინიჭება, როგორც ეს პოლიტიკის დოკუმენტების მონიტორინგისას ხდება. ფიზიკურად ეს მიდგომა უფრო მარტივია, მაგალითისთვის ძირითად ფაქტორებს, რომლებიც აშკარა გავლენას ახდენენ ქვეყნის უსაფრთხოებაზე მივანიჭოთ მაღალი ქულა, ხოლო მცირე ფაქტორებს დაბალი. თუმცა ამგვარი მიდგომა არ იქნება ზუსტი და ობიექტური. მეტიც ვერ მოხდება სრულფასოვნად ენერგეტიკული სექტორის დეტალური ანალიზი და ქვეყნის რეალური ბალანსების გათვალისწინება.

ენერგეტიკული უსაფრთხოების გამოსათვლელად ყველაზე ობიექტურ მეთოდი - საკითხისადმი კომპლექსური მიდგომაა, კერძოდ ინდექსი დაყოფა ექვს მდგენელად-ინდიკატორად, რომლებიც თავის მხრივ ნაწილდებიან ცალკეულ პარამეტრებად. თითოეული მათგანი უსაფრთხოებისთვის მასტიმულირებელი /დესტიმულირებელი პარამეტრია.

ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსის შეფასების ინდიკატორები იყოფა 6 ჯგუფად:

1. ბუნებრივი რესურსის მოხმარების ინდიკატორები:

- 1.1 წიაღისეული საწვავის მოხმარება (% წილი საბოლოო მოხმარებაში);
- 1.2 განახლებადი ენერჯის მოხმარება (% წილი საბოლოო მოხმარებაში);
- 1.3 ელექტროენერჯის მოხმარება ერთ სულ მოსახლეზე;
- 1.4 ენერჯის მოხმარება ერთ სულ მოსახლეზე (ტნე/ერთ სულ მოსახლეზე);
- 1.5 ენერჯის მოხმარება 1000 \$-ზე (ენერჯის მოცულობა ტნე-რომლის შეძენაც შეიძლება 1000 \$-ით);
- 1.6 ენერჯის ნეტო იმპორტი (%);
- 1.7 იმპორტირებული საწვავის წილი საბოლოო მოხმარებაში (%).

2. რესურსები:

2.1 ამოწურვად რესურსებზე დამოკიდებულება.

3. რესურსების უსაფრთხოების გამოთვლის ინდიკატორები, რესურსების ეფექტურობის ჯგუფი: 3.1 პირველადი ენერჯონტენსივობა (მჯ/არსებული წლისთვის მშპ); 3.2 მშპ მოხმარებულ ენერჯორესურსზე (ტნე/მშპ); 3.3 საწვავის ექსპორტი (%).

4. ახალი ენერჯის წყაროს ათვისების ინდიკატორები: 4.1 განახლებადი ენერჯის წილი ენერჯის საბოლოო მოხმარებაში (%); 4.2 ალტერნატიული /ან ბირთვული ენერჯის წილი (%); 4.3 განახლებადი წყაროებიდან წარმოებული ელექტროენერჯის წილი (%).

5. რესურსების უსაფრთხოება (მნიშვნელოვანი ემისიის მქონე ენერჯის წყაროებზე დამოკიდებულება).

6. წვდომა ენერჯიაზე.

6.1 წვდომა ელექტროენერჯიაზე (სოფლად და ქალაქად).

აღნიშნული ინფორმაციის შეგროვების შემდეგ გამოთვლების წარმოება ხდება სამ ეტაპად:

1. საჭირო სტატისტიკური ინფორმაციის შეგროვება. დადებითი და უარყოფითი სტიმულატორების განსაზღვრა;

2. თითოეული ინდიკატორის საშუალო მნიშვნელობის განსაზღვრა. ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდიკატორების და ინდექსის გამოთვლა;

3. მიღებული ინფორმაციის ანალიზი. ტრენდების და მოთხოვნის მამოძრავებლების განსაზღვრა.

ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი  $s$  ქვეყნისთვის (ჩვენ შემთხვევაში საქართველოსთვის)  $t$  წლისთვის გამოითვლება შემდეგნაირად.

$$I_{GEO(2020)} = f \left( \prod_{j=1}^u \frac{g_{jts}}{g_{jtw}} \right)$$

მოცემულ ფორმულაში:

$g_{jts}$  - არის უსაფრთხოების ინდიკატორის მნიშვნელობა  $j$  ჯგუფისთვის;  $t$  - წელი;  $s$  - ქვეყნისთვის;

$g_{jtw}$  - იგივე მნიშვნელობა გამოთვლილი ყველა ქვეყნისთვის ჯამურად (საქართველოს შემთხვევაში ეს შეიძლება იყოს ევროპის ქვეყნები მათ დონესთან შედარების მიზნით);

$u$  - პარამეტრების რაოდენობა, რომელიც ხელმისაწვდომი იყო ინდექსის გამოსათვლელად;

$f$  - ფუნქცია, რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელი ხდება მიღებული მნიშვნელობების ნორმალიზება.

კონკრეტული პარამეტრების დაჯგუფება და მათი გასაშუალოებული მნიშვნელობების შედარება იძლევა ენერგეტიკული უსაფრთხოების შეფასების შესაძლებლობას. თუმცა ეს მნიშვნელობა ფარდობითია სხვა ქვეყნების

მიმართ, განვითარებული და განვითარებადი ქვეყნების მნიშვნელობების შედარებით შესაძლებელია მეტი ანალიტიკური დასკვნების გამოტანა.

საქართველოსთვის, ინფორმაცია შეფასების ინდიკატორების მნიშვნელობების შესახებ ადებულია მსოფლიო ბანკის მიერ შეგროვებული სტატისტიკური მონაცემებიდან. ენერგეტიკული უსაფრთხოების მაღალი/დაბალი ინდექსი შეიძლება გამოწვეული იყოს ინფორმაციის ფიზიკურად არ არსებობის ან მისი ნაკლოვანებების გამო. ინდექსის მნიშვნელობაზე განსაკუთრებით მოქმედებს: საწარმოების გაჩერება, რის შედეგადაც მცირდება ენერგიაზე მოთხოვნა; მოსახლეობის გადინება, რომელიც ხელი შეუწყო ერთ სულ მოსახლეზე მეტი რესურსის განაწილებას; ცენტრალური გათბობის და სხვა სისტემების მოშლა, რომლებიც მეტ წილად წიაღისეულს საწვავს მოიხმარენ და ა.შ.

უნდა აღინიშნოს, რომ საქართველოს აგრეგირებული ენერგეტიკული ბალანსები ყველაზე ზუსტი 2012-2013 წწ. ხდება, რაც იძლევა მნიშვნელობების მეტი სიზუსტით განსაზღვრის შესაძლებლობას.

ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მაჩვენებელს, რომელის საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს ქვეყნის ენერგოდამოუკიდებლობისა და მდგრადი განვითარების პოტენციალი.

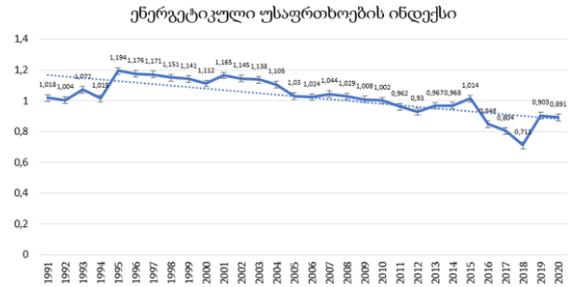
2000, 2010, 2020 წლებში ქვეყნები ენერგეტიკული უსაფრთხოების მაჩვენებლის მიხედვით 6 კლასტერად დაიყო. საქართველო 2000 წლისთვის მეორე კლასტერში მოხვდა (ავსტრია, დანია და პორტუგალიასთან ერთად), 2010 წ. მესამე კლასტერში (გერმანია, ესპანეთი, საფრანგეთთან, ხორვატიასთან, სლოვაკეთთან და სერბეთთან ერთად), ხოლო 2020 წ. მეოთხე კლასტერში (ბელგიას, კვიპროსს, სლოვაკეთს, რუმინეთსა და გერმანიასთან) ერთად.

ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი მით უფრო ზუსტია, რაც უფრო მეტი პარამეტრია ხელმისაწვდომი და რაც უფრო ფართოა მონაცემთა ბაზა.

ნახ. 5-ზე მოცემული საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი 1991-2020 წწ.

ევროპული ქვეყნების უმრავლესობისთვის, ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსის გაშუალებული მნიშვნელობა არის 1, მასთან მიმართებაში შესაძლოა განვსაზღვროთ

რამდენად არის ქვეყანა ახლოს ევროპულ სტანდარტებთან ენერგეტიკული უსაფრთხოების მიმართულებით.



ნახ. 5. საქართველოსთვის ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსი 1991-2020 წწ.

უნდა აღინიშნოს, რომ საქართველოს შემთხვევაში ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდექსის გამოთვლა საკმაოდ რთულია. ეს გამომდინარეობს სტატისტიკური ინფორმაციის არარსებობიდან ან ნაკლოვანებიდან. იმისათვის, რომ სრულყოფილად შეფასდეს ქვეყნის ენერგეტიკული უსაფრთხოება და ამ მიმართულებით განსახორციელებელი ღონისძიებები ეროვნულ პოლიტიკაში სწორედ გაიწეროს აუცილებელია ასეთი მონაცემების არსებობა.

### დასკვნა

1. ენერგეტიკული ბალანსების ანალიზის საფუძველზე გამოვლენილია ის მაჩვენებლები, რომლებიც ქვეყანაში არსებულ ენერგეტიკულ რისკებზე მიუთითებს, ესენია: იმპორტის წილი ენერჯის საბოლოო მოხმარებაში; გენერაციის სეზონურობა; ენერჯის ადგილობრივი წყაროების ათვისება და შესაბამისად მათი წილი საბოლოო მოხმარებაში; იმპორტზე დამოკიდებულების შემცირება და იმპორტის წყაროების დივერსიფიკაცია.

2. ენერგეტიკული უსაფრთხოების გამოსათვლელი ინდიკატორები დაყოფილია შემდეგ ჯგუფებად: რესურსების მოხმარების წილი; ამოწურვადი რესურსების წილი; ევექტური რესურსების წილი; ახალი ენერჯის წყაროების ათვისების წილი; დაბინძურების წილი წიაღისეული საწვავის მოპოვებისას.

3. სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით შეფასებულია ენერგეტიკული უსაფრთხოებისა და იპორტდამოკიდებულების ინდექსი.

4. გაანალიზებულია ენერჯის მოხმარების სამი უდიდესი სფეროს მიერ მოხმარებული ენერჯის წილი საბოლოო მოხმარებაში.

5. ბაზრის კონცენტრაციის - ჰერფინდალ-ჰირშმანის ინდექსის მიხედვით დადგენილია, რომ საქართველოს იმპორტის წყაროები ძლიერ კონცენტრირებულია.

6. შეფასებულია საქართველოს ენერგეტიკული უსაფრთხოების ინდიკატორებისა და ინდექსის საშუალო მნიშვნელობები.

#### ლიტერატურა

1. Stavitskiy, A., Kharlamova, G.; Komendant, O.; Andrzejczak, J.; Nakonieczny, J. Methodology for Calculating the Energy Security Index of the State: Taking into Account Modern Megatrends. *Energies* 2021, 14, 3621. <https://doi.org/10.3390/en14123621>
2. 2021. საქართველოს აგრეგირებული ენერგეტიკული ბალანსი. თბილისი: საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახური.

3. IEA. 2021. "Georgia energy profile."

4. n.d. International Energy Security Risk Index—Analysis. Accessed November 15, 2021. <https://openstat.psa.gov.ph/>.

5. საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა. 2020-2030. გადამცემი ქსელის განვითარების ათწლიანი გეგმა. თბილისი: საქართველოს

6. საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისია (სემეკი). ელექტროენერჯის ფაქტობრივი ბალანსები (2020 წლისთვის). <https://data.gnerc.org/>

## ენერგოეფექტური შეშის ღუმელების დანერგვის სტრატეგია საქართველოში

**ნოდარ ქვეციშვილი**, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

საქ. ტექნიკ. უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [nodar\\_ke@yahoo.com](mailto:nodar_ke@yahoo.com)

**თენგიზ ჯიშკარიანი**, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

საქ. ტექნიკ. უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [tengish@yahoo.com](mailto:tengish@yahoo.com)

**ნიკოლოზ ჯავშანაშვილი**, აკადემ. დოქტორი, ასოც. პროფესორი

საქ. ტექნიკ. უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, E-mail: [nickjavshanashvili@yahoo.com](mailto:nickjavshanashvili@yahoo.com)

**ანოტაცია.** ენერგოეფექტური შეშის ღუმელების ფართომასშტაბიანი დანერგვის აუცილებლობის გათვალისწინებით, საქართველოს სტანდარტების, ტექნიკური რეგლამენტების და მეტროლოგიის ეროვნული სააგენტოს მიერ დამტკიცებული და სამოქმედოდ შემოღებულ იქნა ევროპული სტანდარტი CEN/EN 13240, ხოლო საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „მალატემპერატურული თბოფიზიკური პროცესების სამეცნიერო-საინჟინრო ცენტრში“, ე.წ. „კალორიმეტრულ სტენდზე“, ჩატარდა მათი თბოტექნიკური გამოცდის პროცედურები (ტესტირება). ნაშრომში შეფასებულია შეშის ღუმელების ტესტირების შედეგები და აღწერილია ევროპული სტანდარტებთან მათი შესაბამისობის დამოწმების საკანონმდებლო აქტები და პროცედურები.

**საკვანძო სიტყვები:** ენერგოეფექტურობა, შეშის ღუმელი, ევროპული სტანდარტი, კალორიმეტრული სტენდი, ნამწვი აირები.

### Strategy for introduction of energy-efficient wood stoves in Georgia

**Nodar Kevkhashvili**, Doctor of Technical Sciences, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [nodar\\_ke@yahoo.com](mailto:nodar_ke@yahoo.com)

**Tengiz Jishkariani**, Doctor of Technical Sciences, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [tengish@yahoo.com](mailto:tengish@yahoo.com)

**Nikoloz Javshanashvili**, Academ. Doctor, Assoc. Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, E-mail: [nickjavshanashvili@yahoo.com](mailto:nickjavshanashvili@yahoo.com)

**Annotation.** Considering the need for large-scale implementation of energy-efficient wood-burning stoves, the European standard CEN/EN 13240 was approved and implemented by the National Agency of Standards, Technical Regulations and Metrology of Georgia. On the "calorimetric stand", their thermal technical test procedures (testing) were carried out. The paper evaluates the results of testing wood stoves and describes the legislative acts and procedures for certifying their compliance with European standards.

**Keywords:** Energy efficiency, wood stove, European standard, calorimeter stand, exhaust gases.

**შესავალი.** დღეისათვის საქართველოს რეგიონებში პრაქტიკულად შეუძლებელია უნებართვოდ მოპოვებული საშემე მერქნის მოცულობების დადგენა და მისი გამოყენების მაჩვენებელი დაახლოებით ხუთჯერ აღემატება ეროვნული სატყეო სააგენტოს (NFA) მიერ ოფიციალურად გამოყოფილ, რეალურად აღრიცხულ და სანიტარულად დასაშვებ ნორმებს. თუ მხედველობაში მივიღებთ იმას, რომ საქართველოში საშემე მერქნის ძირითადი მომხმარებელი სოფლის მოსახლეობაა, რომლის უდიდესი ნაწილისათვის სათბობის სხვა ალტერნატიული წყარო უბრალოდ მიუწვდომელია, ნათელი გახდება, რომ ხე-ტყის ასეთი მასშტაბებით გამოყენება ქვეყანას ეკოლოგიური კატასტროფის წინაშე დააყენებს.

(2021 წლისათვის მძლავრი სუბსიდირების მიუხედავად, ელექტროენერჯისა და ბუნებრივი აირის ღირებულება მაინც ძალიან მაღალია სოფლის მოსახლეობის უმრავლესობისათვის. ამიტომ, ბუნებრივ აირს გასათბობად მხოლოდ სოფლის ოჯახების 2-3% იყენებს, მაშინ როდესაც ამ ოჯახების დაახლოებით 70% დაკავშირებულია ბუნებრივი აირის ქსელთან).

**აქტუალობა.** ხე-ტყის უსისტემო და უკონტროლო ჭრის ერთ-ერთი ძირითადი მიზეზი არის ის, რომ საქართველოში დამზადებული შეშის ღუმელების უმეტესობა არის დაბალეფექტური, ცუდად დამზადებული, არ შეესაბამება მომხმარებლის საჭიროებას, მოითხოვს მუდმივ კონტროლს

და უსაფრთხოების ელემენტარულ მოთხოვნებსაც კი ვერ აკმაყოფილებს. ბაზარზე არსებულ თითქმის ყველა შემის ღუმელს აქვს მსგავსი დიზაინი და მათი ენერგოეფექტურობა 25-30%-ს არ აღემატება, რაც იმას ნიშნავს, რომ ასეთ ღუმელებში საშუალო მერქნის ენერგეტიკული პოტენციალის მხოლოდ 25-30%-ის გამოყენება შესაძლებელია.

შემის ღუმელების ენერგოეფექტურობის (მეკოეფიციენტის) გაზრდა, საშუალო მერქნის ტენიანობასა და საცხოვრებელი შენობის შემომზადებული კონსტრუქციების (კედლები, სახურავი, იატაკი, ფანჯრები, კარები) თერმულ მდგომარეობასთან ერთად, მნიშვნელოვნად ზრდის საშუალო მერქნის ენერგეტიკული პოტენციალის გამოყენების შესაძლებლობას და შესაბამისად, მნიშვნელოვნად ამცირებს მასზე მოთხოვნილებას საყოფაცხოვრებო სექტორში. მაგალითად, ერთი და იგივე დონეზე დათბუნებული (100 ვტ/მ<sup>2</sup>) საცხოვრებელი შენობის 100 მ<sup>2</sup> ფართობის გასათბობად გამოყენებული შემის ღუმელი, რომლის მ.ე.კოეფიციენტი 30%-ია, წელიწადში მოიხმარს 21,0 მ<sup>3</sup> 40%-იანი ტენშემცველობის საშუალო მერქანს, მაშინ როდესაც შემის ღუმელი, რომლის მ.ე.კოეფიციენტი 70%-ია, მოითხოვს იგივე ტენშემცველობის მხოლოდ 9,0 მ<sup>3</sup> საშუალო მერქანს.

**სამუშაოს მიზანი.** ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო შემის ღუმელების ფართომასშტაბიანი დანერგვის აუცილებლობის გათვალისწინებით, საქართველოს სტანდარტების, ტექნიკური რეგლამენტების და მეტროლოგიის ეროვნული სააგენტოს მიერ დამტკიცებული და სამოქმედოდ შემოღებულია ევროპული სტანდარტი CEN/EN 13240, რომელიც განსაზღვრავს იმ მოთხოვნებს, რომლითაც უნდა განხორციელდეს შემის ღუმელების დიზაინი, პროექტირება, წარმოება და მუშა მახასიათებლების მარკირება. ამასთან ერთად, სტანდარტი ითვალისწინებს ტესტირების სპეციფიკურ პროცედურებს, რომლის თანახმადაც შემის ღუმელების სერტიფიცირება შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მათი ენერგოეფექტურობა, ნახშირორჟანგის (CO<sub>2</sub>) მინიმალური ემისიის უზრუნველყოფა და უსაფრთხო მუშაობა, დადასტურებულ იქნება რეალური გამოკვლევებით (ტესტირებით) სათანადო ლაბორატორიებში. პროდუქციის ბაზარზე

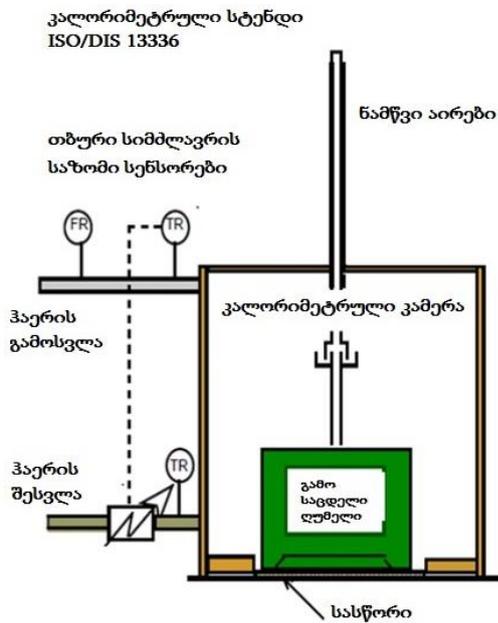
გატანამდე შემის ღუმელის თითოეული სახეობის ტესტირება სავალდებულოა.

**თემატური ნაწილი.** მიუხედავად სამოქმედოდ შემოღებული ევროპული CEN/EN 13240 სტანდარტისა საქართველოში დღემდე არ არსებობდა შემის ღუმელების ენერგოეფექტურობის შესამოწმებელი ოფიციალური ლაბორატორია, ექსპერტთა აკრედიტებული ჯგუფი, მეცნიერული პროგრამა და ტექნიკური გაანგარიშების ეროვნული მეთოდოლოგია და ღუმელების ეფექტურობის დასადატურებლად არანაირი ტესტირება არ ტარდებოდა.

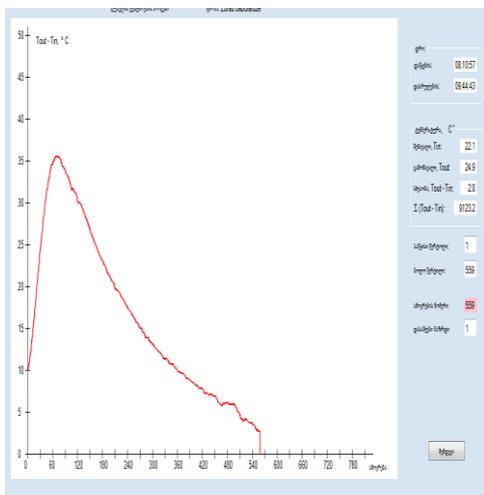
ამ ხარვეზის აღმოსაფხვრელად საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტის „მალალტემპერატურული თბოფიზიკური პროცესების სამეცნიერო-საინჟინრო ცენტრში“, საერთაშორისო და ევროპული სტანდარტების ISO/DIS 13336 და CEN/EN 13240 საფუძველზე, პროფ. ნოდარ ქევიშვილის ხელმძღვანელობით, შემუშავდა შემის ღუმელების ენერგოეფექტურობისა და თბური სიმძლავრის გაზომვის მეთოდოლოგია, რომელიც ითვალისწინებს ე.წ. „კალორიმეტრული კამერის“ გამოყენებას, სადაც, გარემოსაგან იზოლირებულად მოთავსებულია საკვლევი ღუმელი. ღუმელი, საწვავთან ერთად, იდგმება სასწორზე, რაც საშუალებას გვაძლევს გაიზომოს საწვავის ხარჯი დროის ნებისმიერი მომენტისათვის. წვისათვის საჭირო ჰაერი ღუმელში მიეწოდება იზოლირებულად, ისევე როგორც ნამწვი აირები ტოვებენ კამერას ჰაერთან კონტაქტის გარეშე. კალორიმეტრულ კამერაში ღუმელის მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის შესაფასებლად კალორიმეტრულ კამერაში შემსვლელი და გამომსვლელი მილების გამოყენებით ცირკულირებს ატმოსფერული ჰაერი მუდმივი ხარჯით (სურ.1).

ტესტირებისათვის წარმოდგენილ იქნა ოთხი მწარმოელის მიერ დამზადებული 7 ღუმელი. შვიდივე ღუმელი გამოიცადა პირდაპირი გაზომვის მეთოდით. გაზომვების ჩაწერისა და შედეგების დამუშავებისთვის შეიქმნა შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფა. შემის ღუმელის თბური სიმძლავრის ცვლილების ტიპური გრაფიკი მოცემულია სურ. 2-ზე. საშუალო მერქნის წვის პროცესში გამოყოფილი თბური ენერგია გრაფიკულად ტოლია იმ ფართობისა, რომელიც

მოთასებულია გრაფიკის მრუდსა და აბსცისათა ღერძს შორის.



სურ. 1. კალორიმეტრული სტენდი



სურ. 2. თბური სიმძლავრის ცვლილების ტიპური გრაფიკი

გარდა ენერგოეფექტურობისა, ღუმელების შესაფასებლად გამოყენებულ იქნა კიდევ რამდენიმე კრიტერიუმი (მათი სიმძლავრე, ცხოვის საშუალება, საცეცხლე კამერის ზომები, მათი წარმოების განვითარებისა და უსაფრთხო ექსპლუატაციის შესაძლებლობები).

წარმოდგენილი ღუმელები, რომელთა ენერგოეფექტურობა 70%-დან 85%-მდე იცვლებოდა, მათი ღირებულებისა და ენერგოეფექტურობს მიხედვით, გაიყო ორ

ჯგუფად. პირველ ჯგუფს მიეკუთვნა 500 ლარზე ნაკლები ღირებულებისა და არა ნაკლებ 70% ენერგოეფექტურობის მქონე ღუმელები, ხოლო მეორე ჯგუფს - 1000 ლარზე ნაკლები ღირებულების ღუმელები, არა ნაკლებ 80% ენერგოეფექტურობით. ტესტირების შემდეგ საქართველოს ბაზარს შეემატა მაღალი ენერგოეფექტურობის მქონე შემის ღუმელების სამი ვარიანტი: „ეკონომ-ღუმელი საცხობით - MZ-08, „ეკონომ-ღუმელი საცხობის გარეშე - MZ-18 და „რუსთავის ღუმელი“.

საქართველოში, გერმანიის საერთაშორისო თანამშრომლობის საზოგადოების (GIZ) მიერ განხორციელებული გარემოსდაცვითი პროგრამის ECOserve ფარგლებში, სოფლის განვითარების სააგენტოს (RDA) წარმომადგენლებისა და ამავე სააგენტოს ახმეტის საკონსულტაციო სამსახურის თანამშრომლების მიერ ქ.ახმეტისა და ახმეტის მუნიციპალიტეტის 15 სოფლის წინასწარ შერჩეულ 41 ოჯახში, არსებული ტრადიციული საყოფაცხოვრებო შემის ღუმელები ჩანაცვლებულ იქნა ახალი ენერგოეფექტური შემის ღუმელებით (36 ერთეული „ეკონომ-ღუმელი საცხობი კამერით“, 3 ერთეული „ეკონომ-ღუმელი საცხობის გარეშე“ და 2 ერთეული „რუსთავის ღუმელი“).

ღუმელების მუშაობის ეფექტურობის შეფასება 2020-2021 წლის გათბობის სეზონზე მოხდა მონიტორინგის გზით. თითოეული ოჯახი RDA-ს მეთვალყურეობით ყოველდღიურად აწარმოებდა ოთახის და გარე ჰაერის ტემპერატურების გაზომვას, ღუმელის მუშაობის ხანგრძლივობის დაფიქსირებას და თვეში მოხმარებულ შემის ხარჯის აღრიცხვას. ამას წინ უძღოდა საცხოვრებელი შენობის შემომზღუდი კონსტრუქციების ტექნიკური მდგომარეობის შესწავლა და საჭიროების შემთხვევაში ენერგოდამზოგი ღონისძიებების შემუშავება (შენობის ენერგოაუდიტი) და ინფორმაციის შეგროვება ოჯახის მიერ წინა წელს მოხმარებული საშუალო მერქნის რაოდენობის შესახებ.

41 ოჯახში ჩატარებული დაკვირვებათა მონაცემების ერთობლივი დამუშავებით მიღებული შედეგების მაღალი სანდოობის მიზნით (მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების სტიუდენტის კრიტერიუმის შესაბამისად), ყურადღება გამახვილდა 23 სატესტო ოჯახის დაზუსტებულ მონაცემებზე.

მონაცემების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ენერგოეფექტური და ტრადიციული თუნუქის ღუმელების მქოვეციენტების საშუალო მნიშვნელობების სხვაობამ შეადგინა 68,9%-35%=33,9%. შედეგად 23 ოჯახში თუნუქის ღუმელების ენერგოეფექტური ღუმელებით ჩანაცვლებამ გამოიწვია გათბობის სეზონზე 129,9 მ<sup>3</sup> შეშის მოხმარება, მაშინ როდესაც სხვა თანაბარ პირობებში, 35% ეფექტურობის მქონე თუნუქის ღუმელების ექსპლუატაციის შემთხვევაში დაიხარჯებოდა 255,7 მ<sup>3</sup> შეშა, ანუ გათბობის სეზონზე დაიზოგა 125,8 მ<sup>3</sup> შეშა, რაც თითოეული ოჯახისათვის საშუალოდ 5,4 მ<sup>3</sup> შეშის დანაზოგს შეადგენს.

მიღებული შედეგების გავრცელებით ახმეტის მოსახლეობის პოპულაციაზე (9841 კომლი) დაბალეფექტური ღუმელების შეცვლა ენერგოეფექტური შეშის ღუმელებით გათბობის ერთ სეზონზე გამოიწვევს დაახლოებით 53140 მ<sup>3</sup> შეშის დაზოგვას.

საშეშე მარქნის დაზოგვის პოტენციალი და ინვესტიციის სიდიდე, რომლების ბინის მფლობელებს დაარწმუნებდნენ რესურსების დაზოგვის მნიშვნელოვანი პოტენციალის არსებობასა და ინვესტიციის მომგებიანობაში, მოცემულია ცხრ. 1-ში.

**საშეშე მარქნის დაზოგვის პოტენციალი და ინვესტიციის**

**ცხრილი 1**

კომლის №	შეშის დანაზ. 2020-2021 მ <sup>3</sup>	შეშის ფასი ლ/მ <sup>3</sup>	დაზოგილ შეშის ფასი ლარი	ღუმელის ფასი ლარი
№1	2,0	70	140	370
№2	4,6	70	322	370
№3	4,9	70	343	370
№4	1,5	70	105	250
№5	3,3	70	228	370
№6	3,5	70	245	370
№7	4,0	70	280	370
№8	5,0	70	350	370
№9	3,6	70	252	370
№10	2,5	70	175	370
№11	3,0	70	210	370
№12	5,0	70	350	370
№13	6,5	70	455	370
№14	6,5	70	455	370
№15	4,0	70	280	370
№16	5,0	70	350	695
№17	2,7	70	189	370

ხარჯსარგებლიანობის დასადგენად პირველ რიგში შეფასდა რეალური საპროცენტო განაკვეთი, რომელიც იანგარიშება ქვეყანაში წლიური ინფლაციის მაჩვენებლით (3,0%) და საბანკო ნომინალური საპროცენტო განაკვეთით (15,0%). ამ მონაცემებით საქართველოში რეალური საპროცენტო განაკვეთი შეადგენს 11,7%-ს (ცხრ. 2).

**პროექტის რენტაბელობის დასადგენი მაჩვენებლები**

**ცხრილი 2**

რეალური საპროცენტო განაკვეთის (11,7%), მყიდველის მიერ ღუმელის შესყიდვაზე განხორციელებული ინვესტიციის რაოდენობის (370 ლარი) და წლიური დანაზოგის (480 ლარი) მიხედვით, ცხრილში 3 წარმოდგენილია ეკონომიკური გაანგარიშება ერთი კონკრეტული ოჯახისათვის.

**ეკონომიკური გაანგარიშება ერთი ოჯახისათვის**

**ცხრილი 3**

როგორც ცხრ. 3-დან ჩანს, მარტივი ამოგება (PB) შეადგენს 0,8 წელს, ხოლო ამოგება ინფლაციის (PO) გათვალისწინებით, ანუ თანხა რომელიც დახარჯა მყიდველმა ინფლაციის გათვალისწინებით, დაიბრუნებს 0,9 წელში, რაც ძალიან კარგი მაჩვენებელია.

ანალოგიური ეკონომიკური გაანგარიშებების შედეგები 17 ოჯახისათვის ნაჩვენების ცხრილში 4

ეკონომიკური გაანგარიშება  
17 ოჯახისათვის

ცხრილი 4

Measures	Investment	Net savings	PB	PO	IRR	NPV	NPVQ	Max. Investment	TOTAL Investment
Eorchashvili Elysa	370	400	0,8	0,9	130%	2.381	6,44	2.746	10,0
Krimelashvili Meri	370	400	0,8	0,9	130%	2.381	6,44	2.746	10,0
Borchashvili Vachagan	370	375	1,0	1,1	101%	1.779	4,81	2.145	10,0
Kantarashvili Natiela	370	375	1,0	1,1	101%	1.779	4,81	2.145	10,0
Makhidze Albert	370	360	1,0	1,1	99%	1.739	4,70	2.105	10,0
Xadashvili Natiela	370	347	1,1	1,2	94%	1.619	4,38	1.955	10,0
Mchedlishvili Vago	370	305	1,2	1,4	82%	1.378	3,73	1.745	10,0
Ketelashvili Mariza	370	305	1,2	1,4	82%	1.378	3,73	1.745	10,0
Arndashvili Dalia	370	277	1,3	1,5	75%	1.218	3,29	1.585	10,0
Shavendashvili Nino	370	253	1,5	1,7	68%	1.080	2,92	1.447	10,0
Marukashvili Beba	370	253	1,5	1,7	68%	1.080	2,92	1.447	10,0
Muboshvili Gao	370	235	1,6	1,8	63%	977	2,64	1.344	10,0

ცხრ. 4-ის გაგრძელება

Measures	Investment	Net savings	PB	PO	IRR	NPV	NPVQ	Max. Investment	TOTAL Investment
Djabashvili Kacha	370	214	1,7	2,0	57%	857	2,32	1.224	10,0
Gidzashvili Gergo	370	209	1,9	2,2	53%	776	2,10	1.144	10,0
Manashvili Ananji	695	375	1,9	2,2	53%	1.454	3,09	2.145	10,0
Kolorashvili Tamar	250	130	1,9	2,3	51%	495	1,98	744	10,0
Ispitche Otar	370	140	2,6	3,3	36%	432	1,17	601	10,0

ხარჯსარგებლიანობის ანალიზმა გვიჩვენა, რომ რენტაბელობის დასადგენი ყველა ფინანსური მაჩვენებელი (ამოგების ვადა PB, ინვესტიციის გამოსყიდვის შიდა ნორმა IRR, წმინდა მიმდინარე ღირებულება NPV და წმინდა მიმდინარე ღირებულების კოეფიციენტი NPVQ) ადასტურებს იმას, რომ სოფლების საოჯახო სექტორში ენერგოეფექტური შემოს ღუმელების ფართომასშტაბიანი დანერგვის შედეგად საშუა

მერქნისა და ფულადი სახსრების ეკონომია მიიღება არა მხოლოდ ერთჯერადად, არამედ მომდევნო წლების განმავლობაშიც.

**დასკვნა**

საყოფაცხოვრებო შემოს ღუმელების ტესტირების საერთაშორისო და ევროპული სტანდარტების ISO/DIS 13336 და CEN/EN 13240 შემოღება და ახალი ტყის კოდექსის მიღება, სტიმულს მისცემს და წაახალისებს ადგილობრივ მწარმოებლებს, დაამზადონ უკეთესი ხარისხის და უფრო მაღალი ენერგოეფექტურობის შემოს ღუმელები. ხოლო, მოსახლეობა მალე გაითავისებს, რომ ენერგოეფექტური ღუმელების შემქნით, კარგად გამომშრალი საშუა მერქნის გამოყენებით და შენობის დათბუნების მარტივი ღონისძიებების გატარებით, შეძლებენ იცხოვრონ უფრო კომფორტულად და მნიშვნელოვნად შეამცირონ დანახარჯები გათბობასა და საკვების მომზადებაზე.

**ლიტერატურა**

1. ქევიცივილი. ო. კილურაძე, ნ. ივნია, ნ. ჯავშანაშვილი, თ. ჯიშკარიანი. ენერგოაუდიტი საქართველოს რეგიონების საყოფაცხოვრებო სექტორში. სახელმძღვანელო, ISBN 978-9941-8-3889-7. თბილისი. 2021. 164 გვ.
2. ნ. ქევიცივილი, თ.ჯიშკარიანი, ხ. არაბიძე, ნ. ჯავშანაშვილი, თ. ყვავიაშვილი. საშუა მერქნის წვის პროცესი და საყოფაცხოვრებო შემოს ღუმელების ენერგოეფექტურობა/ჟურნალი „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი“ (სსს). №1. 2023. გვ. 65-72.

**References (Transliterated)**

1. N.Kevxihvili, O.Kiguraze, N.Ivnia, N. Javhanahvili, T.Jihkariani. Energoauditi saqartvelos regione bis sakofacxovrebo seqtorhi. Saxelmzrvanelo, ISBN 978-9941-8-3889-7, Tbilisi, 2021, 164 გვ.
2. N.Kevxihvili, T.jihkariani, G. Arabize, N.Javhanahvili, T. Kvavihvili. „sahehe merqnis wvis procesi da sayofacxovrebo hehis rumelebis energoefqturoba. Jurnal i „saqartvelos sainjinro siaxleni“ (sss), .№1. 2023. 65-72.