



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE OF AZERBAIJA
MINISTRY OF SCIENCE AND EDUCATION
OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN
INSTITUTE OF PHYSICS

ENERGETİKANIN PROBLEMLƏRİ

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

POWER ENGINEERING PROBLEMS

ENERGETİKANIN KOMPLEKS PROBLEMLƏRİ * ELEKTROENERGETİKA * İSTİLİK ENERGETİKASI * İSTİLİK FİZİKASI *
ELEKTROFİZİKA * ELEKTROTEKNOLOGİYA * ENERJİ MƏNBƏLƏRİ * EKOLOGİYA * XRONİKA

КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ * ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА * ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА * ТЕПЛОФИЗИКА *
ЭЛЕКТРОФИЗИКА * ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ * ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ * ЭКОЛОГИЯ * ХРОНИКА *

COMPLEX PROBLEMS OF POWER ENGINEERING * THE ELECTRICAL POWER ENGINEERING *
THE THERMAL POWER ENGINEERING * THERMOPHYSICS * ELECTROPHYSICS * ELECTROTECHNOLOGY *
ENERGY SOURCES * ECOLOGY * CHRONICLE

* DATA ANALİTİK VƏ SÜNİ İNTELLEKT *
* АНАЛИТИКА ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ *
* DATA ANALYTICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE *

4

2025

BAKİ ☆ ELM ☆ BAKU

ENERGETİKANIN PROBLEMLƏRİ

elmi – texniki jurnal

№ 4 2025

Jurnal 2000-ci ildə akademik Ç.M.Cuvarlı tərəfindən təsis edilib

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Rəyasət Heyətinin qərarı ilə çap olunur

Redaksiya heyəti

A. Həşimov (baş redaktor), N. Rəhmanov (baş redaktorun müavini), J. Bilbao (İspaniya), K. Dursun (Norveç), N. Bizon (Rumıniya), P. İlyuşin (Rusiya), A. Murakami (ABŞ), T. Nurubəyli (məsul katib və texniki redaktor), C. Taplamacıoğlu (Türkiyə), N. Tabatabai (Danimarka), N. Yusifbəyli, H. Quliyev, A. Babayeva, T. Xalina (Rusiya), R. Kəlbəliyev, R. Rəhmanov (İngiltərə), N Duich (Xorvatiya).

Redaksiyanın ünvanları: Bakı, Az-1143, H.Cavid prospekti, 131, AR ETN Fizika İnstitutu,
Az-1602, H.Zərdabi prospekti, 94, Az.ET və LAEI

Tel.: (994 12) 539-44-02

Faks: (994 12) 539-31-16

E – mail: a.hashimov@physics.science.az

Nəşrin redaktoru: F.Rzayev

“Energetikanın Problemləri” jurnalı Azərbaycan Respublikası Mətbuat və İnformasiya
Nazirliyində qeydiyyatdan keçmişdir, qeydiyyat sayı B 507

Tiraj: 50 nüsxə

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

научно – технический журнал

№ 4 2025

Основан в 2000 году академиком Ч.М.Джуварлы

Печатается по постановлению Президиума Национальной Академии Наук Азербайджана

Главный редактор

академик НАН Азербайджана А.М. Гашимов

Адреса редакции: Az -1143, Баку, пр.Г.Джавида, 131, Институт Физики МНО АР
Az -1602, Баку, пр.Г.Зардаби, 94, АЗ.НИИПИИ Энергетики ОАО “Азерэнерджи”

Тел.: (994 12) 539-44-02

Факс: (994 12) 539-31-16

E-mail: a.hashimov@physics.science.az

POWER ENGINEERING PROBLEMS

Editor in chief Arif Hashimov

Editorial board

N. Rahmanov (deputy editor in chief), J. Bilbao (Spain), K. Dursun (Norway), N. Bizon (Romania), P. Iushin (Russia), A Murakami (USA), T. Nurubeyli (executive secretary) Ch. Taplamachioglu (Turkey), N. Tabatabaei (Danmark), N. Yusifbeyli, H. Quliyev, A. Babayeva, T. Khalina (Russia), R. Kalbaliyev, R. Rahmanov (UK), N. Duich (Croatia).

Published by the decision on the Presidium of the Azerbaijan National Academy of Sciences

International Scientific, technical and industrial journal. Published from September, 2000

DOI:10.70784/azip.5.2025403

**RESEARCH ON THE INFLUENCE OF VOLTAGE AND CURRENT HARMONICS
ON ELECTRICAL LOSSES IN ELECTRICAL NETWORKS****MARUFOV I.M., MUKHTAROVA K.M., KARIMOVA S.M.***Azerbaijan State Oil and Industry University*
ilkinmarifov@mail.ru tel.051- 731-01-30

This article analyzes the impact of nonlinearity of modes and non-sinusoidality of voltage-current waveforms on the efficiency of electrical actuators in distribution electrical networks. During the study, it was determined that actuators with nonlinear characteristics worsen the quality of electrical energy and cause the formation of voltage and current harmonics in the network. Different types of nonlinear actuators in distribution networks were studied in groups and the spectrum of harmonics they created was analyzed. The reasons for the formation of voltage and current harmonics were investigated, and the issue of normalizing the allowable currents based on the method of calculating the correction factor for cable lines and current transformers was considered. Calculations based on the measured load spectrum have shown that the effective current reduction factor is 0.975, which requires a reduction of about 10% of the fundamental frequency component. The results of the study are of practical importance for assessing the impact of harmonics in electrical networks and controlling nonlinear loads.

Keywords: nonlinearity, harmonics, voltage, current, asinusoidal, network, correction factor, transformer.

Introduction

The most negative consequence of network loading, high harmonics, has been studied even better, and several books have been written on this issue. The effect of asinusoidality of voltages and currents on the main operation of electrical equipment is practically present in all industrially developed countries and, as a rule, on the one hand, leads to an increase in voltage and power losses in networks, a further decrease in their carrying capacity, and on the other hand, to a violation of the nominal operation of electrical equipment and a slight reduction in its service life, as well as a decrease in labor productivity, as well as the quality and quantity of the product produced [1]. For example, it is obvious that at a possible asymmetric value of the voltage of approximately 2% and asynchronicity of 5%, the basic service life of induction motors is reduced by 21%, for synchronous motors by 32%, for transformers by 8%, and for capacitors by 40%.

When considering the distortion of the voltage and current curves of a low-voltage network, it is necessary to take into account certain features of its construction. For a special case, they are related to the fact that the vast majority of the requirements of such a network, as well as nonlinear ones, are single-phase. If the network is 3-phase, then all types of high-harmonic currents flow. In this case, the low voltage in the 4-wire network can cause problems with the 0 wire becoming even higher, which leads to uneven loading of the phase wires when a single-phase nonlinear load is directly connected to them. Sometimes the algebraic sum of the current in the 0 wire can exceed the final value of the current in the phase wire. The analysis performed in this work shows that the current (neutral maximum) is theoretically 1.730, and sometimes even 3 times greater than the phase value, taking into account harmonics. At the moment of instantaneously changing load, current pulsation is observed for each phase at different times. Since all currents flow into the neutral, there can be no question of mutual compensation [2]. The maximum value for the load is not crossed, the neutral current is taken as three times the phase current. In this case, the specific weight of the electronic equipment is sufficiently small for a larger network. It is more important to note some of the main constructive features implemented by the low-voltage network. They can have a significant impact on the higher harmonic values of the voltage and current. According to current practice, the most common design for NN networks is distribution transformers with winding

connections such as a star-star scheme with 0. The main disadvantage of such transformers is the relatively large resistance of the Z 0 series. This is determined by the main constructive feature of the transformer, the scheme of its existing winding connection, the degree of basic saturation (reading) for magnetic wires, etc. It should also be noted that several works have been devoted to the issues of finding the total resistances of the transformer R active, X inductive, Z. Different methods were used when finding these parameters using various wires. In this regard, the results differ more among themselves. When analyzing the following, it can be concluded that the final value of Z for transformers with TM, TCMA, TMA windings is more than 8-18 times. This feature of transformers with a star-star winding connection can make low phase currents much more sensitive to asinusoidality [3].

Problem statement

For about the last three years, the center of electromagnetic safety has been studying the state of the power supply system in large buildings with networks of 100 and thousands of computers. Analysis of domestic and foreign publications leads experts to the conclusion that the "Energy System" is facing a new and more serious problem. Its main meaning is that the power supply network in buildings equipped with computer equipment is exposed to higher harmonics than the 0.4 kV industrial frequency (50 Hz) harmonics. At the moment when the total power of non-linear electrical consumers is taken no more than 10-15%, in this case, any malfunctions in the operation of the power supply system cannot occur. When the specified limit is exceeded, various problems in operation arise. In buildings with more than 25% nonlinear load, problems can occur more quickly [4-6]. The same problem also occurs with semiconductor-type nonlinear loads. The general form of the most common voltage is shown in Figure 1, while the ideal form, when compared with sinusoidal ones, is shown in Figure 2.

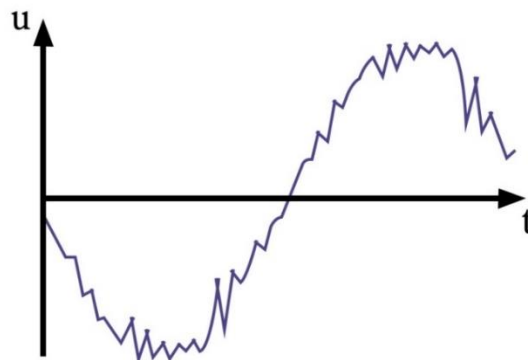


Fig.1. Real form of stress during nonlinear loading.

Harmonic distortion of voltages and also currents occurs when there is an element or equipment in the network that has a nonlinear volt-ampere characteristic.

Sources of sinusoidal voltage distortion can be grouped [7] into the following main types:

1. Electrical power equipment: AC frequency converters, DC converters, UPS uninterruptible power supplies, rectifiers, converters, thyristor systems, diode bridges, high-frequency metal melting furnaces.
2. Welding machines, arc furnaces, control systems for residual frequency currents, arc metal melting furnaces, welding machines, welding machines and arc steel melting furnaces generate harmonic spectra, the frequency of harmonics, they are generated by the equipment.
3. Transformers with non-linear characteristics, especially with saturation.
4. Frequency converters, cycloconverters, rectifiers.
5. Induction motors, motors, generators, etc.

Induction motors generate harmonics when there is a gap between the stator and rotor, especially with the saturation of the steel; during normal rotation of the rotor, the harmonic frequencies are in the range of 500-2000 Hz, but during engine start-up they "skip" the entire range to a certain value. The torques generated by the motors can be very significant when they

are installed at the end of a long low-voltage line. In cases of more than 1 km, harmonic quantities of up to 1% have been measured [8-11].

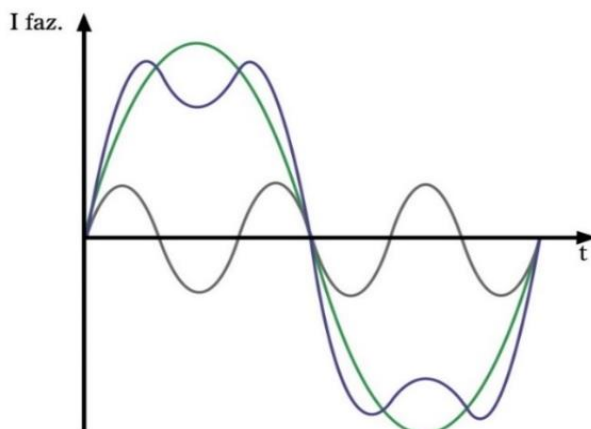


Fig 2. Distortion of sinusoidal voltage and the appearance of harmonic components.

6. Household appliances: computers, televisions, ovens.

7. Rotating machines - generators and motors, the rotating field of which is non-ideal sinusoidal. In this case, it is possible to suppress the first-order harmonics, which are more important than the higher harmonics and at the same time are less valuable, poorly distributed throughout the system.

8. Saturated magnetic circuits are, first of all, transformers, where the relationship between induction (B) and magnetic field (H) is nonlinear. In the first approach for the magnetized current, it can be assumed that the fundamental harmonic dominates, and other harmonics are not significant. However, in this case, the magnetic flux, and therefore the voltage at the outputs, cannot be considered sinusoidal.

9. Lighting (DPL-mercury lamps, fluorescent lamps): gas discharge lighting devices and electrical ballasts.

Problem solving

The essence of the existing methodology is that we can calculate the correction factor taking into account the effect of the spectrum of the resulting harmonic, the total number of parallel cables laid in a given trench, the ambient temperature, the permissible loading, etc. It is known that when an aperiodic current flows through the phase line of the cable, heat can be released due to the active power loss caused by the current of the fundamental frequency and also by higher harmonics [12].

$$P_{\Sigma}^{ph} = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R_n \quad (1)$$

where I_1, I_n - fundamental frequency and also harmonic current at high limits, R_1, R_n - active resistance of fundamental frequency and harmonic current at high limits. In the 0 line, at the moment of non-linear symmetrical loading, high harmonic currents can flow, which can cause 3 times higher harmonics and additional power loss.

$$P_{\Sigma}^{zero} = 9 \cdot \sum_{n=3,9,15..} I_n^2 \cdot R_n, \quad (2)$$

Expressions (1) and (2) determine the active resistance of the currents in the n th harmonic.

$$R_n = R_d(0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}), \quad (3)$$

where R_d is the resistance of the line to the current at the fundamental frequency, and n is the total number of harmonics. The released heat is transferred from the heated lines to the surrounding environment by thermal conductivity [13]. The thermal regime for the cable is found by the second-order differential equation of the heat balance.

$$a \cdot \nabla^2 T = 0 \quad (4)$$

where a - is the heat transfer and ∇ - is the Laplace operator. The basic calculation method for the correction factor of the longer-term maximum current can be given by the sum of the active power losses in the zero and phase lines and is more precisely shown in expressions (2) and (1).

$$P_{\Sigma} = 3I_1^2 \cdot R_1 \cdot K_{allo} \quad (5)$$

Based on the value of this coefficient, which is greater than unity, the further increase in losses when an a-sinusoidal current flows relative to the current at the fundamental frequency can be determined by the expression given below.

$$k_{alo} = 1 + \sum_{n=2}^{40} (k_{1n})^2 A_n + 3 \frac{R_1^{zero}}{R_1} \sum_{n=3,9,15...}^{40} (k_{1n})^2 A_n \quad (6)$$

k_{1n} - nth harmonic coefficient for current; R_1^{zero} - active resistance of the 0 line at the fundamental frequency, n- harmonic number; $A_n = 0,1870 + 0,532\sqrt{n}$.

Then the concept of equivalent current is applied. This is the basic frequency current, the amount of heat released when current flows through the 3-wire cable, is assumed to be the same as the amount of heat released when a sinusoidal current flows through the 0-wire cable.

This can also be calculated in the form given below.

$$I_{ekv} = I_1 \cdot \sqrt{k_{allo}} \quad (7)$$

In terms of energy, the application of the concept of equivalent 1 is the replacement of the active energy loss caused by the transition from 4 sources (three lines and 0) to 3 sources (three lines) and the total power of the heat released by the non-sinusoidal current with the fundamental frequency current: The reduction of the 4th heat source to 3 is an error case, since there is some insulation with thermal resistance between 0 and the phase line. However, calculations show that this error is approximately 5%. As a result, the correction factor for the longer-term discharge current is determined in the form given below.

$$K_{allo.v} = 1/\sqrt{k_{allo}} \quad (8)$$

This coefficient is intended to be used to determine the long-term permissible current when choosing a given cross-section of a cable of known power, in order to avoid some heating of the cable insulation by higher harmonics. From the expression in (8) it is also possible to determine the fundamental frequency current [14]. The current correction factor for the effective value of the asinusoidal current is determined in the form given below.

$$K_d = k_{allo.v} \sqrt{1 + \sum_{n=3} (K_{I_n})^2} \quad (9)$$

Figure 3 shows the implementation of the method in the form of an algorithm.

The calculation of the current correction factor analysis methodology has the following regularity:

- The final value of the correction factor for cables of different brands laid under equivalent conditions is always similar, regardless of the designation of the cable insulation.
- The final value of the correction factor never depends on the cross-section of the phase line for the cable.
- The final value of the correction factor for the long-term allowable current for 4-wire cables with a 0-wire of small cross-section is even smaller than for cables with the same cross-section of all types of lines.
- The wider the spectrum of harmonics generated by nonlinear electrical receivers, the greater the value of the harmonics of the current.

ACBx Type 150 power cable is intended for supplying non-linear loads (Shopping mall). It is important to determine the final value of the maximum continuous current at the

fundamental frequency when the effective value of the phase and zero currents and the heating of the insulation of a given cable, which can affect the coefficient of high-value harmonics of the current, are not taken into account [15]. The spectral shape of the harmonics of the phase current in the table .

Active resistance of the core for the cable $R_1 = R_1^{zero} = 0,243 \frac{Om}{km}$.

Final table value of the current that can be continuously discharged $I_{allo}^{table} = 281 A$

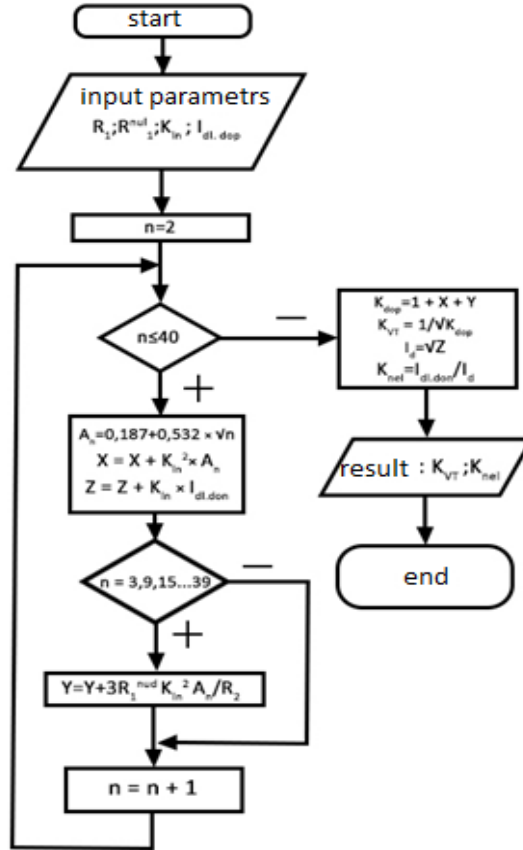


Fig.3. Algorithm for calculating the long-term allowable correction factor of a cable.

Table 1.

Measurement of the harmonic spectrum of the connected current

Number of harmonicas	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$K_{In}, \%$	1	31,2	18,5	12,7	8,6	5,4	3,2	2,7	1,7	1,1	0,7

From the spectrum of existing harmonics, we first determine the necessary conditions for the use of expression . K_{In} , A_n , as well as the mathematical sum of all types of spectrum of current flowing in the 0 and phase lines with their 0-sequence harmonics are respectively equal.

$$\sum_{n=2}^{40} (K_{In})^2 \cdot A_n = 0,2045; \quad \sum_{\substack{n=2k=3, \\ n=3,9,15..}}^{40} (K_{In})^2 \cdot A_n = 0,1229$$

K_{allo} The coefficient (6) is determined from the final result.

$$K_{allo} = 1 + 0,2045 + 3 \frac{0,243}{0,243} \cdot 0,1229 = 1,573$$

At this moment, the basic value of the correction factor for the root mean square value of the continuous maximum current is determined by expression (9).

$$K_{vq} = \frac{1}{\sqrt{k_{allo}}} = \frac{1}{\sqrt{1,573}} = 0,797; \quad K_{ne} = 0,797 \cdot \sqrt{1 + 0,10552} = 0,838$$

The final value of the current that can be continuously passed at the fundamental frequencies, taking into account the corrections for the given harmonic currents,

$$I_{allo}^{bq} = I_{allo}^{table} \cdot K_{vq} = 281 \cdot 0,797 = 224,04 A$$

This method can introduce some error in finding the final value of the correction factor. The heat source is separated from each other by insulation with a certain thermal resistance.

Calculation method of the correction factor for the nominal current of an oil transformer.

The decrease in the transformer's capacity due to a sinusoidal current is determined by the increase in losses due to higher harmonic currents in addition to the increase in losses. All types of losses in a transformer can be divided into conventionally variable and conventionally constant losses (load losses) arising from the magnetization of the metal core. Conventionally constant losses practically do not change when the higher harmonics of the current flow. Unlike the load, in turn, the losses arising from the circulation and eddy currents in the winding are conventionally divided into losses on the walls and other parts of the given tank. All these components depend on the square of the effective value of the leakage current and the degree of the harmonics present. Due to the additional losses caused by the eddy current in the transformer windings and also by the circulating current, the corresponding degree is 2, while the other losses caused by the eddy current in the tank and other structural parts of the transformer are -0.8 and 1.05.

The increase in the total part of the additional losses of the active power with the participation of higher harmonics is characterized by the coefficient of increase in losses compared to the normal operating mode of the transformer at the fundamental frequency.

$$K_{fil} = \frac{P_{fil}}{P_{fil.nom}} = \sum_{n=1}^{n=n_{mak}} \left(\frac{I_n}{I_{nom}} \right)^2 \cdot n^2;$$

$$K_b = \frac{P_b}{P_{b.nom}} = \sum_{n=1}^{n=n_{mak}} \left(\frac{I_n}{I_{nom}} \right)^2 \cdot n^{1,05}$$

$$K_{dig} = \frac{P_{dig}}{P_{dig.nom}} = \sum_{n=1}^{n=n_{mak}} \left(\frac{I_n}{I_{nom}} \right)^2 \cdot n^{0,8}, \quad (10)$$

here P_{dig} , P_{fil} , P_b , losses in the transformer winding, tank and other parts from eddy current under normal conditions;

I_{nor} - The root mean square value of the current at nominal frequency and under normal load conditions.

In this case, the active power load loss of the transformer during an asinusoidal current leakage was usually considered equal to the load loss in the normal mode and in the presence of higher harmonics.

$$I_{nom}^2 \cdot R + P_{dol.nom} + P_{b.nom} + P_{d.nom} =$$

$$= I^2 \cdot R + K_{fil} \cdot P_{dol.nom} + K_{dig} \cdot P_{dig.nom} \quad (11)$$

(11) with this

$$\frac{I}{I_{nom}} = \sqrt{\frac{P_{qiz.nom}}{1 + K_{dol} P_{dol.nom} + K_b \cdot P_{b.nom} + K_{dig} P_{dig.nom}}} \quad (12)$$

Based on the data provided in the transformer passport, the algorithm allows determining a correction factor for the normal value, based on the spectrum of higher current harmonics and the main load of the current transformer compared to the normal value, taking into account the effect of very high current harmonics caused by non-linear electrical loads and the temperature rise above them.

$$\theta_b = \theta_{a.m.f} \left(\frac{K^2 (P_m + K_{fil} P_{fil.nom} + K_b P_{bak.nom} + K_{dig} P_{dig.nom}) P_{xx}}{P} \right)^{0,8} \quad (13)$$

$$\theta_{dol} = \theta_d \left(K^2 \frac{P_m + K_{fil} P_{fil.nom}}{P_m + P_{fil.nom}} \right)^{0,8} \quad (14)$$

$\theta_{a.m.f}$ - the basic value of the temperature increase in the upper part of the tank under normal conditions; $\theta_{dol.no}$ -- the value of the further increase in the given temperature of the most heated point of the winding above the temperature of the oil in the upper part of the tank; K- the load factor of the transformer relative to the normal value of the current. When the given geometric dimensions of the transformer are smaller, the algorithm allows for a more accurate calculation of the correction factor. Based on the spectrum of the load measured at the time of

using the given calculation method, the following certain results were obtained. The given effective value of the current reduction factor is 0.9750, while the main frequency current must necessarily decrease by approximately 10%.

Conclusion

The analysis of the impact of nonlinearity and non-sinusoidality of the regimes on the efficiency of the operation of electrical actuators was carried out. As noted, electrical actuators with nonlinear characteristics cause deterioration of the quality of electrical energy. The analysis of the main types of nonlinear actuators that cause voltage and current distortion in distribution electrical networks was carried out. Thus, different actuators consume certain types of nonlinear loads, therefore, it is advisable to study groups of actuators, not individual actuators. In addition, an analysis of voltage and current harmonics was carried out and the causes of their occurrence were identified. The issue of normalizing the currents that can be released using the correction factor calculation method in cable lines and current transformers was considered. The following results were obtained according to the measured load spectrum when using the calculation method. The reduction factor of the effective value of the current is 0.975, while the fundamental frequency current should decrease by about 10%.

-
1. *Depenbrock, M.* The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. IEEE transactions on power systems. Vol. 8, No 2, 1993, pp. 381-387.
 2. *Singh, B.* A review of active filters for power quality improvement. – IEEE trans. on industrial electronics / B/ Singh, K/ Al-Haddad, A. Chandra, Vol. 46, No 5, 1999, pp. 960-971.
 3. *Luo, S.* An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents. – IEEE trans. on industrial electronics / S. Luo, Z. Hou. Vol. 42, No 1, 1995, pp. 85-89.
 4. *Akagi, H.* Active harmonic filters. Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.
 5. *Cirincione, M. Vitale G.* A single-phase DG generation unit with shunt active power filter capability by adaptive neural filtering. – IEEE trans. on industrial electronics / M. Cirincione, M. Picci, 2008, Vol. 55, No. 5, pp. 2093-2110.
 6. *Karimi, H.* An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions. IEEE transactions on power delivery / H. Karimi, M. Karimi-Ghartemani, M. Iravani, Vol. 18, No 4, 2003, pp. 1350-1355.
 7. *Vissanrionov V.I., Deriogina G.V., Malinin H.K.* Power Equipment for use Renewabl Energy. -Moscow: VIEN, 2004.-pp.30-31.
 8. *Marina Brutinel.* Tecchnical and economic study of access to the energy services of the municipality of Safo. Report 3, March 2014.-pp.23-24.
 9. *Shuter T.C., Vollkommer H.T, Kirkpatrick T.L.* A survey of harmonic levels on the American electric power distribution system //IEEE Trans.on Power Delivery.- October 2007.-Vol.4, No.4.-P.2204-2213.
 10. *Hartungi R., Jiang L.* Investigation of power quality in health care facility, Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Canada, Spain, 2325 March, 2010.
 11. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A.* Analysis of reliability of typical power supply circuits. Reliability: Theory and Applications, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024
 12. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Ismayilova S.I.* High and low voltage coordination in electrical power systems. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). - Issue 62, Volume 17, Number 1, Pages 19-31, March 2025 (Serial No: 0062-1701-0325)

13. *Пириева Н.М., Рзаева С.В., Талибов С.Н.* Анализ устройств защиты от перенапряжений электрических сетей. «Интернаука»: научный журнал – №43(266). Часть 3. Москва, 2022. с.14-17
14. *Najiba P., Salmina A.* Some research questions of reactive energy compensation. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2023. 2(107). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14966_pp_68-71
15. *Маруфов И.М., Пириева Н.М., Алиева Г.А., Ганиева Н.А.* Анализ надежности энергетической системы. Научно-технический журнал, Проблемы энергетики №3. Баку, 2020. с.70-75.

ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİNDƏ GƏRGİNLİK VƏ CƏRƏYAN HARMONİKALARININ ELEKTRİK İTKİLƏRİNƏ TƏSİRİNİN ARAŞDIRILMASI

MƏRUF OV İ.M., MUXTAROVA K.M., KƏRİMOVA S.M.

Bu məqalədə paylayıcı elektrik şəbəkələrində rejimlərin qeyri-xəttiliyinin və gərginlik-cərəyan dalğaformalarının qeyri-sinusoidallığının elektrik işlədicilərinin işinin effektivliyinə təsirinin analizi aparılmışdır. Tədqiqat zamanı qeyri-xətti xarakteristikaya malik işlədicilərin elektrik enerjisinin keyfiyyətini pisləşdirdiyi və şəbəkədə gərginlik və cərəyan harmonikalarının yaranmasına səbəb olduğu müəyyən edilmişdir. Paylayıcı şəbəkələrdə müxtəlif tiplərə aid qeyri-xətti işlədicilər qrupları şəklində öyrənilmiş və onların yaratdığı harmoniklərin spektri təhlil edilmişdir. Gərginlik və cərəyan harmonikalarının formalaşma səbəbləri araşdırılmış, kabel xətləri və cərəyan transformatorları üçün düzəliş əmsalının hesablanması metodikasına əsaslanaraq buraxıla bilən cərəyanların normallaşdırılması məsələsinə baxılmışdır. Ölçülmüş yük spektri əsasında aparılan hesablamalar göstərmişdir ki, cərəyanın effektiv qiymətinin azaldılması əmsalı 0,975 təşkil edir və bu halda əsas tezlik komponentinin təxminən 10% azalması tələb olunur. Tədqiqatın nəticələri elektrik şəbəkələrində harmoniklərin təsirinin qiymətləndirilməsi və qeyri-xətti yüklərin idarə olunması üçün praktik əhəmiyyət kəsb edir.

Açar sözlər: qeyri-xəttilik, harmonika, gərginlik, cərəyan, asinusoidal, şəbəkə, düzəliş əmsalı, transformator.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

МАРУФОВ И.М., МУХТАРОВА К.М., КАРИМОВА С.М.

В данной статье анализируется влияние нелинейности режимов и несинусоидальности формы напряжения и тока на эффективность работы электроприводов в распределительных электрических сетях. В ходе исследования установлено, что электроприводы с нелинейными характеристиками ухудшают качество электроэнергии и вызывают образование гармоник напряжения и тока в сети. Были проведены групповые исследования различных типов нелинейных электроприводов в распределительных сетях и проанализирован спектр создаваемых ими гармоник. Исследованы причины образования гармоник напряжения и тока, а также рассмотрен вопрос нормирования допустимых токов на основе метода расчета поправочного коэффициента для кабельных линий и трансформаторов тока. Расчеты на основе измеренного спектра нагрузки показали, что эффективный коэффициент снижения тока составляет 0,975, что требует снижения основной составляющей частоты примерно на 10%. Результаты исследования имеют практическое значение для оценки влияния гармоник в электрических сетях и управления нелинейными нагрузками.

Ключевые слова: нелинейность, гармоники, напряжение, ток, асинусоидальность, сеть, поправочный коэффициент, трансформатор

DOI:10.70784/azip.5.2025411

AVTOTRANSFORMATORLARIN İFRAT GƏRGİNLİKDƏN MÜHAFİZƏSİNİN TƏKMİLLƏŞDİRİLMƏSİ

MUFİDZADƏ N.A., İSMAYİLOVA G.G.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
AZ1010, Bakı, Azadlıq prospekti, 20
gulgaz77@mail.ru*

Bu məqalədə avtotransformatorların ifrat gərginliklərin təsirindən mühafizəsi məsələsi ətraflı şəkildə araşdırılır və onların mühafizəsini təkmilləşdirmək üçün yeni, daha səmərəli bir sxem təklif olunur. Təklif edilən bu sxemə əsasən, avtotransformatorun orta gərginlik dolağının mühafizəsi, onun yüksək gərginlik dolağını qoruyan əsas ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcısının (İGM) kiçik bir hissəsindən və əlavə olaraq daha aşağı gərginlik səviyyəsinə malik ikinci bir İGM-dən istifadə etməklə yaradıla bilər. Belə yanaşma sayəsində avtotransformatorların ifrat gərginliklərdən mühafizəsi həm texniki, həm də iqtisadi baxımdan daha sərfəli olur, çünki bu halda mühafizə sisteminin dəyəri əhəmiyyətli dərəcədə azalır. Məqalədə həm ənənəvi, həm də təklif olunan yeni mühafizə sxemi tətbiq olunduğu hallarda, elektrik verilişi xətlərindən gələn impuls gərginlik dalğalarının avtotransformator dolaqlarında yaratdığı ifrat gərginliklər müqayisəli şəkildə tədqiq edilmişdir. Tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, hər iki sxem üzrə əldə olunan nəticələr bir-birinə çox yaxındır və ifrat gərginliklərin səviyyəsi yol verilən normativ hədləri aşmır. Belə olan halda, təklif olunan yeni sxemin həm texniki baxımdan etibarlı, həm də iqtisadi cəhətdən üstün olması özünü göstərir.

Açar sözlər: transformator, daxili ifrat gərginlik, xarici ifrat gərginlik, ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcıları, ildırımın mühafizəsi.

Məsələnin aktuallığı. Elektrik enerji sistemlərinin istismarı prosesində, sistemi təşkil edən elementlər müxtəlif xarakterli gərginlik və cərəyan artımlarının təsiri altında qalır. Bu artımların sayının böyük hissəsi daxili və xarici ifrat gərginliklərin yaranması ilə bağlı olur. Xarici ifrat gərginliklər, adətən, daha yüksək amplitudaya malik olur və onların yaranmasının əsas səbəbi ildırımın elektrik verilişi xətlərinə birbaşa dəşməsidir. Belə hallarda yaranan impuls ifrat gərginlikləri elektrik avadanlıqları üçün ciddi təhlükə yaradır.

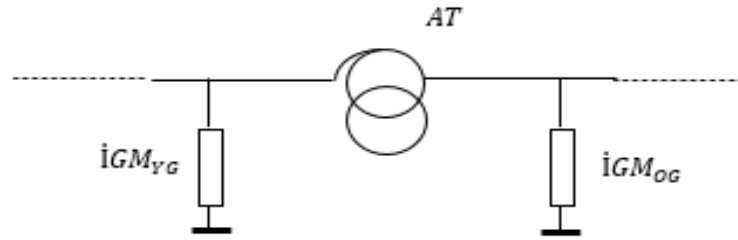
Bu cür zərbələrin mənfi təsirini azaltmaq və avadanlıqları qorumaq məqsədilə ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcıları (İGM) tətbiq olunur. Xüsusilə yarımstansiyalarda yerləşən transformatorlar və avtotransformatorlar (AT) yüksək dəyərə və strateji əhəmiyyətə malik avadanlıqlar olduğundan, onların mühafizəsi daha yüksək səviyyədə yaradılır. Bu məqsədlə əsas İGM-lə yanaşı, əlavə olaraq ikinci bir İGM də tətbiq olunur.

İkinci İGM, adətən, transformatorlardan müəyyən məsafədə yerləşdirilir və hər iki İGM-in effektiv və etibarlı işləməsini təmin etmək üçün yarımstansiya yaxın olan elektrik verilişi xətlərinin müəyyən hissəsi trosla (qoruyucu naqillə) örtülür. Bu texniki həllin məqsədi İGM-dən keçən cərəyanın onun yol verilən maksimal qiymətini aşmamasını təmin etməkdir [1].

Beləliklə, çoxpilləli mühafizə sxeminin tətbiqi sayəsində ildırım zərbələri və digər ifrat gərginliklərin yaranması zamanı sistemin etibarlılığı artır, bahalı elektrik avadanlıqlarının zədələnmə ehtimalı isə minimuma endirilir.

Avtotransformator (AT) müxtəlif gərginlik səviyyələrinə malik iki elektrik şəbəkəsi arasında əlaqələndirici funksiya yerinə yetirdiyindən, o, hər iki şəbəkə xətlərindən gələn ifrat gərginlik dalğalarının təsirinə məruz qala bilər. Buna görə də AT-nın xətlərdən gələn ifrat gərginlik dalğalarından etibarlı şəkildə mühafizəsini təmin etmək məqsədilə, onun həm yüksək gərginlik (YG) dolağı tərəfdə, həm də orta gərginlik (OG) dolağı tərəfdə ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcıları (İGM) yerləşdirilir (şəkil 1) [1,2].

Bu mühafizə üsulu sayəsində avtotransformatorun hər iki dolağı ildırım və ya digər mənşəli impuls gərginliklərdən eyni dərəcədə olunur, nəticədə avadanlığın izolyasiyasının zədələnmə riski azalır və onun istismarının etibarlılığı artır.

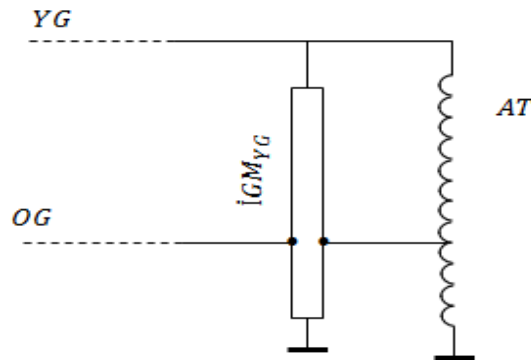


Şək. 1. AT – un xətlərdən gələn ifrat gərginlik dalğalarından mühafizəsi sxemi.

Bu məqalədə avtotransformatorun (AT) elektrik verilişi xətlərindən gələn ifrat gərginlik dalğalarından mühafizəsinin mövcud sxeminin təkmilləşdirilməsi məsələsi araşdırılır. Məqalədə həmçinin, mövcud sxemə nisbətən iqtisadi baxımdan daha sərfəli yeni bir mühafizə sxemi təklif olunur və AT-nın hər iki sxemlə mühafizəsi zamanı dolaqlarda yaranan ifrat gərginliklər təhlil edilir.

Avtotransformatorun orta gərginlik (OG) dolağı, əslində, onun yüksək gərginlik (YG) dolağının bir hissəsi olduğundan, OG dolağının mühafizəsini, YG dolağını mühafizə edən İGM-in müəyyən bir hissəsindən istifadə etməklə təmin etmək mümkündür (şək. 2-ə bax).

Bu yanaşma həm texniki cəhətdən effektivdir, həm də əlavə avadanlıq xərclərini azaltmağa imkan verir.



Şək. 2. AT – un xətlərdən gələn ifrat gərginlik dalğalarından bir İGM – lə mühafizə.

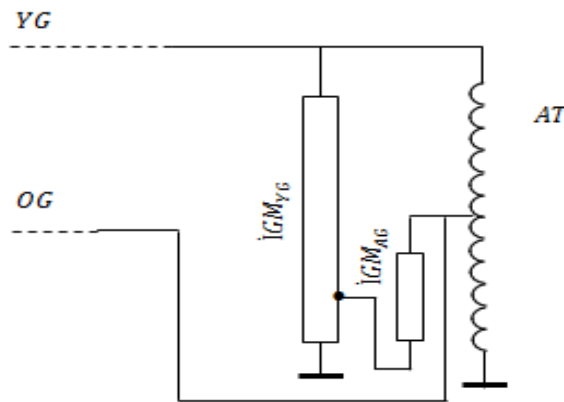
İlk yanaşmada belə düşünmək olar ki, YG İGM-də, OG dolağının gərginliyinə uyğun nöqtədən əlavə çıxış yaratmaqla və bu çıxışa OG xəttini və OG dolağını qoşmaqla avtotransformator (AT) hər iki tərəfdən (YG və OG xətlərindən) gələn ifrat gərginlik dalğalarından qorunmuş olar. Belə bir sxem ilk baxışda texniki baxımdan sadə və iqtisadi baxımdan sərfəli görünür, çünki əlavə avadanlıq və xərclər minimaldır və AT-nın qorunması birbaşa həyata keçirilir.

Lakin elektrik sisteminin istismarı zamanı bu yanaşmanın ciddi çatışmazlığı ortaya çıxır. Belə ki, OG tərəfdə qısa qapanma yarandıqda, YG İGM-in yüksək və orta gərginlik tərəfləri arasındakı hissəsi yüksək gərginliyin təsiri altına düşür. Belə yüksək gərginlik, İGM-in yüksək və orta gərginliklərin fərqi hesablanmış bu hissəsi üçün çox böyük təhlükə yarada bilər və onun sıradan çıxmasına gətirib, çıxarır. Nəticədə, AT-nın mühafizə sxemi zədələnir və sistemdə daha böyük qəza riski yaranır. Belə, mühafizə sxeminin iqtisadi baxımdan ucuz olmasına baxmayaraq, onun etibarlılıq baxımından ciddi problem yaratdığını göstərir.

Bu problemin qarşısını almaq üçün təklif olunan alternativ yanaşma daha təhlükəsiz və etibarlıdır. Burada YG İGM-dən çıxış, OG-ə uyğun nöqtədən deyil, daha aşağı gərginliyə uyğun nöqtədən götürülür. Bu nöqtəyə isə ikinci, daha aşağı gərginlikli İGM qoşulur - şəkl.3. Beləliklə, YG İGM-in əlavə çıxışı ilə yerə bağlanan nöqtəsi və ikinci alçaq gərginlikli İGM birlikdə OG dolağına uyğun olmalıdır. Bu yanaşma bir neçə üstünlük təmin edir:

1. İGM-in sıradan çıxma riskinin azalması – OG dolağında qısa qapanma baş verdikdə, YG İGM - in yüksək və orta gərginliklər arasında olan hissəsi, YG tərəfinin təsirinə məruz qalmır və normal iş rejimi davam edir.
2. Hər iki gərginlik səviyyəsi üçün etibarlı mühafizə – həm YG, həm də OG dolaqlarında yaranan ifrat gərginliklərə qarşı mühafizə - təmin olunur.
3. Sistemin etibarlılığının artması – mühafizə sxemindəki uyğunluq sayəsində qəza halları və əlavə zədələnmə riski minimuma endirilir.
4. İqtisadi səmərəlilik – əlavə İGM, OG İGM – dən daha aşağı gərginlikli olduğundan daha ucuz olur ki, bu da xərclərin azalmasına səbəb olur.

Beləliklə, YG İGM-in əlavə çıxışı ilə yerə bağlanan nöqtəsi arasındakı hissəsi və ikinci alçaq gərginlikli İGM-in birlikdə istifadəsi, OG dolağının qorunmasını təmin edir və AT-nın həm etibarlılığını, həm də uzunmüddətli istismar səmərəliliyini artırır (şəkil 3). Bu yanaşma, həm texniki, həm də iqtisadi baxımdan sistem üçün balanslaşdırılmış və etibarlı həll hesab olunur.



Şəkl. 3. AT – un xətlərdən gələn ifrat gərginlik dalğalarından bir əsas və bir əlavə İGM – lə mühafizə sxemi.

Məqalədə aparılan tədqiqatın əsas məqsədi, avtotransformatorun (AT) yeni təklif olunan mühafizə sxeminin mövcud istifadə olunan sxemə nisbətən texniki cəhətdən üstün olub-olmamasını müəyyən etməkdir. Bu məqsədlə, hər iki mühafizə sxemi ilə sistemin əlaqəsi ətraflı şəkildə öyrənilmiş və analiz edilmişdir [3,4].

Tədqiqat prosesində həm mövcud, həm də yeni sxem üzrə AT-nın dolaqlarında yaranan ifrat gərginliklər diqqətlə qiymətləndirilmişdir. Burada xüsusilə elektrik verilişi xətlərindən gələn impuls gərginlik dalğalarının təsiri altında dolaqlarda yaranan maksimal gərginliklər, bu gərginliklərin rəqsləri və dalğaların yayılma xüsusiyyətləri müqayisəli şəkildə araşdırılmışdır. Məqsəd, yeni sxemin tətbiqi ilə AT-nın həm yüksək gərginlik, həm də orta gərginlik dolaqlarında ifrat gərginliklərin azaldılması, qayıdan dalğaların minimuma endirilməsi və sistemin ümumi etibarlılığının artırılmasını müəyyən etməkdir.

Tədqiqatın nəticələri göstərir ki, yeni sxemin tətbiqi, AT-nın hər iki dolağında yaranan ifrat gərginlikləri effektiv şəkildə azaldır, mövcud sxemlə müqayisədə gərginlik səviyyələrində ciddi fərq yaranmır və nəticələr yol verilən normativ qiymətləri aşmır. Bu isə həm texniki etibarlılığı artırır, həm də əlavə mühafizə tədbirlərinin iqtisadi cəhətdən sərfəliliyini təmin edir.

Beləliklə, aparılan tədqiqat, yeni mühafizə sxeminin yalnız maliyyə baxımından deyil, eyni zamanda texniki baxımdan da effektiv və etibarlı olduğunu ortaya qoyur və AT-nın uzunmüddətli, təhlükəsiz istismarına şərait yaradır.

Tədqiqat metodu. Hesabatda nominal gərginliyi 220/110 kV olan avtotransformator (AT) tədqiqat obyektini kimi seçilmişdir. Tədqiqat üçün, AT dolaqlarının ekvivalent əvəz sxemi hazırlanmış və ona uyğun olaraq, həm yüksək gərginlik (YG), həm də orta gərginlik (OG) dolaqları üçün birləşdirilmiş mühafizə sxemi qəbul edilmişdir [6,7]. Bu yanaşma, AT- u onun real iş rejiminə uyğun modelləşdirmək və mühafizə sxeminin effektivliyini qiymətləndirmək üçün uygundur.

Hesabatda YG və OG tərəflərində İGM-lərlə AT dolaqları arasındakı məsafələr 120 m götürülmüşdür [5]. Bu məsafə yarımstansiyanın quruluşu (dalan tipli olması), xətlərin yerləşməsi və mühafizə elementlərinin optimal işləməsi baxımından seçilmişdir. Eyni zamanda, yarımstansiyanın digər elementlərini nəzərə alan xüsusi giriş tutumları, hesabata daxil edilərək sistemin tam elektrik xarakteristikası modelləşdirilmişdir.

İfrat gərginlik dalğası kimi, xəttə əmələ gələ biləcək maksimal impuls ifrat gərginlik dalğası seçilmişdir. Bu dalğanın parametrləri 1,2/50 μ s, amplitudu isə xətt izolyasiyasının örtülmə gərginliyindən bir qədər aşağı qəbul edilmişdir ki, modelləşdirmə praktiki istismar şərtlərini düzgün əks etdirməsin. Dalğanın yarımstansiya gəldiyi xətt isə dalğa müqaviməti parametrləri ilə riyazi modelə daxil edilmişdir.

Tədqiqat riyazi modelləşdirmə üsulu ilə aparılmış və OrCAD alqoritm dili istifadə olunmuşdur. Bu yanaşma, impuls ifrat gərginliklərin AT dolaqlarında yayılmasını və mühafizə sxeminin effektivliyini dəqiq şəkildə təhlil etməyə imkan verir.

Alınan nəticələr həm cədvəl 1, həm də şəkil 4–5 vasitəsilə təqdim edilmişdir. Cədvəllərdə mövcud və yeni mühafizə sxemləri olan hallarda yaranan ifrat gərginliklərin maksimum qiymətləri, onların zamana görə dəyişməsi və dolaqlarda gərginlik rəqslərinin paylanması müqayisəli şəkildə göstərilmişdir. Şəkillər isə sistemdə gərginliklərin dolaqlarda paylanmasını vizual olaraq əks etdirir, və nəticə enbbarı ilə sxemin effektivliyi və AT-nın hər iki dolağının qorunma səviyyəsi haqqında ətraflı informasiya verir [8].

Bu nəticələr göstərir ki, yeni təklif olunan mühafizə sxemi, mövcud sxemə nisbətən həm texniki etibarlılığı artırır, həm də iqtisadi cəhətdən səmərəlidir, yəni AT-nın təhlükəsiz istismarı üçün əlavə üstünlükləri təmin edir.

Cədvəl 1

Mövcud və yeni sxemlə mühafizə olunan AT – un YG və OG dolaqlarında ifrat gərginliklər

Mühafizə sxemi	Dalğa gələn xətt	U_{YM}	U_{Y1}	U_{Y5}	U_{Y8}	U_{OM}	U_{O1}	U_{O5}	U_{O8}	I_{YM}	I_{OM}
		kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kA
Mövcud sxem	YG xətti	436	561	415	279	115	115	93	55	3,42	0
	OG xətti	82	82	129	228	217	312	195	89	0	2,34
Yeni sxem	YG xətti	438	547	377	234	111	112	93	54	3,34	3,34
	OG xətti	82	82	134	216	210	303	190	84	0	2,38

Cədvəl 1-də hər iki İGM-də yaranan gərginlik və cərəyan dəyərləri, eləcə də AT dolaqlarının 1, 5 və 8-ci nöqtələrindəki gərginliyin qiymətləri təqdim edilmişdir.

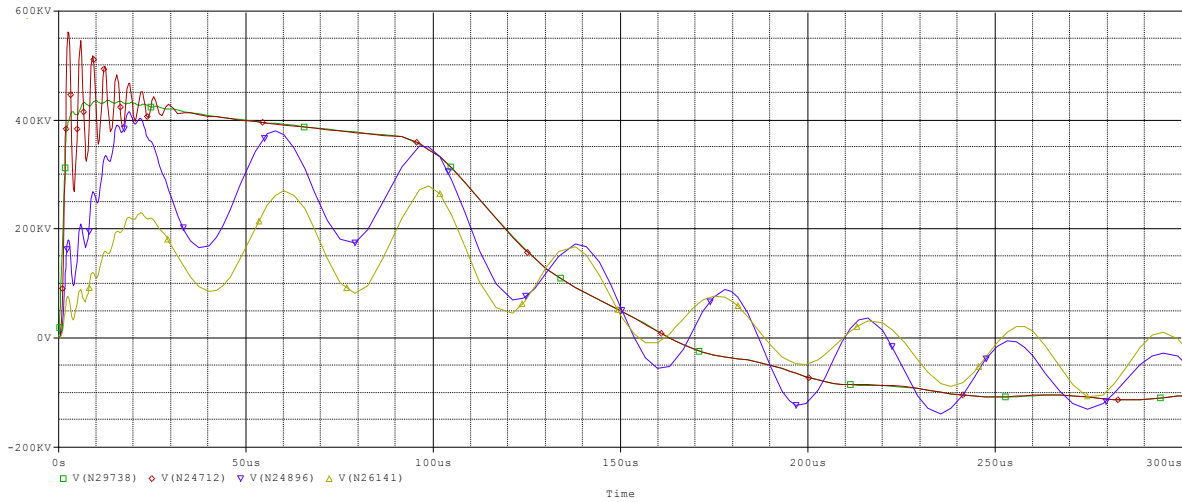
Mövcud mühafizə sxemi tətbiq olunmuş AT - a YG elektrik verilişi xəttindən gələn impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə, YG dolağından əvvəl yerləşən İGM gələn dalğanın amplitudasını 436 kV səviyyəsinə qədər azaldır. Bu zaman İGM-də yaranan cərəyan 3,423 kA

olur. Beləliklə, AT-nın YG dolağının girişində gərginlik 561 kV təşkil edir ki, bu da normativdə göstərilən 920 kV limitindən xeyli aşağıdır.

YG dolağında gərginlik, dolağın əvvəlindən axırına qədər monoton şəkildə azalır. Dolağın axırındakı gərginlik isə OG dolağının girişindəki gərginliyə bərabər olur və bu qiymət 115 kV səviyyəsində alınır. Bunun səbəbi, OG xəttinin bu nöqtəyə birləşməsi və onun dalğa müqavimətinin gərginliyi məhdudlaşdırmasıdır.

YG dolağına tətbiq olunan impuls gərginlik dalğası OG dolağına keçərək onun boyunca yayılmağa davam edir və dolağın əvvəlindən axırına qədər gərginlik azalır, çünki OG dolağının sonu yerə birləşdirilmişdir. OG dolağının girişində gərginliyin 115 kV olması göstərir ki, bu nöqtədə yerləşən İGM praktiki olaraq işləmir; onun cərəyanı isə 1 A-dən az 0,718 A alınmışdır [9,10].

Beləliklə, AT-nın mövcud mühafizə sxemi ilə YG dolağına impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə, dolağın 1, 5 və 8-ci nöqtələrində və YG tərəfdəki İGM-də yaranan gərginliklərin paylanması şəkil 4-də əyani şəkildə göstərilmişdir. Bu nəticələr göstərir ki, YG dolağının mühafizəsi effektiv şəkildə təmin olunur, OG dolağında isə impuls gərginliyin təsiri minimaldır və İGM işləmir.



Şək. 4. AT – un mövcud sxemlə mühafizəsi halında onun YG dolağına impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə, onun YG dolağının 1, 5, 8 – ci nöqtələrində və İGM – da gərginliklərin ayrılırları

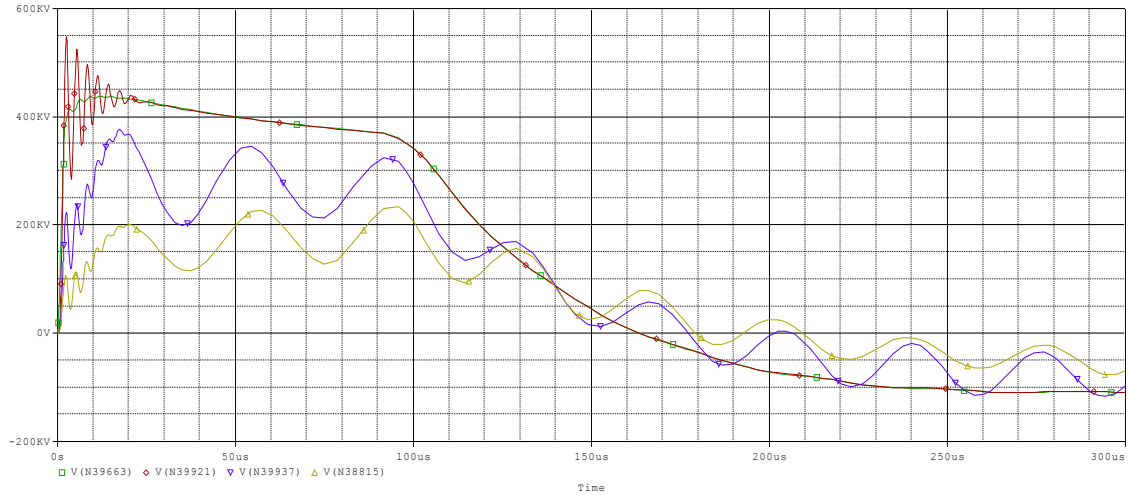
İmpuls gərginlik dalğası OG elektrik verilişi xətti ilə yarımstansiyaya gəldikdə o, AT – un bu hissədəki İGM – i ilə məhdudlaşdırılır. İGM – də gərginlik və cərəyan uyğun olaraq 217 kV və 2,343 kA alınır. Bu halda, OG dolağının girişində gərginlik 312 kV – a bərabər olur ki, bu da yol verilən qiymətdən (470 kV) çox kiçikdir. OG dolağında gərginlik yerlə birləşən neytrala qədər dolaq boyu azalır və neytral nöqtədə sıfır olur. OG dolağına təsir edən impuls gərginliyi digər istiqamətdə - YG dolağında da yayılır. Bu dolaqda gərginlik onun girişinə doğru dolaq boyu azalır və girişdə 88 kV olur. YG dolağının girişində gərginliyin belə kiçik qiymət almasına səbəb bu nöqtədə YG elektrik verilişi xəttinin olmasıdır. Xəttin dalğa müqaviməti girişindəki gərginliyi 88 kV – a qədər məhdudlaşdırır və bu qiymət kifayət etmir ki, buradakı İGM işləsin. Doğrudan da İGM işləmir, çünki ondan keçən cərəyan 0,249 A – dir [11].

Avtotransformatorun (AT) təklif olunan yeni sxemlə mühafizəsi zamanı əldə olunan nəticələrin, onun mövcud sxemlə mühafizəsi zamanı əldə olunan nəticələrlə müqayisəsi göstərir ki, bəzi göstəricilər demək olar ki, eynidir, digərlərində isə yalnız cüzi fərqlər mövcuddur (cədvələ bax).

Məsələn, YG xəttindən gələn impuls gərginlik dalğası zamanı bu tərəfdə yerləşən İGM-də yaranan gərginlik mövcud sxemdə 436 kV, təklif olunan sxemdə isə 438 kV alınır. İGM-də

yaranan cərəyanlar müvafiq olaraq 3,42 kA və 3,34 kA, dolağın girişindəki gərginlik isə 561 kV və 548 kV olmuşdur. Bu göstəricilər arasında fərq minimaldır və hər iki sxemin mühafizə effektivliyinin yüksək olduğunu göstərir.

AT-nın mövcud sxemlə mühafizəsi zamanı YG dolağının bir neçə nöqtəsində və İGM-də yaranan gərginliklərin paylanması şəkil 4-də göstərilmişdir. Eyni ölçmələr yeni sxemlə mühafizə zamanı da aparılmış və nəticələr şəkil 5-də təqdim edilmişdir. Şəkil 4 və şəkil 5-i müqayisə etdikdə görünür ki, gərginlik ayrıları arasında nəzərəcarpacaq fərq yoxdur, yəni hər iki sxem dolaqların ifrat gərginliklərdən qorunmasını eyni səviyyədə təmin edir.



Şək. 5. AT – un yeni sxemlə mühafizəsi halında onun YG dolağına impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə onun bu dolağının 1, 5, 8 nöqtələrində və İGM – də gərginlik ayrıları

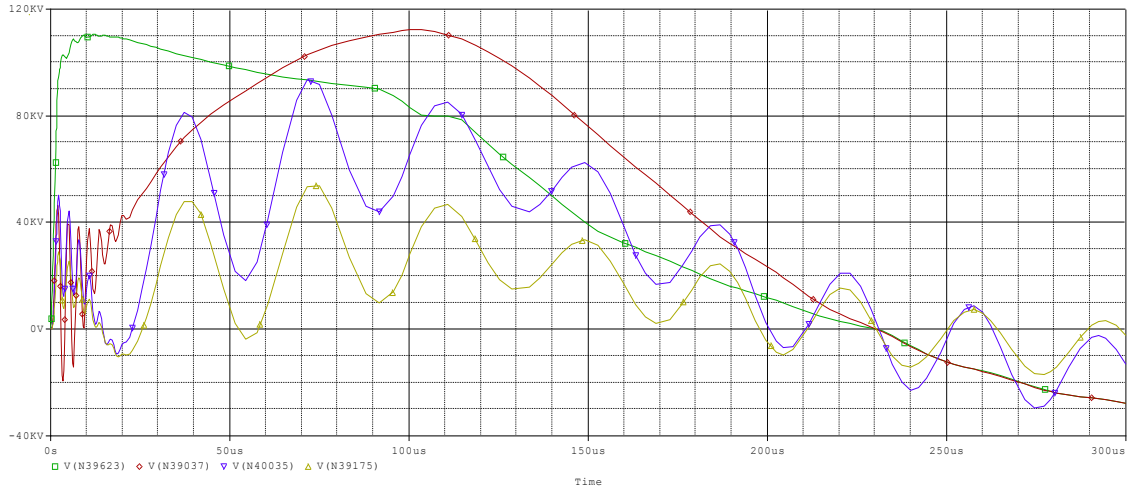
Bu nəticələr göstərir ki, yeni sxemin tətbiqi mövcud sxemlə müqayisədə texniki baxımdan heç bir zəiflik yaratmır, lakin əlavə üstünlük — iqtisadi səmərəlilik və sadələşdirilmiş quruluş təmin edir.

Avtotransformatorun (AT) yeni təklif olunan sxemlə mühafizəsi zamanı, ona YG xəttindən gələn impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə, OG dolağında yaranan gərginliklərin qiymətləri mövcud sxemlə mühafizə zamanı ölçülən gərginliklərlə çox yaxın olur. Yəni, yeni sxemin tətbiqi OG dolağında maksimal gərginliyin səviyyəsini əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirmir və bu baxımdan yeni sxem mövcud sxemlə müqayisədə texniki baxımdan effektivdir [12,13].

Lakin, OG İGM-də və OG dolağının girişindəki gərginliklərin dalğa forması fərqli xarakter daşıyır: burada yaranan gərginliklər aperiodik, yəni düşən dalğa tipində olur (şəkil 6). Bu fərqliliyin səbəbi, YG dolağının girişinə tətbiq olunan impuls gərginlik dalğasının OG dolağının girişinə birbaşa YG dolağından keçərək gəlməməsidir. Bunun əvəzinə, dalğa OG dolağına kombinə edilmiş YG və OG İGM-lərdən keçərək daxil olur.

Nəticədə, OG dolağında yaranan gərginliklər artıq YG dolağından birbaşa ötürülən dalğa xarakterini daşımır. İGM-lərin və dolağın elektrik parametrləri bu dalğanın amplitudasını və formalarını dəyişir, bu isə aperiodik dalğa forması ilə nəticələnir. Bu xüsusiyyət, OG dolağının impuls gərginliklərin təsirinə reaksiyasını daha yumşaq və nəzarət olunan şəkildə dəyişdirir, eyni zamanda dolağın izolyasiyasının qorunmasını təmin edir.

Beləliklə, yeni sxem tətbiq edildikdə OG dolağında maksimal gərginlik səviyyəsi mövcud sxemlə demək olar ki, eynidir, lakin gərginliklərin dalğa forması aperiodik xarakter alır, bu da mühafizə sisteminin reaksiyasının dəyişməsinə göstərir. Bu xüsusiyyət, impuls ifrat gərginliklərin AT-nın OG dolağına təsirini azaldır və dolağın izolyasiya stressini balanslaşdırır, nəticədə AT-nın etibarlılığı və təhlükəsiz istismarı artır.



Şək. 6. AT – un yeni sxemlə mühafizəsi halında onun YG dolağına impuls gərginlik dalğası təsir etdikdə onun OG dolağının 1, 5, 8 nöqtələrində və İGM – də gərginlik ayrılması

Bütün bu deyilənlərdən görünür ki, AT – ın ifrat gərginliklərdən mövcud və təklif olunan yeni sxemlə mühafizəsi zamanı onun dolaqlarında yaranan gərginliklərin qiymətləri çox yaxın olurlar. Belə olan halda və yeni sxemin iqtisadi cəhətdən mövcud sxemdən üstün olması səbəbindən, bu sxemdən istifadə olunması məqsədəuyğun hesab olunmalıdır [6, 7].

NƏTİCƏ

Avtotransformatorların (AT) ifrat gərginliklərdən qorunması məqsədilə yeni bir mühafizə sxemi təklif edilmişdir. Bu sxem, mövcud - tətbiq olunan mühafizə sxemindən fərqli olaraq, həm texniki, həm də iqtisadi baxımdan optimallaşdırılmışdır. Tədqiqat zamanı AT-nın həm mövcud, həm də yeni sxemlə mühafizə edildiyi hallarda, ona impuls ifrat gərginlik dalğası tətbiq olunmuş və dolaqlarında yaranan gərginliklər müqayisəli şəkildə öyrənilmişdir.

Analiz nəticələri göstərir ki, hər iki sxemdə AT dolaqlarında yaranan maksimal ifrat gərginliklər bir-birinə çox yaxın qiymətlərdə olur. Eyni zamanda, bu gərginlik səviyyələri normativ və yol verilən maksimum gərginlik limitlərini keçmir, yəni hər iki sxem dolaqların etibarlı mühafizəsini təmin edir. Bu, onu göstərir ki, yeni sxemin tətbiqi texniki baxımdan mövcud sxemlə müqayisədə heç bir zəiflik yaratmır və elektrik avadanlıqlarının izolyasiya səviyyəsini qoruyur.

Yeni mühafizə sxeminin ən böyük üstünlüyü isə onun iqtisadi cəhətdən daha sərfəli olmasıdır. Sxemin quruluşu sadələşdirilmiş, əlavə avadanlıq tələbləri azaldılmış və quraşdırma xərcləri minimuma endirilmişdir. Bu xüsusiyyət, AT-nın hər iki dolağının etibarlı mühafizəsini qoruyarkən həm sərmayə xərclərinin optimallaşdırılmasına, həm də istismar zamanı xərclərin azaldılmasına imkan yaradır.

Beləliklə, aparılan tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, yeni mühafizə sxemi yalnız texniki baxımdan effektiv deyil, eyni zamanda iqtisadi baxımdan da üstündür. Bu səbəbdən, AT-ların ifrat gərginliklərdən qorunması üçün bu yeni sxemin tətbiqi məqsədəuyğun və optimal həll hesab edilə bilər.

1. CIGRE Standard WG A2.26. Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). P. Picher. CIGRE, p.60, 2008.
2. IEC 60076-18:2022, "Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response", London, pp.78, 2022.
3. Mufidzade N.A., Ismayilova G.G., Determination of insulation degradation level and location between windings of transformer. International Journal on "Technical and

- Physical Problems of Engineering” (IJTPE) Published by International Organization of IOTPE, vol.16, No3, September 2024, pp. 127-134.
4. *Mufidzade N.A., Ismayilova G.G., Huseynov E.N.* Effect of line coronation on overvoltage in transformers of rated voltage 330 kV. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) Published by International Organization of IOTPE, June 2022 Issue 51, pp-7-14.
 5. *Mufidzade N.A., Megerbi M.M., Otman-Sherif T.L.* “Refinement of the calculation scheme transformer windings in overvoltage calculations”. Electricity No. 1, pp. 56-57, Russia, Moscow, 2003.
 6. *Пириева Н.М., Тагизаде Л.Н.* «Ограничители перенапряжения и защита трансформаторов от перенапряжений». Международный научный журнал «Вестник науки.» № 1 (70) Том 3. 2024. С 772-778
 7. *Roth P.R.*, "Effective Measurements using Digital Signal Analysis", IEEE Spectrum, pp. 62-70, April, 2021.
 8. *Reza Khalilisenobe.* “Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review”, Electric Power Systems Research, Volume 155, pp.330-345, February 2018.
 9. *Пириева Н.М., Велиев Г.А., Аббасов А.И., Сулейманов Э.Э.* Коммутационные процессы в электрических сетях 10-35 кВ. Проблема энергетики №2, Баку, 2021 стр. 100-106
 10. *Пириева Н.М., Заманов Х.Г.* Исследование современных методов защиты линий высокого напряжения от перенапряжений. Международный научный журнал «Вестник науки» № 7 (76) Том 4. 2024 г. С 322-328
 11. *Пириева Н.М., Махмудов У.И.* Анализ системы заземления и защиты от перенапряжения подстанции. Международный научный журнал Флагман науки: научный журнал. Январь 2024. - СПб., Изд. ГНИИ "Нацразвитие" - 2024. №1(12).
 12. *Пириева Н.М., Рзаева С.В., Талибов С.Н.* «Анализ устройств защиты от перенапряжений электрических сетей» «Интернаука»: научный журнал – № 43(266). Часть 3. Москва, Изд. «Интернаука», 2022. с.14-17
 13. *Пириева Н.М., Мамедов Я.О.* Анализ устройств и современных методов защиты от перенапряжений. Международный научный журнал «Вестник науки» № 4 (85) Том 4. Апрель 2025 г. 1149 – 1157.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

МУФИДЗАДЕ Н.А., ИСМАЙЛОВА Г.Г.

В статье рассматривается вопрос защиты автотрансформаторов от перенапряжений и предлагается новая схема защиты, разработанная для повышения надежности при снижении затрат. В предлагаемой схеме защита обмотки среднего напряжения (MV) осуществляется с использованием небольшой части разрядника (ОПН) высоковольтной обмотки (HV), дополненной дополнительным низковольтным разрядником (LV). Такой комбинированный подход обеспечивает эффективную защиту обмотки среднего напряжения при значительном сокращении количества необходимого защитного оборудования. В результате предложенный метод оказывается значительно более экономичным по сравнению с традиционной схемой защиты, не снижая при этом уровень безопасности и надежности. В исследовании проведен подробный анализ воздействия импульсных перенапряжений на автотрансформатор при применении как существующей, так и предложенной схем защиты. С использованием математического моделирования и имитационного моделирования были рассчитаны уровни перенапряжений во всех соответствующих обмотках, что позволило выполнить

сравнительную оценку обеих схем. Результаты показывают, что в обоих случаях максимальные перенапряжения в обмотках очень близки и остаются ниже допустимых значений, что подтверждает, что новая схема обеспечивает защиту, эквивалентную традиционной. Кроме того, новая схема имеет несколько дополнительных преимуществ: она сокращает общее количество используемых разрядников, упрощает установку и техническое обслуживание, а также повышает экономическую эффективность системы защиты. Исследование демонстрирует, что предложенная конфигурация защиты эффективно защищает автотрансформатор от высоковольтных переходных процессов в сети, оптимизируя как технические характеристики, так и экономическую эффективность.

Ключевые слова: автотрансформатор, внутреннее перенапряжение, внешнее перенапряжение, ограничители перенапряжения, молниезащита.

IMPROVEMENT OF OVERVOLTAGE PROTECTION FOR AUTOTRANSFORMERS

MUFIDZADE N.A., ISMAYILOVA G.G.

The article addresses the issue of overvoltage protection for autotransformers and proposes a new protection scheme designed to enhance reliability while reducing costs. In the proposed scheme, the medium-voltage (MV) winding protection is achieved by utilizing a small portion of the surge arrester (SA) from the high-voltage (HV) winding, complemented by an additional low-voltage (LV) surge arrester. This combined approach ensures effective protection of the MV winding while significantly reducing the amount of protective equipment required. As a result, the proposed method is considerably more economical compared to the conventional protection scheme, without compromising safety or reliability. The study includes a detailed analysis of the impact of impulse overvoltage waves on the autotransformer under both the existing and the proposed protection schemes. Using mathematical modeling and simulation, the overvoltage levels in all relevant windings were calculated, allowing for a comparative evaluation of the two schemes. The results show that in both cases, the maximum overvoltages in the windings are very similar and remain below the permissible limits, confirming that the new scheme provides protection equivalent to the traditional approach. Furthermore, the new scheme offers several additional advantages: it reduces the total amount of surge arresters needed, simplifies installation and maintenance, and improves the economic efficiency of the protection system. The study demonstrates that the new protection configuration effectively safeguards the autotransformer against high-voltage transients from the supply network while optimizing both technical performance and cost-efficiency.

Keywords: autotransformer, internal overvoltage, external overvoltage, overvoltage limiters, lightning protection.

DOI:10.70784/azip.5.2025420

SU ELEKTRİK STANSİYASI BLOK TRANSFORMATORLARININ İDARƏ EDİLMƏSİ ÜZRƏ RİSKLİ VƏ MÖVQELİ YANAŞMA

ŞİXƏLİYEVƏ S.Y., PİRİYEVƏ N.M.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
“Elektromexanika” kafedrası
saadaasmar@mail.ru

Artan enerji tələbatı və əsas avadanlıqların köhnəlməsi şəraitində su elektrik stansiyaların (SES) blok transformatorlarının etibarlı və effektiv idarə olunması məsələləri daha da aktuallaşır. Məqalədə bu avadanlığın idarə olunmasına dair iki müasir yanaşma – risk yönümlü və pozisional (mövqeyə əsaslanan) yanaşmalar təhlil olunur. Risk yönümlü yanaşma transformatorlarda potensial nasazlıqların müəyyənəndirilməsi, onların baş vermə ehtimalının və mümkün nəticələrinin qiymətləndirilməsini əhatə edir. Pozisional yanaşma isə transformatorun stansiya sxemindəki rolu, enerji blokunun strukturundakı əhəmiyyəti və nasazlıq zamanı enerji sisteminə təsiri baxımından təhlili tamamlayır. Məqalədə hər iki yanaşmanın inteqrasiyasına əsaslanan risk matrisası konsepsiyası təqdim olunur. Bu yanaşma sayəsində idarəetmə tədbirləri – texniki xidmətin planlaşdırılması, modernizasiya və ehtiyat mexanizmlərinin tətbiqi üzrə prioritetləşdirmə həyata keçirilir. Həmçinin, yağın vəziyyəti, vibrasiya və qaz tərkibi üzrə onlayn monitoring sistemləri və FMEA, RCM, nasazlıq ağaclarının təhlili kimi müasir risk qiymətləndirmə metodlarının tətbiqi tövsiyə olunur. Burada risklərin qiymətləndirilməsi, mümkün nasazlıqların təhlili (FMEA və s.), təxmini nəticələrin qiymətləndirilməsi və bu nəticələrin avadanlıq üzərindəki təsirlərinə görə prioritetləşdirilməsi metodları təqdim edilir. Həmçinin, blok transformatorlarda müşahidə edilən kritik risk faktorları (temperatur artımı, izolyasiya zəifləməsi, vibrasiya və s.) misal gətirilərək onların idarə edilməsi yolları izah olunur. Bu inteqrasiya, aktivlərin idarə olunmasında səmərəliliyin artırılmasına, istismar xərclərinin optimallaşdırılmasına və SES-in dayanıqlı fəaliyyətinin təmin olunmasına imkan verir.

Açar sözlər: SES blok transformator, aktivlərin idarə olunması, risk yönümlü yanaşma, pozisional yanaşma, FMEA, SCADA, avadanlığın etibarlılığı, risk matrisi, rəqəmsal monitoring.

GİRİŞ

Avadanlıqların istismar vəziyyətini optimal əmək və material xərcləri ilə müəyyən səviyyədə saxlamaq elektrik enerjisi obyektinin aktivlərinin idarə edilməsi sisteminin prioritet məqsədlərindən biridir. Bu məqsədlə müasir müəssisələr nasazlıqların sayını artırmadan və avadanlığın xidmət müddətini azaltmadan avadanlığa texniki xidmət xərclərini azaltmağa imkan verən bir sıra problemləri həll etməlidir, yəni büdcənin düzgün idarə olunmasını təmin etməlidir.

Azərbaycanda elektrik enerjisi obyektlərinin avadanlığının idarəetmə sisteminin təkmilləşdirilməsi üçün tədricən risk yönümlü yanaşma tətbiq edilir. Bu növ xidmətin bir xüsusiyyəti, təhlildə əlavə bir parametrin istifadəsidir - avadanlıqların nasazlığı ehtimalı. Əhəmiyyət dərəcəsinin birgə nəzərdən keçirilməsi avadanlıq və onun sıradan çıxma ehtimalı risk səviyyəsini müəyyən etməyə imkan verir.

Bu yazıda elektrik enerjisi sənayesinin inkişaf tarixində formalaşmış elektrik enerjisi obyektinin avadanlıqlarının idarə edilməsinə müxtəlif yanaşmalar, onların xüsusiyyətləri, üstünlükləri və çatışmazlıqları haqqında ümumi məlumat verilir.

Avadanlıqların idarə edilməsində risk yönümlü yanaşmaya keçid etmək istəyən enerji şirkətlərinin konkret nümunələri verilmişdir. Məqalədə qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsinin tətbiqi əsasında risk səviyyəsinin müəyyən edilməsi üsulu nəzərdən keçirilir ki, bu da stansiyada mövcud olan monitoring sistemi nəzərə alınmaqla su elektrik stansiyalarının transformatorlarının istismar vəziyyətini qiymətləndirməyə imkan verir [8-10].

Elektrik enerjisi qurğusunun avadanlıqlarının idarə edilməsində yanaşmalar aşağıdakılardır.

Elektrik enerjisi qurğusunun avadanlığının idarəetmə sisteminin təşkili strategiyanın seçilməsini və metodologiyanın müəyyənəndirilməsini əhatə edir.

Hal-hazırda elektrik enerjisi qurğularının avadanlıqlarının idarə edilməsinə aşağıdakı yanaşmalar mövcuddur [1-3]:

- RTF (Run-to-Failure) - imtinaya qədər işləmə;
- TBM (Time-Based Maintenance) - qaydalara uyğun texniki qulluq, planlı profilaktik baxış;
- CBM (Condition-Based Maintenance) - şərt üzrə texniki xidmət;
- RCM (Reliability-Centered Maintenance) - etibarlılıq yönümlüdür texniki xidmət;
- RBM (Risk-Based Maintenance) - risk yönümlü texniki qulluq.

İmtinaya qədər istismar (RTF– Run to Failure)

Elektrik enerjisi avadanlıqlarının idarə edilməsinə yanaşmaların inkişafı tarixində ilk RTF strategiyasıdır (Run to Failure). Bu strategiya əməyin təşkili dərəcəsinə görə ən az sərtidir. İmtinaya qədər istismar, limit vəziyyətinə çatdıqdan sonra avadanlıqda təmir və texniki xidmət işlərinin aparılmasını nəzərdə tutur ki, bu da müəyyən edilmiş funksiyaların yerinə yetirilməməsi və buna görə də işləmə qabiliyyətinin itirilməsi deməkdir. Bu yanaşma ötən əsrin 20-30-cu illəri üçün xarakterikdir.

İmtinaya qədər istismar strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları Cədvəl 1-də verilmişdir.

İmtinaya qədər istismar strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları

Cədvəl 1

Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
1. Təmirələr arasında uzun müddət	1. Təmir işlərinin və texniki qulluğun yerinə yetirilməsi üçün tələb olunan resursların (məliyyə, vaxt və s.) planlaşdırma
2. Təmir xidmətinin saxlanması üçün aşağı xərclər	2. Baxım və təmir işlərinin uzun müddətli olması
	3. Qəzaların aradan qaldırılması üçün yüksək xərclər.

Baxılan strategiya, uğursuzluğu normal texnoloji prosesin pozulmasına, habelə insanların həyatı və sağlamlığına, ətraf mühitə təhlükənin yaranmasına səbəb olmayan aşağı qiymətli avadanlıqlar üçün mövcud çatışmazlıqlara baxmayaraq, hazırda uğurla tətbiq edilə bilər [6-7].

İmtinaya qədər əməliyyat strategiyasını tətbiq etmək lazımdır, ilk növbədə başqa texniki xidmət növünü seçərkən nasazlığa qədər istismar edilən avadanlığın dəyişdirilməsi xərclərini alternativ xərclərlə müqayisə etmək.

Qaydalara uyğun texniki qulluq, planlı profilaktik baxış (TBM - Time-Based Maintenance)

Elektrik enerjisi qurğusunun avadanlığının idarə edilməsinə bu yanaşma 20-ci əsrin 50-60-cı illərində istifadə olunmağa başladı. Bu, sənaye müəssisələrinin mexanizm və maşınlarının sayının artması, avadanlığın özünün mürəkkəbliyinin artması, həmçinin yüksək qiymətə malik olan avadanlıqların xidmət müddətinin uzadılması ehtiyacı ilə əlaqədardır. Nəticədə, nasazlığa qədər əməliyyat strategiyasının istifadəsi yersiz oldu, çünki bu, avadanlıqların nasazlığı nəticəsində əhəmiyyətli itkilərə səbəb oldu.

Elektrik stansiyası və yarımstansiya avadanlıqlarına planlı profilaktik texniki xidmət haqqında Əsasnaməyə uyğun olaraq, elektrik stansiyası və yarımstansiya avadanlığına planlı profilaktik təmir, ayrı-ayrı hissələrin və aqreqatların təmiri və dəyişdirilməsi və avadanlığın uzunmüddətli, etibarlı və qənaətli işləməsini təmin etmək yolu ilə avadanlığın texniki parametrlərini layihə və hesablanmış dəyərlərə çatdırmağa yönəlmiş işlərin məcmusudur [2-5].

Bu yanaşma çərçivəsində nasazlığa qədər əməliyyat strategiyası ilə müqayisədə yerinə yetirilən işlərin sayı və həcmi xərclərin artmasına səbəb olur və buna görə də avadanlığın texniki xidmətinə nəzarət etmək və idarə etmək zərurəti yaranır. Nəticədə, təmir və texniki xidmətin planlaşdırılması sistemləri, o cümlədən cədvəllərin yaradılması proseslərinin avtomatlaşdırılması üçün ilk alətlər meydana çıxır. Qaydalara uyğun olaraq texniki xidmət strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları Cədvəl 2-də verilmişdir.

Qaydalara uyğun olaraq texniki xidmət strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları

Cədvəl 2

Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
1. Fövqəladə qəzaların sayının azaldılması 2. Avadanlığın istismar müddətinin təmirlərarası dövrlərə nəzarət etmək imkanı 3. Təmir zamanı avadanlıqların dayanma müddətinin tənzimlənməsi 4. Avadanlıqların, onun komponentlərinin və mexanizmlərinin təmiri xərclərinin proqnozlaşdırılması 5. Avadanlıqların nasazlığının səbəblərinin təhlili.	1. Təmir işlərinin planlaşdırılması üçün vəsaitin olmaması 2. Əmək xərclərinin hesablanmasında çətinlik 3. Planlaşdırılmış təmir işlərini operativ şəkildə tənzimləməkdə çətinlik 4. Saz vəziyyətdə olan avadanlıqların təmirinin aparılması 5. Qalan xidmət müddətindən asılı olmayaraq aqreqlərin və hissələrin məcburi dəyişdirilməsi.

Qaydalara və ya planlı profilaktik təmirə (SPM) uyğun olaraq texniki qulluq avadanlıqların nasazlıqdan əvvəl profilaktik yoxlamalarını və təmirini nəzərdə tutur ki, bu da avadanlığın texniki vəziyyətinin yaxşılaşmasına və nasazlıq ehtimalının azalmasına səbəb olur. Avadanlıqlara texniki qulluq tədbirlərinin tezliyi və müddəti avadanlığın dizaynından və onun iş şəraitindən asılıdır [11].

Vəziyyətə əsaslanan Baxış (CBM - Condition-Based Maintenance)

Vəziyyətə əsaslanan texniki xidmət strategiyası 20-ci əsrin 70-80-ci illəri üçün xarakterikdir. Bu yanaşma texniki diaqnostika, monitoring və elektrik avadanlıqlarının vəziyyətini proqnozlaşdırmaq üçün texniki vasitələrdən istifadə etməklə müəyyən edilən avadanlığın faktiki texniki vəziyyətinə əsaslanaraq texniki xidmətin və təmirin planlaşdırılmasını nəzərdə tutur. Vəziyyətə əsaslanan texniki xidmət strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları Cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 3

Vəziyyətə əsaslanan texniki xidmət strategiyasının üstünlükləri və çatışmazlıqları

Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
1. Təmir və texniki xidmət xərclərinin azaldılması 2. Bahalı avadanlıqların işləmə müddətinin artması 3. Uğursuzluqların sayının azaldılması 4. Avadanlıqların dayanma vaxtlarının sayının azaldılması 5. İnsanlar və ətraf mühit üçün yüksək təhlükəsizlik	1. Ayrı-ayrı avadanlıq qruplarının texniki vəziyyəti indeksinin hesablanması üçün vahid sənaye metodologiyası yoxdur və mövcud aktivlər və onların istismar intensivliyi haqqında real məlumatlar əsasında bütövlükdə elektrik enerjisi qurğuları 2. Əksər generasiya müəssisələrində əsas avadanlığın texniki vəziyyətinin monitoringi sistemləri texniki vəziyyətə görə təmir növündən istifadə etməyə imkan vermir 3. Avadanlıqların aşınma səviyyəsini və nasazlıq ehtimalını proqnozlaşdırmaq üçün monitoring məlumatlarına, nasazlıqların və nasazlıqların statistikasına əsaslanan istehsal avadanlıqlarının texniki vəziyyətinin sistemə qiyətləndirilməsi və proqnozu mövcud deyil

Etibarlı və uyğunlu texniki baxış (RCM)

RCM bütün istehsal sistemləri və onların komponentlərinin istehsal prosesində etibarlı şəkildə işləməsinin təmin etmək üçün tələb olunan tədbirləri tapmağa və görməyə imkan verən metodologiyadır.

DÜİST R 27.002-2009 "Mühəndislikdə etibarlılıq. Şərtlər və anlayışlar"a uyğun olaraq RCM-nin məqsədləri:

1. müəyyən edilmiş iş şəraitində məhsulun lazımi etibarlılıq göstəriciləri ilə işləməsinin təmin edilməsi;
2. məhsulun dizaynını təkmilləşdirmək və ya müəyyən edilmiş etibarlılıq səviyyəsi qeyri-kafi olan komponentlərinin əlavə ehtiyatlarını tətbiq etmək üçün zəruri məlumatların əldə edilməsi;
3. texniki xidmət xərcləri və qalıq nasazlıqlardan dəyən zərər də daxil olmaqla, minimum ümumi həyat dövrü dəyəri ilə bu məqsədlərə nail olmaq;
4. əvvəllər müəyyən edilmiş texniki xidmət məqsədlərinə nail olunmasının effektivliyini qiymətləndirmək yolu ilə mövcud texniki xidmət proqramının ilkin yaradılmış proqramla müqayisədə yenidən nəzərdən keçirilməsi və təkmilləşdirilməsi üçün zəruri olan məlumatların əldə

edilməsi. Təhlükəsizliyi baxımından kritik və ya bahalı komponentlərin texniki vəziyyətinin monitorinqi proqramın təkmilləşdirilməsində mühüm rol oynayır [1,3].

RCM-nin fərqli xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, avadanlığa texniki qulluq prinsipləri yalnız parametrlər və təbiətlə deyil, həm də nasazlığın nəticələri ilə müəyyən edilməlidir. Etibarlılıq yönümlü texniki xidmət strategiyasına bir sıra tədbirlərin müəyyən edilməsi və tətbiqi daxildir. İstənilən istehsal sistemi və onun komponentlərinin müəyyən iş şəraitində öz funksiyalarını yerinə yetirməsinə imkan verir [1]. Etibarlılığa yönəlmiş texniki xidmətin üstünlükləri və çatışmazlıqları Cədvəl 4-də verilmişdir.

Etibarlılıq yönümlü texniki xidmətin üstünlükləri və çatışmazlıqları

Cədvəl 4

Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
<ol style="list-style-type: none"> 1. Daha səmərəli texniki xidmət əməliyyatlarının həyata keçirilməsi hesabına sistemin funksiyalarını yerinə yetirməsinin yüksək etibarlılığı 2. Daha səmərəli büdcə planlaşdırması, nəticədə texniki xidmət xərclərinin azalması; 3. Tam sənədləşdirilmiş audit hesabatlarının yaradılması və buraxılması; 4. Uğursuzluğun idarə edilməsi sistemindən istifadə etmək imkanı; 5. Texniki xidmət sisteminə cavabdeh olan menecerlər onlara nəzarət və tələb olunan monitorinqi həyata keçirməyə imkan verən idarəetmə aləti alacaqlar. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Daxil edilən informasiyanın keyfiyyətindən asılılığın yüksək səviyyəsi; 2. İxtisaslı kadrlara ehtiyac.

Risk Əsaslı Baxım (RBM)

Risk əsaslı strategiya (RBM) proqnozlaşdırılan nəticələrdən və onların istehsal üçün əhəmiyyətindən asılı olaraq risk dəyərində əsaslanaraq istehsal aktivlərinə texniki təsiri müəyyən etməyə imkan verən metodologiya [12-15].

Bu tip texniki xidmətin bir xüsusiyyəti, təhlildə əlavə bir parametrin (avadanlıqların nasazlığı ehtimalı) istifadəsidir. Uğursuzluq ehtimalı texniki vəziyyətin bir funksiyasıdır. Əsas texnoloji avadanlıqların texniki vəziyyətinin qiymətləndirilməsi inteqral göstəricinin müəyyən edilməsi prosesidir (texniki vəziyyətin göstəricisi). Texniki vəziyyətin göstəricisi faktiki məlumatlar əsasında müəyyən edilən avadanlığın və ya elektrik enerjisi qurğusunun texniki vəziyyətinin kəmiyyət qiymətləndirilməsidir.

Risk səviyyəsi birgə müəyyən edilir ekspert üsulu ilə və ya mövcud nasazlıqların statistikasını əsasında tapıla bilən onun uğursuzluq ehtimalını və avadanlığın əhəmiyyət dərəcəsini nəzərə alaraq. Risk dəyəri avadanlığa texniki qulluq və təmirin optimal vaxtını və həcmələrini müəyyən etməyə, habelə onların həyata keçirilməsinin prioritetləri sırasına görə sıralamağa imkan verir [16-19].

Risk yönümlü yanaşma əsasında təmir və texniki xidmət tədbirlərinin planlaşdırılması istehsal proqramlarını planlaşdırarkən fəaliyyət növlərinin seçilməsini əsaslandırmağa imkan verir.

Risk əsaslı texniki xidmətin üstünlükləri və çatışmazlıqları Cədvəl 5-də verilmişdir.

Risk əsaslı texniki xidmətin üstünlükləri və çatışmazlıqları

Cədvəl 5

Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
<ol style="list-style-type: none"> 1. Təmir və texniki xidmət xərclərinin azaldılması 2. Bahalı avadanlıqların işləmə müddətinin artması 3. Uğursuzluqların sayının azalması 4. Sistemin tətbiqindən sonra xərclərin tez qaytarılması 5. İnsanlar və ətraf mühit üçün yüksək təhlükəsizliyin təmin edilməsi 6. Texniki xidmət sisteminin idarə edilməsi üçün məlumat bazası yaradılır 7. Avadanlıqların mümkün nasazlıqları və onların aradan qaldırılması və qarşısının alınması üçün tövsiyələr haqqında məlumat bazası yaradılır 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mövcud aktivlər və onların istismar intensivliyi haqqında real məlumatlar əsasında ayrı-ayrı avadanlıq qruplarının texniki vəziyyətinin hesablanması üçün vahid sənaye metodologiyası mövcud deyil 2. Real vaxt rejimində avadanlığın texniki vəziyyətinin monitorinqi sisteminin təşkilinin yüksək qiyməti 3. Risk səviyyələrinin və prioritetlərinin müəyyən edilməsi yüksək ixtisaslı kadr tələb edən əmək tutumlu prosesdir 4. Daxil edilən informasiyanın (verilənlərin) keyfiyyətindən yüksək asılılıq

NƏTİCƏ

Məqalədə su elektrik stansiyalarının (SES) blok transformatorlarının idarə olunmasında müasir yanaşmaların tətbiqinin zəruriliyi və bu sahədə mövcud problemlərə cavab verən optimal idarəetmə modelləri ətraflı şəkildə təhlil olunmuşdur. Xüsusilə artan enerji tələbatı və əsas avadanlıqların köhnəlməsi fonunda transformatorların etibarlı və qənaətli istismarının təmin olunması strateji əhəmiyyət kəsb edir.

Risk yönümlü və pozisional yanaşmaların hər biri transformatorların idarə olunmasında spesifik üstünlüklər təqdim edir. Risk yönümlü yanaşma nasazlıqların proqnozlaşdırılması və onların mümkün nəticələrinin qiymətləndirilməsi vasitəsilə texniki xidmət tədbirlərinin daha məqsədyönlü şəkildə planlaşdırılmasına imkan verir. Pozisional yanaşma isə avadanlığın enerji sistemindəki funksional əhəmiyyətinə əsaslanaraq prioritetləşdirilməni təmin edir. Bu iki yanaşmanın inteqrasiyası əsasında formalaşdırılmış risk matrisi isə effektiv idarəetmə qərarlarının verilməsinə şərait yaradır.

Məqalədə həmçinin FMEA, RCM və nasazlıq ağaclarının təhlili kimi müasir risk qiymətləndirmə metodlarının tətbiqinin vacibliyi vurğulanır. Onlayn monitoring sistemlərinin (SCADA, DCS, IoT sensorları və s.) istifadəsi nəticəsində real vaxtda məlumatların təhlili texniki xidmətlərin daha dəqiq və qənaətli icrasını mümkün edir.

Nəticə etibarilə, təqdim olunan yanaşmaların və inteqrasiya olunmuş modelin tətbiqi SES-lərdə blok transformatorların istismarında:

- qəfil nasazlıqların qarşısının alınmasına,
- texniki xidmət və modernizasiya üzrə qərarların optimallaşdırılmasına,
- ümumi istismar xərclərinin azaldılmasına,
- avadanlığın etibarlılığının və xidmət müddətinin artırılmasına töhfə verir.

Bu metod və yanaşmalar enerji sektorunda fəaliyyət göstərən mütəxəssislər, texniki xidmət sahəsində qərarvericilər və rəqəmsal idarəetmə platformalarının hazırlanması ilə məşğul olan qurumlar üçün praktik və strateji əhəmiyyət daşıyır. Beləliklə, məqalədə təqdim olunan yanaşmalar enerji istehsalı obyektlərində aktivlərin idarə olunmasında dayanıqlılıq və səmərəliliyin artırılması üçün mühüm konseptual baza yaradır.

-
1. Xia Y., Song X., He J., Jia Z., Wang X., Simulation and partial discharge detection for typical defects of 10 kV cable joint // Journal of Engineering, Vol. 2019, Issue 16, 2019, pp. 2856–2859.
 2. Jineeth J., Shilpa M., Sindhu T.K., Numerical modelling, simulation and experimental validation of partial discharge in cross-linked polyethylene cables // IET Science, Measurement & Technology, Vol. 14, Issue 10, 2021, pp. 862–869.
 3. Пириева Н.М., Гусейнов З.Х. Анализ неисправностей в силовых трансформаторах. Международный научный журнал «Вестник науки» №7, Том4 (64) 2023 г. с.297-304.
 4. Пириева Н.М., Тагизаде Л.Н. Ограничители перенапряжения и защита трансформаторов от перенапряжений. Международный научный журнал «Вестник науки. № 1 (70) Том 3. 2024. С 772-778.
 5. Radzi M.I., Ali N.H., Ariffin A.M., Rahman M.S., Rameli N., Ahmad M.R., Salleh A.S., Development and testing of a partial discharge detection device on medium voltage XLPE cable // Indonesian Journal of Electrical Engineering & Computer Science, Vol. 21, Issue 1, 2020, pp. 8–18.
 6. Serttaş F., Hocaoğlu F., Partial discharge detection and localization on medium-voltage XLPE cables with multiclass support vector machines // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 28, Issue 4, 2020, pp. 2331–2344.
 7. Gusev, V.V. Monitoring i diagnostika elektrooborudovaniya peremennogo toka v almazodobyvayushchey promyshlennosti: Avtoref. tekhnicheskoye nauki: / V.V. Gusev. – Tomsk: Izdatel'stvo TPI, 2010, – s.25.

8. *Kerimzade G.S.* “Structure of the monitoring and tracking electromechanical control system”. PRZEGLADElektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature SIGMA–NOT. ISSN 0033-2097,R.100 NR 07/2024.Warszawa.pp.295-297.
9. *Kerimzade G.S.*, Features of hanging the parameters of induction control support // IJ TPE Journal, ISSN 2077- 3528 ISSUE .Number 1. March, 2025, pp.69-80.
10. *Safiyev E.S., Shikhaliyeva S.Y.*, Analysis of ecology and efficiency of overhead power lines of ultra-high voltage //IJTPE-Issue 62, Volume 17, Number 1, March 2025, pp.91-100.
11. *Shikhaliyeva S.Y., Safiyev E.S.*, Extra high voltage on overhead power lines // The 20th International Conference on “Technical and Physical Problems of Engineering” International Organization of IOTPE, 2024, pp. 76-82.
12. *Shikhaliyeva S.Y.* “Analysis of unexplained breaks in power transmission lines”, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Vo. 15, N2 2023, pp. 198-206.
13. *Şixəliyeva S.Y., Aşurova U.İ.*, Azərbaycanın elektrik şəbəkələrində elektrik enerjisi itkilərinin hesablanması, təhlili və tənzimlənməsi təcrübəsi // Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri, III Beynəlxalq elmi konfrans, SDU, Sumqayıt, 27-28 oktyabr 2022, s.130-132.
14. *Пириев Г.С.* Расчет при электрическом проектировании трансформаторов. Журнал «Инновационные научные исследования», Научно-издательский центр Вестник науки, № 9 Том 4 (66) сентябрь 2023, стр.328-334.
15. *Rzayeva S.V., Ganiyeva N.A. Piriyeva N.M.*, Modern approaches to electrical equipment diagnostics // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) - Issue 58, Volume 16, Number 1, March 2024, pp.182-189.
16. *Piriyeva N.M., Karimova R.K., Abdullayeva G.K.*, High-temperature heat-insulating materials: a compromise between thermal conductivity and reliability //Reliability: Theory & Applications. 2025, June 2(84), pp.408-413.
17. *Karimova R.K. Piriyevev H.S.* Diagnostics of electrical equipment at thermal plants. Reliability: Theory & Applications RTA, No4(80) Volume 19, Pp.441-447. December, 2024
18. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A.* Analysis of reliability of typical power supply circuits. Reliability: Theory and Applications, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024
19. *Piriyeva N.M., Abdullayeva G.K., Bakhtiyarov A.L.* Engineering approaches to minimizing the environmental impact of thermal power plants. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) – Issue 61, Volume 16, Number 4, december 2024. Pp.231-243

**РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И ЗАВИСЯЩИЕ ОТ
МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ БЛОЧНЫМИ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

ШИХАЛИЕВА С.Я., ПИРИЕВА Н.М.

В условиях растущего спроса на электроэнергию и устаревания ключевого оборудования вопросы надежного и эффективного управления блочными трансформаторами гидроэлектростанций (ГЭС) становятся все более актуальными. В статье анализируются два современных подхода к управлению этим оборудованием – риск-ориентированный и позиционный (позиционный). Риск-ориентированный подход предполагает выявление потенциальных отказов трансформаторов, оценку вероятности их возникновения и возможных последствий. Позиционный подход дополняет анализ с точки зрения роли трансформатора в схеме станции, его значимости в структуре энергоблока и его влияния на энергосистему в случае отказа. В статье представлена

концепция матрицы рисков, основанная на интеграции обоих подходов. Благодаря этому подходу определяются приоритеты в мероприятиях по управлению – планирование технического обслуживания, модернизация и внедрение резервных механизмов. Также рекомендуется использовать системы онлайн-мониторинга состояния масла, вибрации и газового состава, а также современные методы оценки рисков, такие как FMEA, RCM и анализ дерева отказов. В статье представлены методы оценки рисков, анализа видов отказов (FMEA и др.), оценки прогнозируемых результатов и приоритизации этих результатов в зависимости от их влияния на оборудование. Также на примерах поясняются критические факторы риска, наблюдаемые в блочных трансформаторах (повышение температуры, ослабление изоляции, вибрация и др.), а также объясняются методы их управления. Такая интеграция позволяет повысить эффективность управления активами, оптимизировать эксплуатационные расходы и обеспечить устойчивую работу электростанции.

Ключевые слова: блочный трансформатор СЭС, управление активами, риск-ориентированный подход, позиционный подход, FMEA, SCADA, надежность оборудования, матрица рисков, цифровой мониторинг.

RISK-ORIENTED AND LOCATION-SPECIFIC APPROACHES TO MANAGING BLOCK TRANSFORMERS AT HYDROELECTRIC POWER PLANTS

SHIKHALIYEVA S.Y., PIRIYEVA N.M.

In the context of increasing energy demand and obsolescence of key equipment, the issues of reliable and effective management of block transformers of hydroelectric power plants (HPS) are becoming more and more relevant. The article analyzes two modern approaches to the management of this equipment - risk-oriented and positional (position-based) approaches. The risk-oriented approach involves identifying potential failures in transformers, assessing the probability of their occurrence and possible consequences. The positional approach completes the analysis in terms of the role of the transformer in the plant scheme, its importance in the structure of the power unit and its impact on the power system in the event of a failure. The article presents the concept of a risk matrix based on the integration of both approaches. Thanks to this approach, management measures are prioritized - maintenance planning, modernization and the introduction of backup mechanisms. It is also recommended to use online monitoring systems for oil condition, vibration and gas composition, and modern risk assessment methods such as FMEA, RCM, and fault tree analysis. Here, methods for risk assessment, failure mode analysis (FMEA, etc.), estimation of estimated results, and prioritization of these results according to their impact on the equipment are presented. Also, critical risk factors observed in block transformers (temperature rise, insulation weakening, vibration, etc.) are explained by giving examples and explaining their management methods. This integration allows for increasing the efficiency of asset management, optimizing operating costs, and ensuring the sustainable operation of the power plant.

Keywords: SES block transformer, asset management, risk-based approach, positional approach, FMEA, SCADA, equipment reliability, risk matrix, digital monitoring.

DOI:10.70784/azip.5.2025427

RƏQƏMSAL ENERGETİKA DÖVRÜNDƏ TRANSFORMATOR VƏ VERİLİŞ XƏTLƏRİNİN MODERNLƏŞDİRİLMƏSİ

SÜLEYMANOVA L.Ç.

*Mingəçevir Dövlət Universiteti Az – 4500, Dilarə Əliyeva küç.21.
suleymanovalc@mail.ru*

Məqalədə rəqəmsal energetika dövründə transformatorların və elektrik veriliş xətlərinin modernləşdirilməsi məsələləri təhlil olunur. Rəqəmsallaşma proseslərinin enerji sistemlərində tətbiqi, ağıllı şəbəkələrin formalaşması və süni intellektə əsaslanan idarəetmə sistemlərinin əhəmiyyəti elmi baxımdan qiymətləndirilir. Transformator və veriliş xətlərində enerji səmərəliliyinin artırılması, real vaxt monitoring texnologiyalarının tətbiqi, həmçinin itkilərin azaldılması istiqamətində müasir yanaşmalar araşdırılmışdır.

Açar sözlər: rəqəmsal energetika, transformator, elektrik veriliş xətləri, enerji səmərəliliyi, ağıllı şəbəkələr, avtomatlaşdırma.

GİRİŞ

Müasir dövrdə energetika sənayesi dördüncü sənaye inqilabı kontekstində köklü dəyişikliklər yaşayır. Rəqəmsal texnologiyaların tətbiqi nəticəsində enerji sistemlərinin idarə edilməsi, monitoringi və diaqnostikası tam yeni səviyyəyə yüksəlmişdir [1]. Elektrik enerjisinin istehsalı, ötürülməsi və paylanması arasında mühüm əlaqələndirici rolunu transformatorlar və veriliş xətləri oynayır.

Enerji infrastrukturunun rəqəmsallaşması, süni intellekt və “ağıllı şəbəkə” texnologiyalarının tətbiqi enerji təhlükəsizliyi, səmərəlilik və ekoloji davamlılıq baxımından böyük üstünlüklər yaradır [2].

Energetika sahəsində baş verən texnoloji dəyişikliklər rəqəmsal transformasiya prosesini sürətləndirmişdir. Enerji sistemləri yalnız elektrik istehsalı və ötürülməsi ilə məhdudlaşmır, həm də real vaxt rejimində məlumatların toplanması, analiz edilməsi və qərarların avtomatik qəbulunu təmin edən mürəkkəb idarəetmə sistemində çevrilmişdir.

Rəqəmsal energetika konsepsiyası ağıllı infrastrukturun formalaşmasına, enerji axınlarının optimallaşdırılmasına və enerji təhlükəsizliyinin artırılmasına yönəlib. Transformatorlar və elektrik veriliş xətləri bu prosesin əsas obyektlərindəndir.

Azərbaycanın enerji sektorunda modernləşmə proqramları dövlət strategiyası çərçivəsində həyata keçirilir və “yaşıl enerji” konsepsiyası rəqəmsal infrastrukturun inkişafını prioritetləşdirir.

Metodologiya

Tədqiqatda analitik və sistemli yanaşma metodları tətbiq edilmişdir. Müasir enerji şəbəkələrində istifadə olunan rəqəmsal nəzarət sistemləri, sensor əsaslı monitoring texnologiyaları və süni intellekt alqoritmləri müqayisəli şəkildə təhlil olunmuşdur.

Əldə olunan nəticələr əsasında transformatorların və veriliş xətlərinin texniki göstəricilərinin optimallaşdırılması, həmçinin enerji itkilərinin azaldılması istiqamətində rəqəmsal həllərin rolu qiymətləndirilmişdir.

Tədqiqatın məqsədi — enerji sistemlərinin dayanıqlılığını və səmərəliliyini artırmaq üçün rəqəmsal idarəetmənin tətbiq imkanlarını göstərməkdir.

ELEKTRİK VERİLİŞ XƏTLƏRİNİN RƏQƏMSAL MODERNLƏŞDİRİLMƏSİ

1. Elektrik veriliş xətlərinin modernləşdirilməsi

Elektrik veriliş xətləri enerji sisteminin əsas daşıyıcı elementlərindəndir. Onların etibarlılığı enerji təminatının sabitliyinə birbaşa təsir göstərir.

Müasir xətlərdə SCADA və IoT sensorları vasitəsilə gərginlik, cərəyan, temperatur və mexaniki gərginliklər real vaxt rejimində izlənilir. Bu yanaşma qəza risklərini azaldır və profilaktik xidmət imkanlarını artırır.

2. Transformatorların müasir texnologiyaları

Modern transformatorlarda tətbiq olunan texnologiyalar:

- **Rəqəmsal idarəetmə modulları:** Uzaqdan nəzarət və avadanlıq optimallaşdırılması.
- **Sensor əsaslı diaqnostika:** Temperatur, vibrasiya və izolyasiya vəziyyətinin monitorinqi.
- **Amorf polad nüvələr:** Enerji itkilərini 30–40% azaldır.
- **Ekoloji izolyasiya yağları:** Ətraf mühitə təsir minimal və avadanlığın ömrü uzanır.

3. Enerji itkilərinin azaldılması üsulları

Avadanlıq tipi	İstismar müddəti (il)	İllik enerji itkisi (%)	Modern texnologiya ilə itkisi (%)
Köhnə transformator	25	5.0	3.0
Amorf nüvəli transformator	25	3.5	2.0
Standart veriliş xətti	40	6.0	4.0
HVDC xətti	40	4.5	2.5

Rəqəmsal monitorinq və idarəetmə texnologiyaları ilə enerji itkilərinin mənbələri real vaxtda aşkar edilir və profilaktik tədbirlər görülür.

4. Rəqəmsal idarəetmənin iqtisadi səmərəliliyi

Göstərici	Ənənəvi sistem	Rəqəmsal idarəetmə	Fərq (%)
İstismar xərcləri	100%	80–85%	15–20% azalma
Avadanlıq nasazlığı	100%	70–75%	25–30% azalma
Enerji itkiləri	100%	88–90%	10–12% azalma

Rəqəmsal idarəetmə tətbiqi nəticəsində həm iqtisadi, həm də texniki effektivlik artır. Rəqəmsal transformasiyanın iqtisadi effekti həm enerji istehsalında, həm də paylanmasında özünü göstərir.

Tədqiqatlar göstərir ki, ağıllı şəbəkə və rəqəmsal idarəetmə texnologiyalarının tətbiqi nəticəsində:

- istismar xərcləri 15–20% azalır,
- avadanlıqların nasazlıq dərəcəsi 25–30% azalır,
- enerji itkiləri isə orta hesabla 10–12% azalma göstərir.

Bu göstəricilər transformator və veriliş xətlərinin rəqəmsal modernləşdirilməsinin iqtisadi cəhətdən səmərəli olduğunu sübut edir.

5. Dayanıqlı enerji strategiyaları və ekoloji üstünlüklər

Rəqəmsal energetika yalnız texnoloji deyil, həm də ekoloji məqsədlərə xidmət edir. Ağıllı sistemlər enerji istehlakını optimallaşdırır, bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyasını asanlaşdırır və karbon emissiyasını azaldır.

Azərbaycanın “yaşıl enerji zonaları” və “Azad iqtisadi zonalar” çərçivəsində həyata keçirilən layihələrdə rəqəmsal idarəetmənin tətbiqi artıq reallığa çevrilməkdədir.

Ümumi anlayış və əhəmiyyəti.

Elektrik veriliş xətləri enerji sisteminin əsas komponentlərindəndir. Onlar elektrik enerjisinin istehsal mənbələrindən paylayıcı şəbəkələrə və istehlakçılara ötürülməsini təmin edir. Müasir dövrdə bu xətlər yalnız enerji ötürən deyil, həm də məlumat toplayan və ötürən intellektual infrastruktura çevrilir [3].

Müasir texnologiyalar və idarəetmə üsulları.

Veriliş xətlərində rəqəmsal idarəetmə və sensor nəzarət texnologiyalarının tətbiqi sayəsində xətlərin real vaxtda aşkarlanması və profilaktik tədbirlərin görülməsi mümkündür. Əsas yeniliklər bunlardır:

- Rəqəmsal sensorlar vasitəsilə gərginlik və cərəyan dəyişmələrinin onlayn izlənməsi;
- Dron və peyk nəzarət sistemləri;
- Optik lifli rabitə vasitəsilə məlumat ötürülməsi;
- “Self-healing grids” – özünü bərpa edən ağıllı şəbəkələr [4].

Enerji itkilərinin azaldılması.

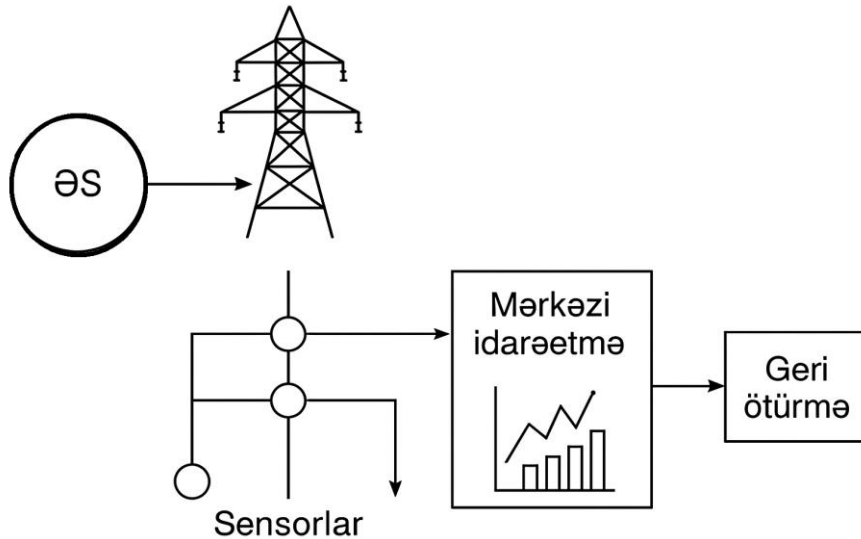
Veriliş xətlərində enerji itkiləri əsasən cərəyan və müqavimət parametrlərindən asılıdır:

$$P_{itki}=I^2R$$

Bu itkilərin azaldılması üçün yüksək gərginlikli ötürmə sistemləri (HVDC) və kompozit keçiricilər geniş tətbiq olunur. HVDC texnologiyası həm məsafə, həm də enerji keyfiyyəti baxımından səmərəlidir [5].

TRANSFORMATORLARIN RƏQƏMSAL MODERNLƏŞDİRİLMƏSİ

5. Ağıllı şəbəkə və diaqram göstərişi



Şək.1. Ağıllı şəbəkədə transformator və veriliş xətlərinin monitoring sistemi.

Rəqəmsal şəbəkələr enerji tələbatını və təklifini balanslaşdırır, fəvqəladə hallar proqnozlaşdırılır, və sistemin dayanıqlığı təmin edilir.

Transformator dəyişən cərəyanın gərginliyini elektromaqnit induksiya prinsipi ilə dəyişdirən cihazdır. Əsas qanun aşağıdakı kimidir:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

burada U_1 , U_2 - gərginliklər, N_1 , N_2 - sarım saylarıdır [6].

Rəqəmsal nəzarət və diaqnostika.

Yeni nəsil transformatorlarda rəqəmsal idarəetmə modulları, sensor sistemlər və məlumat toplama qurğuları mövcuddur. Bu texnologiyalar:

- temperatur və yük səviyyəsini izləyir;
- arızaları erkən mərhələdə aşkar edir;
- uzaqdan idarəetmə və diaqnostika imkanı yaradır;
- enerji itkilərini minimuma endirir [7].

Ekoloji və səmərəlilik baxımından yeniliklər.

Amorf polad nüvəli transformatorlar və az itkili izolyasiya yağları enerji səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, ekoloji dayanıqlığı təmin edir. Bu cür texnologiyalar həm enerji qənaətinə, həm də karbon izinin azaldılmasına kömək edir [8].

RƏQƏMSAL ENERGETİKADA GƏLƏCƏK YANAŞMALAR

Gələcəkdə enerji sistemlərinin idarə olunması süni intellekt, blokçeyn, IoT (əşyaların interneti) və bulud hesablamaları texnologiyalarına əsaslanacaq.

Bu texnologiyalar vasitəsilə:

- Enerji tələbatı və təklifi avtomatik balanslaşdırılacaq;
- Ağıllı sensorlar vasitəsilə sistemin real vəziyyəti təhlil ediləcək;
- Enerji infrastrukturunu daha çevik və təhlükəsiz hala gətiriləcək [9].

NƏTİCƏ

Rəqəmsal energetika şəraitində transformator və elektrik veriliş xətlərinin modernləşdirilməsi enerji sistemlərinin etibarlılığı, səmərəliliyi və ekoloji davamlılığı üçün əsas istiqamətlərdən biridir. Rəqəmsal idarəetmə, süni intellekt və avtomatlaşdırma texnologiyalarının tətbiqi enerji infrastrukturunun inkişafını təmin edir.

Bu istiqamətdə aparılan işlər Azərbaycanın və dünyanın enerji sektorunda yaşıl və rəqəmsal keçidin əsasını qoyur.

Transformator və veriliş xətlərinin rəqəmsal modernləşdirilməsi enerji sistemlərinin etibarlılığını, təhlükəsizliyini və səmərəliliyini artırır.

- Rəqəmsal idarəetmə və ağıllı şəbəkələr enerji axınlarının optimallaşdırılmasını təmin edir.
- Süni intellekt və avtomatlaşdırılmış monitoring sistemləri qəza hallarının qarşısını alır.
- Bu yanaşma Azərbaycanın enerji sektorunda rəqəmsal keçid və “yaşıl enerji” strategiyasına uyğun gəlir.

Gələcəkdə rəqəmsal texnologiyaların daha geniş tətbiqi bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyasını asanlaşdıracaq və karbon emissiyasını azaldacaq.

-
1. *Əliyev F.Ə.* Ümumi energetika və elektrik sistemləri. Bakı: ADNSU, 2018.
 2. *Əhmədov R.* Elektrik maşınları və transformatorlar. Bakı: Elm və Təhsil, 2020.
 3. *Glover J.D., Sarma M.S., Overbye T.* Power System Analysis & Design. Cengage Learning, 2017.
 4. IEEE Power & Energy Society. Transmission and Distribution Systems Handbook., 2019.
 5. World Energy Council. Digitalization and the Future of Energy Systems., 2023.
 6. *Kundur P.* Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 2019.
 7. ABB Group. Digital Transformers for Smart Grids. Technical Report, 2022.
 8. *Siemens Energy.* Next-Generation Transformer Technologies., 2021.
 9. IEA. Global Energy Digitalization Outlook 2024. Paris: International Energy Agency, 2024.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ЭПОХУ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

СУЛЕЙМАНОВА Л.Ч.

В статье анализируются вопросы модернизации трансформаторов и линий электропередачи в эпоху цифровой энергетики. С научной точки зрения оцениваются применение процессов цифровизации в энергосистемах, формирование интеллектуальных сетей и значение систем управления на основе искусственного интеллекта.

Рассматриваются современные подходы к повышению энергоэффективности трансформаторов и линий электропередачи, применению технологий мониторинга в реальном времени, а также снижению потерь.

Ключевые слова: цифровая энергетика, трансформатор, линии электропередачи, энергоэффективность, интеллектуальные сети, автоматизация.

MODERNIZATION OF TRANSFORMERS AND TRANSMISSION LINES IN THE ERA OF DIGITAL ENERGY

SULEYMANOVA L.Ch.

The article analyzes the issues of modernization of transformers and power transmission lines in the era of digital energy. The application of digitalization processes in energy systems, the formation of smart networks and the importance of artificial intelligence-based control systems are evaluated from a scientific point of view. Modern approaches to increasing energy efficiency in transformers and transmission lines, the application of real-time monitoring technologies, as well as reducing losses are examined.

Keywords: digital energy, transformer, power transmission lines, energy efficiency, smart grids, automation.

DOI:10.70784/azip.5.2025432

HAVA ELEKTRİK VERİLİŞ XƏTLƏRİNDƏ KOMMUTASIYA GƏRGİNLİKLƏRİNDƏN MÜHAFİZƏ SİSTEMLƏRİNİN QURLUŞU VƏ QIYMƏTLƏNDİRMƏ METODLARININ ARAŞDIRILMASI

MURADOVA R.Ə.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Azərbaycan, Bakı AZ 1010, Azadlıq prospekti, 20
rahila.muradova.a.@asoiu.edu.az*

Hava elektrik veriliş xətləri (HEVX) elektrik enerjisinin istehsal mənbələrindən istehlakçılara ötürülməsini təmin edən açıq tipli enerjiötürmə qurğularıdır və müasir enerji sistemlərinin yüksək gərginlikli ötürücü infrastrukturunun əsasını təşkil edir. Bu xətlər həm uzunməsafəli ötürmələrdə, həm də regional paylayıcı şəbəkələrdə istifadə olunur və onların etibarlı fəaliyyəti enerji sisteminin ümumi dayanıqlığına birbaşa təsir göstərir. HEX-lərin konstruksiyası elektrik, mexaniki və iqlim təsirlərinə qarşı dayanıqlı şəkildə layihələndirilir və xətt boyunca elektrik enerjisinin fasiləsiz ötürülməsini təmin edir. Məqalədə hava veriliş xətlərində kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemlərinin quruluşu və qiymətləndirmə metodları araşdırılmışdır.

Açar sözlər: hava veriliş xətləri, şunt reaktorları, mühafizə sistemləri, izolyasiya, ildırımın mühafizəsi, ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcı qurğular

Hava elektrik xətlərində (HEX) kommutasiya əməliyyatları – açarların qoşulması və ayrılması, boş xəttin qoşulması, yükün ayrılması, şunt reaktorlarının və ya kondensator batareyalarının qoşulub-ayrılması – keçid elektromaqnit proseslərin yaranmasına səbəb olur. Bu proseslərin nəticəsində əmələ gələn kommutasiya gərginlikləri nominal gərginlik səviyyəsini bir neçə dəfə aşaraq izolyasiya sisteminin elektrik və termiki yüklənməsini artırır. Nəticə etibarilə izolyatorlarda səthi sızma cərəyanları, qılgımlanma, deşmə hallarının ehtimalı yüksəlir və xəttin istismar etibarlılığı azalır. Buna görə də HEX-lərin layihələndirilməsi və istismarı zamanı əsas prioritetlərdən biri kommutasiya mənşəli impuls gərginliklərinin təhlükəli səviyyəyə çatmasının qarşısını alan mühafizə sistemlərinin düzgün seçilməsi və optimallaşdırılmasıdır.

Kommutasiya gərginlikləri ildırım mənşəli impulslarla müqayisədə daha uzunmüddətli, lakin yüksək enerji tutumlu keçid prosesləridir və xüsusilə 110–500 kV gərginlik siniflərində izolyasiya koordinasiyası baxımından həlledici rol oynayır. İldırım impulsları xəttə təsadüfi və qısa zamanlı təsir etsə də, kommutasiya impulsları enerji sisteminin normal rejim əməliyyatlarının təbii nəticəsi kimi daha tez-tez baş verir. Bu səbəbdən dissertasiyada mühafizə tədbirlərinin əsas hissəsi məhz kommutasiya gərginliklərinin məhdudlaşdırılması və onların dinamik parametrlərinin qiymətləndirilməsinə yönəldilir; ildırım mühafizəsi isə kompleks yanaşmanın tamamlayıcı elementi kimi nəzərə alınır [1].

Kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemləri elektrik şəbəkəsinin keçid proseslərinə təsir göstərərək impulsun:

- maksimal amplitudasını azaltmağa,
- yüksəlmə sürətini (du/dt) məhdudlaşdırmağa,
- sönmə müddətini qısaltmağa,
- enerjinin təhlükəsiz istiqamətə yönəldilməsinə və ya istilik şəklində udulmasına

xidmət edir. Belə mühafizə izolyasiyanın sınaq-dözümlülük səviyyəsi ilə impulsun pik qiymətləri arasında tələb olunan ehtiyatı saxlayır və IEC 60071-2 standartında qoyulan izolyasiya koordinasiyası şərtlərinin yerinə yetirilməsini təmin edir.

Funksional təyinatına görə kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemləri ümumi şəkildə iki əsas mexanizm üzrə işləyir:

1. Gərginliyin məhdudlaşdırılması (clamping) – impulsun pik amplitudasını müəyyən həddə “kəsərək” izolyasiyanın dözümlülük səviyyəsindən aşağıda saxlayır.

2. Sönümləndirmə və dalğa formasının yumşaldılması (damping/conditioning) – impulsun yüksəlmə sürətini azaldır, salınımları zəiflədir, refleksiya və rezonans təsirlərini məhdudlaşdırır.

Bu mexanizmlərə əsasən və beynəlxalq normativlərə (IEC 60099, IEC 60071-2, IEEE C62 seriyası və s.) uyğun olaraq kommutasiya gərginliklərindən mühafizə vasitələri aşağıdakı əsas qruplara təsnif edilir [2,3]:

1) İfrat gərginlik məhdudlaşdırıcı qurğular (İGM)

İGM kommutasiya impulsları zamanı xəttə yaranan artıq gərginliyi qeyri-xətti müqavimət hesabına məhdudlaşdıraraq enerjinin bir hissəsini özündə udur və artıq komponenti torpağa yönəldir. Müasir HEX-lərdə metal-oksid (ZnO) əsaslı İGM geniş tətbiq olunur. Onların üstünlükləri:

- yüksək sürətli reaksiya (mikrosaniyə səviyyəsi),
- böyük enerji udma qabiliyyəti,
- impulsdan sonra operativ bərpa olunma kimi xüsusiyyətləridir.

İGM xüsusilə qarışıq hava–kabel xətlərində sərhəd zonalarında və yarımstansiya girişlərində yerləşdirildikdə refleksiya nəticəsində yaranan lokal pikləri effektiv şəkildə azalda bilir.

2) RC-zəncirlər və keçid gərginlik məhdudlaşdırıcıları

RC-zəncirlər rezistor və kondensatorun ardıcıl/paralel birləşməsindən ibarət olub kommutasiya impulsunun yüksəlmə sürətini azaldır və dalğaların enerjisini söndürür. Bu qurğular əsasən:

- yüksək gərginlikli açarların kontaktlarında,
- transformator və reaktorların giriş-çıkış uclarında,
- yenidən qoşulma rejiminin intensiv olduğu düyünlərdə tətbiq olunur. RC-zəncirlərin əsas effekti vaxt sabitinin ($\tau=RC$) artırılması nəticəsində impulsun “yumşaldılmasıdır”; yəni izolyasiyaya düşən elektrik sahəsinin ani artımı məhdudlaşdırılır.

3) Cərəyan məhdudlaşdırıcı reaktorlar və induktiv kompensasiya elementləri

Kommutasiya rejimlərində gərginlik impulsunun geri qayıtması və rezonansın şiddəti xəttin paylanmış induktivlik-tutum nisbəti ilə sıx bağlıdır. Şunt reaktorları və uyğun induktiv kompensatorlar:

- xəttin ekvivalent dalğa müqavimətini dəyişdirir,
- impulsun yayılma şəraitini stabilləşdirir,
- gərginlik piklərinin yaranma ehtimalını azaldır.

Uzun məsafəli 110–220 kV xətlərində və boş xəttin kommutasiya rejimlərində bu elementlərin rolu xüsusilə böyükdür.

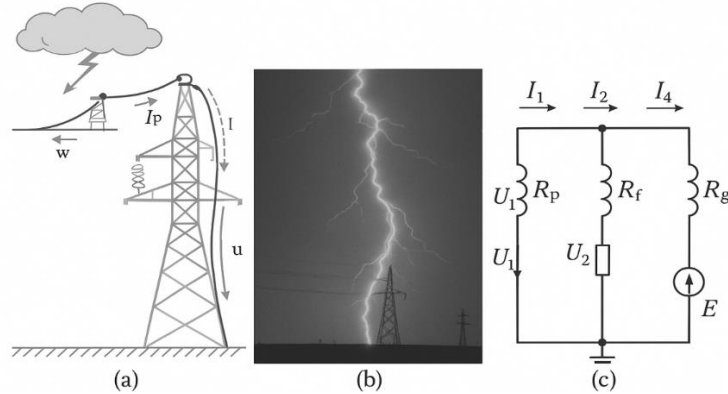
4) Aktiv idarəetmə və monitoring əsaslı mühafizə

Müasir enerji sistemlərində “controlled switching” texnologiyası, mikroprosessor idarəetmə açarlar, sensor-diaqnostik komplekslər və rəqəmsal yarımstansiya konsepsiyası kommutasiya anını faza bucağı üzrə optimallaşdırmağa imkan verir. Bu yanaşma impulsun ən əlverişsiz anda yaranmasının qarşısını alır və passiv mühafizə vasitələrinin iş yükünü azaldır. Aktiv mühafizənin əsas üstün cəhəti prosesə real vaxtda təsir etməsi və sistemin adaptiv sənaye istismarına uyğunlaşmasıdır.

Beləliklə, kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemləri HEVX-lərin izolyasiya stabilliyini və etibarlılığını təmin edən əsas texniki vasitələrdir. İGM pik gərginliyi məhdudlaşdırır, RC-zəncirlər impulsun dalğa formasını yumşaldır və söndürür, reaktorlar refleksiya-rezonans təsirlərini azaldır, aktiv idarəetmə isə kommutasiya prosesini optimallaşdırır. Bu qoruyucu vasitələrin bircə və düzgün seçilmiş kombinasiyası kommutasiya impulslarının təhlükəlilik səviyyəsini normativ həddlərdə saxlayır və dissertasiyanın növbəti bölmələrində aparılacaq modelləşdirmə və risk-etibarlılıq təhlili üçün metodoloji əsas yaradır [4].

Yuxarıda təqdim olunan təsnifata əsasən, kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemlərinin hər biri impulsun dinamikasına fərqli mexanizmlərlə təsir göstərir və bu təsirlərin xəttin real istismar şəraiti ilə uyğunluğunun qiymətləndirilməsi vacibdir. Xüsusilə kənd tipli və uzun məsafəli HEX-lərdə həm faza keçiricilərinin birbaşa zədələnməsi, həm də kabel–hava

sərhəd zonalarında lokal maksimumların yaranması riskləri artır. Bu baxımdan mühafizə elementlərinin yerləşdirilməsi, torpaqlama şəraiti və xəttin konstruktiv quruluşu izolyasiya koordinasiyası üçün həlledici rol oynayır. Havanın üst qatında yerləşdirilən qoruyucu naqillərin faza keçiricilərini birbaşa zərbədən necə qoruduğu, cərəyanın torpaqlama xəttinə necə yönləndirildiyi və bu prosesin ekvivalent elektrik modeli şəkil 1-də verilmişdir.



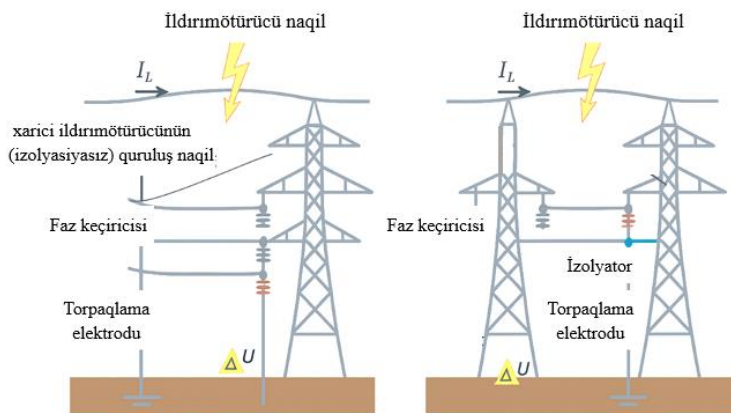
Şək.1 Hava elektrik xəttində ildırımötürücü sistemin konstruksiyası:
a -hissəsində ildırımötürücü naqilin quruluşu,
b- hissəsində sınaq zamanı ildırım zərbəsinin fotosəkli,
c- hissəsində isə ekvivalent elektrik sxemi.

Bu sxem cərəyanların (I_1 – I_4) və potensial fərqlərin (U_1 , U_2) paylanmasını əks etdirir. Göründüyü kimi, ildırım zərbəsi birbaşa faz keçiricisinə deyil, qoruyucu naqilə yönəlir və torpaqlama xətti vasitəsilə sönməlidir.

RC-zəncirlərin və ildırımötürücü sistemlərin iş prinsipi. Hava elektrik xətlərində yaranan keçid proseslər zamanı gərginlik impulslarının amplitudası bir neçə yüz kilovolt həddinə çata bilər. Belə rejimlərdə izolyasiya sisteminə düşən elektrik sahəsinin intensivliyi artır, nəticədə deşmə və ya qılgıncımlanma hadisəsi baş verə bilər.

İldırımötürücü sistemlərin iş prinsipi. İldırımötürücü sistemlər (ing. *overhead ground wire systems*) hava xəttinin üst hissəsində yerləşdirilən metal naqillərdən ibarətdir və onların əsas funksiyası ildırım zərbəsinin birbaşa faz keçiricisinə düşməsinin qarşısını almaqdır. İldırım cərəyanı ən az müqavimət yolunu — yəni ildırımötürücü naqili və torpaqlama xəttini seçir. Bu halda yüksək gərginlik faz keçiricilərinə deyil, torpağa yönəldilmiş olur [5-6].

Şəkil 2-də ildırımötürücü naqilin və dayağın torpaqlama xəttinin iş prinsipi sxematik şəkildə göstərilmişdir. Burada ildırım cərəyanı I_L ildırımötürücü naqil boyunca axaraq dayağın torpaqlama elektroduna daxil olur və potensial fərqi ΔU torpaqla bərabərləşir.



Şək.2. İldırımötürücü sistemin iki konstruktiv variantı:
a – xarici ildırımötürücü (izolyasiyasız) quruluş;
b – izolyasiyalı ildırımötürücünün quruluşu.

İldırımötürücü sistemlərin effektivliyi müdafiə bucağı ilə xarakterizə olunur. Müdafiə bucağı α dayaqların hündürlüyü və keçiricilərin yerləşmə məsafəsi ilə müəyyən olunur:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h - h_c}{a/2}$$

burada h — ildırımötürücü naqilin hündürlüyü, h_c — faz keçiricisinin hündürlüyü, a — fazalararası məsafədir. Təcrübə göstərir ki, $\alpha = 25\text{--}35^\circ$ olduqda ildırım zərbələrinin 95 %-dən çoxu uğurla ildırımötürücü naqilə yönəlir.

Torpaqlama müqavimətinin kiçik olması ($2\text{--}10 \Omega$) ildırım cərəyanının tam sönməsi üçün mühüm şərtədir. Müasir dayaqlarda torpaqlama sistemi sinklənmiş polad lentlər və ya şaquli elektrodlar şəklində yerinə yetirilir [7].

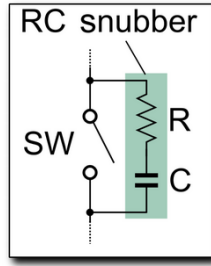
RC-zəncirlərin iş prinsipi. Kommutasiya zamanı yaranan gərginlik impulsları ildırımdan fərqli olaraq daha qısa davamlı və yüksək tezlikli olur. Onların azaldılması üçün RC-zəncirlər — yeni ardıcıl və ya paralel qoşulmuş rezistor-kondensator birləşmələri istifadə olunur.

Bu elementlərin əsas vəzifəsi gərginliyin dəyişmə sürətini məhdudlaşdırmaq və enerjini istilik şəklində udmaqdır. RC-zəncirin ekvivalent dövrəsi Şəkil 3-də göstərilmişdir.

RC-zəncirin dinamik davranışı aşağıdakı diferensial tənliklə ifadə olunur:

$$U(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

burada R — müqavimət, C — tutum, $\tau = RC$ — dövrənin vaxt sabitidir.



Şəkil 3. – Kommutasiya rejimində RC-zəncirin ekvivalent modeli.

Göründüyü kimi, R və C qiymətləri artırıldıqca gərginlik impulsu daha yavaş yüksəlir və keçid prosesi daha hamar olur. Bu, izolyasiyanın üzərinə düşən elektrik sahəsini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır.

RC-zəncirlər xüsusilə yüksək gərginlikli açarların kontaktları üzərində və transformatorların birləşmə yerlərində tətbiq olunur. Onlar həm də kommutasiya rejimində enerji paylanması sabitləşdiricisi rolunu oynayır [8].

Aparılmış sınaqlar göstərir ki, 110 kV xəttə RC-zəncir tətbiq edildikdə kommutasiya gərginliyinin amplitudası təxminən 25–30 % azalır, kontaktlararası qövsün davam etmə müddəti isə 1,5 dəfə qısalır. İldırımötürücü sistemlər faz keçiricilərinin birbaşa ildırım təsirindən qorunmasını, RC-zəncirlər isə kommutasiya zamanı yaranan keçid gərginliklərin sönməsini təmin edir. Bu iki prinsipin birgə tətbiqi hava elektrik xətlərinin ümumi etibarlılığını artırır və izolyasiya sisteminin xidmət müddətini uzadır.

Kommutasiya rejimlərində mühafizənin dinamik göstəriciləri. Hava elektrik xətlərində kommutasiya prosesləri çox qısa zaman intervalında baş verən yüksək tezlikli elektromaqnit hadisələridir. Bu hadisələr zamanı xəttin izolyasiya sisteminə təsir edən əsas parametrlər — pik gərginlik, sönmə müddəti, gərginlik məhdudlaşdırma əmsalı, enerji udma qabiliyyəti və sistemin etibarlılığı — mühafizə sistemlərinin dinamik göstəricilərini formalaşdırır. Bu göstəricilərin təhlili mühafizə sistemlərinin səmərəli seçilməsi və optimal parametrlərinin müəyyən edilməsi üçün vacibdir [9].

Reaksiya vaxtı və sönmə müddəti. Kommutasiya impulsunun dinamik davranışını müəyyən edən əsas parametrlər RC-zəncirin vaxt sabitidir:

$$\tau = RC$$

Bu sabit impulsun sönmə sürətini təyin edir. Adətən impulsun 95 % sönməsi üçün təqribən:

$$t_s \approx 3\tau$$

Məsələn, $R = 50 \Omega$ və $C = 20 \mu\text{F}$ olduqda:

$$\tau = 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 0.001 \text{ s}, \quad t_s \approx 0.003 \text{ s} = 3 \text{ ms}$$

Bu o deməkdir ki, RC-zəncir qoşulduqda kommutasiya impulsu 3 millisaniyə ərzində təhlükəsiz səviyyəyə endirilir.

Enerji udma qabiliyyəti. RC-zəncirin impuls zamanı udduğu enerji:

$$W = \int_0^{t_s} i^2(t) R dt$$

Sadə qiymətləndirmə üçün:

Tutaq ki, impuls zamanı orta cərəyan $I_{av}=40$, sönmə müddəti $t_s=3$ ms:

$$W \approx I_{av}^2 R t_s, \quad W \approx 40^2 \cdot 50 \cdot 0.003 = 240 \text{ J}$$

Bu enerji RC-zəncirin istilik yüklənməsi üçün təhlükəli hesab olunmur və tipik sınaq qiymətlərinə uyğundur.

Gərginlik məhdudlaşdırma əmsalı. Mühafizə sistemlərinin effektivliyi aşağıdakı əmsalla xarakterizə olunur:

$$k_m = \frac{U_{qoruma}}{U_{qorumasız}}$$

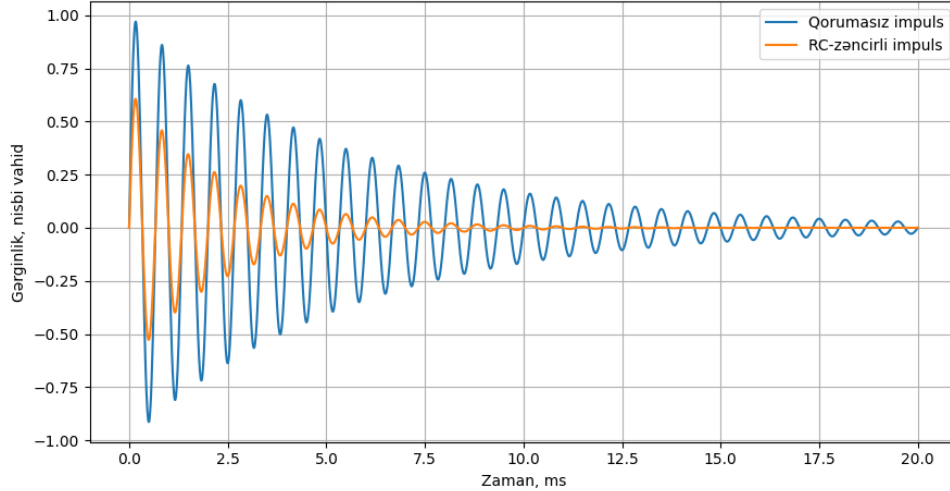
Misal üçün:

- qorumasız halda pik gərginlik: $U_{max}=450$ kV
- RC-zəncir qoşulduqda: $U_{qoruma}=280$ kV

$$k_m = \frac{280}{450} = 0.62$$

Bu nəticə IEC standartlarına görə yüksək səmərəlilik hesab olunur ($k_m < 0.7$).

Aşağıdakı qrafik kommutasiya impulsunun RC-zəncir olmadan və RC-zəncir ilə davranışını sadələşdirilmiş formada göstərir (şəkil 4).



Şəkil 4. RC-zəncirli və zəncirsiz kommutasiya impulsunun müqayisəsi.

Şəkil 4-dən görüldüyü kimi, RC-zəncirin tətbiqi kommutasiya impulsunun maksimal amplitudasını nəzərəcarpacaq dərəcədə azaldır və keçid prosesin sönmə müddətini qısaldır. Lakin mühafizə sisteminin effektivliyini yalnız dalğa formasına görə deyil, həmçinin reaksiya vaxtı, enerji udma qabiliyyəti və gərginlik məhdudlaşdırma əmsalı kimi dinamik göstəricilərin ümumi qiymətləndirilməsi əsasında təyin etmək daha məqsədəuyğundur. Buna görə də növbəti mərhələdə RC-zəncir və ildırımötürücü sistemlər üçün əsas dinamik parametrlər cədvəl 1-də sistemləşdirilmiş şəkildə təqdim olunur [10].

Kommutasiya rejimlərində mühafizə sistemlərinin dinamik göstəricilərinin təhlili göstərir ki:

- RC-zəncir kommutasiya impulslarının pik amplitudasını 30–40 % azaldır,
- impulsun sönmə müddətini 2–3 dəfə qısaldır,
- gərginlik məhdudlaşdırma əmsalını 0.6 səviyyəsinə endirir,

• ildırımötürücü sistem isə faza keçiricilərini birbaşa ildırım zərbəsindən qoruyur və impuls enerjisini tam torpağa yönəldir.

Cədvəl 1

RC-zəncirin və ildırımötürücü sistemin dinamik göstəriciləri

Göstərici	RC-zəncir	İldırımötürücü sistem
Reaksiya vaxtı	0.5–3 ms	1–5 μ s
Sönmə müddəti	3–10 ms	Yoxdur (cərəyan torpaqlanır)
Gərginlik məhdudlaşdırma əmsalı k_m	0.55–0.70	0.20–0.35
Enerji ilə işləmə prinsipi	Enerji udur	Enerjini torpağa yönəldir
Effektivlik	Kommutasiya impulslarında	İldırım zərbələrində

Bu nəticələr hava elektrik xətlərində izolyasiya koordinasiyasını təmin etmək üçün kompleks mühafizə yanaşmasının zəruriliyini sübut edir və modelləşdirmə üçün əsas yaradır.

Etibarlılıq və risk əsaslı qiymətləndirmə meyarları. Hava elektrik xətlərində kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemlərinin səmərəliliyini qiymətləndirmək üçün yalnız impulsların amplitudası və dalğa forması ilə məhdudlaşmaq kifayət etmir. Praktik istismarda əsas məqsəd — mühafizə tədbirlərinin xəttin ümumi etibarlılığını nə dərəcədə artırdığını və texniki-iqtisadi riskləri nə qədər azaltdığını əsaslandırmaqdır. Bu səbəbdən kommutasiya rejimlərində mühafizə sistemlərinin kompleks qiymətləndirilməsi etibarlılıq nəzəriyyəsi və risk əsaslı yanaşma üzərində qurulur.

Etibarlılıq baxımından hava xətti “fiziki komponentlər + mühafizə qurğuları + torpaqlama + idarəetmə” kimi çoxkomponentli sistem kimi qəbul edilir. Sistemə təsir edən əsas təhlükə mənbələri isə, bir tərəfdən, kommutasiya impulslarının izolyasiyada yaratdığı gərginlik artımı, digər tərəfdən isə ildırım zərbələrinin xəttə birbaşa və ya dolaylı təsiridir. Buna görə etibarlılığın qiymətləndirilməsi iki səviyyədə aparılır: komponent etibarlılığı və sistem etibarlılığı.

Komponent etibarlılığı göstəriciləri:

Hər bir mühafizə elementinin (RC-zəncir, ildırımötürücü naqıl, torpaqlama konturu, açarların idarəetmə sistemi) sıradan çıxma intensivliyi nasazlıq axını ilə xarakterizə olunur:

$$\lambda = \frac{n_f}{T}$$

burada n_f — müəyyən vaxtda qeydə alınan nasazlıqların sayı, T — müşahidə müddətidir.

Komponentin işlək qalma ehtimalı aşağıdakı eksponensial qanuna əsasən qiymətləndirilir:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Bu ifadə göstərir ki, nasazlıq intensivliyi azaldıqca komponentin etibarlılığı yüksəlir. Məsələn, RC-zəncirin termik yüklənməsi və təkrarlanan impuls nəticəsində sıradan çıxma ehtimalı λ_{RC} ilə, ildırımötürücü sistemdə isə əsas risk dayağın torpaqlama müqavimətinin artması ilə λ_T parametri ilə qiymətləndirilir.

Komponent etibarlılığı ilə yanaşı, istismarda çox geniş istifadə olunan iki mühüm göstərici mövcuddur:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad MTTR = \frac{\sum t_{bərpa}}{n_f}$$

burada MTBF — nasazlıqlar arasındakı orta iş müddəti, MTTR — orta bərpa vaxtıdır.

Bu göstəricilər mühafizə sisteminin resursunu və istismar baxımından “dayanıqlılığını” xarakterizə edir.

Sistem etibarlılığı və kompleks qiymətləndirmə. Hava elektrik xəttinin qorunması bir neçə elementin paralel və ardıcıl işləməsinə əsaslandığı üçün, ümumi etibarlılıq çoxkomponentli sistem modeli kimi təyin edilir. Əgər komponentlər ardıcıl işləyirsə:

$$R_{sis}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

Əgər əsas qoruyucu elementlər paralel işləyərək bir-birini ehtiyatlayırsa, ümumi etibarlılıq daha yüksək olur:

$$R_{par}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

Bu yanaşma göstərir ki, məsələn, RC-zəncir + ildırımötürücü naqıl + effektiv torpaqlama birlikdə tətbiq olunduqda xəttin ümumi etibarlılığı tək elementli qoruma ilə müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə yüksəlir.

Etibarlılıq göstəriciləri “nasazlıq ehtimalını” izah etsə də, risk anlayışı ehtimal ilə nəticənin (zərərin) birgə təsirini qiymətləndirir. Enerji sistemində risk ümumi şəkildə belə təyin olunur:

$$Risk = P_f \cdot C$$

burada P_f — izolyasiya deşməsi və ya avadanlığın sıradan çıxma ehtimalı, C — həmin hadisənin nəticəsində yaranan texniki-iqtisadi zərərin ölçüsüdür.

Kommutasiya gərginlikləri üçün riskin hesablanmasında əsas kriteriyalar aşağıdakılardır: -İzolyasiya deşilməsi ehtimalı (pik gərginliyin izolyasiyanın dözümlülük səviyyəsinə yaxınlığı);

-Elektrik təchizatının kəsilməsi nəticəsində zərər (enerji itkisi, istehlakçıların dayanması);

-Avadanlığın bərpa xərci və vaxtı;

-Təhlükəsizlik riski (qısaqapanma və yanğın ehtimalı).

Riskin praktik qiymətləndirilməsi üçün tez-tez nisbi risk indeksi tətbiq olunur:

$$RI = \frac{U_{max}}{U_{imp}}$$

burada U_{max} — kommutasiya impulsunun maksimal qiyməti, U_{imp} — izolyasiyanın icazə verilən impuls dözümlülük səviyyəsidir.

Əgər $RI \leq 0.8$ olarsa, risk aşağı; $0.8 < RI < 1.0$ olduqda risk orta; $RI \geq 1.0$ olduqda isə risk yüksək qiymətləndirilir və mühafizə tədbirlərinin təkmilləşdirilməsi tələb olunur.

Kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemlərinin (YGM, RC-zəncir, şunt reaktoru və s.) səmərəliliyi yalnız pik gərginliyin azalması ilə deyil, eyni zamanda impuls enerjisinin paylanması, dinamik davranış, etibarlılıq və risk göstəriciləri ilə birlikdə qiymətləndirilməlidir.

NƏTİCƏ

Aparılan araşdırmalar göstərdi ki, kommutasiya rejimlərində xəttin ən həssas və riskə məruz qalan hissələri kabel-hava sərhədi və xəttin açıq uca yaxın zonalarıdır. Məhz bu sahələrdə gərginlik impulsları toplanır və izolyasiya üçün təhlükəli səviyyəyə yüksələ bilər. Buna görə də həmin nöqtələrdə əlavə mühafizə tədbirlərinin görülməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. *Electromagnetic Transients Program – Restructured Version (EMTP-RV)* mühitində aparılan modelləşdirmə göstərdi ki, RC-zəncir, ZnO tipli ifrat gərginlik məhdudlaşdırıcısı (arrester) və şunt reaktorun birgə tətbiqi gərginlik piklərini orta hesabla 30–40 % azaldır, dalğaformaların daha tez sönməsinə şərait yaradır və xətt izolyasiyasının yüklənməsini nəzərəcərpacaq dərəcədə azaldır.

1. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A.* Analysis of reliability of typical power supply circuits. Reliability: Theory and Applications, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024.
2. *Rzayeva S.V., Ganiyeva N.A., Piriyeva N.M.* Modern approaches to electrical equipment diagnostics. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) - Issue 58, Volume 16, Number 1, March 2024 (Serial No: 0058-1601-0324), pp.182-189.
3. *Rzayeva, S.V., Piriyeva, N.M., Ismayilova, S.I.* High and low voltage coordination in electrical power systems. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, 2025, 17(1), pp 19–31, 250102.

4. *Piriyeva, N.M., Mammadov, N.S., Rzayeva, S.V.* Development of new methods for protecting substation and overhead lines from overvoltages. *Reliability Theory and Applications*, 2025, 20(1), pp 683–689.
5. *Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г.* Выбор модели опоры ВЛ 35-220 кВ при анализе грозовых перенапряжений //труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – С.112-118.–URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17942105> (дата обращения – 05.05.2021).
6. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений /Ф.Х. Халилов [и др.]. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 272 с.
7. *Ahmedov, E., Aliyev, N., Sadiqov, S.* Increasing the Impulse Electrical Strength of Winding Insulation of High-Voltage Transformers. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024, (8).
8. *Furgal, J.* Influence of lightning current model on simulations of overvoltages in high-voltage overhead transmission systems. *Energies*. 2020, 13(2), 296.
9. *Ahmedov, E., et al.* Improving the lightning resistance of high-voltage overhead power line. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023, 11.
10. *Ahmadov, E.N., Aliyev, N.A., Rzayeva, S.V.* Modern methods for protecting high-voltage overhead power lines from lightning overvoltage. The 20th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering. 2024, 31 October, International Organization of IOTPE, pp. 12–17. ISSN 2309-0553.

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ И ОЦЕНКИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

МУРАДОВА Р.А.

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) — это открытые сооружения, обеспечивающие передачу электроэнергии от источников производства к потребителям и являющиеся основой высоковольтной передающей инфраструктуры современных энергосистем. Эти линии широко применяются как в магистральных сетях электропередачи, так и в региональных распределительных сетях, при этом их надежная работа напрямую определяет устойчивость и безопасность функционирования энергосистемы в целом. Конструкция воздушных линий разрабатывается с учетом воздействия электрических, механических и климатических факторов и должна обеспечивать длительную и бесперебойную передачу электроэнергии. В статье рассматриваются методы проектирования и оценки систем защиты от коммутационных напряжений в воздушных линиях электропередачи.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, шунтирующие реакторы, системы защиты, изоляция, молниезащита, устройства ограничения перенапряжений

A STUDY OF METHODS FOR DEVELOPING AND EVALUATING SURGE PROTECTION SYSTEMS IN OVERHEAD POWER LINES

MURADOVA R.A.

Overhead power lines are open structures that transmit electric power from generation sources to consumers and form the backbone of the high-voltage transmission infrastructure of modern power systems. These lines are widely used in both main transmission networks and regional distribution networks, and their reliable operation directly determines the stability and safety of the power system as a whole. The design of overhead lines is developed taking into account the impact of electrical, mechanical, and climatic factors and must ensure long-term and uninterrupted power transmission. This article discusses methods for designing and evaluating switching voltage protection systems in overhead power lines.

Keywords: overhead power lines, shunt reactors, protection systems, insulation, lightning protection, surge suppression device.

DOI:10.70784/azip.5.2025440

MÜASİR PYEZOELEKTRİK ELEMENTLƏRİ ÜZƏRİNDƏ PYEZOGENERATORUN LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİ

CƏLİLLİ N.Ə., MAMEDOVA N.N., HƏŞİMOV X.X.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti,
Azadlıq prospekti 20, Bakı, Azərbaycan, AZ1010
nicatcelilli35@gmail.com*

Pyezoqeneratorun layihələndirilməsinə uyğun müasir pyezoelektrik elementin seçilməsi, mexaniki enerjinin (məsələn, titrəmə və ya təzyiqin) elektrik enerjisinə çevrilməsi üçün onun konfigurasiyasının müəyyən edilməsi mühüm mərhələlərdən biridir. Layihələndirmə zamanı pyezo materialın birbaşa xüsusiyyətləri nəzərə alınaraq, bu prosesi həyata keçirən optimal sxem formalaşdırılır. Hazırlanan bu sxem alınan yüklərin səmərəli toplanmasını və onları faydalı gərginliyə çevrilməsini təmin edir. Nəticədə əldə edilən enerji avtonom sistemlərin, sensorların və ya ətraf mühətdən enerji yığılması kimi müxtəlif tətbiqlərin enerji təminatında istifadə olunur.

Açar sözlər: Pyezoelektrik effekt, pyezogenerator, enerji yığılımı, rezonans tezliyi, mikrogenerator, seysmik kütlə, pyezoelektrik materiallar.

Giriş. Müasir elmi-texniki inkişaf mərhələsində enerji tələbatının sürətlə artması alternativ və səmərəli enerji mənbələrinin axtarışını zəruri etmişdir. Bu istiqamətdə pyezoelektrik elementlərə əsaslanan enerji yığılımı və çevrilməsi texnologiyaları xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Pyezoelektrik effekt mexaniki təsirlərin nəticəsində elektrik enerjisinin yaranmasına əsaslanır və bu xüsusiyyət pyezogeneratorların işləmə prinsipinin əsasını təşkil edir. Pyezogeneratorlar vibrasiya, təzyiq və ya fırlanma kimi mexaniki təsirlərdən enerji hasil etmək qabiliyyəti sayəsində mikrosistemlərdə, sensor qurğularda və avtonom enerji mənbələrində geniş tətbiq potensialına malikdir. Son illərdə aparılan elmi tədqiqatlar göstərir ki, pyezoelektrik materiallardan hazırlanan generatorlar aşağı gücə malik sistemlər üçün davamlı və etibarlı enerji mənbəyi kimi istifadə oluna bilər.

Bu qurğuların səmərəliliyi əsasən istifadə olunan materialların mexaniki dayanıqlığı və elektrik xüsusiyyətlərindən asılıdır. Bu tədqiqatda yüksək çevrilmə qabiliyyətinə malik PZT (Qurğuşun Zirkonat Titanatı) və PVDF (Polivinilidendiflorid polimeri) kimi pyezoelektrik materiallardan geniş istifadə araşdırılmışdır. Bu istiqamətdə aparılan araşdırma enerji yığılımı texnologiyalarının təkmilləşdirilməsi, enerji ilə müstəqil işləyən elektron sistemlərin inkişafı və davamlı enerji təminatı sahəsində mühüm elmi və praktiki əhəmiyyət daşıyır.

Əsas hissə. Müasir pyezoelektrik elementlər mexaniki enerjini birbaşa elektrik enerjisinə çevirə bilən materiallardır. Bu xüsusiyyət onlardan enerji yığılımı və avtonom enerji mənbələrinin yaradılmasında geniş istifadə etməyə imkan verir. Pyezogeneratorların əsas məqsədi xarici mexaniki titrəmələr və ya fırlanma hərəkətlərindən yaranan enerjini elektrik signalına çevirməkdir. Belə sistemlərdə pyezoelektrik elementlər adətən şüa, lövhə və ya halqa formasında konstruksiyalara inteqrasiya olunur. Generatorun effektivliyini artırmaq üçün fırlanan sistemin tezliyi ilə pyezoelementin rezonans tezliyi uyğunlaşdırılır. Bu uyğunluq enerji çevrilməsini maksimum dərəcədə səmərəli edir. Pyezoelementlərə bərkidilmiş ətalət kütlələri onların deformasiyasını artıraraq çıxış gərginliyini yüksəldir. Pyezoelektrik materiallar, mexaniki gərginlik və ya deformasiya nəticəsində elektrik yükü yarada bilən və eyni zamanda elektrik sahəsinə məruz qaldıqda mexaniki deformasiya keçirə bilən materiallardır. Pyezoelektrik effekt bu xüsusiyyətin geri çevrilə bilən xüsusiyyətidir. Pyezoelektrik material

mexaniki qüvvə və ya gərginliyə məruz qaldıqda, materialın kristal tor quruluşundakı yüklü atom və ya ionların mövqeləri dəyişir. Bu yük ötürülməsi maddə boyunca elektrik potensialı və ya gərginlik yaranmasına səbəb olur. Pyezoelektrik effektin birbaşa və əks təsirini ayırd etmək mümkündür. Bir materialda mexaniki gərginlik nəticəsində elektrik yükünün yaranması birbaşa pyezoelektrik effekt adlanır. Bu effekt pyezoelektrik sensorlarda daxil olmaqla müxtəlif tətbiqlərdə geniş istifadə olunur. Birbaşa effektin tərsi isə əks pyezoelektrik effektdir. Pyezoelektrik material elektrik sahəsinə məruz qaldıqda deformasiyaya uğrayır və ya formasını dəyişir. Bu fenomen pyezoelektrik aktuatorlar və generatorlarda istifadə olunur. Pyezoelektriklik simmetriya mərkəzi olmayan və ümumi dipol momenti sıfır olmayan materiallarda müşahidə olunur. [1] Pyezoelektrik materialın üç iş rejimi mövcuddur. d_{33} rejimi, həmçinin uzunlamasına rejim kimi tanınır, polyarlıq və gərginlik istiqamətinin paralel olduğu iş rejimidir; bu, pyezoelektrik enerji toplama tətbiqləri üçün tövsiyə olunur. d_{31} rejimi, həmçinin eninə rejim kimi tanınır, polyarlıq və tətbiq olunan gərginlik istiqamətinin bir-birinə perpendikulyar olduğu rejimdir. Üçüncü rejim paralel kəsici rejim d_{15} -dir, bu, ilkin polyarlıq elektrodlarına perpendikulyar yerləşdirilmiş elektrodlar üzərində yük toplandıqda və kəsici mexaniki qüvvə tətbiq olunduqda meydana gəlir. Bu xüsusiyyət bütün pyezoelektrik kimi materiallarda mövcud deyil. Piezoelektrik materiallar həmçinin onların elektromexaniki əmsalı ilə xarakterizə olunur, bu aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$k_i = \frac{W_i^e}{W_m^j} \quad (1)$$

burada, W_i^e — ox üzrə yığılan elektrik enerjisini, W_m^j — isə həmin ox üzrə verilən mexaniki giriş enerjisini ifadə edir.

Bu xüsusiyyəti əldə etmək üçün ferroelektriklər polyarizasiya olunmalıdır. Şəkil 1-də hazırda mühəndislik tətbiqlərində istifadə olunan pyezoelektrik materialların ferroelektrik və qeyri-ferroelektrik materiallara ilkin təsnifatını göstərir [2].



Şək.1. Müasir mühəndislik tətbiqlərində istifadə olunan pyezoelektrik materiallar.

Generatorlarda enerji çevrilməsi üçün bütün dörd əsas pyezoelektrik qrupundan olan materiallardan istifadə etmək mümkündür. Pyezoelektrik generatorların dizaynında ən çox keramika materiallarından istifadə olunur. Əvvəlcə generatorlarda PZT keramikaları istifadə olunur. PZT, titan və cıvə zirkonatın qarışıq kristalıdır və ümumi formulu belədir: $(x)\text{PbTiO}_3-(1-x)\text{PbZrO}_3$ $(x)\text{PbTiO}_3-(1-x)\text{PbZrO}_3$.

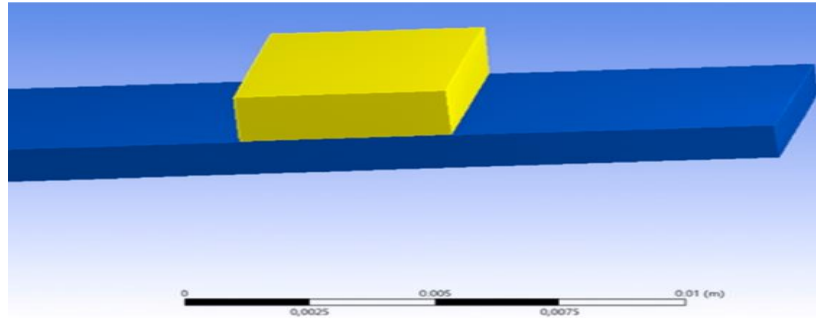
PZT keramikanın xüsusiyyətlərini qarışıq kristal təşkil edən komponentlərin faiz nisbətini dəyişməklə manipulyasiya etmək mümkündür ($x = 0-1$). Bu, fərqli material sabitlərinə malik PZT keramika istehsal etməyə imkan verir. Generator dizaynına həsr olunmuş tək bir PZT keramika mövcud deyil. Kompozitlər, müxtəlif formadakı pyezoelektrik materiallardan, yapışqan qatlarından, polimer filmindən və uyğun şəkildə formalaşdırılmış elektrodlarından

ibarət materiallardır. Bu kompozit qatlarının əlavə hissələrinə düzgün yerləşdirilmiş elektrodlar quraşdırılır.

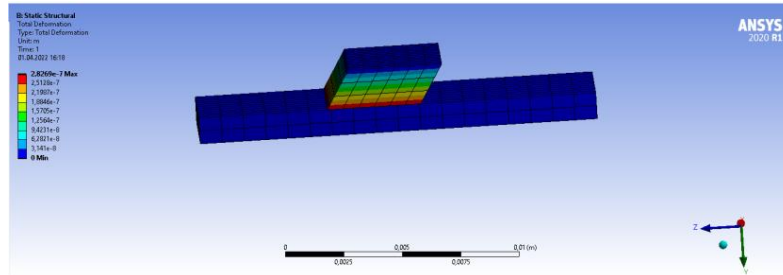
Layihələndirmə mərhələsində həm mexaniki, həm də elektrik modelləşdirmə üsullarından — xüsusilə ANSYS kimi sonlu elementlər proqramlarından istifadə olunur. ANSYS proqramında sonlu element modeli qurulmuşdur (şəkil 2-3). ANSYS proqramında qurulmuş sonlu element modelində analiz nəticəsində pyzeoelement üzərində maksimal gərginlik 240 V səviyyəsində müşahidə edilmişdir. Gərginliyin yüksək olması generatorun elektrik enerjisi istehsal gücünü artırır. Daha yüksək gərginlik, enerji toplama və saxlama sistemlərinə daha çox enerji ötürülməsinə imkan verir. Bu proqramlar vasitəsilə gərginlik paylanması, rezonans tezlikləri və çıxış gərginliyi analiz edilir. Fırlanan sistemlərdə tətbiq olunan pyzogeneratorlar vibrasiyadan enerji yığıcı üçün çox əlverişlidir. Onlar batareyasız işləyən sensor sistemlərində, monitorinq cihazlarında və ağıllı mexanizmlərdə tətbiq oluna bilər. Lakin onların bir sıra çatışmazlıqları var [3]:

1. Az cərəyan. Pyzogenerator çevrici rolunu oynayır, lakin elektrik enerjisi mənbəyi deyil.

2. Elektrik yükü yalnız mexaniki təsir anında yaranır. Cərəyan qısa müddətlidir, bu isə bir sıra qurğulara əlavə elementlərin tətbiqini tələb edir. Nəticədə konstruksiya mürəkkəbləşir və bununla da etibarlılığı azalır.



Şək.2. Sonlu elementin simulyasiya modeli.

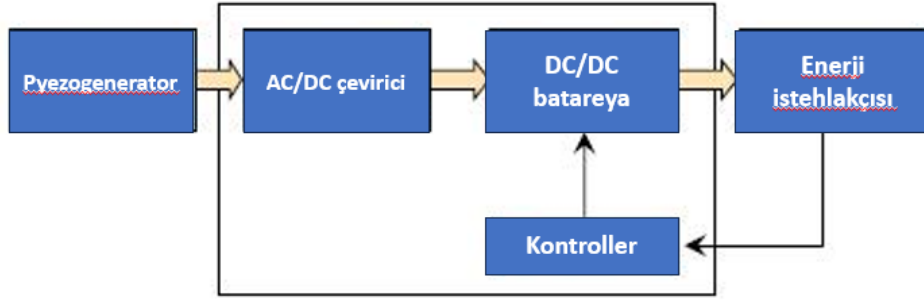


Şək.3. Gərginlik tətbiq edildikdə sonlu element modeli.

5–100 μm qalınlığında pyzeoelektrik elementlərinin istehsalı üçün yeni texnologiyanın tətbiqi və onların avtomatik olaraq çoxqatlı konstruksiyalara yığılmasının reallaşdırılması pyzeoelektrik generatorların optimal parametrlərlə hazırlanmasına imkan verir. Bu parametrlər onların impedansının yük impedansı ilə uyğunlaşmasını və çıxış gərginliyinin 2–10 V-dan 240–300 V-a qədər olmasını təmin edir [1–4]. Pyzogeneratorun konstruksiyası pyzeoelementin konstruksiyasından asılıdır. Polyarizasiya istiqaməti mexaniki qüvvə istiqaməti ilə üst-üstə düşən pyzeoelementlər 100–300 V gərginlikli güclü pyzeoelektrik generatorların yaradılmasında istifadə olunur. Yaradılmasında əsasən PVDF əsaslı pyzeoelementdən istifadə olunur. PVDF əsaslı elastik pyzeoelementlər adi keramika əsaslı pyzeoelementlərdən fərqli olaraq daha elastik və yüngüldür. PVDF əsaslı elastik pyzeoelementlərin tətbiqi nəticəsində enerji çevrilməsinin səmərəliliyi 15% artmışdır. Bükülmə tipli (bimorf) pyzeoelementlərdə,

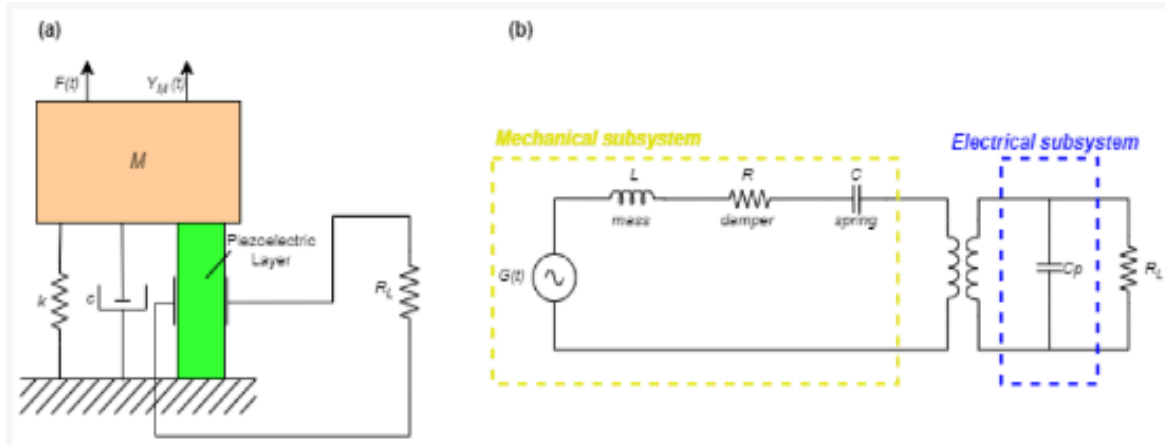
polyarizasiya istiqaməti vibrasiya zamanı deformasiya istiqamətinə perpendikulyar olduqda, 2–10 V çıxışlı mini-pyzeoelektrik generatorların yaradılmasında istifadə edilir.

Adətən, güclü pyzeoelektrik pyzegeneratorlar mexaniki enerjini (ən azı 1–2 kN təzyiq altında) dövrü yükləmə zamanı elektrik enerjisinə çevirən çevricilərdir. Bu zaman dəyişən gərginlik körpü tipli tənzimləyicilər vasitəsilə sabit gərginliyə çevrilir. Pyzeoçevrici uzun müddət ərzində, hər dövr üçün nisbətən az miqdarda elektrik enerjisi istehsal etdiyi üçün adətən enerji toplama və saxlama sistemi istifadə olunur (şəkil 4). Pyzegeneratorun çıxış gərginliyini müəyyən səviyyədə stabiləşdirmək üçün geri əlaqə sisteminə malik xüsusi kontrollerdən istifadə olunur. Kontroller həmçinin pyzegeneratorun impedansının enerji istehlakçısının çıxış impedansı ilə uyğunlaşmasını təmin edir. [5]



Şəkil 4. Qidalanma modulunun blok sxemi.

Tipik bir pyzeoelektrik elementləri üzrə yığılmış pyzegenerator, şəkil 5-də göstərilən ekvivalent elektromexanik model ilə təsvir olunur.



Şəkil 5. (a) Pyzeoelektrik generator qurğusunun elektromexaniki modeli.

(b) Bimorf pyzegeneratorun dövrə modeli.

Bu dövrə aşağıdakı elementlərdən ibarətdir:

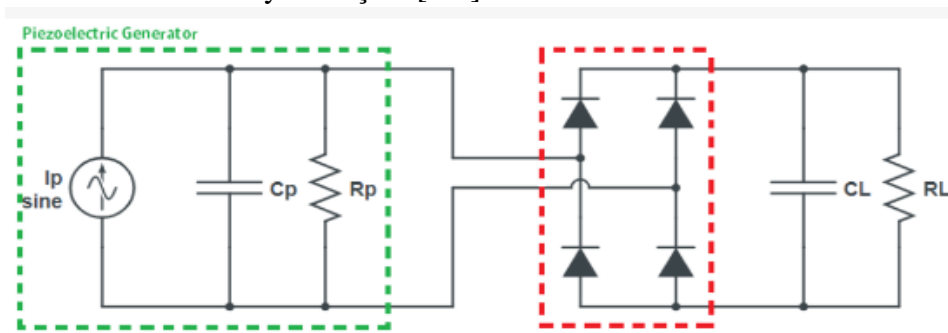
- Mənbə $G(t)$: mexaniki sahədə giriş titrəyiş intensivliyi ilə ifadə olunur;
- İnduktivlik L : mexaniki sahədə ekvivalent inersiya kütləsini göstərir;
- Rezistor R : pyzeoelektrik generatoru təşkil edən materialın titrəyişləri və digər mexaniki itkiləri ifadə edir;
- Kondensator C : mexaniki sahədə çevricinin elastik enerjisini təmsil edir;
- Kondensator C_p : pyzeoelektrik elementin iki elektrodu arasındakı elektrik tutum dəyəridir.

Elektron inteqrasiya edilmiş dövrlərdə şəkil 5-də göstərilən bu model sadələşdirilərək pyzeoelektrik elementin daxili müqaviməti R_p və tutumu C_p ilə paralel birləşdirilmiş AC cərəyan generatoru kimi göstərilir [9].

Girişdə izah edildiyi kimi, xarici mexaniki qüvvəyə məruz qalan pyzeoelektrik cihaz struktura gərginlik/deformasiya vəziyyəti gətirir, bu da bir elektrik sahəsi yaradır və birbaşa pyzeoelektrik effekt nəticəsində terminallarda yük əmələ gəlir. Bu elektrik enerjisi müsbət və

ya mənfi siqnallardan ibarət ola bilər və istifadədən əvvəl düzləndirilməlidir. Buna görə də, pyezoelektrik generatorun AC cərəyanını DC enerjiyə çevirmək üçün AC/DC çevirici interfeys dövrəsinə ehtiyac var.

Standart pyezogenerator dövrəsi — günəş radiyası, titrəyiş, istilik fərqləri və ya radio tezlik (RF) siqnalları kimi müxtəlif mühit mənbələrindən enerji toplayaraq onu istifadə oluna bilən elektrik enerjisinə çevirən sadə dizayndır. Şəkil 6-da göstərilən təkmərhələli standart pyezogenerator dövrəsi tam körpü düzləndiricidən ibarətdir. Dəyişən cərəyanın sabit cərəyanıya çevrilməsini ən sadə üsulla həyata keçirir.[6-8]



Şək. 6. Standart tam körpü düzləndirici dövrəsi.

Bu dövrədəki diod körpüsü cərəyanın pyezoelektrik təbəqədən geriye hərəkətini əngəlləyir və onu düzləşdirir. Hər bir impuls, yükün işarəsindən asılı olmayaraq, enerji toplaya bilər. Bu, əlaqəli tutumun daha sürətli yüklənməsini təmin edir. Lakin bu metodun mənfi tərəfi — impedans uyğunlaşmasının mümkün olmaması və diodun birbaşa gərginlik itkisi səbəbindən çevirmə səmərəliliyinin aşağı olmasıdır.

Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, pyezoelektrik generatorların enerji çevirmə səmərəliliyi əsasən rezonans tezliklərinin düzgün seçilməsindən və pyezoelementin material xüsusiyyətlərindən asılıdır. ANSYS analizində maksimal gərginliyin 240 V səviyyəsində müşahidə olunması enerji çıxışını artırır və avtonom sistemlər üçün daha əlverişli edir. PVDF əsaslı elastik pyezoelementlərin tətbiqi enerji çevrilməsini təxminən 15% yüksəldərək generatorun səmərəliliyini artırır. Beləliklə, optimallaşdırılmış pyezoelektrik generatorlar mikrosensorlar və ağıllı cihazlar üçün perspektivli və effektiv enerji mənbəyi kimi qiymətləndirilə bilər.

NƏTİCƏ

Tədqiqat göstərir ki, pyezoelektrik elementlər əsasında enerji yığımı gələcəyin perspektivli texnologiyalarındandır. Müasir materiallar, xüsusilə PZT və PVDF əsaslı kompozitlər, generatorların səmərəliliyini və davamlılığını artırır. Buna baxmayaraq, qurğusun toksikliyi, enerji idarəetməsi və inteqrasiya problemləri hələ də həll olunmamış qalır. SECE, SSHI və PSCE kimi yeni dövrə modelləri enerjinin daha effektiv toplanmasına imkan yaradır. Ümumilikdə, pyezoelektrik enerji yığımı sahəsi enerji səmərəliliyinin artırılması və davamlı texnologiyaların inkişafı üçün mühüm potensiala malikdir.

1. Shirvanimoghaddam, M.; Shirvanimoghaddam, K.; Abolhasani, M.M.; Farhangi, M.; Barsari, V.Z.; Liu, H.; Dohler, M.; Naebe, M. Towards a Green and Self-Powered Internet of Things Using Piezoelectric Energy Harvesting. *IEEE Access* 2019, 7, 94533–94556.
2. Won, S.S.; Seo, H.; Kawahara, M.; Glinsek, S.; Lee, J.; Kim, Y.; Jeong, C.K.; Kingon, A.I.; Kim, S.H. Flexible vibrational energy harvesting devices using strain-engineered perovskite piezoelectric thin films. *Nano Energy* 2019, 55, 182–192.

3. *James Michael Wooten, 'High-Dynamic Range Collision Detection Using Piezoelectric Polymer Films for Planar and Non-Planar Applications' 2022, 2968,101415.*
4. *Cheol Park, Zoubeida Ounaies, Kristopher E. Wise, and Joycelyn S. Harrison, 'In Situ Poling and Imidization of Amorphous Piezoelectric Polyimides. <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/in-situ-poling-and>:04.04.2022*
5. *Eitel, R.E. Octahedral tilt-suppression of ferroelectric domain wall dynamics and the associated piezoelectric activity in Pb(Zr, Ti)O₃. Режим доступа: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.75.094106>.*
6. *Shabani, E.; Abdekhodaie, S.D.M.J. Laboratory detection methods for the human coronaviruses. Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis. 2021, 40, 225–246*
7. *Rao, J.; Chen, Z.; Zhao, D.; Yin, Y.; Wang, X.; Yi, F. Recent Progress in Self-Powered Skin Sensors. Sensors 2019, 19, 2763.*
8. *Promphet, N.; Ummartyotin, S.; Ngeontae, W.; Puthongkham, P.; Rodthongkum, N. Non-invasive wearable chemical sensors in real-life applications. Anal. Chim. Acta 2021, 1179, 338643.*
9. *Kamišalić, A.; Fister, I.; Turkanović, M.; Karakatič, S. Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review. Sensors 2018, 18, 1714.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ДЖАЛИЛЛИ Н.Э., МАМЕДОВА Н.Н., ГАШИМОВ Х.Х.

Выбор современного пьезоэлектрического элемента, соответствующего проектированию пьезогенератора, а также определение его конфигурации для преобразования механической энергии (например, вибрации или давления) в электрическую энергию являются важными этапами. При проектировании учитываются прямые свойства пьезоматериала, на основе чего формируется оптимальная схема. Разработанная схема обеспечивает эффективный сбор полученной нагрузки и преобразование ее в полезное напряжение. В результате полученная энергия используется для обеспечения энергией автономных систем, сенсоров или для сбора энергии из окружающей среды в различных приложениях.

Ключевые слова: пьезоэлектрический эффект, пьезогенератор, сбор энергии, резонансная частота, микрогенератор, сейсмическая масса, пьезоэлектрические материалы.

DESIGN OF PIEZOGENERATOR BASED ON MODERN PIEZOELECTRIC ELEMENTS

CALILLI N.E., MAMAEDOVA N.N., HASHIMOV X.X.

Selecting a modern piezoelectric element suitable for piezogenerator design and determining its configuration to convert mechanical energy (e.g., vibration or pressure) into electrical energy are crucial steps. During the design process, the direct properties of the piezoelectric material are considered to form an optimal circuit. The developed circuit ensures efficient collection of the generated charges and their conversion into useful voltage. As a result, the harvested energy is used to power autonomous systems, sensors, or for energy harvesting from the environment in various applications.

Keywords: piezoelectric effect, piezogenerator, energy harvesting, resonant frequency, microgenerator, seismic mass, piezoelectric materials.

DOI:10.70784/azip.5.2025446

MODELING OF LIGHTNING OVERVOLTAGES IN OVERHEAD POWER LINES**GUSEYNOVA I.A.***Azerbaijan State Oil and Industry University*
huseynova.ilduze@asoiu.edu.az

Lightning overvoltages represent a serious threat to the reliability of overhead power lines, particularly in medium-voltage distribution networks. Due to their exposed configuration, overhead lines are highly susceptible to electromagnetic coupling from nearby lightning discharges, which often leads to insulation stress, flashovers, and power supply interruptions. This paper investigates lightning overvoltages in overhead power lines using analytical modeling and numerical simulation supported by experimental data. The Extended Rusck Model is applied to account for realistic line geometry, lossy soil conditions, nearby tall structures, and grounding arrangements. Time-domain simulations are carried out in the LIOV-EMTP environment using the Agrawal field-to-line coupling approach. Analytical estimates indicate that nearby lightning strokes with peak currents of approximately 30 kA can induce overvoltages in the range of 120–180 kV on typical 10–20 kV overhead lines, which may exceed their insulation withstand capability. The obtained modeling results are in good agreement with reported full-scale and laboratory experimental data. The findings support the development of effective lightning protection measures and contribute to improving the reliability of overhead power systems.

Keywords: lightning overvoltages; overhead power lines; Extended Rusck Model; electromagnetic coupling; surge protection.

Introduction

Overhead power lines (OHLs) constitute a fundamental component of electric power transmission and distribution systems, enabling the reliable delivery of electrical energy over extensive geographical areas. Owing to their exposed configuration, however, OHLs are inherently susceptible to atmospheric phenomena, among which lightning activity represents one of the most severe natural threats to system reliability and operational performance. In regions characterized by moderate to high lightning density, such as Poland and other parts of Central Europe, lightning-related disturbances play a critical role in system stability, fault resilience, and the continuity of power supply.

Both direct and indirect lightning discharges pose significant risks to overhead lines, with the severity of their impact determined by the characteristics of the lightning event, line configuration, and the effectiveness of protective measures. A direct lightning strike to a phase conductor can inject currents on the order of tens of kiloamperes into the network, generating overvoltage surges that may reach several megavolts, depending on the line's characteristic impedance. These surges frequently exceed the basic insulation level (BIL) of power equipment, resulting in phase-to-phase or phase-to-ground flashovers, permanent insulation damage, and the operation of protective relays. Such effects are particularly critical in medium-voltage (MV) distribution systems, where insulation margins are limited and even a single lightning event can lead to extensive customer outages and significant economic losses.

In practice, overhead lines are even more frequently affected by lightning-induced overvoltages caused by nearby discharges. These overvoltages arise from the electromagnetic coupling between lightning-generated fields and the line conductors and supporting structures. Although their peak amplitudes are generally lower than those associated with direct strikes, their high frequency of occurrence results in a considerable cumulative impact on network performance. Distribution networks operating at voltage levels of 10–20 kV are especially vulnerable to such disturbances, which may lead to progressive insulation degradation, recurrent operation of surge arresters, and failures of covered or insulated conductors.

The accurate assessment of lightning-induced overvoltages requires a detailed understanding of electromagnetic field propagation, conductor response, and the influence of grounding systems, shielding arrangements, and protective devices. Classical analytical approaches, such as the original Rusck model developed in the mid-20th century, provided a valuable foundation for early studies; however, these methods are increasingly inadequate for modern power networks. Contemporary line configurations often involve complex geometries, variable conductor heights, non-uniform soil resistivity, and the presence of nearby metallic structures and urban infrastructure, all of which significantly affect lightning–line interaction.

To address these limitations, recent research has focused on the development of advanced modeling techniques capable of capturing the complex behavior of lightning-induced phenomena under realistic conditions. The Extended Rusck Model (ERM), for example, extends the classical formulation by incorporating lossy ground effects, partial shielding, nearby conductive objects, and non-uniform conductor elevations. In parallel, time-domain simulation environments such as LIOV-EMTP enable detailed numerical analysis and facilitate model validation through comparisons with full-scale field measurements and controlled laboratory experiments. These tools allow for a more accurate prediction of transient overvoltages arising from both direct and indirect lightning events.

In this paper, a comprehensive investigation of lightning-induced disturbances in overhead power lines is presented, combining analytical modeling, numerical simulation, and experimental validation. Particular emphasis is placed on the influence of key parameters—including lightning current waveform characteristics, soil conductivity, grounding configurations, and the presence of nearby structures—on the magnitude and temporal behavior of induced overvoltages. The results contribute to the development of more effective lightning protection strategies and offer practical recommendations for engineers involved in the design, operation, and modernization of high-voltage and medium-voltage overhead networks.

By integrating analytical rigor with practical engineering considerations, this study aims to enhance the resilience and operational safety of power systems. This objective is of increasing importance in the context of climate-related changes in lightning activity and the growing complexity of modern electrical infrastructure.

Formulation of the Problem.

Lightning activity represents one of the major natural threats to the reliability of overhead power lines. Both direct and indirect lightning strokes can generate significant overvoltages that exceed the insulation levels of power system equipment, leading to phase-to-phase and phase-to-ground flashovers, insulation breakdowns, customer outages, and overall disturbances in the power supply system.

When a direct lightning strike hits an overhead line (OHL), the lightning current is divided at the point of impact into two traveling waves propagating in opposite directions along the line. The resulting overvoltage amplitude can be estimated as one half of the stroke current multiplied by the characteristic impedance of the line, which typically ranges from 400 to 500 Ω . For instance, a lightning current of 10 kA acting on a line with a characteristic impedance of 400 Ω produces an overvoltage of approximately 2000 kV, which far exceeds the insulation strength of medium-voltage (MV) distribution lines.

Such extreme overvoltages often result in multiple flashovers, both between phases and from phase to ground. In the affected section of the network, these phenomena lead to voltage sags and temporary power interruptions as protective devices operate to isolate the faulted line segment.

Figure 1 illustrates a typical overvoltage waveform caused by a direct lightning strike to an MV overhead line. According to the results reported by Mirra *et al.* [1], the waveform is characterized by short-duration, high-frequency spikes associated with repeated insulation breakdowns, followed by a slower-rising voltage component with an amplitude close to the insulation withstand level.

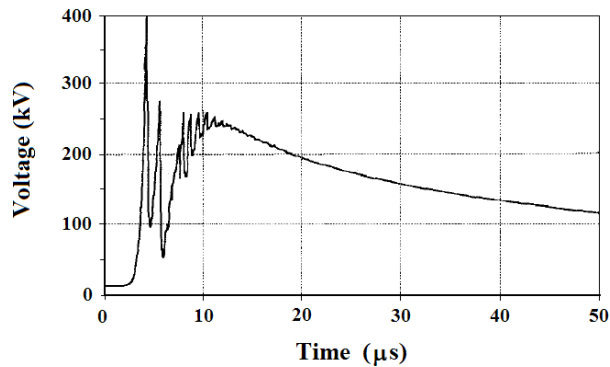


Fig.1. Example of a typical overvoltage due to a direct strike to an MV line.

In the case of bare conductors, direct lightning strikes usually lead to temporary short-circuit flashovers that are rapidly cleared by protective relays, thereby preventing long-term damage. However, for covered conductors, the presence of insulation restricts the flow of power-frequency arc currents. As a result, phase-to-phase flashovers may cause severe thermal and mechanical stress, potentially leading to insulation rupture and permanent conductor damage, as discussed in [2].

Although overvoltages resulting from direct strikes are more severe in terms of peak magnitude, indirect (induced) lightning events occur much more frequently, particularly in distribution networks rated at 15 kV and below. These events are caused by electromagnetic coupling between nearby lightning discharges and overhead lines and, despite their lower amplitude, cumulatively account for a large number of insulation failures and service interruptions.

The magnitude and waveform of lightning-induced overvoltages depend on several interrelated parameters, including the lightning current waveform, distance between the strike point and the line, ground conductivity, conductor configuration, and the presence of shielding or surge protection devices. In practical conditions, lightning often strikes elevated objects such as towers, masts, or nearby buildings rather than the line itself. In such cases, the induced voltage on the overhead line is formed by the combined electrostatic and electromagnetic influence of the lightning channel and the current flowing through the struck structure, which significantly complicates the prediction of overvoltage levels.

Therefore, the problem of lightning protection for overhead power lines involves a wide range of physical phenomena and requires both analytical modeling and experimental validation. Simplified or classical approaches, such as the original Rusck model [3], exhibit limited accuracy when applied to complex scenarios involving tall strike objects, non-uniform soil resistivity, or multi-segmented line geometries. This limitation underlines the necessity for enhanced modeling techniques and numerical methods capable of reliably predicting lightning-induced overvoltages and supporting the design of effective lightning protection strategies.

Solution to the Problem

To reduce the adverse effects of lightning-induced overvoltages and to improve the protection of overhead power lines, advanced analytical models supported by experimental validation are required. Among these, the Extended Rusck Model (ERM) represents a significant improvement over the classical Rusck formulation, as it accounts for realistic line geometries, lossy soil conditions, nearby tall objects, and the influence of grounding systems and surge protection devices [4–7].

Within the ERM framework, the voltage induced on an overhead line is determined by the combined action of the scalar electric potential associated with charges in the lightning channel and the magnetic vector potential generated by currents flowing in both the lightning channel and the struck object. This approach enables the evaluation of the spatial and temporal evolution of induced voltages along the line, including cases where lightning strikes elevated structures located in the vicinity of the line.

The reliability of the ERM has been confirmed by full-scale field experiments, most notably those reported by Yokoyama *et al.* [8–10], where simultaneous measurements of lightning stroke currents and induced voltages were performed. Comparisons between measured and calculated waveforms demonstrate that the ERM accurately reproduces the voltage front and peak values, while minor discrepancies in the waveform tails can be attributed to simplified lightning current representations, transmission-line modeling assumptions, and measurement system limitations. Additional validation has been obtained from reduced-scale laboratory experiments using a 1:50 overhead line model with appropriate voltage and time scaling factors [16], which further confirmed the capability of the ERM to predict both the amplitude and shape of induced overvoltages.

In parallel, the field-to-line coupling model proposed by Agrawal *et al.* has been implemented within the LIOV-EMTP simulation environment [13–15]. This tool allows detailed time-domain analysis of lightning interactions with complex, multi-conductor overhead systems, taking into account lossy ground effects, non-uniform grounding conditions, corona phenomena, and realistic network terminations. Numerical results obtained using LIOV-EMTP show strong agreement with both ERM predictions and experimental observations.

In analytical form, the lightning-induced voltage along the line can be expressed as an integral of the longitudinal component of the external electric field:

$$v_{\text{ind}}(x, t) = - \int_0^x E_z^{\text{ext}}(s, t) ds$$

For practical engineering estimation of the peak induced voltage, a simplified coupling relationship is often employed:

$$V_{\text{ind}}(t) \approx M(r) \frac{di(t)}{dt}$$

where $M(r)$ is the mutual coupling coefficient between the lightning channel and the overhead line, which depends on the distance r , conductor height, line geometry, and ground parameters.

Assuming an exponential approximation of the lightning current front,

$$i(t) = I_{\text{max}}(1 - e^{-t/T_f}),$$

the maximum rate of rise of the current is given by

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{max}} = \frac{I_{\text{max}}}{T_f}.$$

Consider a nearby lightning stroke with a peak current

$$I_{\text{max}} = 30 \text{ kA},$$

and a front time

$$T_f = 2 \mu\text{s}.$$

The maximum current derivative is therefore

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{max}} = \frac{30 \times 10^3}{2 \times 10^{-6}} = 1.5 \times 10^{10} \text{ A/s}.$$

For a typical overhead distribution line located at a distance of approximately $r = 100$ m from the lightning channel, the mutual coupling coefficient may be taken as

$$M(r) \approx (8\text{--}12) \mu\text{H}.$$

Hence, the peak induced voltage is estimated as

$$V_{\text{ind,pk}} \approx (8\text{--}12) \times 10^{-6} \times 1.5 \times 10^{10} = (1.2\text{--}1.8) \times 10^5 \text{ V},$$

$$V_{\text{ind,pk}} \approx 120\text{--}180 \text{ kV}.$$

Such voltage levels are comparable to, or may exceed, the insulation withstand capability of typical 10–20 kV distribution lines, indicating a high probability of insulation stress, flashover, or surge arrester operation.

Discussion

Analytical calculations and experimental observations consistently show that lightning-induced overvoltages generally exhibit shorter front times and narrower pulse widths than overvoltages caused by direct strikes. Nevertheless, due to their high frequency of occurrence, induced events represent a dominant factor in insulation aging, repeated protective device operation, and long-term reliability degradation of overhead distribution systems.

In conclusion, the Extended Rusck Model, supported by experimental investigations and numerical simulations using tools such as LIOV-EMTP, provides a robust and physically consistent framework for predicting lightning-induced transients. The application of these methods enables the design of more resilient overhead lines, optimized surge protection schemes, and improved power system reliability under lightning exposure.

Conclusions

This study has addressed the problem of lightning-induced overvoltages in overhead power lines by combining advanced analytical modeling, numerical simulation, and experimental validation. Both direct and indirect lightning effects were considered, with particular emphasis on induced overvoltages, which occur more frequently and represent a major source of insulation stress and service interruptions in medium-voltage distribution networks.

The Extended Rusck Model was employed to account for realistic line geometries, lossy soil conditions, nearby tall structures, and grounding and protection arrangements. Comparisons with full-scale field measurements and reduced-scale laboratory experiments demonstrated that the model accurately reproduces the front and peak values of induced voltage waveforms, confirming its applicability under practical operating conditions. Minor discrepancies observed in the waveform tails were attributed to simplified current representations and modeling assumptions rather than fundamental limitations of the approach.

Analytical estimation based on field-to-line coupling relationships showed that nearby lightning strokes with typical current parameters can induce peak voltages on the order of 120–180 kV on overhead distribution lines. These values are comparable to, or exceed, the insulation withstand levels of 10–20 kV systems, highlighting the necessity of effective surge protection and optimized grounding configurations.

The results also indicate that lightning-induced overvoltages are characterized by fast rise times and relatively short durations. Despite their lower peak magnitudes compared to direct-strike overvoltages, their high frequency of occurrence makes them a dominant factor in insulation aging, repeated surge arrester operation, and long-term reliability degradation of overhead lines.

Overall, the combined use of the Extended Rusck Model, time-domain simulation tools such as LIOV-EMTP, and experimental validation provides a reliable and physically consistent framework for assessing lightning-induced transients. The proposed approach supports the development of improved lightning protection strategies and contributes to enhancing the resilience and operational reliability of overhead power systems exposed to lightning activity.

-
1. *Mirra C., Porrino A., Ardito A. and Nucci C.A.*, “Lightning overvoltages in low-voltage networks”, Proceedings of the International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Birmingham, Conference Publication no. 438, pp. 2.19.1-2.19.6, June 1997.
 2. CIGRE-CIRED JWG C4.4.02, “Protection of MV and LV Networks against Lightning. Part I, Common Topics”, CIGRE Technical Brochure no. 287, 2005.

3. Rusck S., "Induced lightning over-voltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks", *Transactions of the Royal Institute of Technology*, no. 120, 1958.
4. Piantini A. and Janiszewski J.M., "Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 2799-2802, 1998.
5. Piantini A. and Janiszewski J.M., "The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines", *Proceedings of the 7th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Curitiba, pp. 151-155, Nov. 2003.
6. Piantini A. and Janiszewski J.M., "An improved model for lightning induced voltages calculations", *Proceedings of the IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, São Paulo*, pp. 554-559, Nov. 2004.
7. Yokoyama S., Miyake K., Mitani H. and Takanishi A., "Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 8, pp. 2420-2427, 1983.
8. Yokoyama S., Miyake K., Mitani H. and Yamazaki N., "Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 2, pp. 129-139, 1986.
10. Yokoyama S., Miyake K. and Fukui S., "Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines (II)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 4, pp. 2196-2203, 1989.
11. Uman M.A. and McLain D.K., "Magnetic field of the lightning return stroke", *Journal of Geophysical Research*, vol. 74, pp. 6899-6910, 1969.
12. Piantini A., de Carvalho T.O., Silva Neto A., Janiszewski J.M., R.A.C. Altafim and A.L.T. Nogueira, "A System for simultaneous measurements of lightning induced voltages on lines with and without arresters", *Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon*, vol. 1, pp. 297-302, Sep. 2004.
13. Rzyayeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A. Analysis of reliability of typical power supply circuits. *Reliability: Theory and Applications*, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024.
14. Rzyayeva S.V., Ganiyeva N.A., Piriyeva N.M. Modern approaches to electrical equipment diagnostics. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)-Issue58, Volume16, Number1, March 2024 (Serial No:0058-1601-0324)*, pp.82-189.
15. Rzyayeva, S.V., Piriyeva, N.M., Ismayilova, S.I. High and low voltage coordination in electrical power systems. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2025, 17(1), pp 19–31, 250102.
16. Piriyeva, N.M., Mammadov, N.S., Rzyayeva, S.V. Development of new methods for protecting substation and overhead lines from overvoltages. *Reliability Theory and Applications*, 2025, 20(1), pp 683–689.

HAVA ELEKTRİK XƏTLƏRİNDƏ İLDIRIMDAN YARANAN İFRAT GƏRGİNLİKLƏRİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

HÜSEYNOVA İ.Ə.

İldırımın yaranan ifrat gərginliklər, xüsusilə orta gərginlikli paylayıcı şəbəkələrdə hava elektrik xətlərinin etibarlılığı üçün ciddi təhlükə mənbəyidir. Açıq konstruksiyaya malik olduqlarına görə hava xətləri yaxın məsafədə baş verən ildırım boşalmalarının elektromaqnit təsirinə yüksək dərəcədə məruz qalır ki, bu da izolyasiyanın gərginləşməsinə, elektrik enerjisi təchizatında fasilələrə səbəb olur. Məqalədə hava elektrik xətlərində ildırımın yaranan ifrat gərginliklər analitik modelləşdirmə və ədədi hesablama əsasında, eksperimental məlumatların

cəlb edilməsi ilə tədqiq edilmişdir. Xəttin real həndəsəsini, torpağın itkilərini, yaxınlıqda yerləşən hündür obyektləri və torpaqlama sxemlərini nəzərə almaq üçün genişləndirilmiş Rusck modeli tətbiq olunmuşdur. Zaman oblastında ədədi modelləşdirmə Agrawal sahə-xətt əlaqə modeli əsasında LIOV-EMTP mühitində aparılmışdır. Analitik qiymətləndirmələr göstərir ki, pik cərəyanı təxminən 30 kA olan yaxın ildırım zərbələri 10–20 kV-luq tipik hava elektrik xətlərində 120–180 kV səviyyəsində ifrat gərginliklər yarada bilər ki, bu da izolyasiyanın dözümlülük səviyyəsini aşağı bilər. Alınan nəticələr ədəbiyyatda təqdim olunan tammiqyaslı və laboratoriya eksperimentlərinin nəticələri ilə yaxşı uyğunluq göstərir və hava elektrik şəbəkələrinin etibarlılığının artırılması üçün effektiv ildırımdan mühafizə tədbirlərinin işlənilməsinə imkan yaradır.

Açar sözlər: ildırımdan yaranan ifrat gərginliklər; hava elektrik xətləri; genişləndirilmiş Rusck modeli; elektromaqnit əlaqə; ildırımdan mühafizə.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ МОЛНИИ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ГУСЕЙНОВА И.А.

Перенапряжения от молнии представляют серьезную угрозу надёжности воздушных линий электропередачи, особенно в распределительных сетях среднего напряжения. Вследствие открытой конструкции воздушные линии в значительной степени подвержены электромагнитному воздействию близких грозовых разрядов, что часто приводит к перенапряжению изоляции, перекрытиям и нарушениям электроснабжения. В работе выполнено исследование перенапряжений от молнии в воздушных линиях электропередачи на основе аналитического моделирования и численного расчёта с привлечением экспериментальных данных. Для учёта реальной геометрии линии, потерь в грунте, наличия близко расположенных высоких объектов и схем заземления применена расширенная модель Руська. Численное моделирование во временной области выполнено в среде LIOV-EMTP с использованием модели электромагнитной связи Агравала. Аналитические оценки показывают, что близкие удары молнии с пиковыми токами порядка 30 кА могут вызывать перенапряжения величиной 120–180 кВ на типичных воздушных линиях напряжением 10–20 кВ, что может превышать допустимые уровни электрической прочности их изоляции. Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными данными натурных и лабораторных экспериментов и могут быть использованы при разработке эффективных мер молниезащиты и повышении надёжности воздушных электроэнергетических систем.

Ключевые слова: перенапряжения от молнии; воздушные линии электропередачи; расширенная модель Руська; электромагнитная связь; молниезащита.

DOI:10.70784/azip.5.2025453

RECENT TRENDS IN THERMAL ENERGY STORAGE OF CONCENTRATED SOLAR POWER SYSTEMS

KALBALIYEV F.R.

*Azerbaijan National Aerospace Agency, AZ 1115, Baku, Azerbaijan
faig.kalbaliyev@gmail.com*

This paper examines recent advancements in Thermal Energy Storage (TES) technologies for Concentrated Solar Power (CSP) systems, focusing on their underlying principles, current developments, and future prospects. It provides an overview of the major TES configurations, including Sensible Heat Storage (SHS), Latent Heat Storage (LHS), and Thermochemical Heat Storage (THS), analyzing their operational principles, material properties, and integration with CSP. The study also discusses the key challenges and limitations of each TES approach and identifies the technological improvements needed to enhance efficiency, scalability, and cost-effectiveness. Overall, the findings indicate that while SHS configurations, such as molten salts, dominate in CSP applications, further research and innovation in all TES configurations are essential to unlocking the full potential of CSP with TES, contributing to the global transition toward sustainable, renewable energy systems.

Keywords: concentrated solar power, thermal energy storage, solar energy, molten salt

INTRODUCTION

The global demand for energy and reliance on fossil fuels have significantly increased due to population growth and industrialization [1]. However, the continued reliance on conventional energy sources contributes to climate change and environmental degradation [2]. Consequently, researchers are increasingly focused on developing and optimizing renewable energy technologies due to their sustainability and minimal environmental impact.

Among renewable energy technologies, Concentrated Solar Power (CSP) has gained considerable attention for its potential to provide large-scale, dispatchable energy [3]. This is particularly achievable through its integration with Thermal Energy Storage (TES) systems, which enable CSP to overcome the intermittency challenges associated with solar energy. CSP systems employ different configurations, including Parabolic Trough Collectors (PTC) and Solar Power Towers (SPT), which focus solar rays to generate heat energy [4]. The captured heat may subsequently be stored and transformed into electricity, providing continuous power even during non-sunny periods [4].

CSP plants generate thermal energy by employing optical systems, such as mirrors and lenses, to concentrate sunlight onto a receiver [3]. The captured heat can then be converted into electrical energy via heat engines (commonly steam turbines) or chemical processes [5]. The selection of an appropriate TES system for CSP applications depends on multiple factors, including storage duration, capital and operational costs, required temperature ranges, and overall storage capacity [6].

The integration of TES in CSP plants (as shown in Figure 1) significantly enhances their reliability by mitigating the fluctuations inherent in solar and other renewable energy sources. Unlike wind and solar photovoltaic (PV) technologies, which are dependent on real-time weather conditions, CSP plants with TES can provide continuous electricity generation by storing excess thermal energy for later use [7].

Over the past few decades, extensive research and technological advancements have led to the development and commercialization of CSP-TES solutions. Most of CSP technologies utilize molten nitrate salts as both the heat transfer fluid (HTF) and TES medium. This technology is implemented in a two-tank storage configuration coupled with a steam turbine, which is currently considered the state-of-the-art approach [8].

TES systems in CSP applications are categorized into three main types: (1) Sensible Heat Storage (SHS), which stores thermal energy by increasing the temperature of a storage medium, such as molten salts or thermal oil; (2) Latent Heat Storage (LHS), which uses phase change materials (PCMs) to store and discharge heat while maintaining nearly constant temperature conditions; and (3) Thermochemical

Heat Storage (THS), which relies on reversible chemical reactions to achieve high energy density and long-term storage stability [9].

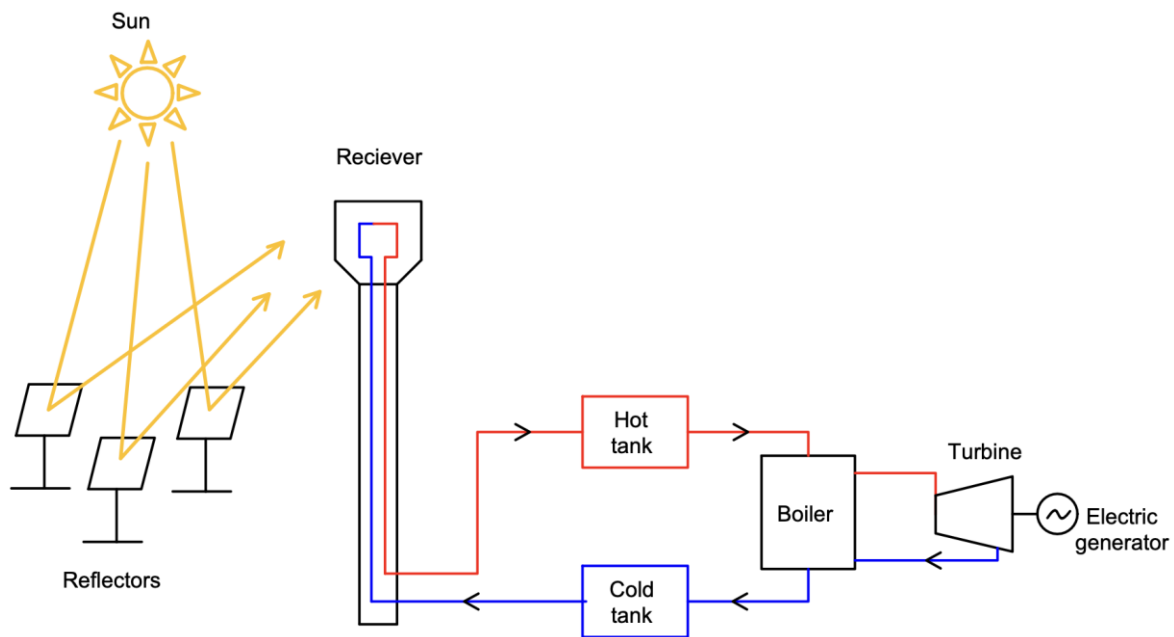


Fig.1. TES Integration in CSP plant.

Each TES technology has distinct advantages and limitations. SHS remains the most widely adopted method in commercial CSP plants due to its well-established efficiency-cost balance. While SHS systems typically operate with storage efficiencies between 50% and 90%, LHS systems can reach up to 100%, whereas THS systems generally fall within a similar range [10]. However, LHS and THS systems are generally more expensive than SHS due to their higher heat and mass transfer requirements for efficient charging and discharging cycles [11]. Despite significant advancements in TES research, further innovations are necessary to develop storage technologies that are environmentally sustainable, technically viable, and economically feasible for widespread CSP deployment.

CONCENTRATED SOLAR POWER TECHNOLOGIES

Concentrated Solar Power (CSP) plants are categorized into four primary technology types: Parabolic Trough Collectors (PTC), Solar Power Towers (SPT), Linear Fresnel Reflectors (LFR), and Parabolic Dish Collectors (PDC). Figure 2 gives a visual representation of the working principles of different CSP technologies, illustrating the process of concentrating solar radiation to heat a working fluid, which is subsequently used to generate electricity via direct steam generation or heat exchangers utilizing molten salts or thermal oils as HTF.

PTC utilizes parabolic mirrors to concentrate sunlight onto a receiver tube containing heat transfer fluid (HTF), typically synthetic oil or molten salt, with operational temperatures below 500°C [12]. SPT, on the other hand, employs an array of heliostats to direct sunlight onto a central receiver, achieving temperatures exceeding 1,000°C [13]. This higher temperature capability enhances energy conversion efficiency and facilitates the integration of thermal energy storage (TES), enabling dispatchable power generation even in the absence of direct sunlight. LFR uses flat, cost-effective mirrors to focus solar radiation onto a linear receiver. While LFR systems offer lower production costs, their efficiency is generally lower compared to PTC and SPT [14]. PDC, although capable of achieving high operational efficiencies due to their ability to reach elevated temperatures, are typically constrained to small-scale applications due to their complex design and maintenance requirements. Among these technologies, PTC and SPT dominate the global CSP market, accounting for the majority of installed capacity. PTC remains the most widely implemented CSP technology due to its commercial maturity and extensive deployment. However, SPT is increasingly considered the preferred CSP solution for future energy systems, as it operates at higher temperatures, resulting in greater thermal efficiency and improved integration with TES systems [14].

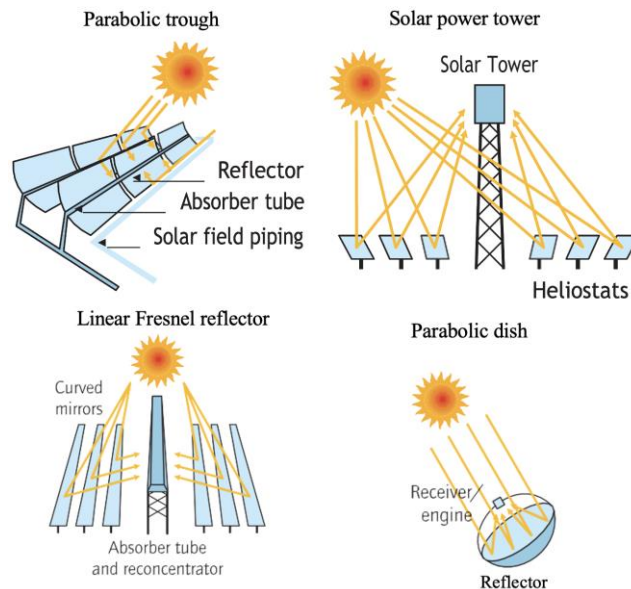


Fig.2. Different CSP Technologies [15].

A significant advantage of CSP plants lies in their capability to integrate TES systems that store excess thermal energy for subsequent use, thereby maintaining electricity generation even under reduced solar input, such as during overcast conditions or at night. By decoupling energy collection from power generation, TES units improve the operational flexibility and overall reliability of CSP facilities, enabling electricity production to align more closely with demand fluctuations.

METHODS

This study employs a methodological approach based on literature review, comparative analysis, and qualitative evaluation. First, an extensive review of academic papers, industry reports, and technical articles from 2010 to 2024 was conducted to understand the principles of Concentrated Solar Power (CSP) systems and their integration with Thermal Energy Storage (TES) technologies. The review focused on different TES systems, including Sensible Heat Storage (SHS), Latent Heat Storage (LHS), and Thermochemical Heat Storage (THS), analyzing their performance, advantages, challenges, and technological advancements.

A comparative analysis was conducted to evaluate various TES technologies based on their energy storage capacity, operational performance, and compatibility with CSP systems. The evaluation considered parameters such as material properties, energy densities, system integration complexities, and cost-effectiveness.

Additionally, a qualitative assessment was conducted to identify emerging trends in TES technologies, technological gaps, and areas where further research is needed. Finally, the commercial feasibility of TES technologies was evaluated by reviewing case studies of existing CSP plants and analyzing scalability, cost reduction potential, and market adoption.

ADVANCEMENTS AND FUTURE PERSPECTIVES OF THERMAL ENERGY STORAGE

Thermal energy can be stored in three fundamental forms: sensible heat storage (SHS), latent heat storage (LHS), and thermochemical heat storage (THS) [16]. SHS systems, the simplest and most commercially mature TES technology, store energy by increasing the temperature of a storage material such as molten salts or thermal oils [17]. The storage capacity in SHS systems depends on the specific heat capacity, density, and operating temperature range of the material. Despite being cost-effective and technically straightforward, SHS exhibits lower energy storage densities compared to LHS and THS.

Latent Heat Storage (LHS) systems employ phase change materials (PCMs) that absorb and discharge heat throughout phase transition processes (e.g., solid–liquid or liquid–gas) [18]. LHS offers significantly higher energy density, with storage capacities up to eight times greater than SHS systems [19]. However, practical challenges related to material stability, thermal conductivity, and system integration hinder its large-scale commercialization.

Thermochemical heat storage (THS) systems store energy through reversible endothermic and exothermic chemical reactions, enabling exceptionally high energy storage densities and long-duration storage [20]. THS represents the most technically advanced and efficient TES method, but its

complexity and high costs have prevented widespread deployment in commercial CSP plants [21]. According to Achkari et al., while LHS and THS technologies exhibit superior thermophysical properties, their application remains largely confined to laboratory research and pilot-scale demonstrations [22].

Given the cost-effectiveness and simplicity of SHS, it continues to dominate commercial CSP plants. However, further advancements in LHS and THS are required to overcome technical and economic challenges, enabling broader adoption in large-scale CSP applications. The subsequent sections provide a detailed analysis of each TES technology, examining its operational principles, material properties, efficiency, and commercial feasibility for concentrated solar power systems.

- **SENSIBLE HEAT STORAGE**

Sensible heat storage (SHS) systems can be classified based on the type of storage medium utilized, which includes liquid-based systems (e.g., molten salts, nanofluids), solid-based systems (e.g., concrete and rocks), and gas-based systems (e.g., steam).

- **LIQUID-BASED SYSTEMS**

Among various SHS media, molten salts are the most widely implemented in CSP applications due to their advantageous thermophysical properties [10]. Common eutectic mixtures used for TES in CSP include HITEC ternary salt (53% KNO_3 , 7% NaNO_3 , and 40% NaNO_2), HITEC XL® (48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 7% NaNO_3 , and 45% KNO_3), and the commercially known binary mixture “Solar Salt” (60% NaNO_3 and 40% KNO_3) [23]. The predominant storage configuration for molten salts is the two-tank system, where one tank stores the hot molten salt while the other maintains the cold storage. Heat is transferred between these tanks for charging and discharging operations [24]. In indirect storage configurations, a heat exchanger is used with thermal oil as the heat transfer fluid (HTF), whereas in direct systems, molten salt itself serves as both the HTF and the storage medium. Molten salts offer several advantages, including high energy density (ranging from 75 kWh/m^3 to 200 kWh/m^3), operational temperatures up to 565°C, long-term durability exceeding 10,000 thermal cycles, and an estimated lifespan of over 20 years [25].

Despite their widespread application, existing molten salts face thermal stability challenges, particularly at temperatures exceeding 560°C, leading to decomposition and corrosion issues in CSP components [26]. The adoption of high-temperature-resistant alloys can mitigate these issues. Further advancements in molten salt technology are essential to enhance their thermal stability, reduce corrosion, and enable operational temperatures of 600–650°C, facilitating integration with next-generation supercritical CO_2 Brayton cycles.

Nanofluids represent another innovative approach in TES, offering superior thermophysical properties, including higher specific heat capacity and enhanced thermal conductivity compared to conventional molten salts [27]. However, their application is constrained by the operational temperature limit of the base fluid as molten salt (approximately 565°C). While the addition of nanoparticles improves heat transfer properties, it also introduces challenges such as increased viscosity, higher pumping costs, stability concerns related to nanoparticle agglomeration, and potential corrosion effects [28]. Additionally, the increased cost of nanofluid-based storage media must be offset by corresponding improvements in thermal performance to ensure economic viability. Currently, nanofluids are still in the research stage, with significant challenges remaining, including understanding nanoparticle interactions, addressing stability issues, and optimizing their economic feasibility. Further experimental studies are necessary to assess the long-term behavior of nanofluids and determine their suitability for CSP applications.

- **SOLID-BASED SYSTEMS**

Packed-bed thermal energy storage systems employ a matrix of densely packed solid particles, which accumulate thermal energy conveyed by a heat transfer fluid (HTF) throughout the charging phase. During charging, the HTF, heated by the solar field, enters from the top of the packed bed and transfers its thermal energy to the solid particles [29]. Conversely, during the discharging phase, the HTF flows in the opposite direction, entering from the bottom and being reheated by the energy previously stored in the solid medium. Commonly used storage materials in packed-bed systems include locally available rocks and sand, such as quartzite rock and silica sand [30]. Additionally, certain commercial packed-bed TES systems are engineered to withstand operating temperatures reaching around 1600 °C, employing cost-effective ceramic particles with high thermal stability [31].

This TES technology offers several advantages, such as the widespread availability and cost-effectiveness of storage materials, making it a practical solution for energy storage applications. Additionally, it can operate across a broad temperature range and enables direct heat transfer between the working fluid and the storage medium. Its chemical stability and resistance to degradation further enhance its reliability [32]. Moreover, the system does not involve hazardous substances or corrosive chemicals, ensuring safer and more sustainable operation [30]. However, most research on packed-bed TES has been conducted at the laboratory or prototype scale.

Concrete-based TES presents another viable alternative to molten salt storage, offering cost-effectiveness and the availability of raw materials. Concrete consists of cement, coarse and fine aggregates, water, and potentially other additives. In concrete-based thermal energy storage (TES) systems, the material undergoes a series of thermochemical transformations when exposed to elevated temperatures. At lower temperatures, dehydration occurs as physically and chemically bound water is released [33]. As the temperature increases to intermediate levels, dihydroxylation takes place, particularly affecting phases such as Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [33]. At higher temperatures, decarbonation processes dominate, involving the decomposition of calcium carbonate (CaCO_3) [33]. These transformations, along with possible phase changes in the mineral structure, can significantly influence the thermal stability and mechanical integrity of the concrete.

These chemical interactions can impair the durability and structural soundness of the concrete, leading to spalling, a form of material degradation that markedly limits system longevity. Strategies such as incorporating polypropylene fibers (PPF) have been explored to mitigate spalling risks [34]. Rahjoo et al. [35] conducted controlled laboratory experiments demonstrating that geopolymers-based concrete (GEO) can endure operating temperatures up to approximately 650 °C, surpassing typical OPC-based counterparts, which degrade above 500 °C. It should be noted that these elevated temperature tests were conducted under laboratory conditions only, and further validation would be required to confirm performance under real-world TES operational settings. Despite advantages such as ease of construction, non-toxicity, and non-flammability, challenges related to material degradation due to thermal expansion, contraction, and cracking remain critical concerns. Long-term demonstration projects are necessary to validate the feasibility of higher operating temperatures and assess the reliability and durability of concrete TES modules [36].

- **GAS-BASED SYSTEMS**

Gas-based TES primarily employs steam accumulators, which utilize pressurized saturated water as the storage medium. These systems operate by storing sensible heat in the form of pressurized liquid water, which absorbs excess steam from the cycle during the charging process [37]. The steam condenses within a pressurized storage vessel, increasing both the temperature and pressure of the stored liquid. The system reaches full charge when approximately 90% of the storage volume is occupied by the saturated liquid. Steam accumulators can operate at temperatures up to approximately 330°C, depending on their design pressure [38]. However, the technology also presents several limitations, including restricted storage capacity due to the high-pressure requirements, low operational temperatures, and limited scalability [39]. These constraints render steam accumulators inefficient and economically unviable for large-scale applications.

- **LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS**

Latent heat storage (LHS) systems utilize phase change processes, typically involving solid-liquid transitions, to store thermal energy at a nearly constant temperature [40]. For effective implementation, the phase transition temperature of the storage medium must align with the operational temperature range of the system. Phase change materials (PCMs) used in LHS are classified into organic compounds, inorganic compounds, and their eutectic mixtures [41]. While organic PCMs are generally suited for low-temperature thermal energy storage, inorganic PCMs, such as carbonates, fluorides, and chlorides, are more appropriate for high-temperature applications, making them suitable for use in concentrated solar power (CSP) plants. However, these materials often exhibit undesirable corrosion behavior when exposed to metals over multiple thermal cycles [42].

Copper (Cu) is widely recognized as a highly promising PCM for high-temperature thermal energy storage due to its exceptionally high melting point (above 1000°C), superior thermal conductivity, and significant latent heat capacity (208.7 kJ/kg) [43]. These characteristics make Cu an ideal candidate for efficient energy storage and transfer in advanced thermal applications.

Despite their advantages, PCMs face several challenges, including incongruent melting, significant subcooling, and high corrosivity. Nonetheless, future advancements in PCM-based latent heat storage (LHS) systems are expected to facilitate their broader adoption and practical implementation.

However, recent studies suggest an increasing focus on this system, and it is expected that, in the future, this technology will move beyond laboratory research and be implemented in CSP plants for practical energy generation.

• THERMOCHEMICAL HEAT STORAGE

Thermochemical energy storage stores solar energy as chemical energy via reversible endothermic and exothermic reactions [44]. These systems typically operate at elevated temperatures, allowing the stored energy to be released efficiently when required. In thermochemical storage systems, the working material typically consists of two main components: a sorbent, which may be in solid or liquid form, and a sorbate, usually represented by released water vapor. The amount of thermal energy required to initiate the desorption or dissociation process is determined by the strength of the interaction, or binding energy, between these two substances [45]. A clear understanding of thermochemical heat storage systems also requires distinguishing between the two primary types of sorption mechanisms—absorption and adsorption—and recognizing the procedures involved in their operation.

Among the various chemical processes considered for thermal energy storage, metal oxide/metal reactions and ammonia-based reactions are the most significant. According to Pardo et al. [46], thermochemical thermal energy storage (TES) represents a promising solution for long-term storage of solar heat. Prieto et al. [47] identified calcium carbonate (CaCO_3) as one of the most effective thermochemical materials due to its high energy storage density (ESD) of $4,400 \text{ MJ/m}^3$ and its suitability for high-temperature applications within the range of $800\text{--}900^\circ\text{C}$. Ma Zhiwen [48] reported that thermochemical TES technology, utilizing a chemically looping fluidized bed in CSP systems, can achieve temperatures ranging from 500 to 1500°C in the receiver.

High-temperature thermochemical storage systems represent the next generation of thermal energy storage, offering enhanced efficiency in solar energy conversion and long-duration energy storage capabilities. While calcium looping emerges as a particularly promising approach, further advancements are needed to refine reactor configurations, enhance material stability over repeated cycles, and optimize CO_2 capture and release integration. In addition, future research should focus on improving heat and mass transfer within the system, reducing operational costs, and developing scalable and modular system designs to enable practical implementation in large-scale CSP applications.

However, considering current research trends and technological readiness levels, the near-term deployment of thermochemical heat storage systems in commercial CSP plants appears unlikely, as most developments are still limited to laboratory or pilot-scale investigations.

CONCLUSION

Thermal energy storage (TES) remains a cornerstone for enhancing the efficiency, reliability, and dispatchability of Concentrated Solar Power (CSP) systems. Among the three principal TES approaches, sensible heat storage (SHS), latent heat storage (LHS), and thermochemical heat storage (THS), SHS currently dominates commercial deployment due to its technological maturity, cost-effectiveness, and operational simplicity. Molten salts, particularly in two-tank configurations, have demonstrated robust performance in CSP applications. However, improvements in thermal stability and corrosion resistance are necessary to enable higher operating temperatures compatible with next-generation supercritical CO_2 cycles.

LHS systems, employing high-temperature phase change materials, offer markedly higher energy densities and the potential for extended storage durations. However, challenges such as corrosion, material degradation, and integration complexity continue to limit large-scale adoption. Recent advances in high-melting-point metallic PCMs, such as copper, indicate promising pathways for overcoming these barriers, but long-term field validation remains essential.

THS systems present the highest theoretical energy densities and unparalleled potential for long-duration storage with minimal losses. Processes such as calcium looping and metal oxide redox reactions exhibit strong applicability for CSP at elevated temperatures. Nonetheless, high system complexity, material stability concerns, and cost barriers confine these technologies largely to laboratory and pilot-scale demonstrations.

Future progress in TES for CSP will depend on a dual-track strategy: (i) optimizing SHS systems to push operational boundaries while reducing costs, and (ii) accelerating research, development, and

demonstration efforts for LHS and THS technologies to achieve commercial readiness. Cross-disciplinary advances in materials science, heat transfer enhancement, corrosion mitigation, and modular system design will be crucial.

Ultimately, the integration of advanced TES technologies will play a pivotal role in enabling CSP to provide stable, dispatchable, and competitive renewable energy in the global energy transition.

-
1. *Friedemann A.J.* Life after Fossil Fuels: A Reality Check on Alternative Energy. London: Springer International Publishing, 2021.
 2. *Osman A.I., Chen L., Yang M., et al.* Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. Vol. 21. pp. 741–764. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-8.
 3. *Wang Y., Wu Z., Ni D.* Large-scale optimization among photovoltaic and concentrated solar power systems: a state-of-the-art review and algorithm analysis. *Energies*. 2024. Vol. 17(17). p. 4323.
 4. *Alam M.I., Nuhash M.M., Zihad A., Nakib T.H., Ehsan M.M.* Conventional and emerging CSP technologies and design modifications: research status and recent advancements. *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 20. p. 100406.
 5. *Palacios A., Barreneche C., Navarro M.E., Ding Y.* Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – a review from a materials perspective. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 156. pp. 1244–1265.
 6. *Maia C.B., Neumann L.R., De Andrade Oliveira G., et al.* A comprehensive review of solar tower CSP systems using TES and molten salts. *International Journal of Ambient Energy*. 2023. Vol. 44(1). pp. 1733–1747.
 7. *Kennedy K.M., Ruggles T.H., Rinaldi K., et al.* The role of concentrated solar power with thermal energy storage in least-cost highly reliable electricity systems fully powered by variable renewable energy. *Advances in Applied Energy*. 2022. Vol. 6. p. 100091.
 8. *Tagle-Salazar P.D., Cabeza L.F., Prieto C.* Transient performance modelling of solar tower power plants with molten salt thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 97. p. 112793.
 9. *Fakri H., El Fadar A.* TES materials integrated in CSP plants: research trends, challenges and 3E performance analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2025. Vol. 293. p. 113861.
 10. *Kalbaliyev F.R., Mammadov F.F.* Environmental impacts of oil and salt-based working fluids in solar power systems. *PPOR*. 2025. Vol. 1. p. 88.
 11. *Sun M., Liu T., Wang X., et al.* Roles of thermal energy storage technology for carbon neutrality. *Carbon Neutrality*. 2023. Vol. 2. p. 12.
 12. *Chekifi T., Boukraa M.* Thermal efficiency enhancement of parabolic trough collectors: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. pp. 10923–10942.
 13. *Parmar L.S., Singh S.K.* A study of performance and analysis CSP renewable based on solar tower power plant. *Proceedings of the 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. Uttar Pradesh, India, 2022. pp. 1094–1099.
 14. *Mammadov F., Kalbaliyev F.* Analysis of technical and technological parameters of solar thermal power plants. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. pp. 37–44.
 15. *IEA.* *Technology Roadmap – Concentrating Solar Power*. Paris: International Energy Agency, 2010.
 16. *Zalba B.B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. pp. 251–283.

17. *Khare S., Dell'Amico M., Knight C., McGarry S.* Selection of materials for high temperature sensible energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013. Vol. 115. pp. 114–122.
18. *Chalivendula S.R., Tarigonda H.* Recent advances in organic phase change materials for thermal energy storage: a review on sustainable development applications. *International Journal of Thermophysics*. 2025. Vol. 46. p. 88.
19. *Tatsidjodoung P., Pierrès N.L., Luo L.* A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 18. pp. 327–349.
20. *Smdani G., Islam M.R., Yahaya A.N.A., Safie S.I.B.* Performance evaluation of advanced energy storage systems: a review. *Energy & Environment*. 2022. Vol. 34(4). pp. 1094–1141.
21. *Zhang H., Dasbiswas K., Ludwig N.B., et al.* Stable colloids in molten inorganic salts. *Nature*. 2017. Vol. 542. pp. 328–331.
22. *Achkari O., El Fadar A.* Latest developments on TES and CSP technologies – energy and environmental issues, applications and research trends. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 167. p. 114806.
23. *Sitka A., Szulc P., Smykowski D., et al.* The impact of binary salt blends' composition on their thermophysical properties for innovative heat storage materials. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8(5). p. 208.
24. *Roubaud P.C., Osorio D.P.* Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. pp. 133–148.
25. *Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V.* Factsheet – Hochtemperatur Flüssigsalzspeicher. BVES, 2023.
26. *Bell S., Steinberg T., Will G.* Corrosion mechanisms in molten salt thermal energy storage for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 114. p. 109328.
27. *Chieruzzi M., Cerritelli G.F., Miliozzi A., et al.* Heat capacity of nanofluids for solar energy storage produced by dispersing oxide nanoparticles in nitrate salt mixture directly at high temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017.
28. *Rabani R., Naeini K.H.* Molten salt nanofluids for high-temperature thermal energy storage: advances, mechanisms, and challenges. *Sustainable Energy and Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 1(3). pp. 165–181.
29. *Erregueragui Z., Boutammachte N., et al.* Packed-bed thermal energy storage analysis: quartzite and palm-oil performance. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 99. pp. 370–379.
30. *Zanganeh G., Pedretti A., Zavattoni S., et al.* Packed-bed thermal storage for concentrated solar power – pilot-scale demonstration and industrial-scale design. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. pp. 3084–3098.
31. *Alumina Energy Ltd.* Our technology – Alumina Energy. Available at: <https://www.aluminaenergy.com/technology>.
32. *Yuvaaraj J.S., Deepakkumar R.* Advancement in experimental and computational approach for thermal performance investigation of single-tank packed bed thermal energy storage system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 46. p. 433.
33. *Semugaza G., Mielke T., Castillo M.E., et al.* Reactivation of hydrated cement powder by thermal treatment for partial replacement of ordinary Portland cement. *Materials and Structures*. 2023. Vol. 56. p. 48.
34. *Martins M., Villalobos U., Delclos T., et al.* New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. pp. 2144–2149.

35. *Rahjoo M., Goracci G., Gaitero J.J., et al.* Thermal energy storage prototype based on geopolymer concrete for high-temperature applications. *Materials*. 2022. Vol. 15(20). p. 7086.
36. *Alva G., Liu L., Huang X., Fang G.* Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol.68. pp.693-706.
37. *Steinmann W.D.* Steam accumulators. In: *Thermal Energy Storage for Medium and High Temperatures*. Wiesbaden: Springer, 2022.
38. *González-Roubaud E., Pérez-Osorio D., Prieto C.* Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. pp. 133–148.
39. *Stevanovic V.D., Petrovic M.M., Milivojevic S., Ilic M.* Upgrade of the thermal power plant flexibility by the steam accumulator. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 223. p. 113271.
40. *Kumar A., Kumar A.* Heat transfer analysis in thermal energy storage – a comprehensive review-based latent heat storage system. *Energy Storage*. 2022. Vol. 5(6).
41. *Mehling H.* Review of classification of PCMs, with a focus on the search for new, suitable PCM candidates. *Energies*. 2024. Vol. 17(17). p. 4455.
42. *Liang Y., Yang H., Tang H., et al.* Influence of metal encapsulation on thermophysical properties and heat transfer in salt hydrate phase change material for air conditioning system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 62. p. 103618.
43. *Zhou X., Yamashita S., Kubota M., Kita H.* Encapsulated copper-based phase-change materials for high-temperature heat storage. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7(6). pp. 5442–5452.
44. *André L., Abanades S.* Recent advances in thermochemical energy storage via solid–gas reversible reactions at high temperature. *Energies*. 2020. Vol. 13(22). p. 5859.
45. *N'Tsoukpoe K.E., Kuznik F.* A reality check on long-term thermochemical heat storage for household applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 139. p. 110683.
46. *Pardo P., Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., et al.* A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. pp. 591–610.
47. *Prieto C., Cooper P., Fernández A.I., Cabeza L.F.* Review of technology: thermochemical energy storage for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. pp. 909–929.
48. *Ma Zhiwen.* Chemical looping fluidized-bed concentrating solar power system and method. US Patent No. 9,702,348. United States Patent and Trademark Office, 2017.

FOKUSLAŞDIRICI GÜNƏŞ ENERJETİK QURĞULARININ İSTİLİK ENERJİSİ AKKUMULYASİYASININ İNKİŞAF TENDENSİYALARI

KƏLBƏLİYEV F.R.

Bu məqalədə Fokuslaşdırıcı Enerjetik Günəş Qurğuları (FEGQ) üçün İstilik Enerjisi Akkumulyasiyası (İEA) texnologiyalarında son tendensiyalar araşdırılır, onların əsas prinsipləri, mövcud inkişaf istiqamətləri və gələcək perspektivləri təhlil olunur. Məqalədə əsas İEA konfigurasiyalarına ümumi baxış təqdim olunur, bu sistemlərin işləmə prinsipləri, material xüsusiyyətləri və FEGQ ilə inteqrasiyası araşdırılır. Tədqiqat, hər bir İEA yanaşmasının əsas çətinliklərini və məhdudiyyətlərini müzakirə edir, həmçinin səmərəliliyin, miqyaslı bilənliyinin və iqtisadi səmərəliliyin artırılması üçün tələb olunan texnoloji təkmilləşdirmələri müəyyənləşdirir. Ümumilikdə, nəticələr göstərir ki, FEGQ tətbiqlərində ərimiş duzlar kimi konfigurasiyalar üstünlük təşkil etsə də, bütün İEA texnologiyalarında aparılacaq əlavə tədqiqatlar və innovasiyalar, İEA

texnologiyası olan FEGQ sistemlərinin tam potensialının reallaşdırılması və davamlı, bərpa olunan enerji sistemlərinə global keçidin sürətləndirilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Açar sözlər: fokuslaşdırıcı energetik günəş qurğuları, istilik enerjisi akkumulyasiyası, günəş enerjisi, ərimiş duz.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ АККУМУЛЯЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

КАЛБАЛИЕВ Ф.Р.

В данной статье рассматриваются современные тенденции развития технологий аккумулирования тепловой энергии (АТЭ) для концентрирующих солнечных энергоустановок (КСЭУ). Проанализированы их основные принципы, существующие направления развития и перспективы дальнейшего совершенствования. Представлен обзор основных конфигураций систем АТЭ, исследованы их принципы работы, свойств применяемых материалов, а также вопросы интеграции с КСЭУ. В работе обсуждаются ключевые проблемы и ограничения каждой из технологий АТЭ, а также определяются необходимые технологические усовершенствования для повышения эффективности, масштабируемости и экономичности систем. В целом результаты исследования показывают, что, несмотря на преобладание конфигураций на основе расплавленных солей в применении КСЭУ, дальнейшие исследования и инновации во всех направлениях АТЭ имеют важное значение для реализации полного потенциала КСЭУ с системами аккумулирования тепла и ускорения глобального перехода к устойчивым, возобновляемым энергетическим системам.

Ключевые слова: концентрирующие солнечные энергоустановки, аккумулирование тепловой энергии, солнечная энергия, расплавленные соли

DOI:10.70784/azip.5.2025463

3D MODELING OF THE DEPENDENCE OF OVERVOLTAGE ON GROUNDING RESISTANCE AND PHASE-TO-GROUND CAPACITANCE OF THE NETWORK**¹ORUJOV N.I., ²GULIYEV H.B., ³ALIMAMMADOVA S.J.***¹Baku Engineering University, Khirdalan, Azerbaijan
norucov@beu.edu.az**²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
huseyngulu@mail.ru**³Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan
sara_elimmedova@mail.ru*

In isolated neutral networks, it becomes necessary to generate artificial overvoltages in order to perform insulation testing of electrical equipment under load. In this context, it is required to establish the mathematical relationships between the parameters of single-phase non-stationary ground faults. During such faults, the dependencies among critical parameters—such as overvoltage multiplicity, ground-fault resistance, and fault angle—are governed by complex laws. Therefore, adequate mathematical models must be developed to describe these interdependencies under practical conditions. This study addresses the analytical determination of the relationship between overvoltages arising in isolated neutral networks due to non-stationary ground faults, ground-fault resistance, and the network's phase-to-ground capacitance. For this purpose, a regression equation has been derived to express the dependence of overvoltage multiplicity on ground-fault resistance and phase-to-ground capacitance, and a corresponding 3D (spatial) representation has been constructed.

Keywords: isolated neutral network, overvoltage frequency, ground fault resistance, phase-to-ground capacitance of the network, regression equation, 3D modeling

Introduction

It is well known that the failure of electrical equipment can lead to various injuries among operational personnel, disruption of technological processes, and severe accidents. Therefore, specific tests are conducted in advance to prevent such issues. In general, these tests are carried out in the following cases: commissioning of equipment or installations, after an accident, following scheduled or unscheduled maintenance, or after a certain period since the last inspection. Notably, high-voltage insulation testing of electrical equipment is mandatory for isolated neutral power networks with voltages up to 35 kV [1, 2].

In such networks, during single-phase ground faults, the ground-fault current is mainly limited by the capacitive component. This, in particular, leads to the occurrence of arc overvoltages at the initial stage of the fault. The level of overvoltage depends on the ground-fault parameters (ground-fault resistance, network capacitance, and ground-fault angle). Therefore, in order to test the network insulation under load, analysis and modeling of single-phase ground-fault processes are required.

In isolated neutral networks, performing high-voltage insulation tests under load conditions is of particular relevance for identifying potential equipment failures in advance and ensuring the uninterrupted power supply to consumers [3, 4]. Research conducted in this field indicates that various methods and tools have been proposed for such testing [5–7].

In [8], a description of simulation modeling of single-phase ground faults is presented, taking into account the characteristics of isolated and compensated neutral networks. The proposed model makes it possible to analyze transient processes during ground faults and to assess the influence of various parameters on arc overvoltages. However, the model is not suitable for analyzing the individual effects of specific network parameters.

In [9], overvoltages arising from single-phase ground faults in isolated neutral networks are investigated. It is noted that the magnitude of overvoltage can reach 3–5 times the nominal voltage. The necessity of establishing a mathematical relationship between arc overvoltage, ground fault

resistance, and network capacitance is emphasized, although no description of the model is provided.

In [10], a diagnostic methodology for single-phase ground faults in isolated neutral networks is proposed. The results of electromagnetic transient process studies and overvoltage assessment, obtained using a laboratory test bench capable of modeling 6–10 kV networks, are presented. However, the practical applicability of the obtained results is not considered.

Foreign researchers highlight the importance of a comprehensive approach to the analysis and modeling of arc overvoltages in isolated neutral networks [11]. The use of three-dimensional models, spectral analysis, and regression methods enables more accurate prediction of network conditions during single-phase ground faults and effective control of arc overvoltages under load testing. Therefore, modeling the dependence of arc overvoltage on ground fault resistance and network capacitance in isolated neutral networks is considered a relevant task for improving the overall reliability of power systems.

In neutral-isolated networks, the application of overvoltages caused by single-phase ground faults during testing requires thorough analysis and high-precision modeling of these processes. Various mathematical models, including regression equations, are used to analyze the dependence of overvoltage on network parameters. Such models make it possible to predict in advance the multiplicity of overvoltage as a function of network characteristics. For example, in studies on overvoltage modeling in 10 kV distribution cable networks under single-phase ground faults, overvoltage calculations and analyses were performed [12].

In [13], the analysis of overvoltages in neutral-isolated networks during single-phase ground faults was carried out, and the use of active resistance was proposed for overvoltage control. In the related studies, the multiplicity of overvoltage in 6–35 kV networks under single-phase arc faults was assessed, taking into account the influence of ground-fault capacitive current on the magnitude of overvoltage. However, network parameter considerations were not incorporated into the modeling [14–18].

Some works analyzed overvoltages arising from circuit interruptions during single-phase faults, providing mathematical models and simulation results, although the combined influence of network parameters was not considered [19]. In neutral-isolated distribution networks, the grounding of the neutral by different methods and its impact on the overvoltage magnitude were investigated using spectral and wavelet analysis techniques, with the EMTP-ATP software package employed for modeling [20,21].

As noted above, studies in this field have not provided comprehensive evaluations of the dependence of overvoltages on ground-fault parameters in isolated neutral networks during single-phase-to-ground faults. Therefore, it is necessary to develop mathematical models that describe the relationships among these parameters.

In [22], a method for testing insulation under load conditions in isolated neutral networks was proposed. According to this method, based on Petersen's theory, artificial non-stationary ground faults are created in the network to test insulation under load. It should be emphasized that during such ground faults, the magnitude of arc overvoltages in the networks depends on the ground-fault resistance, the fault angle, and the phase-to-ground capacitance of the network. Hence, to determine the value of the test voltage, it is essential to preliminarily establish the ground-fault resistance and the fault angle. For this reason, identifying the dependencies of the multiplicity of arc overvoltage in isolated neutral networks on ground-fault resistance, fault angle, and phase-to-ground capacitance under non-stationary ground faults represents a relevant research problem.

1. Problem statement for the regression model of arc overvoltage

In general, to determine the dependencies among the aforementioned parameters, it is necessary to perform a numerical solution of the system of differential equations characterizing the transient process of single-phase earth fault in neutral isolated networks, using modern computational technologies. However, the numerical solution of this problem is considerably complicated due to the stiffness of the mentioned differential equations. In other words, since the system of differential equations is nonlinear, in some cases the stability of the solution is compromised and the results become distorted. Therefore, to overcome such difficulties, it is essential to obtain analytical expressions defining the dependencies of the arc overvoltage

multiplicity (k) on the earth fault resistance (R_0), the earth fault angle (φ), and the phase-to-earth capacitance of the network (C_f). It should be noted that, for this purpose, in [23,24] the dependence of arc overvoltage on the ground fault resistance was considered; in [25,26] the dependence on the ground fault angle was studied; in [27,28] the dependence on the phase-to-ground capacitance of the network was analyzed; and in [29–32] analytical expressions were obtained for the dependence of arc overvoltage on both the ground fault resistance and the ground fault angle, with proposals made for their practical application.

A 3D model that takes into account the arc length and velocity during a single-phase ground fault was developed. The model was experimentally validated on a test platform in real distribution networks [33-35, 36]. However, in the proposed model, the influence of ground fault parameters such as the ground fault angle and the network capacitance was not considered.

To address the issue of controlling voltage magnitude during load tests of network insulation, it is also necessary to investigate the dependence of arc overvoltage on other pairs of parameters. Therefore, as a continuation of the research carried out in this work, attention is given to developing a simple and easily applicable regression model for the dependence of arc overvoltage on ground fault resistance and phase-to-ground capacitance in isolated neutral networks. It should be noted that although preliminary studies have been carried out by the authors for this purpose, due to the relevance of the problem, further research is required to improve the accuracy of the obtained mathematical model and to enhance its practical applicability. The regression model describes the revealed interdependence between parameters, yet it does not explicitly account for the need to assess risks arising during tests and to develop protective measures for equipment. At the same time, the model cannot fully capture all nonlinear effects and the characteristics of transient processes [37].

For a visual representation of the dependence of arc overvoltage on ground fault parameters, three-dimensional graphs are used. This makes it possible to effectively analyze the overvoltage level and to adopt more adequate decisions for its control.

2. Mathematical model of the dependence of arc overvoltage on network parameters

The analytical expression describing the dependence of arc overvoltage magnitude on the ground fault resistance and the phase-to-ground capacitance of the network in an isolated neutral system ($\varphi = \text{const}$) caused by non-stationary ground faults is considered. For this purpose, the results of experimental studies carried out on a low-voltage model of an isolated neutral network are used ($\varphi = 90^\circ$), as presented in Table 1 [22].

As seen from Table 1, the dependence of arc overvoltage multiplicity on the grounding resistance and the phase-to-ground capacitance of the network can be approximated by the following regression equation [38]:

$$k = \frac{a}{R_0} + \frac{b}{C_f} + c, \quad (1)$$

here, a, b, c – are regression coefficients.

If in equation (1) we accept the substitutions $\frac{1}{R_0} = x$ and $\frac{1}{C_f} = y$

$$k = ax + by + c, \quad (2)$$

Table 1.: Dependence $k = f(R_0, C_f)$

R_0, Om	C_f, mkF						
	1	2	3	4	5	6	8
5	3,30	2,99	2,85	2,74	2,66	2,58	2,47
10	2,96	2,74	2,59	2,47	2,39	2,33	2,21
15	2,77	2,54	2,39	2,28	2,20	2,14	2,08
20	2,62	2,38	2,24	2,13	2,06	2,01	1,92
25	2,49	2,25	2,12	2,02	1,95	1,91	1,84
30	2,38	2,15	2,02	1,93	1,88	1,84	1,80

Thus, the dependence of the arc overvoltage multiplicity (k) on the conductance of the ground-fault circuit (x) and the reciprocal value of the phase-to-ground capacitance of the network (y) can be approximated by a linear regression equation (Table 2).

Table 2.: Dependence $k = f(x, y)$

x	y						
	1,00	0,50	0,333	0,250	0,200	0,167	0,125
0,200	3,30	2,99	2,85	2,74	2,66	2,58	2,47
0,100	2,96	2,74	2,59	2,47	2,39	2,33	2,21
0,067	2,77	2,54	2,39	2,28	2,20	2,14	2,08
0,050	2,62	2,38	2,24	2,13	2,06	2,01	1,92
0,040	2,49	2,25	2,12	2,02	1,95	1,91	1,84
0,033	2,38	2,15	2,02	1,93	1,88	1,84	1,80

The regression coefficients of equation (2) are determined by the following known expressions [36]:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\sigma(k)}{\sigma(x)} \cdot \frac{r(k,x) - r(k,y)r(x,y)}{1 - r^2(x,y)}; \\ b &= \frac{\sigma(k)}{\sigma(y)} \cdot \frac{r(k,y) - r(k,x)r(x,y)}{1 - r^2(x,y)}; \\ c &= M(k) - aM(x) - bM(y). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Here, $M(x)$ is the mathematical expectation of the variable x , $M(y)$ is the mathematical expectation of the variable y , $M(k)$ is the mathematical expectation of the variable k , $\sigma(x)$ is the standard deviation of x , $\sigma(y)$ is the standard deviation of y , $\sigma(k)$ is the standard deviation of k , $r(x,y)$ is the linear correlation coefficient between x and y , $r(k,x)$ is the linear correlation coefficient between k and x , and $r(k,y)$ is the linear correlation coefficient between k and y .

The numerical values of the statistical indicators required for determining the regression coefficients and identifying the desired model are obtained from the correlation table presented in Table 3. The following notations have been adopted in the correlation table:

$$\begin{aligned} A_i &= (x_i - M(x))^2; \quad B_i = (y_i - M(y))^2; \quad C_i = (k_i - M(k))^2; \\ E_i &= (x_i - M(x)) \cdot (y_i - M(y)); \quad P_i = (k_i - M(k)) \cdot (x_i - M(x)); \quad T_i = (k_i - M(k)) \cdot (y_i - M(y)); \\ L_i &= \left| \frac{ax_i + by_i + c - k_i}{k_i} \right|; \quad N_i = (ax_i + by_i + c - k_i)^2. \end{aligned}$$

The data array consists of a volume of $n=42$, and the values of the statistical indicators necessary for determining the coefficients, obtained as a result of calculations, are presented below.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i &= 3,43; \quad \sum_{i=1}^n y_i = 15,45; \quad \sum_{i=1}^n k_i = 97,62; \\ M(x) &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0,082; \quad M(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = 0,368; \quad M(k) = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} = 2,324; \end{aligned}$$

Table 3.: Correlation Table

i	x_i	y_i	k_i	A_i	B_i	C_i	E_i	P_i	T_i	L_i	N_i
1	0,200	1,000	3,30	0,01400	0,39960	0,95201	0,07480	0,11545	0,61679	0,01399	0,00213
2	0,100	1,000	2,96	0,00033	0,39960	0,40413	0,01158	0,01165	0,40186	0,02334	0,00477
3	0,067	1,000	2,77	0,00022	0,39960	0,19866	-0,00948	-0,00668	0,28175	0,01177	0,00095
4	0,050	1,000	2,62	0,00100	0,39960	0,08744	-0,02001	-0,00936	0,18693	0,01650	0,00186
5	0,040	1,000	2,49	0,00173	0,39960	0,02746	-0,02633	-0,00690	0,10475	0,05128	0,01630
6	0,033	1,000	2,38	0,00233	0,39960	0,00310	-0,03055	-0,00269	0,03521	0,08712	0,04299
7	0,200	0,500	2,99	0,01400	0,01746	0,44317	0,01563	0,07877	0,08796	0,00868	0,00067
8	0,100	0,500	2,74	0,00033	0,01746	0,17281	0,00242	0,00762	0,05493	0,08439	0,05340
9	0,067	0,500	2,54	0,00022	0,01746	0,04653	-0,00198	-0,00323	0,02850	0,07205	0,03349
10	0,050	0,500	2,38	0,00100	0,01746	0,00310	-0,00418	-0,00176	0,00736	0,0415	0,00978
11	0,040	0,500	2,25	0,00173	0,01746	0,00551	-0,00550	0,00309	-0,00981	0,00641	0,00020
12	0,033	0,500	2,15	0,00233	0,01746	0,03037	-0,00638	0,00842	-0,02303	0,02568	0,00304
13	0,200	0,333	2,85	0,01400	0,00119	0,27637	-0,00408	0,06220	-0,01814	0,00460	0,00017
14	0,100	0,333	2,59	0,00033	0,00119	0,07060	-0,00063	0,00487	-0,00917	0,08055	0,04352
15	0,067	0,333	2,39	0,00022	0,00119	0,00431	0,00051	-0,00098	-0,00226	0,06711	0,02572
16	0,050	0,333	2,24	0,00100	0,00119	0,00710	0,00109	0,00266	0,00290	0,03851	0,00744
17	0,040	0,333	2,12	0,00173	0,00119	0,04173	0,00143	0,00851	0,00705	0,00556	0,00013
18	0,033	0,333	2,02	0,00233	0,00119	0,09259	0,00166	0,01470	0,01050	0,02863	0,00334
19	0,200	0,250	2,74	0,01400	0,01389	0,17281	-0,01394	0,04919	-0,04899	0,01203	0,00108
20	0,100	0,250	2,47	0,00033	0,01389	0,02123	-0,00216	0,00267	-0,01717	0,06166	0,02320
21	0,067	0,250	2,28	0,00022	0,01389	0,00196	0,00176	0,00066	0,00521	0,05003	0,01301
22	0,050	0,250	2,13	0,00100	0,01389	0,03774	0,00373	0,00615	0,02289	0,01876	0,00159
23	0,040	0,250	2,02	0,00173	0,01389	0,09259	0,00491	0,01267	0,03586	0,01213	0,00060
24	0,033	0,250	1,93	0,00233	0,01389	0,15546	0,00569	0,01905	0,04646	0,04360	0,00708
25	0,200	0,200	2,66	0,01400	0,02817	0,11270	-0,01986	0,03972	-0,05635	0,02810	0,00558
26	0,100	0,200	2,39	0,00033	0,02817	0,00431	-0,00307	0,00120	-0,01103	0,04624	0,01221
27	0,067	0,200	2,20	0,00022	0,02817	0,01544	0,00251	0,00186	0,02086	0,03286	0,00522
28	0,050	0,200	2,06	0,00100	0,02817	0,06984	0,00531	0,00836	0,04436	0,00397	6,68888
29	0,040	0,200	1,95	0,00173	0,02817	0,14009	0,00699	0,01559	0,06282	0,02886	0,00316
30	0,033	0,200	1,88	0,00233	0,02817	0,19739	0,00811	0,02147	0,07457	0,05103	0,00920
31	0,200	0,167	2,58	0,01400	0,04047	0,06539	-0,02380	0,03025	-0,05144	0,05010	0,01671
32	0,100	0,167	2,33	0,00033	0,04047	0,00003	-0,00368	0,00010	-0,00114	0,03262	0,00577
33	0,067	0,167	2,14	0,00022	0,04047	0,03396	0,00301	0,00276	0,03707	0,01765	0,00142
34	0,050	0,167	2,01	0,00100	0,04047	0,09877	0,00637	0,00995	0,06323	0,00813	0,00026
35	0,040	0,167	1,91	0,00173	0,04047	0,17163	0,00838	0,01726	0,08335	0,03707	0,00501
36	0,033	0,167	1,84	0,00233	0,04047	0,23453	0,00972	0,02340	0,09743	0,06003	0,01220
37	0,200	0,125	2,47	0,01400	0,05897	0,02123	-0,02873	0,01724	-0,03538	0,08398	0,04303
38	0,100	0,125	2,21	0,00033	0,05897	0,01306	-0,00445	-0,00209	0,02775	0,00549	0,00014
39	0,067	0,125	2,08	0,00022	0,05897	0,05967	0,00364	0,00366	0,05932	0,00462	9,24856
40	0,050	0,125	1,92	0,00100	0,05897	0,16344	0,00769	0,01280	0,09818	0,03880	0,00555
41	0,040	0,125	1,84	0,00173	0,05897	0,23453	0,01011	0,02017	0,11761	0,05922	0,01187
42	0,033	0,125	1,80	0,00233	0,05897	0,27487	0,01173	0,02534	0,12732	0,06589	0,01407
Σ	3,430	15,450	97,62	0,13747	3,35869	5,25982	0,00000	0,62590	2,56695	1,52022	0,44830

$$\sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2 = 0,13747222; \sum_{i=1}^n (y_i - M(y))^2 = 3,35869048; \sum_{i=1}^n (k_i - M(k))^2 = 5,259829;$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - M(x))(y_i - M(y)) = 0; \sum_{i=1}^n (k_i - M(k))(x_i - M(x)) = 0,6259;$$

$$\sum_{i=1}^n (k_i - M(k))(y_i - M(y)) = 2,5669524;$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{ax_i + by_i + c - k_i}{k_i} \right| = 1,520225995;$$

$$\sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + c - k_i)^2 = 0,44830679.$$

Based on Table 3, variances, root mean square deviations, two-dimensional covariance coefficients (correlation moments), and two-dimensional correlation coefficients for individual quantities are calculated using well-known formulas. The obtained numerical values are as follows:

$$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2}{n} = 0,00327; D(y) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M(y))^2}{n} = 0,07997;$$

$$D(k) = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - M(k))^2}{n} = 0,12523;$$

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} = 0,05721; \sigma(y) = \sqrt{D(y)} = 0,28279; \sigma(k) = \sqrt{D(k)} = 0,35388;$$

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M(x))(y_i - M(y))}{n} = 0; \text{cov}(k, x) = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - M(k))(x_i - M(x))}{n} = 0,0149;$$

$$\text{cov}(k, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - M(k))(y_i - M(y))}{n} = 0,06112;$$

$$r(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)D(y)}} = 0; r(k, x) = \frac{\text{cov}(k, x)}{\sqrt{D(k)D(x)}} = 0,73606; r(k, y) = \frac{\text{cov}(k, y)}{\sqrt{D(k)D(y)}} = 0,61073.$$

Then, based on expressions (3), the estimated values of the regression coefficients of equation (1) or (2) are obtained as follows:

$$a = 4,55; b = 0,76; c = 1,67.$$

Thus, after determining the regression coefficients, the dependence (2) between the multiplicity of arc overvoltage caused by non-stationary ground faults in networks with isolated neutral, the conductivity of the ground fault circuit, and the reciprocal value of the network's phase-to-ground capacitance can be explicitly written as follows:

$$k = 4,55x + 0,76y + 1,67, \quad (4)$$

3. Adequacy of the mathematical model

Let us verify the adequacy of the regression equation (4) obtained between the amplitude of overvoltage during transient ground faults, the conductance of the ground-fault circuit, and the reciprocal value of the network phase-to-ground capacitance. For this purpose, the multiple correlation coefficient is calculated and its significance is tested using Fisher's criterion [39]. The value of the multiple correlation coefficient is determined by the well-known expression:

$$R = \sqrt{\frac{r^2(k, x) + r^2(k, y) - 2r(k, x)r(k, y)r(x, y)}{1 - r^2(x, y)}} = 0,96.$$

The fact that the multivariate correlation coefficient is close to unity ($R = 0,96 \rightarrow 1$) indicates that the dependence between the multiplicity of arc overvoltage, the conductivity of the ground fault circuit, and the reciprocal value of the network's phase-to-ground capacitance can be considered a strong linear correlation

The significance of the multiple correlation coefficient is tested using the F-Fisher criterion. It is known that, at a significance level of α , the regression equation is considered adequate if the condition $F > F(\alpha, q_1, q_2)$ is satisfied [39], where q_1 and q_2 are the degrees of freedom.

The empirical value of the F-Fisher criterion, based on the given data, is determined as follows:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (5)$$

Here, n is the number of experiments, $n = 42$; m is the number of factors, $m = 2$. According to equation (5), the value of $F = 229.22$.

The critical value of the Fisher criterion F is obtained from the table depending on the significance level (α) and the degrees of freedom (q_1, q_2) [39]:

$$\alpha = 0,05; q_1 = m = 2; q_2 = n - m - 1 = 42 - 2 - 1 = 39; F(\alpha, q_1, q_2) = 3,24.$$

Since $F = 229.22 > F(\alpha, q_1, q_2) = 3,24$, the multivariate correlation coefficient ($R = 0,96$) and the statistical significance of the regression equation are confirmed.

The probable error of the multiple correlation coefficient is determined by the following well-known expression:

$$\varepsilon_R = \pm t(\alpha; n - m - 1) \frac{1 - R^2}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

Here, $t(\alpha; n - m - 1)$ is the tabulated value of Student's criterion, which is taken from statistical tables depending on the significance level (α) and the degrees of freedom ($n - m - 1$) [39].

$$\alpha = 0,05; n - m - 1 = 42 - 2 - 1 = 39; t(\alpha, n - m - 1) = 2,023.$$

Then, according to expression (6), $\varepsilon_R = \pm 0,0245$.

The determination index $R^2 = 0,96^2 = 0,9216$ shows that 92.16% of the variation in the arc overvoltage multiplicity (k) is explained by the variation in the conductivity of the ground fault loop (x) and the inverse value of the phase-to-ground capacitance of the network (y), while the remaining 7.84% is due to the influence of other unaccounted factors.

The mean relative and root-mean-square approximation errors are determined, respectively, by the following well-known expressions:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{ax_i + by_i + c - k_i}{k_i} \right| \cdot 100\% = 3,62\%;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + c - k_i)^2}{n}} = 0,103.$$

4. Results of computer modeling

Thus, the dependence (1) between the multiplicity of arc overvoltage caused by non-stationary ground faults in networks with isolated neutral, the ground fault resistance, and the network's phase-to-ground capacitance can be explicitly written as follows:

$$k = \frac{4,55}{R_0} + \frac{0,76}{C_f} + 1,67, \quad (7)$$

Based on the regression equation (7) obtained using the OriginLab [40] software, a 3D (spatial) representation of the dependence of the arc overvoltage multiple on the ground fault resistance and the phase-to-ground capacitance of the network was constructed (Fig. 1).

From the analytical relation (7) and Fig. 1, it can be clearly observed that in isolated neutral networks, the magnitude of the arc overvoltage during single-phase ground faults depends on the network parameters (ground fault resistance and phase-to-ground capacitance). This provides a practical basis for monitoring this dependence and ensuring the required value of overvoltage during insulation tests of the network under load by means of appropriate control.

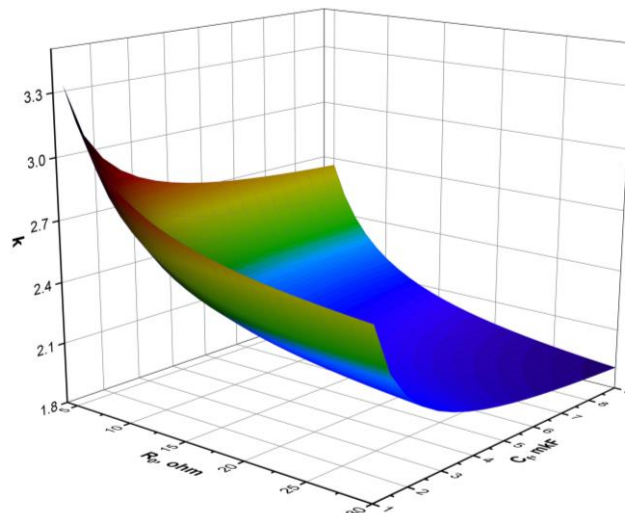


Fig.1. 3D representation of the dependence of arc overvoltage magnitude on grounding resistance and the network phase-to-ground capacitance.

As can be seen from the figure, there is a strong correlation between arc overvoltage, grounding resistance, and network phase capacitance. The obtained simple regression model makes it possible to effectively predict arc overvoltages at different parametric values of the network, which is highly important for practical applications and for enhancing the reliability of distribution networks. At the same time, the modeling results have shown that, particularly at higher values of phase capacitance, an increase in grounding resistance leads to a decrease in the arc overvoltage magnitude.

Conclusion

1. It has been confirmed that modeling the dependence of arc overvoltage in isolated neutral networks on ground fault resistance and network capacitance is an essential tool for analysis and under-load testing in such networks. The use and visualization of the obtained mathematical model enable more accurate assessment of risks and overvoltages during single-phase faults, ensuring more effective process control.

2. A practically implementable regression model has been developed to describe the dependence of arc overvoltage magnitude, caused by non-stationary ground faults following Petersen's theory, on ground fault resistance and the phase-to-ground capacitance of the network. The proposed analytical relationship between these parameters can be regarded as a harmonic correlation and serves as a convenient mathematical model for theoretical investigations.

3. The modeling results have shown that, particularly at higher values of phase-to-ground capacitance, an increase in ground fault resistance leads to a decrease in overvoltage magnitude.

4. The research findings may be useful for power engineers in the design and modernization of distribution networks. The developed regression model can be applied in the Azerbaijani power system during insulation testing under load conditions to address the management of arc overvoltages caused by single-phase ground faults in isolated neutral networks.

-
1. *Khazieva R.T., Vasiliev P.I., Aflyatunov R.R.* (2022) Investigation of the Installation for Insulation Testing of Electrical Equipment with Increased Voltage. Moscow: Electrical Technologies in Industry 3(56):65-69. (In Russian) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(556\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(556)-65-69).
 2. *Patsch R.* (2018) Dielectric diagnostics of power transformers and cables—return voltage measurements, theory and practical results. VDE High Voltage Technology, ETG Symposium. <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/454807130.html>. Accessed 21 July 2023.
 3. *Shahmaev I.Z., Gaisin B.M., Shiryayev O.V.* (2016) A new method for decision making in the design and development of electric power systems. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911000>.
 4. *Mudiraj A.N.* (2016) Improvement of power quality by mitigating harmonics in single-phase AC distribution. International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACDOT.2016.7877556>.
 5. *Antonov A.I.* (2017) Investigation of electromagnetic interference levels in a 10/0.4 kV network with power transformers of different capacities under asymmetric load conditions. Kazan: Bulletin of Higher Educational Institutions. Power Engineering Issues 9–10:65–76. (In Russian) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-65-76>.
 6. *Rajasekhar N.V., Babu M.N.* (2016) Harmonics reduction and power quality improvement using DPF. Int Conf Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7754987>.

7. Akdeniz E, Bagriyanik M. (2016) A knowledge-based decision support algorithm to reduce the impact of transmission system vulnerabilities. *Int J Electric Power Energy Syst* 78:436–444. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.041>.
8. Boeva L.V., Kiselev G.Yu (2017) Simulation model of single-phase earth fault in networks with isolated and compensated neutral. *Molodoy Ucheny* 22(156):26–30. (In Russian)
9. Galieva G.N., Gubaev D.F. (2018) Overvoltages in networks with isolated neutral. *Electrocekh* 6:6–11. (In Russian).
10. Borkovskiy S.O., Goreva T.S., Pyukke G.A., Goreva T.I. (2015) Features of voltage in electrical networks during single-phase earth faults. *Fundamental Res* 2(12):2545–2552. (In Russian).
11. Kuliński K, Heyduk A. (2024) Ground fault in medium-voltage power networks with an isolated neutral point: spectral and wavelet analysis of selected cases in an example industrial network modeled in the atp-empt package. *Energies* 17(7):1532. <https://doi.org/10.3390/en17071532>.
12. Kurochka K.S., Tokochakov V.I., Karabchikova E.A., Panarin K.A. (2020) Computer modeling of overvoltages in 6–10 kV distribution networks during single-phase earth faults. *Syst Anal Appl Inform* 3:34–41. (In Russian) <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2020-3-34-41>.
13. Shakin V.M. (2022) Modeling of overvoltages in 10 kV power networks during metallic earth fault. In: *Native Land – the Basis of All Initiatives of the Young Generation, Proc. Conf.*, pp 649–654. (In Russian).
14. Li S, Xue Y, Feng G, Xu B (2019) Simulation analysis of intermittent arc grounding fault applying with improved cybernetic arc model. *J Eng* 2019(16):3196–3201. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8457>.
15. Xu X, Hu W (2020) Modeling and simulation of arc grounding fault of middle and low voltage distribution network based on ATP-EMTP. *J Comput Methods Sci Eng* 4:1–10. <https://doi.org/10.3233/JCM-204271>.
16. Wang Z, Zhang H, Wang H, Bi Z, He X, Wang Q, Yu X (2022) Analysis of modeling and fault line selection method for single-phase intermittent fault of distribution network. *J Phys: Conf Ser* 2355:012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2355/1/012047>.
17. Huang H, Ma F, Fu L, Zhu W, Li C (2023) An overview of grounding design and grounding fault detection and location methods for a multiphase rectifier generator power supply system. *Machines* 11(11):985. <https://doi.org/10.3390/machines11110985>.
18. Rzeyeva S.V., Mammadov N.S., Ganiyeva N.A. (2023) Overvoltages during single-phase earth fault in neutral-isolated networks (10–35 kV). *J Energy Res Rev* 13(1):7–13. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i1253>.
19. Bakhor Z., Yatseiko A., Ferensovych R. (2021) Multiplicity of overvoltages during arc single-phase earth faults in 35 kV electrical grids. *Energy Eng Control Syst* 7(2):111–116. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.111>.
20. Tarko R., Nowak W., Szpyra W. (2020) Temporary overvoltages in high-voltage power systems caused by breaks of circuit continuity during single-phase earth faults. *IET Gener Transm Distrib* 14(4):628–634. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1688>.
21. Jusić A., Bajramović Z., Turković I., Dedović M.M. (2020) Overvoltage analysis during earth fault for different treatment of neutral point in distribution network. *B&H Electr Eng* 14(2):1–6. <https://doi.org/10.2478/bhee-2020-0013>.
22. Orujov N.I. (1998) Development and investigation of insulation testing methods in neutral-isolated networks based on artificial non-stationary earth faults. PhD Thesis, Baku, Supreme Attestation Commission Under the President of the Republic of Azerbaijan.
23. Orujov N.I., Orujov A.O. (2013) Determination of dependence between arc overvoltage multiplicity and earth fault resistance. *Sci Works AzTU* 3:83–86. (In Azerbaijani).

24. *Orujov N.I.* (2019) Regression model of arc overvoltage dependence on earth fault resistance. In: Role of Engineering in the Innovative Development of Azerbaijan: Goals and Perspectives, Int Sci-Pract Conf, Baku: BEU, Nov 29–30, 285–287. (In Azerbaijani).
25. *Orujov N.I., Orujov A.O.* (2014) Determination of dependence between arc overvoltage and earth fault angle. *Probl Power Eng* 2:36–39. (In Azerbaijani).
26. *Orujov N.I., Mirili T.* (2021) Regression model of arc overvoltage dependence on earth fault angle. In: Proc 5th Int Conf of Young Researchers, Baku: BEU, Book 1, Apr 29–30, 113–116. (In Azerbaijani).
27. *Orujov N.I.* (2018) Determination of dependence between arc overvoltage multiplicity and phase-to-ground capacitance of the network. In: Proc Republican Sci-Tech Conf, Baku: AzTU, Apr 4–5, 254–257. (In Azerbaijani).
28. *Orujov N.I.* (2021) Regression model of arc overvoltage dependence on phase-to-ground capacitance of the network. In: Proc 2nd Int Conf on Science and Technology, Baku: BEU, Nov 26–27, 333–335. (In Azerbaijani).
29. *Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimamedova S.J.* (2024) Regression model of arc overvoltages during single-phase transient ground faults in networks with isolated neutral. *Reliab Theory Appl* 20(2/78):425–433. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-278-425-433>.
30. *Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimamedova S.J.* (2024) Arc overvoltage regression model. In: Proc 9th Int Conf on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2024), Istanbul, Turkiye, Aug 27–29, 64–67.
31. *Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimamedova S.J.* (2024) Regression model of arc overvoltage during single-phase non-stationary earth faults in isolated neutral networks. *Sci Works AzTU* 1:43–48. (In Azerbaijani).
32. *Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimamedova S.J.* (2024) 3D modeling of arc overvoltage dependence on earth fault resistance and earth fault angle. *Probl Power Eng* 2:11–19. (In Azerbaijani).
33. *Hashimov A.M., Rahmanov N.M., Tabatabaei N.M., Guliyev H.B., Ibrahimov F.Sh.* (2020) Probabilistic evaluation of voltage stability limit of power system under the conditions of accidental emergency outages of lines and generators. *IJTPE Journal International Journal on Technical and physical problems of engineering (IJTPE)*, Issue 43, Vol. 12, No. 2, pp.40-45.
34. *Guliyev H.B.* (2019) Reactive power adaptive control system in networks with distributed generation based on fuzzy sets theory. *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP 2019)*, IEEE, DOI: 10.1109/IDAP.2019.8875963, 21-22 September 2019, Malatya, Turkey.
35. *Rahmanov N.R., Kurbatskiy V.G., Guliyev H.B., Tomin N.B., Mammadov Z.A.* (2017) Probabilistic assessment of power system mode with a varying degree of wind sources integration. *E3S Web of Conferences*, Volume 25 (2017), Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2017), Bishkek, Kyrgyzstan, September 11-15, 2017, pp.1-5.
36. *Zhang Y, Li H, Wang X, et al.* (2025) Research on arc extinguishing characteristics of single-phase grounding fault in distribution network. *Energies* 18(2):256.
37. *Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimamedova S.J.* (2024) Modeling of arc overvoltage resistance to ground and the dependence of the phase capacitance of the network with respect to ground. *Reliab Theory Appl* 19(4/80):560–569. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-480-560-569>.
38. *Mammadov N.R., Mammadov B.M.* (2005) Mathematical processing of experimental results. Science, Baku. (In Azerbaijani).
39. *Orujov E* (2018) Econometrics. Science, Baku. (In Azerbaijani).
40. *Origin(Pro)*, “Version 2022,” OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA.

QÖVS İFRAT GƏRGİNLİYİN YERLƏ QAPANMA MÜQAVİMƏTİ VƏ ŞƏBƏKƏNİN YERƏ NƏZƏRƏN FAZA TUTUMUNDAN ASILILIĞININ 3D MODELLEŞDİRİLMƏSİ

ORUCOV N.İ., QULİYEV H.B., ƏLİMƏMMƏDOVA S.C.

Neytralı izolə edilmiş şəbəkələrdə elektrik avadanlıqlarının izolyasiyasının yük altında sınaqlarının aparılması üçün süni ifrat gərginliyin yaradılması zəruri olur və bu zaman birfazlı qeyri-stasionar yerlə qapanma parametrləri arasındakı riyazi əlaqələrin müəyyən edilməsi tələb olunur. Birfazlı qeyri-stasionar yerlə qapanmalar zamanı ifrat gərginliyin dəfəliyi, yerlə qapanma müqaviməti və yerlə qapanma bucağı kimi vacib parametrlər arasındakı asılılıqlar mürəkkəb qanunuyğunluqlara tabe olurlar. Odur ki, praktik şəraitlər üçün belə parametrlərin öz aralarında asılılıqlarını bilməyə imkan verən adekvat riyazi modellər işlənməlidir. İşdə qeyri-stasionar yerlə qapanmalar nəticəsində neytralı izolə olunmuş şəbəkələrdə yaranan ifrat gərginliklə yerlə qapanma müqaviməti və şəbəkənin yerə nəzərən faza tutumu arasındakı əlaqənin analitik olaraq müəyyən olunması probleminə baxılmışdır. Bu məqsədlə ifrat gərginliyin dəfəliyinin yerlə qapanma müqaviməti və şəbəkənin yerə nəzərən faza tutumundan asılılığı üçün reqressiya tənliyi alınmış və ona uyğun 3D təsviri qurulmuşdur.

Açar sözlər: neytralı izolə olunmuş şəbəkə, ifrat gərginliyin dəfəliyi, yerlə qapanma müqaviməti, şəbəkənin yerə nəzərən faza tutumu, reqressiya tənliyi, 3D modelləşdirmə.

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДУГОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАМЫКАНИЮ НА ЗЕМЛЮ И ФАЗНОЙ ЕМКОСТИ СЕТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ

ОРУДЖЕВ Н.И., ГУЛИЕВ Г.Б., АЛИМАМЕДОВА С.Д.

Испытание изоляции электрооборудования под нагрузкой в сетях с изолированной нейтралью требует определения зависимостей между параметрами, характеризующими однофазным нестационарным замыканием на землю. Определение таких зависимостей в большинстве случаев сопряжено с рядом трудностей. Поэтому для практических условий следует разработать простые математические модели, позволяющие узнать зависимости между этими параметрами. В работе рассматривается задача определения зависимости между перенапряжением, возникающим в сети с изолированной нейтралью при нестационарных замыканиях на землю, сопротивлением замыканию на землю и фазной емкостью сети относительно земли. С этой целью получено уравнение регрессии зависимости кратность перенапряжений от сопротивления замыкания на землю и фазной емкости сети относительно земли и построено соответствующее 3D изображение.

Ключевые слова: сети с изолированной нейтралью, кратность перенапряжения, сопротивления замыкания на землю, фазной емкости сети относительно земли, уравнение регрессии, 3D моделирование.

DOI:10.70784/azip.5.2025474

COMPARATIVE STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES IN SrFe₁₂O₁₉ NANOPARTICLES SYNTHESIZED WITH PVP AND Na₂CO₃

¹MUSAYEVA N.N., ²GREMENOK V.F., ¹KHALILOVA H.KH., ²STANCHIK A.V.,
²ZHALUDKEVICH A.I., ²MINCHUKOVA O.F., ²BUSHINSKY M.V.,
¹IZZATOV B.M., ¹ALIZADA M.T.

¹*Department of Application Technologies of Nanomaterials,
Institute of Physics, MSE, Baku, Azerbaijan;*

²*Scientific-Practical Materials Research Centre of the NASB,
Minsk, Republic of Belarus;
nmusayeva@physics.science.az*

Highly crystalline, hexagonal SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles were synthesized using a simple, one-step co-precipitation method. Two different chemical routes were employed to synthesize strontium hexaferrite (SrFe₁₂O₁₉) nanoparticles, and the resulting materials were analyzed in a comparative study. X-ray diffraction (XRD) patterns of powders calcined at 800 °C confirmed that all samples crystallized in a hexagonal magnetoplumbite structure with space group P6₃/mmc. The temperature dependence of the samples' magnetization was investigated in the range of 80–800 K under an applied magnetic field of 8.6 kOe. Similar Curie temperatures were found for both samples (702 K and 706 K). However, the sample synthesized using polyvinylpyrrolidone (PVP) exhibited significantly higher saturation magnetization (57.80 G·cm³·g⁻¹) and coercivity (5167 Oe) than the sample synthesized using Na₂CO₃ as a reducing agent. These results suggest that using PVP during synthesis significantly affects both particle morphology and magnetic performance. The coercivity of the PVP-assisted sample is more than twice that of the Na₂CO₃-based sample, highlighting its potential for use in applications requiring stable, robust hard magnetic materials.

Keywords: Strontium hexaferrite; nanoparticles; PVP; morphology; magnetization, coercivity

1. Introduction

The industrial focus on the development of high-frequency motor technologies requires the production of new efficient, soft and hard magnetic materials having many superior characteristics compared to existing metal magnetics. The use of such materials for the preparation of magnetic cores can increase the strength of the magnetic field in electromagnetic coil by several hundred times compared to existing fixed metal magnetics. From this viewpoint, the researches dealing with new magnetic materials based on isolated metal particles is of great interest to study the magnetic exchange mechanism through thin insulating layers and the formation of multiphase ferromagnetic order in the theory of magnetism. As the magnetic cores get their final shape after compression and their final magnetic and mechanical properties after hardening, they can be immediately wired and assembled into the motor frame. This allows the magnetic core manufacturers both improving the design and simplifying the engine manufacturing process. For such applications, the use of M-type hexaferrites is more appropriate [1–7]. Among them, strontium-based ferrites are particularly attractive due to their high Curie temperature and environmentally friendly nature, which makes them suitable not only for use in electrotechnical devices but also in medical applications [2]. Therefore, it is important to employ synthesis methods that are simple, energy-efficient, and involve fewer chemicals that pose minimal risk to human health.

There are various physical and chemical methods developed to obtain powdered strontium hexaferrite nanocrystals including co-precipitation [8-9], solid-state reaction (ceramic) [10] and hydrothermal [11-15] and green synthesis [16] methods. Lia et al. [16] used modified solid-state method to obtain SrFe₁₂O₁₉ aiming to enhance the coercivity (HcJ) of SrFe₁₂O₁₉ by optimizing the synthesis parameters.

Among the tested conditions, the use of Fe₃O₄ nanoparticles with a Fe/Sr ratio of 12, sintered at 1100 °C, led to the formation of a self-composite structure comprising 70% nano-sized and 30% micro-sized particles. This structure resulted in a significantly improved coercivity of 348.9 kA/m. Zhanyong et al. [18] reported the synthesis of SrFe₁₂O₁₉ hexaferrites using a microwave-assisted solid-state reaction. The resulting particles exhibited high crystallinity and large grain sizes, leading to a saturation magnetization of up to 72 emu/g. However, due to the formation of multi-domain structures, the coercivity was relatively low compared to single-domain particles. This study demonstrates the typical trade-off between high saturation magnetization and lower coercivity in larger, multi-domain particles. SrFe₁₂O₁₉ powder was successfully synthesized by García-Cerda et al. [19] via the sol-gel method. Authors show that single-phase SrFe₁₂O₁₉ formed after calcination of the gel precursor at 800 °C, while the sample calcined at 900 °C showed the highest magnetic performance, with a coercivity of 4783 Oe and saturation magnetization of 56.97 emu/g. Sol-gel auto-combustion was used by authors [20, 21], and their properties were studied across various annealing temperatures. E. Roohani et al. obtained phase purity of SrFe₁₂O₁₉ above 950 °C, while magnetic saturation and coercivity peaked at 1000 °C [20]. TEM revealed hexagonal nanoparticle growth with increasing temperature, and FTIR/TGA confirmed structural and thermal changes. Kumar et al. [4] used a controlled annealing method to enhance the structural and magnetic properties of strontium hexaferrite (SrFe₁₂O₁₉). The samples exhibited a saturation magnetization (M_s) ranging from approximately 56 to 72 emu/g, and the coercivity increased to 6105 G (≈0.63 kOe)—as a result of controlled annealing at 950 °C. R. L. Palomino-Resendiz et al. [22] investigated the thermodynamic and magnetic properties of SrFe₁₂O₁₉ nanodisks synthesized using a sonochemical method, examining how these properties change with temperature. The study examines the oxidation kinetics and magnetic behaviour of this phase-pure, disk-shaped nanomaterial, including its superparamagnetic characteristics, with a measured coercivity field of 0.56 kOe at 100 K and a saturation magnetization of 71.05 emu/g.

All these literature studies showed that the methods used in the synthesis of nanocrystalline materials significantly influence their size, structure and microstructural properties [2-4, 12].

In the present study, two different reducing agents—polyvinylpyrrolidone (PVP) and sodium carbonate (Na₂CO₃)—were employed during the synthesis of strontium hexaferrite (SrFe₁₂O₁₉) nanostructures using a simple one-step co-precipitation method. The objective of this study is to investigate the influence of these reducing agents on the structural, magnetic, and optical properties of the synthesized materials.

2. Materials and methods

2.1. Samples preparation

SrCl₂·6H₂O, FeCl₃·6H₂O, polyvinyl pyrrolidone (PVP), sodium hydroxide (NaOH) and sodium carbonate (Na₂CO₃) were used as initial materials for the synthesis of SrFe₁₂O₁₉ NPs by two chemical methods.

Method 1 (Sample 1). SrCl₂·6H₂O and FeCl₃·6H₂O salts with molar ratio of Fe/Sr = 12 were dissolved in deionized (DI) water and mixed on a magnetic stirrer at a speed of 1200 rpm. PVP was gradually added to the solution in small amount under continuous stirring. The resulting mixture was then placed in an ultrasonic bath operating at a 68 kHz frequency and sonicated for 30 minutes. Subsequently, a 7M NaOH solution was gradually added to the initial mixture in small portions under continuous stirring. The mixing was stopped at a 10.5 level of pH, when a rapid precipitation of dark cranberry color precipitate occurred. The obtained precipitate was repeatedly washed with DI water by centrifugation until the pH value reached 8. After filtering, the precipitate was poured into a ceramic pot and dried at 150 °C in drying chamber, and calcinated at 800 °C for 4 h.

Method 2 (Sample 2). Two solutions were prepared separately. The first solution, containing $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ salts in a 1:12 molar ratio, was dissolved in deionized (DI) water and stirred on a magnetic stirrer at 1200 rpm. The second solution was prepared by dissolving 2.5M NaOH and 1M Na_2CO_3 in DI water. This solution was then gradually added to the first one in small portions, under continuous mixing in an ultrasonic bath operating at 68 kHz. The process was stopped when the pH reached 10.5, at which point rapid precipitation occurred. The resulting precipitate was repeatedly washed with DI by centrifugation until the pH value reached 8, then dried in a ceramic crucible at 150°C in a drying chamber and subsequently calcined at 800 °C for 4 hours.

2.2. Instrumentation

The structural characteristics of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs were studied using Rigaku Ultima IV X-ray diffractometer in grazing incidence diffraction (GIXRD) geometry at 1 degree of incident X-rays with Cu $K\alpha$ radiation source ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Diffraction angle in the range of 20 - 90° was used to identify the crystal structure of the samples. Scherrer equation and Williamson-Hall (W-H) method assuming uniform deformation model (UDM) was used to determine the crystallite size of NPs. Morphology and elemental analysis were conducted using Electron microscope Zeiss, Zeiss, Germany is used for analysis of morphology of the synthesized NPs. The Raman spectra of the samples were recorded at room temperature using a spectrometer Confotec MR350 ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $P = 3.0 \text{ mW}$). FTIR spectroscopy analysis was performed at room temperature using an IR Affinity-1 (Shimadzu, Japan) by measuring the transmittance spectra of the samples. Temperature dependences of the specific magnetization of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs were obtained within 80–800 K temperature range in 0.86 T magnetic field using a ponderomotive method. The magnetization loops for the samples were measured at room temperature using a vibrating sample magnetometer (VSM, PPMS Cryogenic Ltd).

3. Results and discussion

3.1. X-ray diffraction

Figure 1 presents the X-ray diffraction (XRD) results of Sample 1 and Sample 2, synthesized using both methods. The diffraction patterns were compared with the reference XRD data of strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) from the JCPDS database, which corresponds to a hexagonal magnetoplumbite crystal structure with space group $P6_3/mmc$ (JCPDS card No. 33-1340). "As can be seen in Figure 1, the main difference between the graphs lies in the intensity of the two most representative peaks: (107) ($2\theta = 32.48^\circ$) and (114) ($2\theta = 34.33^\circ$) [20]. According to the literature [24], the observed differences in peak intensities may be attributed to local variations in the $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ molar ratio, as well as to the synthesis method itself. These factors can cause distortions in the tetrahedral, octahedral, and trigonal bipyramidal interstitial sites within the hexaferrite crystal structure. Such distortions can alter the packing density of the crystal lattice, leading to slight structural variations. This hypothesis is supported by the results of the structural and magnetic characterizations.

Peaks of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ are also observed in the XRD pattern of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs. The main characteristic peaks of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ are known to be at 33.2° and 35.6°, corresponding to the (104) and (110) Muller indexes [23,24]. The peak at 33.2° has a lower intensity compared to the very intense peaks of the $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs. There is no peak observed at 35.6°, but there is a peak at 35.77°, which is identical to (108) and is related to the $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs [20,25].

Although the XRD pattern of sample 2 (Fig. 1b) closely resembles that of sample 1 in terms of peak positions, notable differences in the intensity of the diffraction peaks are observed. This variation in peak intensity suggests differences in phase composition between the two samples. A comparative analysis of the XRD data indicates that the sample synthesized via the first method contains a relatively lower amount of the $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ phase than the sample prepared using the second method.

Several mechanisms may account for this observation. One plausible explanation is that during the wet chemical synthesis of SrFe₁₂O₁₉, Sr ions are partially lost during the thermal decomposition stage, resulting in an excess of Fe ions. These surplus Fe²⁺ ions can subsequently lead to the formation of the secondary α-Fe₂O₃ phase [2].

Furthermore, due to the variability of chemical synthesis methods, it is likely that the samples contain α-Fe₂O₃ phases in different concentrations. The subsequent sections of this manuscript will provide a detailed analysis of these variations. According to the peaks recorded on the XRD patterns, the crystallite size of SrFe₁₂O₁₉ NPs were calculated by using Scherrer equation:

$$D = 0.9 \lambda \beta \cdot \cos \theta \quad (1)$$

where, D is the average crystallite size, λ is the wavelength of the X-ray source (Cu Kα, 1.54 Å), β is the integral breadth of the diffraction peak, which was calculated from the full width at half maximum of the diffraction peak, and θ is the Bragg's diffraction angle. For comparison, the Williamson–Hall method was also used for this purpose [26]. The term (β cos θ) was plotted with respect to (4 sin θ) for the preferred orientation peaks of powder samples. β is the peak width at half-maximum intensity and θ is the peak position. Accordingly, the slope and y-intersect of the fitted line represent strain and particle size, respectively. The plots showed a negative strain for the SrFe₁₂O₁₉ NPs. This strain may be due to the lattice shrinkage that was observed in the calculation of lattice parameters. The results of the analysis for the SrFe₁₂O₁₉ NPs samples are shown in Figure 1 (Inset).

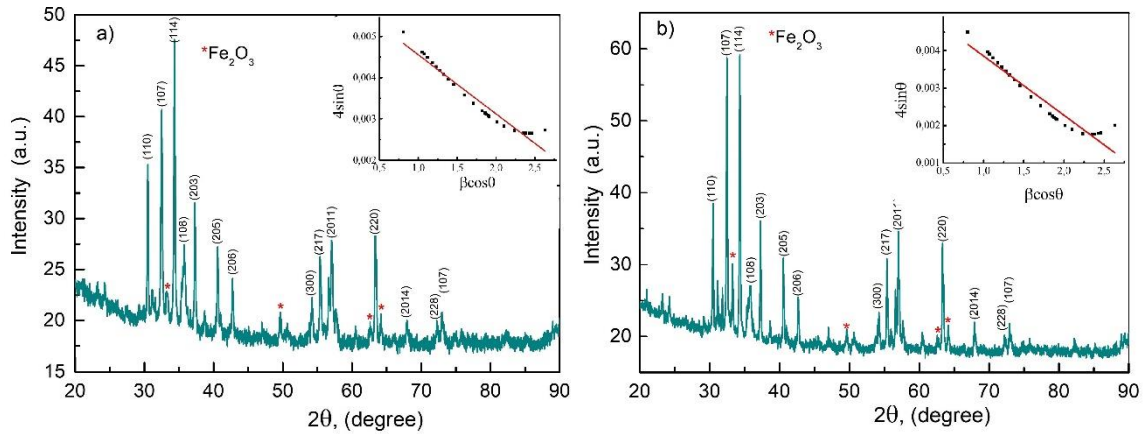


Fig.1. XRD patterns of SrFe₁₂O₁₉ NPs obtained by two different chemical methods: (a) sample 1, (b) sample 2. Inset: The W-H analysis of SrFe₁₂O₁₉ powder samples assuming UDM.

The calculated lattice parameters and the average crystalline size of different SrFe₁₂O₁₉ samples are given in Table 1.

Table 1. Lattice parameters and average crystalline size of SrFe₁₂O₁₉ materials obtained by different synthesis method

	<i>a</i> , nm	<i>c</i> , nm	Crystallite size (by Scherrer eq., (nm))	Crystalline size, <i>D</i> (nm)
Sample 1	5.871	23.004	25	23.15
Sample 2	5.873	22.997	24.83	25.44
JCPDS card, No 33-1340	5.884	23.050	-	-

3.2. FTIR analysis

FTIR spectroscopy is an instrumental analytical method that can be used to identify functional groups and the chemical structure of substances. This technique analyses the infrared spectrum of samples with varying compositions by measuring molecular vibrations, which allows for the precise identification of chemical bonds and functional groups [27–30]. Figure 2 shows the FTIR spectra of Samples 1 and 2 within the wavenumber range of 300–4000 cm^{-1} . Both samples display characteristic peaks at similar positions, suggesting the presence of comparable vibrational modes. The prominent absorption bands observed at 442, 553 and 596 cm^{-1} are attributed to metal–oxygen (M–O) stretching vibrations within the crystal lattice. These vibrations are characteristic of the M-type $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite phase [29]. The band at 596 cm^{-1} corresponds to Fe–O stretching vibrations in tetrahedral sites, while the bands at 553 and 442 cm^{-1} correspond to Fe–O stretching modes in octahedral coordination. Although strontium–oxygen (Sr–O) bonds are present in the structure, their vibrational modes typically appear below 400 cm^{-1} and exhibit low IR activity due to their predominantly ionic nature; thus, they are not distinctly observed in the spectrum. The well-defined nature and positions of these absorption bands confirm the successful formation of the hexagonal ferrite structure.

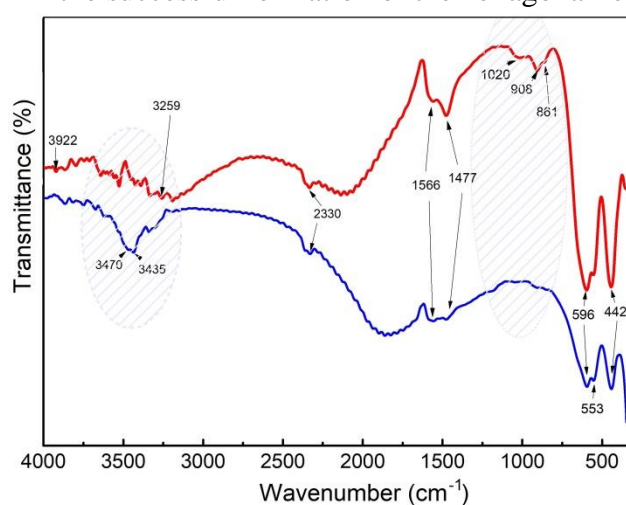


Fig.2. FTIR spectra of Sample 1 (blue curve) and Sample 2 (red curve)

However, sample 2 exhibits additional absorption peaks at 861, 908 and 1020 cm^{-1} . These peaks are indicative of nitrate groups, residual carbonate or metal–OH species and C–O–C stretching vibrations, respectively. The presence of a broad band near 1477 cm^{-1} also suggests the formation of carbonate groups. These features are likely to be associated with the use of carbonate-containing precursors during the synthesis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NPs using the second method (Sample 2). In contrast, sample 1 exhibits relatively intense absorption bands in the 3259–3470 cm^{-1} region, which are absent in sample 2. These peaks correspond to O–H stretching vibrations and may arise from hydroxyl groups (–OH) or adsorbed water molecules.

3.3. SEM analysis

Figure 4 a) and b) indicates the morphologies of the samples synthesised by both methods. As shown in this Figure, the SEM images confirm the clear morphology which is the formation of nanostructured ferrite. It can be seen that the morphology of samples is distributed evenly and present the characteristic of hexagonal platelet and magnetic particles attract each other, it results in agglomeration and overlap between those particles. There are, however, discrepancies. The sample obtained by method 1 (sample 1) exhibits greater uniformity not only in size, but also in morphology.

As can be seen, sample 1 consists of powdery spherical NPs. It can be estimated that the average particle size of samples is approximately within the range of 20 - 30 nm. Sample 2 consists of hexagonal shaped particles of small thickness with a surface area of 1 - 4 μm^2 .

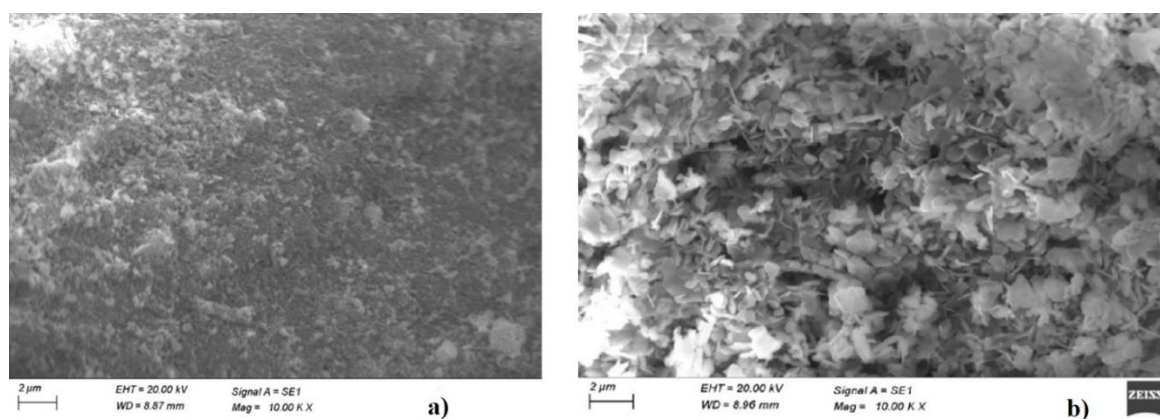


Fig.3. SEM images of the SrFe₁₂O₁₉ NPs: a) sample 1, b) sample 2.

The elemental composition of the SrFe₁₂O₁₉ materials, depending on the conditions of formation, was estimated from measurements of the energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) spectra. A typical energy dispersive spectrum for sample 1 and 2 are shown in Figure 4.

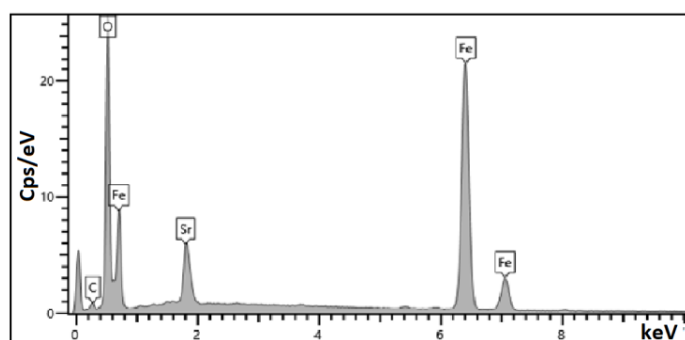


Fig.4. Typical energy dispersive spectrum of the SrFe₁₂O₁₉ NPs.

The EDS spectrum of the samples exhibits signals from Sr, Fe, O and C. Comparing the intensities of the Sr, Fe and O peaks, we can conclude that the content of these elements in the films is close to stoichiometry. The presence of C in the spectrum is associated with the use of a copper grid coated with an amorphous carbon film. A uniform distribution of Sr, Fe and O atoms on the particle surface without local areas with an excess concentration of any element has been established. The chemical composition of the samples was determined by averaging the concentration values from 10 different points on the SrFe₁₂O₁₉ NPs surface (Table 2).

Table 2. Elemental composition of the SrFe₁₂O₁₉ NPs prepared by two methods.

	Sr, at%	Fe, at%	O, at%
Sample 1	3.24	37.36	59.40
Sample 2	3.20	37.83	58.97
Calculation	3.12	37.50	59.38

3.3. Raman spectroscopy

Raman spectroscopy is a method of analysis that allows getting information about the chemical structure, crystallization quality and interaction of the molecules that make up the

substance without changing its chemical composition [11,28-32]. The comparative Raman spectra of both sample 1 and sample 2 at room temperature are shown in Figure 5.

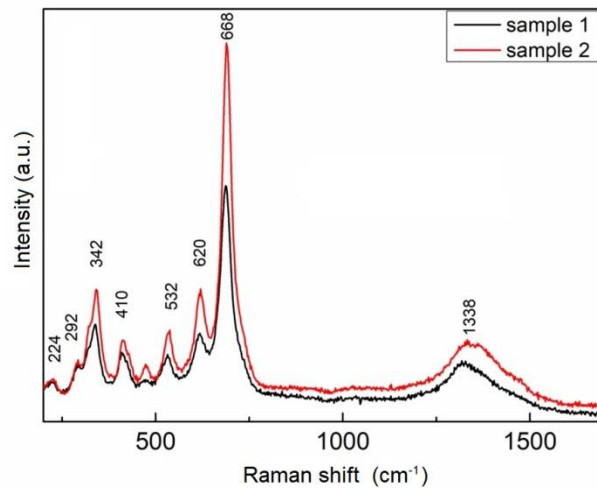


Fig.5. Raman spectra of the SrFe₁₂O₁₉ NPs: sample 1 (black line), sample 2 (red line).

As it can be seen, the crystallization of both samples proceeded well and the 338, 409, 531, 618 and 688 cm⁻¹ modes confirming the formation of SrFe₁₂O₁₉ a hexagonal magnetic plumbite crystal structure with space group P63/mmc are observed [29-32]. Besides, the modes of 224 and 292 cm⁻¹ confirm the formation of the nanocrystalline α -Fe₂O₃ phase that was observed also during X-ray analysis. Analysis of the Raman spectra of both samples, has revealed that the peaks in the spectrum of sample 2 shifted towards the short wavelength region compared to sample 1 (mainly 537 cm⁻¹ and 1333 cm⁻¹). The peak observed at the position of 1319 cm⁻¹ (in sample 2) indicates the formation of amorphous carbon during synthesis by both methods. The signal coming to the detector from sample 2 is larger than that from sample 1.

3.4. Magnetic properties

Magnetic properties are strongly influenced by many factors, including the crystallinity, size, shape, and crystal defects of the material. The Curie temperature is an important parameter for magnetic materials, and it is also affected by the synthesis method, partial substitution of metal cations with other metal ions, and other factors [4,8,12].

Temperature dependences of the specific magnetization of samples were obtained in the temperature range 80–800 K in 8.6 kOe magnetic field using the ponderomotor method (Figure 6).

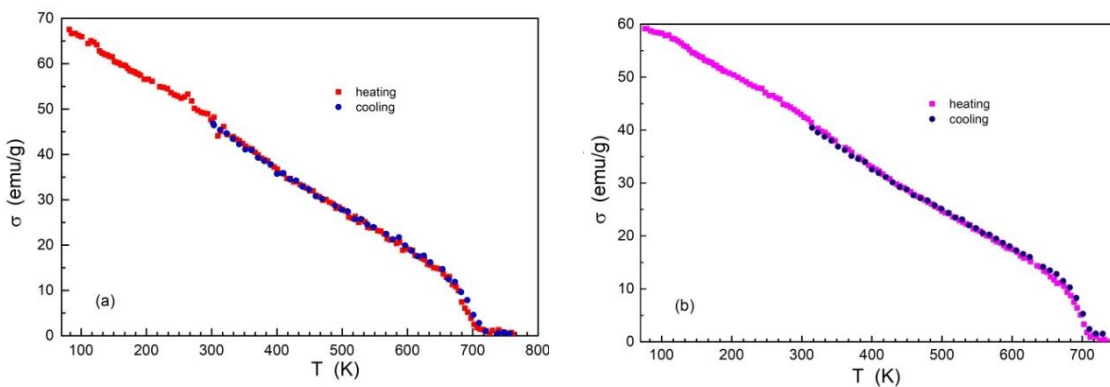


Fig.6. Temperature dependence of the specific magnetization of SrFe₁₂O₁₉ NPs samples.

The specific magnetization value at 80 K is 67.55 emu/g for sample 1 and 59.15 emu/g for sample 2, which is slightly lower than the specific magnetization values of strontium ferrites obtained by other technologies [2,3, 32]. With the rise in temperature, the specific magnetization gradually decreases, and below the Curie temperature it decreases quickly until becomes equal to zero. The Curie temperature is 702 and 706 K for samples 1 and 2, respectively. According to the theory of the spontaneous magnetization process, as the temperature rises, the distance between atoms increases, reducing the effect of exchange interaction. Besides, as a result of the thermal motion law of continuous destruction of the magnetic moment orientation of atom, the saturation intensity of spontaneous magnetization decreases as long as the temperature not exceeds the Curie point. This leads to the destruction of the regular orientation of the magnetic moment of atom, the absence of spontaneous magnetic moment and the transformation of the material from the ferromagnetic phase to the paramagnetic phase.

Figure 7 shows the room-temperature magnetization versus magnetic field, $\sigma(H)$ hysteresis loop measurements with the maximum applied magnetic field of 30 kOe for the nanocrystalline SrFe₁₂O₁₉ materials produced by two methods.

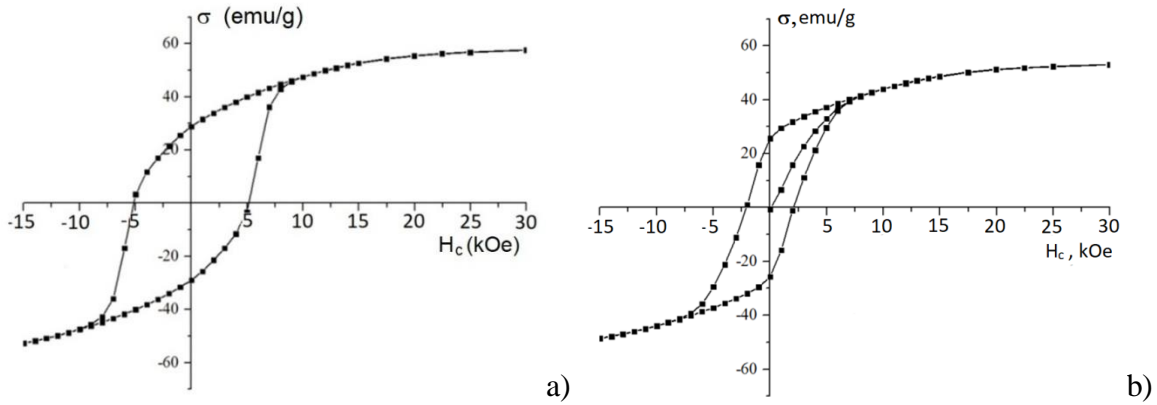


Fig.7. Magnetic hysteresis loops for SrFe₁₂O₁₉ NPs at 300 K: (a) sample 1, (b) sample 2.

All these $\sigma(H)$ curves imply the hard ferromagnetic characteristics features of SrFe₁₂O₁₉ NPs. The saturation magnetization (σ_S), the remanent magnetization (σ_R) and the coercivity (H_C) were determined from the magnetization hysteresis loops at 300 K of the studied SrFe₁₂O₁₉ NPs. It can be seen that the saturation of magnetization is reached at field of about 17 kOe for both samples. The saturation magnetization (σ_S), expressed in Bohr magnetons per formula unit of SrFe₁₂O₁₉, was calculated using the following equation:

$$\sigma_s = \frac{5585}{n_B M}, \quad (1)$$

where M is the molar mass of SrFe₁₂O₁₉ (1061 g/mol); 5585 is a conversion factor based on Avogadro's number and the value of the Bohr magneton, n_B is Bohr magneton number.

Using the values of specific residual magnetization, the residual magnetic moment (nR) expressed in Bohr magnetons was calculated. The calculated values of n_S , n_R and coercivity (H_C), for both samples at 300 K are presented in Table 3. As seen from the table, the coercivity of sample 1 is approximately twice that of sample 2. Given that coercivity depends on factors such as nanoparticle size, structural inhomogeneity, and other microstructural features, it is assumed that the magnetic field required to reach saturation in sample 1 also contributes to its higher coercivity. For the present SrFe₁₂O₁₉ materials, the σ_R/σ_S ratio is ≥ 0.5 , indicating that all samples exhibit single-domain magnetic behavior [1].

Table 3. Magnetic properties of SrFe₁₂O₁₉ NPs samples at 300 K

sample	σ_S , emu/g	n_S , μ_B	σ_R , emu/g	n_R , μ_B	H_C , Oe	σ_R/σ_S
No.1	57.80	10.98	29.43	5.59	5167	0.51
No.2	53.01	10.07	25.74	4.89	2091	0.50

Since nanostructured SrFe₁₂O₁₉ materials are highly sensitive to synthesis parameters, differences in these parameters can directly affect the properties of the final materials. Significant variations are observed in key magnetic parameters, such as saturation magnetization (M_s) and coercivity (H_c), among SrFe₁₂O₁₉ samples synthesized by different methods; however, the σ_R/σ_S ratio remains almost unchanged. Although certain magnetic properties reported in some of the referenced literature are superior, the calcination temperature used in this study is considerably lower. This offers notable advantages in terms of energy efficiency and cost-effectiveness.

5 Conclusions

The present study investigated the influence of processing conditions on the structural and magnetic properties of nano-sized SrFe₁₂O₁₉ powders synthesized via a one-step sol-gel method using two different chemical routes, with either PVP or NaCO₃ acting as a reducing agent. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that samples synthesized using either method crystallized in the hexagonal magnetoplumbite structure (space group P6₃/mmc), with lattice parameters *a* and *c* that were in good agreement with standard JCPDS data. Both XRD and Raman spectroscopy indicated the formation of a predominantly SrFe₁₂O₁₉ phase, with a minor presence of α -Fe₂O₃ observed in both synthesis routes.

Temperature-dependent magnetization studies demonstrated that increasing temperature leads to disruption of magnetic moment alignment, resulting in a transition from ferrimagnetic to paramagnetic at a Curie temperature of approximately 700 K for both samples. Magnetic hysteresis measurements at room temperature revealed that one sample exhibited hard ferromagnetic properties, while the other exhibited soft ferromagnetic properties. This indicates that magnetic behaviour depends strongly on the synthesis method. Notably, using polyvinylpyrrolidone (PVP) as a reducing agent altered the particle morphology and enhanced magnetic performance simultaneously. This resulted in a higher saturation magnetization (57.80 G·cm³·g⁻¹) and coercivity (5167 Oe) than that observed in the sample synthesized using Na₂CO₃. This advantage can be partly attributed to the fact that significantly less α -Fe₂O₃ phase is formed when PVP is used, in contrast to the use of sodium carbonate. Since α -Fe₂O₃ is antiferromagnetic material with weak ferromagnetic behavior at room temperature, its reduced presence contributes to the improved magnetic characteristics of the final product, when PVP is used as a stabilizer rather than sodium carbonate. The more than twofold increase in coercivity suggests that PVP-assisted SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles are promising candidates for applications requiring thermally stable, robust hard magnetic materials.

1. Molaei M.J., Ataie A., Raygan S., Rahimpour M.R., Picken S.J., Tichelaar F.D., Legarra E., Plazaola F., Magnetic property enhancement and characterization of nano-structured barium ferrite by mechano-thermal treatment, *Materials Characterization*, 63 (2012) , 83-89,5803, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.004>.
2. Pullar R.C., Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, *Prog. Mater. Sci.* 57(7) (2012), 1191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>.
3. Kumar M.R., Yu Z.J. and Pan Q. Large scale production of SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles with low calcination temperature, *Mater. Res. Express.* 4 (2017), 095007. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8820>.
4. Kumar A., Singh R.K., Satyapal H.K., Kumar A., Sharma S. Lattice strain mediated structural and magnetic properties enhancement of strontium hexaferrite nanomaterials through controlled annealing, *Physica B: Condensed Matter*, Volume 600 (2021) 412592, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412592>.

5. Liu R., Wu D., Yu X., Zhou N., Liu D., Wang L., Xu Z., Gong H., Zhao T. Improved magnetic properties of self-composite SrFe₁₂O₁₉ powder prepared by Fe₃O₄ nanoparticles Sun, Fengxia Hu, Baogen Shen. *Arabian Journal of Chemistry*, 15 (2022), 9, 104071, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104071>.
6. Qiang G., Jin Y., Lu X., Cui X., Deng D., Kang B., Yang W Temperature effect on the magnetic property and ferroelectricity in hexaferrite SrFe₁₂O₁₉, *Appl. Phys.* 122 (2016), 681 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0221-6>.
7. Singh, V., Jasrotia, R., Kumar, R., Raizada, P., Thakur, S., Batoo, K. and Singh, M. A. Current Review on the Synthesis and Magnetic Properties of M-Type Hexaferrites, *Material. World Journal of Condensed Matter Physics.* 8 (2018), 36. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2018.8200>.
8. Rahman L.Md., Rahman S., Biswas M., Ahmed F. et al., Investigation of structural, morphological and magnetic properties of nanostructured strontium hexaferrite through co-precipitation technique: Impacts of annealing temperature and Fe/Sr ratio, *Heliyon* 9 (3) (2023), e14532 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14532>.
9. Wu, Z., Song, Y., Zhang, R., Shan, L., Dong, L., & Zhang, X. Crystal structure and magnetic properties of Gd–Cu substituted M-type Sr hexaferrites synthesized by the co-precipitation method, *Ferroelectrics.* 546 (1), 48 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1592456>.
10. Kiani E., Rozatian A.S.H., Yousefi M.H. Synthesis and characterization of SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles produced by a low-temperature solid-state reaction method, *J Mater Sci: Mater Electron.* 24, (2013) 2485 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1122-5>.
11. Chakradhary V.K., Akhtar M.J., Highly coercive strontium hexaferrite nanodisks for microwave absorption and other industrial applications. *Compos. Part B Eng.* 183, (2020) 107667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107667>.
12. Frederik Holm Gjørup, Matilde Saura-Múzquiz, Jakob Voldum Ahlburg, Henrik Lyder Andersen, Mogens Christensen, Coercivity enhancement of strontium hexaferrite nanocrystallites through morphology controlled annealing, *Materialia*, 4, 2018, 203-210, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.09.017>.
13. İkeland A.Z., Hölscher J. and Christensen M. Hydrothermal synthesis of SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles: effect of the choice of base and base concentration, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 54, (2021)134004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abd2ec>.
14. Baykal A. · Toprak M.S. · Durmus Z. · Sozeri H. Hydrothermal Synthesis of SrFe₁₂O₁₉ and Its Characterization *J Supercond Nov Magn* (2012) 25:2081–2085 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1587-0>.
15. Malick Jean, Virginie Nachbaur, Julien Bran, Jean-Marie Le Breton, Synthesis and characterization of SrFe₁₂O₁₉ powder obtained by hydrothermal process, *Journal of Alloys and Compounds* 496 (2010), 1–2, 306–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.02.002>.
16. Brito P.C.A., Gomes R.F., Duque J.G.S., Macêdo M.A. SrFe₁₂O₁₉ prepared by the proteic sol–gel process, *Physica B: Condensed Matter*, 384(1–2) (2006) 91-93, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.159>.
17. Lia J., Zhang H.-F., Shao G.-Q., Chen D., Zhao G.-G., Gao Z.-S., Liu J.-H., Lu J.-S., Li X.-B. Synthesis and properties of new multifunctional hexaferrite powders. *Procedia Engineering* 102 (2015) 1885 – 1889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.327>.
18. Zhanyong, W., Liuming, Z., Jieli, L., Huichun, Q., Yuli, Z., Yongzheng, F. Microwave-assisted synthesis of SrFe₁₂O₁₉ hexaferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(18) (2010), 2782 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.04.027>.
19. Garc'ia-Cerda L.A., Rodr'iguez-Fernández O.S., Reséndiz-Hernández P.J. Study of SrFe₁₂O₁₉ synthesized by the sol–gel method. *Journal of Alloys and Compounds* 369 (2004) 182–184 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.09.099>.
20. Roohani E., R. H.A., Sarhaddi, Sudkhah S. and Shabani A. Effect of annealing temperature on structural and magnetic properties of strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by sol gel auto-combustion method, *International Journal of Modern Physics B* 29, (2015) , DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217979215501908>.

21. Godara S.K., Singh M., Kaur V., Narang S.B., Ahmed J., Sood A.K., Effect of calcium solubility on structural, microstructure and magnetic properties of SrFe₁₂O₁₉, *Physica B: Condensed Matter*, 628 (2022) 413560, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413560>.
22. Palomino-Resendiz R.L., Castañeda-Ovando A., Conde-Gallardo A., Palomino-Resendiz S.I., Jaguey-Hernández Y., Tapia-Ignacio C., Thermal analysis and Magnetic characterization of M-type SrFe₁₂O₁₉ nanodisks, *Materialia*, Volume 39, 2025, 102352, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102352>.
23. Guluzade S.A., Musayeva N.N., Modulating the electrical properties of hematite nanostructures with functionalized carbon nanotubes. *AJP Fizika E XXXI* (2025) 02 en p.17-22. DOI: <https://doi.org/10.70784/azip.1.2025217>.
24. Qayoom, M., Shah, K.A., Pandit, A.H. et al. Dielectric and electrical studies on iron oxide (α -Fe₂O₃) nanoparticles synthesized by modified solution combustion reaction for microwave applications. *J Electroceram* 45, 7–14 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10832-020-00219-2>.
25. Sivakumar, P., Shani, L., Yeshurun, Y. et al. Facile sonochemical preparation and magnetic properties of strontium hexaferrite (SrFe₁₂O₁₉) nanoparticles. *J Mater Sci: Mater Electron* 27, 5707–5714 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4482-9>.
26. Hassanzadeh-Tabrizi S.A., Precise calculation of crystallite size of nanomaterials: A review, *Journal of Alloys and Compounds*. 968, (2023) 171914 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171914>.
27. Rahimli, A., & Musayeva, N. (2025). Tuning optical and structural properties of polystyrene nanocomposites with rutile TiO₂ nanoparticles. *Composite Interfaces*, 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/09276440.2025.2457924>.
28. Gremenok, V.F., Musayeva, N.N., Khalilova, K.K. et al. Microstructure and Optical Characteristics of Nickel Nanoparticles Obtained by One-Step Synthesis Method. *J Appl Spectrosc* 91, (2024) 570–574. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01755-3>.
29. Mohammadi Ziarani, G., Kazemi Asl, Z., Gholamzadeh, P. et al. Sol-gel auto-combustion production of SrFe₁₂O₁₉ magnetic nanoparticles and its application in the synthesis of spirooxindol-quinazolinone derivatives. *J Sol-Gel Sci Technol* 85, (2018) 103–109. <https://doi.org/10.1007/s10971-017-4522-9>.
30. Rahimli A., Huseynova A., Musayeva N., Alekperov R., Jafarov M. Insights into dielectric and thermal properties of polystyrene-zinc oxide nanocomposites: A multifaceted characterization approach. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 38(4) (2024) 1542-1556. DOI: <https://doi.org/10.1177/08927057241274265>.
31. Hilczer, A., Pasińska, K., Markiewicz, E., Pietraszko, A., Andrzejewski, B. Magnetic and dielectric response of Sr_{0.95}Nd_{0.05}Fe_{12-x}Al_xO₁₉ (x = 0.36, 0.60, 0.84 and 1.08) obtained by hydrothermal synthesis. *Ferroelectrics*, 534 (1) (2018), 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1080/00150193.2018.1472957>.
32. Wu Q., Yu Z., Hao H., Chu Y., Xie H. The effect of pH value on strontium hexaferrites: microstructure and magnetic properties, *J Mat. Sci: Materials in Electronics*. 28 (2017), 12768. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7104-2>.
33. Rui Sun, Xin Li, Ailin Xia, Shubing Su, Chuangui Jin. Hexagonal SrFe₁₂O₁₉ ferrite with high saturation magnetization, *Ceramics International*, 44,12 (2018), 13551-13555, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.187>.

**PVP və Na₂CO₃ İSTİFADƏ EDİLƏRƏK SİNTEZ OLUNMUŞ SrFe₁₂O₁₉
NANOHİSSƏCİKLƏRİNİN MAQNİT XÜSUSİYYƏTLƏRİNİN
MÜQAYİSƏLİ TƏDQIQI**

**MUSAYEVA N.N., GREMENOK V.F., XƏLİLOVA N.X., STANÇİK A.V.,
JALUDKEVİÇ A.L., MİNÇUKOVA O.F., BİŞİNSKIY M.V.,
İZZƏTOVA B.M., ƏLİZADƏ M.T.**

Yüksək kristallikliyə malik heksagonal SrFe₁₂O₁₉ nanohissəcikləri sadə, birmərhələli birgə çökdürmə (co-precipitation) üsulu ilə sintez edilmişdir. Stronsium heksaferrit (SrFe₁₂O₁₉)

nanohissəciklərinin alınması üçün iki müxtəlif kimyəvi yanaşmadan istifadə olunmuş və əldə olunan materiallar müqayisəli şəkildə təhlil edilmişdir. 800 °C-də termik işlənən tozların rentgen difraksiya (XRD) nəticələri bütün nümunələrin $P6_3/mmc$ faza qrupu ilə heksagonal magnetoplumbit strukturunda kristallaşdığını təsdiqləmişdir. Nümunələrdə maqnitlənmənin temperatur asılılığı 8.6 kOe xarici maqnit sahəsi altında 80–800 K intervalında öyrənilmişdir. Hər iki nümunə üçün yaxın Kюри temperaturları müəyyən edilmişdir (702 K və 706 K). Lakin polivinilpirrolidon (PVP) istifadə edilərək sintez olunan nümunə, Na_2CO_3 reduksiyaedicidən istifadə ilə alınan nümunə ilə müqayisədə daha yüksək doymuş maqnitlənmə ($57.80 \text{ G} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) və koersitivlik (5167 Oe) göstərmişdir. Nəticələr göstərir ki, sintez zamanı PVP-dən istifadə olunması hissəcik morfolojiyasına və maqnit xassələrinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir. PVP ilə sintez olunmuş nümunənin koersitivliyi Na_2CO_3 əsasında alınmış nümunənin göstəricisini iki dəfədən çox üstələyir və bu da onun stabil və yüksək etibarlı sərt maqnit materialları tələb edən qurğularda tətbiqi üçün perspektivli olduğunu göstərir.

Açar sözlər: Stronsium heksaferrit; nanohissəciklər; PVP; morfolojiya; maqnitlənmə; koersitivlik.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ $SrFe_{12}O_{19}$, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PVP И Na_2CO_3

**МУСАЕВА Н.Н., ГРЕМЕНОК В.Ф., ХАЛИЛОВА Х.Х., СТАНЧИК А.В.,
ЖЕЛУДКЕВИЧ А.Л., МИНЧУКОВА О.Ф., БУШИНСКИЙ М.Б.,
ИЗЗАТОВ Б.М., АЛИЗАДА М.Т.**

Высококristаллические гексагональные наночастицы $SrFe_{12}O_{19}$ были синтезированы с использованием простого одностадийного метода совместного осаждения. Для получения наночастиц стронциевого гексаферрита ($SrFe_{12}O_{19}$) были применены два различных химических подхода, а полученные материалы были сравнительно проанализированы. Дифрактограммы рентгеновской дифракции (XRD) порошков, прокалённых при 800 °C, подтвердили, что все образцы кристаллизуются в гексагональной структуре магнетоплюмбита с пространственной группой $P6_3/mmc$. Температурная зависимость намагниченности образцов исследовалась в диапазоне 80–800 K при внешнем магнитном поле 8.6 kOe. Оба образца показали близкие температуры Кюри (702 K и 706 K). Однако образец, синтезированный с использованием поливинилпирролидона (PVP), продемонстрировал значительно более высокую намагниченность насыщения ($57.80 \text{ G} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) и коэрцитивность (5167 Oe) по сравнению с образцом, полученным с использованием Na_2CO_3 в качестве восстановителя. Эти результаты свидетельствуют о том, что применение PVP в ходе синтеза существенно влияет как на морфологию частиц, так и на их магнитные свойства. Коэрцитивность образца, полученного с PVP, более чем в два раза превышает значение для образца на основе Na_2CO_3 , что подчёркивает его перспективность для применения в устройствах, требующих стабильных и высоконадёжных жёстких магнитных материалов.

Ключевые слова: стронциевый гексаферрит; наночастицы; PVP; морфология; намагниченность; коэрцитивность.

DOI:10.70784/azip.5.2025486

ZnO VARİSTORLARININ FİZİKİ VƏ ELEKTRİK XÜSUSİYYƏTLƏRİNİN TƏHLİLİ¹ƏHƏDZADƏ Ş.M., ^{1,2}NURUBƏYLİ T. K., ³IMANOVA A.Y.¹*Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutu,
ahadzade79@mail.ru*²*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti,
omartarana@gmail.com*³*Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası,
almaz.imanova@asco.az*

Məqalədə ZnO varistorlarının fiziki və elektrik xüsusiyyətləri geniş təhlil olunmuşdur. Tədqiqat zamanı müəyyən edilmişdir ki, varistorların etibarlılığı və uzunömürlülüüyü texnoloji nəzarətin keyfiyyətindən, sintez prosesinin sabitliyindən, aşqaralama balansından və mikrostrukturun homogenliyindən asılıdır. ZnO varistorlarının qeyri-xətti elektrik xassələri onların dənəcik sərhədlərində formalaşan baryer təbəqələri ilə izah olunur. Həmçinin, polimer əsaslı nazik təbəqəli kompozit varistorların alınma texnologiyası, onların aşağı temperaturu sintezi, kiçik ölçüləri və parametrlərinin asan tənzimlənməsi baxımından üstünlükləri göstərilmişdir.

Açar sözlər: ZnO, varistor, kompozit, mikrostruktur, metal oksid varistor, ani gərginlik, fiziki və elektrik xassələri.

Metal oksid varistorları, əsasən ZnO (sink oksid) əsaslı keramik yarımkeçirici cihazlardır və onların gərginlik-cərəyan xüsusiyyətləri çox güclü qeyri-xətti xüsusiyyətlərə malikdir. Son illərdə ərzində bu varistorlar elektron, elektrik və enerji paylama sistemlərini ildırım impulsarı və ya keçid gərginlikləri kimi zərərli yüksək gərginliklərdən qorumaq üçün ən çox istifadə olunan vasitələrdən birinə çevrilmişdir. Varistorlar keramik sintez üsulu ilə hazırlanır. Burada quruluş əsasən keçirici ZnO dənəciklərindən və onların ətrafında olan nazik izolyasiyaedici baryerlərdən ibarətdir. ZnO varistorlarının əsas məqsədi dövrəni artıq gərginlikdən qorumaqdır. Bununla belə, bu material aktiv dövrə elementi kimi də geniş istifadə olunur. Gərginlikdən qoruma həm elektron dövrlər, həm də enerji paylama və ötürmə sənayesi üçün çox vacibdir. Məsələn, aşağı qiymətli və yüksək etibarlı yarımkeçirici komponentlərdən ibarət olan dövrlər əsasən 120 voltlu dəyişən cərəyan xətləri üçün nəzərdə tutulur. Lakin belə komponentlərin enerji sistemində yaranan ani yüksək gərginliklərə davam gətirə bilməyəcəyi hallar da istisna deyildir. Varistorların iş prinsipi, tətbiq olunan gərginliyin müəyyən həddi aşdıqda keçiricilik qabiliyyətinin kəskin şəkildə artması ilə izah olunur. Bu qeyri-xətti keçiricilik xüsusiyyəti varistorlara həm aşağı gərginlikli elektron qurğularda, həm də yüksək gərginlikli enerji sistemlərində effektiv qoruma funksiyası yerinə yetirməyə imkan verir. Varistorların istifadəsi elektrik və elektron sistemlərinin istismar etibarlılığını artırır və potensial nasazlıqların qarşısını alır[1].

Təqdim olunan işin əsas məqsədi ZnO varistorlarının mikrostruktur asılılığı və elektrik xüsusiyyətlərinin təhlilidir.

Bu problemin miqyasını daha yaxşı başa düşmək üçün cədvəl 1-də verilmiş məlumatlara baxaq.

Bu cədvəl, müxtəlif şəhər və kənd yerlərində aparılmış sorğu nəticəsində toplanmış ani gərginlik yüksəlişlərinin məlumatlarını təqdim edir. Bu məlumatlara əsasən gündə bir neçə dəfə 1000 volt və daha yüksək gərginliklər baş verir. Bu cür yüksək gərginliklər əsasən keçid impulsarı və ya ildırım fırtınaları zamanı yaranır və qorunmayan yarımkeçirici komponentlərə ciddi zərər verə bilər. Buna görə də məhsulların etibarlılığı üçün belə ani yüksək gərginliklərə qarşı qorunma təmin olunmalıdır.

Ani gərginlik sıçrayışları

Yerləşmə nömrəsi	Ən çox rast gəlinən gərginlik zirvəsi (V)	Davamətmə müddəti (µs və ya dövr)	Saatda orta gərginlik sayı	Pik gərginlik (V)	Ən güclü gərginlik davamətməsi (µs və ya dövr)
1	300	10 µsan	0.07	700	10 µsan
2	500	20 µsan	0.14	750	20 µsan
3	300	1 dövr	0.05	600	1 dövr
4	300	2 dövr	0.2	400	2 dövr
5	250	1 dövr	0.01	400	1 dövr
6	800	1 dövr	0.03	1800	1 dövr
7	300	10 µsan	0.1	1200	4 dövr
8	1500	1 dövr	0.2	1500	1 dövr
9	2000	1 dövr	0.4	2500	1 dövr
10	1500	1 dövr	0.15	1500	1 dövr
11	1400	1 dövr	0.06	1700	1 dövr
12	600	3 dövr s	0.05	800	3 dövr
13	200	15 µsan	0.1	400	30 µsan
14	1000	4 dövr	0.1	5600	1 dövr

Məlum olduğu kimi, ZnO varistorları, “metal oksid varistor” adı ilə də tanınır və ilk dəfə Yaponiyada hazırlanmışdır. 1970-ci illərin əvvəllərində ABŞ-da GE-MOV ticarət adı ilə sənaye və istehlak avadanlıqlarının 1000 voltndan aşağı gərginliklərdə qorunması üçün təqdim edilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, ZnO keramika materiallarının qeyri-xətti elektrik xüsusiyyətləri üzərində ilk tədqiqatlar 1950-ci illərin sonlarında Rusiyada aparılmışdır, lakin bu materialların tətbiq imkanları Yaponiya tədqiqatçısı Matsuoka və onun həmkarları tərəfindən təxminən on il sonra kəşf olunmuşdur. Bundan sonra ZnO varistor materiallarının inkişafı və tətbiqi üzərində intensiv işlər aparılmış və bu materiallar ani gərginliklərdən qoruyucu cihaz kimi geniş istifadə edilməyə başlanmışdır[2].

Hal-hazırda ZnO əsaslı varistorlar yüksək gərginliklər texnikasında müxtəlif səbəbdən yaranan gərginlik (cərəyan) artımlarının məhdudlaşdırılmasında geniş tətbiq olunur. ZnO əsasında elementlərin volt-ampere xarakteristikasının qeyri-xəttiliyi (β) 50-70 intervalında dəyişir. Belə yüksək qeyri-xəttilik ZnO varistorlarını digər yarımkeçiricilərlə müqayisədə əvəzsiz edir.

ZnO varistorları ardıcıl-paralel bağlanır və dielektrik örtüyə yerləşdirilir. Varistorların tətbiqi zamanı əhəmiyyət kəsb edən amillərdən biri də onların parametrlərinin stabilliyidir. Bu məqsədlə varistorların elektrotermiki köhnəlməsi aparılır: elektrik sahəsinin təsiri şəraitində varistorlar 403-423 K-ə qədər qızdırılır, sonra isə otaq temperaturuna qədər soyudulur.

Bu texnoloji əməliyyat varistorun açılma gərginliyinin (U_{op}), qeyri-xəttilik əmsalının (β) və açılma gərginliyinə qədər müqavimətinin (ρ) stabilləşməsinə kimi təkrar olunur. Varistorların parametrlərinin stabil qalması üçün onların nəmlikdən qorunması vacib şərtidir. Varistorların hazırlanmasının son əməliyyatı onların səthinə elektrodların çəkilməsidir. Bu əməliyyat belə aparılır: elementlərin səthi kimyəvi təmizlənir, səthinə gümüş pastadan elektrodlar çəkilir və bişirilir. Elektrodları ətraf mühətdən mühafizə etmək üçün onların səthi laklanır. Onun qadağan zonasının eni digər yarımkeçiricilərdən, məsələn SiC-nin uyğun parametrlərindən böyükdür. Ona görə də aşqarlanmamış ilkin ZnO-nun açılma gərginliyindən sonrakı müqaviməti daha böyük olduğu üçün onun qeyri-xəttilik əmsalı kiçik olmalıdır. Lakin qadağan zonasının eninin böyüklüyünə baxmayaraq bişmə prosesində oksigen çatışmazlığına görə ZnO-nun stexiometriyası təhrif olunur və ona görə də n tip yarımkeçiriciliyə malik olur. ZnO-nun kristallitləri arasında varistor effektinin formalaşmasını təmin edən çox nazik izoləedicilərin oblast yaranır. En kəsinin sahəsi 1sm^2 olan ZnO varistoru amplitudu bir neçə kA olan cərəyan impulslarına davam gətirir və yüksək gərginlik sıçrayışlarını işçi gərginliyə qədər aşağı sala bilir[3].

Bütün keramika materiallarında olduğu kimi, ZnO varistorlarının da mikrostrukturasının nizamsız olacağı gözləniləndir. Əgər, bütün dənəciklərin sərhədləri həm elektrik baxımından həm də bütün dənəciklər ölçü və forma etibarilə tam eyni olsaydı, o zaman varistorun ümumi elektrik xarakteristikası tək bir dənəcik sərhədinin xarakteristikası ilə eyni olardı[4,5]. Lakin realıqda keramika mikrostrukturunda kiçik pozuntular- məsələn, müxtəlif paralel cərəyan yollarında olan dənəcik sərhədlərinin sayındakı fərqlər varistorun elektrod səthləri boyunca cərəyanın ciddi şəkildə dəyişməsinə səbəb ola bilər. Lakin qeyd etmək lazımdır ki, ZnO varistorunun volt-ampere xarakteristikası ilə onun mikrostrukturunu arasındakı əlaqə, həm dənəciyin sərhədinin, həm də elektrik xüsusiyyətlərini tənzimləməyə imkan verən mühüm vasitədir. Bu, konkret tətbiq üçün optimal parametrlərin seçilməsini təmin edir.

Son illərdə ZnO əsaslı nazik təbəqəli kompozit varistorların tətbiqinə də çox yer verilir [6]. Polimer əsaslı nazik təbəqəli kompozit varistorların alınma texnologiyasının sadəliyindən başqa, bəzi istisna parametrlərinə görə də üstün cəhətlərə malikdir. Polimer matrisasının kristallaşmasının temperatur-zaman asılılığını dəyişməklə kompozit varistorların xassələrini və parametrlərini sabitliyini nizamlamaq olar. Keramik fazaya aşqarlar əlavə etməklə polimer əsaslı kompozitlərin səthinin aktivliyini, həmçinin volt-ampere xarakteristikasının qeyri-xəttilik əmsalı və açılma gərginliyini nəzərəcarpacaq dərəcədə dəyişmək mümkündür. Qeyd etmək ki, polimer əsaslı nazik təbəqəli kompozit varistorların alınma texnologiyasının aşağı temperaturluğu, çəki və həndəsi ölçülərinin çox kiçik olması, qeyri-xəttilik əmsalı və açılma gərginliyinin məqsəduyğun şəkildə variasiyası mühüm praktiki əhəmiyyət daşıyır [7-21].

NƏTİCƏ

İşdə müəyyən olunmuşdur ki, varistorların etibarlılığı və uzunömürlülüyü texnoloji nəzarətin keyfiyyətindən asılıdır. Düzgün aşqarlama balansı, sabit sintez etmə mühiti və mikrostrukturun homogen saxlanması deqradasiya proseslərinin qarşısını əhəmiyyətli dərəcədə ala bilər. Qeyd etmək lazımdır ki, ZnO varistorları və ZnO əsasında hazırlanmış kompozit varistorların xassələri yarımkeçiricilər fizikasının, keramika elminin və elektron cihaz mühəndisliyinin qarşılıqlı kəsişməsində yerləşir. Bu materialların xüsusiyyətlərini dərin anlamaqla, daha etibarlı, yüksək enerjiyə davamlı və sabit qoruma elementləri istehsal etmək mümkündür.

1. Greuter, F. (2021). ZnO Varistors: From Grain Boundaries to Power Applications. In: Oxide Electronics (ed. Asim Ray), pp157-226. Published 2021 John Wiley & Sons Ltd.
2. Wang, J., Liu, Z., Wang, X., & Li, S., Improved electrical properties of TiO₂-doped LiNbO₃ crystals by high-temperature annealing. Journal of the American Ceramic Society, vol. 103, issue 12, pp. 4875-4881, 2020.
3. Yuksel P., Hardal G., Kınacı B. Influence of V₂O₅ and B₂O₃ addition on the sintering behaviour and physical properties of ZnO ceramics. Process. Appl. Ceram. Vol.16, pp. 48–54, 2022.
4. Cao W., Guo Y., Su J., Liu J. Effect of sintering temperature on the microstructural evolution of ZnO varistors. J. Electron. Mater. vol.52, pp.1266–1273, 2023;
5. Kelleher M.C. ZnO varistors-the ideal microstructure and characteristics, and methods investigated and developed to achieve these. In: Haseeb A.S.M.A., editor. Encyclopedia of Materials: Electronics. Volume 3. pp. 392–418, Amsterdam, The Netherlands: 2023.
6. Həşimov A.M., Qurbanov K.B., Həsənli Ş.M., Mehdizadə R.N., Əzizova Ş.M., Bayramov X.B. Nazik təbəqəli kompozit varistorun hazırlanma üsulu//Azərbaycan Respublikası Standartlaşdırma, Metrologiya və Patent üzrə dövlət Agentliyi. İ 2007 0172,6 səh.
7. Ahadzadə Sh.M., Hashimov A.M., Khalilova Sh.G. “Research of the electrical properties of composite varistors based on ZnO-polymer”, IJTPE, 2022, Issue 50, Vol. 4, No.1, pp.166-17.

8. *Ahadzade Sh.M., Hashimov A.M., Nurubeyli T.K.* “Research of the electrical properties of the intercrystallite boundary and mechanisms of conductivity in a ZnO varistor with impurities” // ICTPE-2022, Vol 14, №1, p.50-54.
9. *Əhadzadə Ş.M., İmanova A.Y., Əhadova S.S.* Kompozit varistorlarda fərqli keramik fazaların varistor effektinin tədqiqi //Energetikanın Problemləri, 2022, № 4, səh.17-23.
10. *Ahadzade Sh.M., Hashimov A.M.* “Variation of the main parameters of polar and nonpolar polymers and composite varistors based on ZnO”//ICTPE-2020,12 - 13 October İstanbul, Turkey, p.99-101.
11. *Гасанли Ш.М., Азизова Ш.М., Халилов Дж.Дж., Харирчи Ф.* «Спектроскопия диэлектрических параметров варисторов на основе ZnO» //Электронная Обработка Материалов, 2012, том 48, №1, с. 58-62.
12. *Гашимов А.М., Гасанли Ш.М., Мехтизаде Р.Н., Азизова Ш.М., Байрамов Х.Б.* Нелинейный резистор на основе композиции полимер-керамика // Журнал технической физики, 2007, том 77, вып.8.с.121.
13. *Ahadzade Sh.M., Hashimov A.M.* “Variation of the main parameters of polar and nonpolar polymers and composite varistors based on ZnO” //ICTPE-2020, 12-13 October, İstanbul, Turkey, p.99-101.
14. *Ahadzade Sh.M., Hashimov A.M., Khalilova Sh.G.* Research of the electrical properties of composite varistors based on ZnO-polymer// The 17th International Conference on “Technical and Physical Problems of Engineering” (ICTPE-2021) Istanbul, Turkey, № 18, p. 86-89.
15. *Ahadzade S.M., Vakulenko I.A., Asgarov K.* Influence factors on electrophysical parameters of composite varistors // Science and Progress of Transport, 2023, № 1 (101), p.29-36.
16. *Ahadzade Sh.M., İmanova A.Y.*, “Varistor Characteristics of Composites Made Based on ZnO and Si Semiconductor Materials”, The 5th International Scientific and Practical Conference “Science and Innovation of Modern World”, Cognum Publishing House, No. 1, pp. 85-95, London, UK, 25-27 January 2023.
17. *Ahadzade Sh.M., Nurubeyli T.K., İmanova A.Y., Hasanova S.I.* Research of the dielectric penetration(ϵ), electrical conductivity (σ) and specific resistance (ρ) of composite varistors based on various ceramics and polymers// International scientific-practical journal ENDLESS LIGHT in SCIENCE, 2023 Almaty, Kazakhstan, pp.1214-1224.
18. *Ahadzade S.M., Nurubeyli T.K., Quliyev E.Z., Sultanli A.N.* Technological and electrophysical parameters of ZnO varistor with impurities // IJTPE, 2023, Issue 55, Volume 15, Number 2, Pages 307-311.
19. *Ahadzade Sh.M., Vakulenko I.A., Askerov Kh.*, “Influence Factors on Electrophysical Parameters of Composite Varistors”, Transport Science and Progress, No. 1 (101), pp.29-36, 2023.
20. *Ahadzadeh Sh.M., Nurubeyli T.K., Asgarov KH.*, “Analysis of the main parameters of ZnO-polymer composites with different thicknesses”, International Journal on Technical and Physical Problem of Engineering (IJTPE), Issue 58, Vol. 16, No.1, pp. 138-143, March 2024.
21. *Ahadzadeh Sh.M., Nurubeyli T.K., Asgarov KH.*, “Analysis of the main parameters of ZnO-polymer composites with different thicknesses”, International Journal on Technical and Physical Problem of Engineering (IJTPE), Issue 61, Vol. 16, No.4, pp. 244-252, December 2024.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ZnO-ВАРИСТОРОВ

АХАДЗАДЕ Ш.М., НУРУБЕЙЛИ Т.К., ИМАНОВА А.Я.

Установлено, что надежность и долговечность варисторов зависят от качества технологического контроля. Правильный баланс легирования, стабильная среда синтеза и поддержание однородной микроструктуры могут существенно предотвратить процессы деградации. Следует отметить, что свойства варисторов на основе ZnO и композитных варисторов, изготовленных с использованием ZnO, находятся на пересечении физики полупроводников, науки о керамике и инженерии электронных устройств. Глубокое понимание характеристик этих материалов позволяет создавать более надёжные, устойчивые к высокой энергии и стабильные защитные элементы.

Ключевые слова: ZnO, варистор, композит, микроструктура, металлооксидный варистор, мгновенное напряжение, физические и электрические свойства.

ANALYSIS OF PHYSICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ZnO VARISTORS

AHADZADE SH.M., NURUBEYLI T.K., IMANOVA A.Y.

It was found that the reliability and longevity of varistors depend on the quality of technological control. The correct doping balance, stable synthesis environment and maintaining a homogeneous microstructure can significantly prevent degradation processes. It should be noted that the properties of ZnO varistors and composite varistors based on ZnO lie at the intersection of semiconductor physics, ceramic science and electronic device engineering. With a deep understanding of the properties of these materials, it is possible to produce more reliable, high-energy-resistant and stable protection elements.

Keywords: ZnO, varistor, composite, microstructure, metal oxide varistor, instantaneous voltage, physical and electrical properties.

DOI:10.70784/azip.5.2025491

TƏKDİVARLI KARBON NANOBORULARIN ELEKTRON QURULUŞUNUN XİRALLIQDAN ASILILIĞI

HƏSƏNOVA X.Ə.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq pr. 20, Az-1010, Bakı, Azərbaycan
Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi, Fizika İnstitutu,
H. Cavid pr.131, Az-1073, Bakı, Azərbaycan
hasanovakhayala.a@gmail.com*

Bu tədqiqatda təkdivarlı karbon nanoboruların (SWCNT) elektron quruluşunun onların xiralıq indekslərindən (n, m) asılılığı funksional sıxlıq nəzəriyyəsi (DFT) çərçivəsində araşdırılmışdır. Qrafen vərəqəsinin müxtəlif istiqamətlərdə bükülməsi nəticəsində yaranan xiralıq, nanoboruların enerji zolağı quruluşuna və keçiricilik xassələrinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Hesablamalar göstərir ki, $(n-m)$ ədədi 3-ə bölündükdə nanoboru metal davranış nümayiş etdirir, bölünmədikdə isə yarımkeçirici xüsusiyyətə malik olur. Bu fərq, qrafen strukturundakı Dirak (K) nöqtələrinin bükülmə istiqamətinə görə kvantlaşdırılmış k -vektorlarla kəsişib-kəsişməməsi ilə izah olunur. DFT analizləri nəticəsində karbon nanoboruların qadağan zolağının eninin həm diametr, həm də xiralıq bucağından asılı olaraq dəyişdiyi müəyyən edilmişdir. Xiralıqdan asılı elektron davranış karbon nanoboruların nanoelektronika və sensor texnologiyalarında istiqamətə nəzarət olunan tətbiqləri üçün fundamental baza yaradır.

Açar sözlər: karbon nanoboru, xiralıq, elektron quruluş, DFT, qadağan zolağı, yarımkeçirici, metal.

Giriş

Karbon nanoborular (CNT) — qrafen vərəqələrinin silindrik formada bükülməsi nəticəsində yaranan birölçülü (1D) nanostrukturlardır və unikal elektron, mexaniki və istilik xüsusiyyətlərinə görə son illərdə geniş elmi maraq doğurur [1,2]. Bu strukturların kəşfi 1991-ci ildə S. Iijima tərəfindən həyata keçirilmiş və o vaxtdan günümüzə qədər karbon nanoborular nanoelektronika, enerji daşıyıcıları, sensor sistemləri və kompozit materialların inkişafında əsas tədqiqat istiqamətlərindən birinə çevrilmişdir [1].

Karbon nanoboruların ən mühüm xüsusiyyətlərindən biri onların elektron quruluşunun xiralıq indekslərindən (n, m) asılı olmasıdır. Xiralıq indeksi, qrafen təbəqəsindəki iki əsas vektor (a_1 və a_2) boyunca sarma istiqamətini müəyyən edir və nəticədə karbon nanoborunun simmetriyasını və elektron davranışını tam şəkildə təyin edir [3,4]. Bu indekslər arasındakı fərq $(n-m)$ borunun yarımkeçirici və ya metal xassə nümayiş etdirib-etdirməyini müəyyən edən əsas parametr hesab olunur. Əgər $(n-m)$ ədədi 3-ə tam bölünürsə, CNT metal, bölünmədikdə isə yarımkeçirici olur [3,5].

Bu qanunauyğunluq, qrafen strukturundakı Dirak (K) nöqtələrinin karbon nanoborunun kvantlaşdırılmış k -vektor xətləri ilə kəsişib-kəsişməməsi ilə izah olunur. Başqa sözlə, bükülmə istiqaməti enerji zolağının formalaşmasına və qadağan zolağının yaranmasına birbaşa təsir göstərir. Qrafenin ikiölçülü metal davranışı boru formasına çevrildikdə kvantlaşdırılmış k -vektorlar yalnız müəyyən istiqamətlərdə icazəlidir. Bu istiqamətlər K nöqtəsindən keçirsə karbon nanoboru metal, keçmirsə yarımkeçirici xüsusiyyətə malik olur [6,7].

Son illərdə funksional sıxlıq nəzəriyyəsi (DFT) kimi hesablama metodlarının inkişafı karbon nanoboruların elektron quruluşunun daha dəqiq modelləşdirilməsinə imkan yaradıb. DFT yanaşması vasitəsilə karbon nanoboruların qadağan zolağının eninin onların diametrinə, xiralıq bucağına və struktur simmetriyasına görə necə dəyişdiyi dəqiqliklə təhlil olunur [8,9]. Bu tip nəzəri tədqiqatlar karbon nanoboru 2 əsaslı tranzistorlar, sensorlar və kvant cihazları kimi tətbiqlərin dizaynında əsas baza rolunu oynayır.

Bu işdə təkdivarlı karbon nanoboruların elektron quruluşu DFT çərçivəsində sistematik şəkildə araşdırılmış, müxtəlif xiralığa malik strukturlar üçün enerji zolağı və hal sıxlığı (DOS)

analizi aparılmışdır. Məqsəd (n, m) indekslərinin elektron keçiricilik davranışına təsirini müəyyənləşdirmək və $(n-m) \bmod 3$ kriteriyasının fiziki əsaslarını nəzəri və hesablama baxımından izah etməkdir.

Nəzəri əsaslar

Qrafen strukturu və Karbon nanoborunun yaranması.

Təkdirarlı karbon nanoboru (SWCNT) qrafen vərəqəsinin müəyyən istiqamətdə silindrik formada bükülməsi ilə yaranır. Qrafen ikiölçülü altıbucaqlı kristal quruluşa malikdir və hər karbon atomu sp^2 hibridləşməsi ilə üç qonşu atomla σ -rabitə əmələ gətirir, dördüncü elektron isə π -orbitalda yerləşir. Elektron hərəkətliliyi əsasən π və π^* zolaqları vasitəsilə təmin olunur. Qrafenin periodikliyi təyin edən əsas vektorlar aşağıdakı kimi ifadə edilir:

$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}), \quad \vec{a}_2 = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3}) \quad (1)$$

Karbon nanoborunun quruluşu xirallıq vektoru ilə təyin olunur:

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad (2)$$

Burada (n) və (m) tam ədədlərdir və borunun xirallıq indekslərini göstərir. Bu vektorun istiqaməti qrafenin hansı istiqamətdə “büküləcəyini” müəyyən edir.

Xirallıq və nanoborunun tipi

Xirallıq vektoru əsasında karbon nanoborular üç əsas qrupa bölünür: Ziqzaq tip nanoborular: $(n, 0)$, Kürsü tip nanoborular: (n, n) , Xiral nanoborular: (n, m) , $(n \neq m, m \neq 0)$
Xirallıq bucağı aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}m}{2n+m} \right) \quad (3)$$

Bu bucaq karbon nanoborunun elektron xüsusiyyətlərini təyin edən əsas parametrlərdən biridir.

Elektron quruluşun xirallıqdan asılılığı

Qrafen strukturunun enerji zolağı Dirak nöqtələrində (K və K') kəsişir və sıfır qadağan zolağına malikdir. Lakin qrafen vərəqəsi boruya çevriləndə, yəni bir istiqamətdə kvantlaşdırılma tətbiq olunanda, yalnız müəyyən k -vektor komponentləri icazəlidir. Bu kvantlaşdırılma şərti aşağıdakı kimi verilir:

$$\vec{C}_h \cdot \vec{k} = 2\pi q, \quad q \in Z \quad (4)$$

Bu o deməkdir ki, yalnız \vec{k} vektorları bu şərti ödəyirsə, enerji səviyyələri mövcuddur. Əgər bu kvantlaşdırılmış xətlərdən biri qrafenin Dirak nöqtəsindən (K) keçərsə, karbon nanoboru metal davranış göstərir; əks halda, Dirak nöqtəsi ilə kəsilmədiyi üçün qadağan zolağı yaranır və karbon nanoboru yarımkəçirici olur.

Nəticə olaraq, metal və yarımkəçirici davranış üçün sadə kriteriya belə formalaşır:

$$(n - m) \bmod 3 = \begin{cases} 0, & \text{metal CNT} \\ \neq 0, & \text{yarımkəçirici CNT} \end{cases}$$

Bu kriteriya ilk dəfə Saito və Dresselhaus tərəfindən analitik şəkildə təsdiqlənmişdir [3].

Qadağan zolağının eninin hesablanması

Yarımkəçirici karbon nanoborular üçün qadağan zolağının eni təqribən belə təyin olunur:

$$E_g \approx \frac{2a\gamma_0}{d_t} |\sin(3\theta)| \quad (5)$$

Burada:

E_g — qadağan zolağının eni, $a=0.142$ nm = 0.142- C-C rabitəsinin uzunluğu, $\gamma_0 \approx 2.7$ eV- π -elektronlarının keçid enerjisi, d_t -nanoborunun diametri, θ -xirallıq bucağıdır.

DFT nəticələri empirik (tight-binding) modellərlə üst-üstə düşür və $(n-m)$ mod 3 kriteriyasını tam şəkildə təsdiqləyir. Qatqısız (pristine) karbon nanoboruların zona struktur qrafikləri göstərir ki, yalnız $(n-m)$ 3-ə bölünənlərdə zolaqlar Fermi səviyyəsini kəsir, digərlərində isə qadağan zolağı yaranır.

- $((n - m))$ 3-ə bölünürsə \rightarrow metal CNT
- $((n - m))$ 3-ə bölünmürsə \rightarrow yarımkeçirici CNT

Bu fundamental qanun karbon nanoboruların elektronika, optoelektronika və sensor texnologiyalarında məqsədli dizaynı üçün nəzəri baza təşkil edir.

Hesablama metodu

Bu tədqiqatda (11,0), (12,0), (13,0) tipli ziqzaq təkdivarlı karbon nanoboruların (SWCNT) elektron xüsusiyyətləri funksional sıxlıq nəzəriyyəsi (DFT) çərçivəsində öyrənilmişdir.

Hesablamalar Atomistix Tool Kit (ATK, versiya 2023.09) proqramında Lokal Sıxlıq Yaxınlaşması (LDA) əsasında aparılmışdır. İon-elektron qarşılıqlı təsirləri Fritz-Haber İnstitutu formalizmi, mübadilə və korelasiya funksionalları isə Perdew-Zunger yanaşması ilə təhlil olunmuşdur. Atomik orbitalların xətti kombinasiyası ilə genişləndirilmiş Kohn-Sham dalğa funksiyaları istifadə edilmişdir. Enerji kəsim dəyərləri təmiz sistemlər üçün 75 Hartree qəbul edilmişdir. Struktur optimizasiyası zamanı qüvvə və gərginlik üçün yaxınlaşma kriteriyaları 0.001 eV/\AA və 0.001 eV/\AA^3 olaraq təyin edilmişdir. Tərs fəzada inteqrasiya $1 \times 1 \times 5$ Monkhorst-Pack k-nöqtə nümunələməsi ilə icra edilmiş, elektron temperaturu 300 K seçilmişdir.

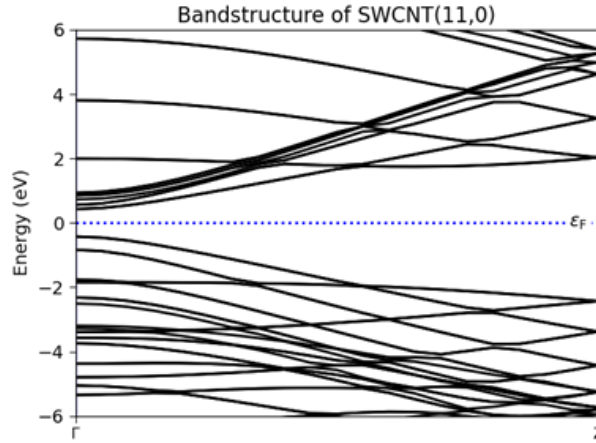
Nəticə və müzakirələr

Bu bölmədə (11,0), (12,0) və (13,0) xirallıq indekslərinə malik təkdivarlı karbon nanoboruların (SWCNT) elektron zona quruluşları funksional sıxlıq nəzəriyyəsi (DFT) əsasında tədqiq edilmişdir. Şəkillərdən (Şəkil 1–3) görüldüyü kimi, nanoborunun elektron davranışı onun xirallıq indekslərindən ciddi şəkildə asılıdır. Şəkil 1-də (11,0) tipli nanoborunun enerji zolağı təsvir olunmuşdur. Görüldüyü kimi, Fermi səviyyəsi (E_F) ilə valent və keçiricilik zonaları arasında müəyyən enerji boşluğu mövcuddur. DFT hesablamaları nəticəsində bu boşluğun eni 0.854 eV olaraq təyin edilmişdir. Bu boşluq nanoborunun yarımkeçirici xassəyə malik olduğunu göstərir. Burada $(n-m) = 11$ olduğu üçün bu dəyər 3-ə bölünmür, yəni $(n-m) \bmod 3 \neq 0$. Nəticə etibarilə, bu nanoboru yarımkeçirici davranış nümayiş etdirir. Şəkil 2-də (12,0) tipli SWCNT-nin zona quruluşu göstərilmişdir. Bu halda enerji zolaqlarından biri birbaşa Fermi səviyyəsini kəsir və qadağan zolağı müşahidə edilmir. Hesablanmış 0.08 eV dəyəri nanoborunun metal və ya çox dar zolaqlı yarımkeçirici xassəyə malik olduğunu göstərir. Bu, nanoboruda elektronların sərbəst hərəkət etdiyini və sistemin metal davranış göstərdiyini təsdiqləyir. Müvafiq olaraq, $(n-m) = 12$ olduğu üçün 3-ə bölünür və bu da $(n-m) \bmod 3 = 0$ kriteriyasına tam uyğundur. Şəkil 3-də (13,0) xirallıq indeksinə malik nanoborunun enerji səviyyələri təsvir edilmişdir. Bu strukturda yenidən Fermi səviyyəsi ilə enerji zolaqları arasında qadağan zolağı müşahidə olunur. DFT hesablamaları nəticəsində bu qadağan zolağının eni 0.71 eV olaraq müəyyən edilmişdir. Bu da nanoborunun yarımkeçirici təbiətə malik olduğunu göstərir. Burada $(n-m) = 13 \rightarrow 3$ -ə bölünmür, nəticədə elektron keçidi üçün enerji tələb olunur. Əldə edilən nəticələrdən görüldüyü kimi, DFT hesablamaları nanoborunun elektron xassələrinin onun xirallıq indekslərinə və $(n-m)$ fərqinə birbaşa bağlı olduğunu açıq şəkildə təsdiqləyir. Yəni,

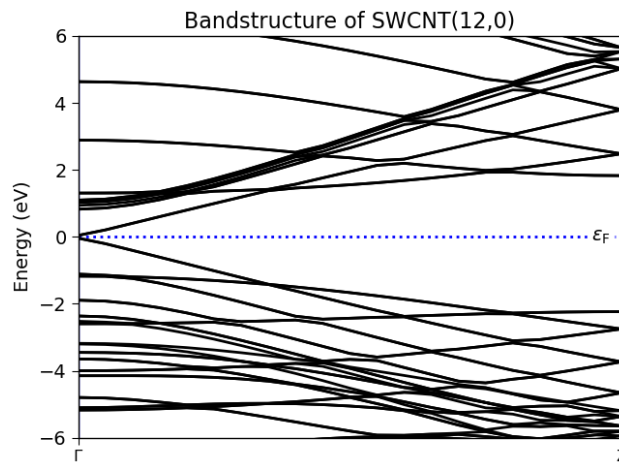
$$(n - m) \bmod 3 = \begin{cases} 0, & \text{metal CNT} \\ \neq 0, & \text{yarımkeçirici CNT} \end{cases}$$

Bu asılılıq qrafen strukturlarında Dirak nöqtələrinin (K və K') nanoborunun kvantlaşdırılmış k -xətləri ilə kəsişib-kəsişməməsi ilə izah olunur. Əgər bu xətlər K nöqtəsindən keçirsə, sistem metal, əks halda yarımkeçirici olur [3,5].

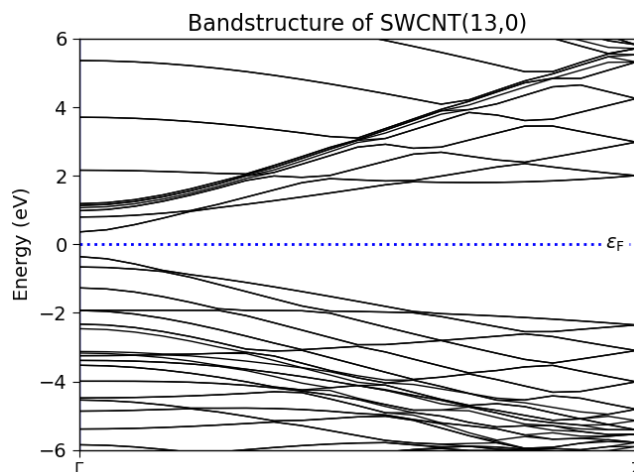
Eyni zamanda, DFT analizləri göstərir ki, nanoborunun diametri artdıqca qadağan zolağının eni azalır və geniş diametrlı CNT-lər metal davranışa daha yaxınlaşır. Bu, nanoboru sistemlərində kvant məhdudlaşdırma effektinin zəifləməsi ilə əlaqədardır. Beləliklə, alınmış nəticələr həm nəzəri modelləri (tight-binding yanaşması), həm də əvvəlki eksperimental müşahidələri [4–6] tam şəkildə dəstəkləyir və təkdivarlı karbon nanoboruların elektron xüsusiyyətlərinin dizaynında xirallığın mühüm rol oynadığını bir daha təsdiqləyir.



Şəkl.1. (11,0) KNB-nun zona quruluşu



Şəkl.2. (12,0) KNB-nun zona quruluşu.



Şəkl.3. (13,0) KNB-nun zona quruluşu.

NƏTİCƏ

Bu tədqiqatda təkdivarlı karbon nanoboruların (SWCNT) elektron quruluşunun onların xiralıq indekslərindən (n,m) asılılığı funksional sıxlıq nəzəriyyəsi (DFT) çərçivəsində sisteməlik şəkildə araşdırılmışdır. Müxtəlif xiralığa malik $((11,0)$, $(12,0)$ və $(13,0)$) nanoborular üçün aparılan hesablamalar nəticəsində əldə olunmuş zona quruluşları, karbon nanoboruların elektron davranışında $(n-m)$ mod 3 kriteriyasının həlledici rol oynadığını aydın şəkildə təsdiqləmişdir.

Hesablamalar göstərmişdir ki, $(11,0)$ və $(13,0)$ nanoborular üçün qadağan zolağının eni müvafiq olaraq 0.854 eV və 0.71 eV olub, bu strukturlar yarımkeçirici xassə nümayiş etdirir. Əksinə, $(12,0)$ nanoboru üçün qadağan zolağının eni 0.08 eV olmuşdur ki, bu da onun metal təbiətini göstərir. Nəticələr, $(n-m)$ ədədi 3-ə bölündükdə karbon nanoborunun metal, bölünmədikdə isə yarımkeçirici xassə göstərdiyini nəzəri və hesablama baxımından sübut edir.

Eyni zamanda, nanoboruların diametrinin artması ilə qadağan zolağının eninin azalması müşahidə olunmuşdur ki, bu da sistemdə kvant məhdudlaşdırma effektinin zəifləməsi ilə əlaqədardır. DFT nəticələri sıx rabitə modelinin analitik proqnozlarını, həm də əvvəlki eksperimental müşahidələri tam şəkildə dəstəkləyir.

Beləliklə, karbon nanoboruların xiralıqdan asılı elektron quruluşunun müəyyənləşdirilməsi, onların nanoelektronika, sensor texnologiyaları və yarımkeçirici cihazların dizaynı sahəsində məqsədlə tətbiqi üçün fundamental elmi baza yaradır.

1. *Iijima, S.* // Nature. 1991. 354(6348), P.56–58.
2. *Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Avouris, P.* //Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications. Springer, 2001.
3. *Saito, R., Dresselhaus, G., & Dresselhaus, M.S.* //Physical Properties of Carbon Nanotubes. Imperial College Press, 1998.
4. *Hamada, N., Sawada, S., & Oshiyama, A.* //Physical Review Letters. 1992. 68(10), P.1579–1581.
5. *Kane, C.L., & Mele, E.J.* //Physical Review Letters. 1997. 78(10), P.1932–1935.
6. *Reich, S., Thomsen, C., & Maultzsch, J.* //Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical Properties. Wiley-VCH, 2004.
7. *Blase, X., Benedict, L.X., Shirley, E.L., & Louie, S.G.* //Physical Review Letters. 1994. 72(12), P.1878–1881.
8. *Zhao, J., Lu, J.P., Han, J., & Yang, C.K.* //Physical Review B. 2004. 70(3), P.035409.
9. *Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K., & Dai, H.* //Nano Letters. 2006.6(1), P.96–100.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ОТ ХИРАЛЬНОСТИ

ГАСАНОВА Х.А.

В данной работе исследована зависимость электронной структуры одностенных углеродных нанотрубок (SWCNT) от их хиральных индексов (n, m) в рамках теории функционала плотности (DFT). Показано, что хиральность, возникающая при сворачивании графенового листа в различных направлениях, существенно влияет на зонную структуру и электропроводящие свойства нанотрубок. Результаты расчётов показывают, что при $(n-m)$, делящемся на 3, нанотрубка проявляет металлическое поведение, а в случае, когда $(n-m)$ не делится на 3, — полупроводниковые свойства. Такое различие объясняется пересечением (или его отсутствием) между квантованными k -векторами свернутого графенового слоя и точками Дирака (K) в первой зоне

Бриллюэна. Анализ в рамках DFT также показал, что ширина запрещённой зоны углеродных нанотрубок изменяется в зависимости от диаметра трубки и хирального угла. Зависимость электронной структуры от хиральности создаёт фундаментальную основу для ориентированного применения углеродных нанотрубок в наноэлектронике и сенсорных технологиях.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, хиральность, электронная структура, DFT, запрещённая зона, полупроводник, металл.

ELECTRONIC STRUCTURE DEPENDENCE OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES ON CHIRALITY

HASANOVA Kh.A.

In this study, the dependence of the electronic structure of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) on their chirality indices (n, m) was investigated within the framework of Density Functional Theory (DFT). The chirality arising from the rolling of a graphene sheet along different directions significantly affects the band structure and conductive properties of carbon nanotubes. The calculations reveal that when the difference ($n-m$) is divisible by 3, the nanotube exhibits metallic behavior, whereas when it is not divisible by 3, it demonstrates semiconducting characteristics. This distinction is explained by the intersection (or lack thereof) between the quantized k -vectors of the rolled graphene sheet and the Dirac (K) points in its Brillouin zone. DFT analysis further indicates that the band gap width of carbon nanotubes varies with both the tube diameter and the chiral angle. The chirality-dependent electronic behavior of SWCNTs provides a fundamental scientific basis for their orientation-controlled applications in nanoelectronics and sensor technologies.

Keywords: carbon nanotube, chirality, electronic structure, DFT, bandgap, semiconductor, metal.

**СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОКРИСТАЛЛИТОВ ZnTe и ZnTe:Cu****МАМЕДОВА С.А.***Бакинский Государственный Университет
tamedovacina89@gmail.com*

Тонкие пленки ZnTe и ZnTe:Cu были получены импульсным лазерным осаждением. Легирование пленок ZnTe с Cu с целью увеличения концентрации носителей р-типа и установления влияния концентрации Cu на структурные, оптические и электрические свойства тонких пленок ZnTe для рассмотрения их потенциального применения в электронных устройствах. Проведены исследования рентгеноструктурного анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, УФ-видимой спектроскопии и эффекта Холла пленок ZnTe и ZnTe:Cu.

Ключевые слова: тонкие пленки, ZnTe, ZnTe:Cu, оптические и электрические свойства.

Теллурид цинка (ZnTe) - полупроводник II-VI группы, который вызвал значительный интерес в последние годы в связи с его применением в оптоэлектронных устройствах. ZnTe относится к р-типу, полупроводник со структурой цинк-обманка, постоянная решетки 6,1037 Å, ширина запрещенной зоны 2,26 эВ при комнатной температуре [1]. Пленки ZnTe могут эффективно использоваться в качестве материалов окон в гетеропереходных солнечных элементах. Тонкие пленки ZnTe использовались в тандемных структурах солнечных элементов, в которых в качестве поглотителя используется CdZnTe, а также для изготовления структур с квантовыми ямами CdZnTe/ZnTe [2].

Исследование легированного ZnTe важно для создания дополнительных устройств (р-типа), гибких панелей [3], тонкопленочных транзисторов (ТФТ) [4], нанопроводов и светодиодов [5]. В связи с его потенциальным применением в устройствах оптоэлектроники было проведено множество исследований по определению структурных, оптических и электрических свойств тонких пленок ZnTe [6]. ZnTe легирован различными элементами с целью улучшения его полупроводниковых свойств, увеличение концентрации носителей и уменьшение удельного сопротивления [7]. Тем не менее сведения о легировании пленок ZnTe медью методом импульсного лазерного осаждения (ИМЛ) в литературе немногочисленны. Метод позволяет точно контролировать толщину слоя, вплоть до атомного уровня, для формирования наноструктур путем последовательного осаждения двух материалов; в данном случае использовались мишени из ZnTe и Cu₂Te. Таким образом, варьируя толщину слоя каждого компонента, можно контролировать количество легирующих примесей в получаемых пленках без учета общей толщины пакета. В данной работе пленки теллурида цинка были легированы Cu методом соосаждения. Кроме того, исследованы структурные, оптические свойства, и приведены результаты электрических характеристик легированных и нелегированных пленок.

Легированные (ZnTe:Cu) и нелегированные (ZnTe) пленки наносились методом PLD. В качестве подложек использовали ИТО стекла. Перед процессом осаждения стекла очищали в ацетон, изопропанол и деионизированной воде под воздействием ультразвука и сушили азотным pistolетом. Для абляции мишеней использовался KrF-лазер с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 20 нс. Для всех напылений скорость лазерного излучения составляла 0,9 Дж/см², частота 6 Гц. Легированные пленки наносились последовательным методом осаждения, состоящим из трех стадий. Первый этап начинался с осаждения тонкого слоя (около 1–2 нм) ZnTe в качестве основного

материала. Второй этап заключался в нанесении слоя легирующего материала Cu толщиной менее 1 нм; и третий этап снова заключался в нанесении тонкого слоя основного материала (ZnTe). Наконец, второй и третий этапы повторялись до тех пор, пока не была достигнута желаемая толщина. Для эффективного контроля толщины очень важно знать скорость осаждения материалов, а для легирования желательны более низкие скорости осаждения, чтобы обеспечить контроль легирования. Количество выстрелов корректировалось в зависимости от скорости нанесения каждой мишени. Соотношение для ZnTe составляло 0,007 нм/выстрел, а для Cu - 0,005 нм/выстрел. Образцы представляли собой нелегированный ZnTe (0) и ZnTe, легированный медью (1, 2, 3, 4), с различным количеством выстрелов за цикл каждого материала для изменения концентрации Cu. Толщина пленок была получена порядка 165–200 нм. С целью диффузии меди в полупроводниковый материал после осаждения легированные образцы подвергались отжигу при 300 °С в атмосфере N₂ в течение 30 мин в печи Thermco MiniBrute. После осаждения и последующей обработки кристаллическую структуру образцов идентифицировали на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima III с Cu K α -излучением ($\lambda=0,15406$ нм). Для всех образцов рентгеноструктурный анализ проводили в диапазоне 20–70 2 θ и константа $\omega=1^\circ$ использовались во избежание влияния подложки на рентгенограммах. Пропускание УФ-Вид оценивали с использованием спектрофотометра Ocean Optics и программного обеспечения Spectra Suite. Измерения, полученные по пропусканию, использовались для расчета энергии запрещенной зоны для каждого образца. Удельное электросопротивление, подвижность, тип и концентрация носителей были получены путем измерения эффекта Холла.

На рис.1 показаны рентгенограммы нелегированного и легированного тонких пленок ZnTe с разной концентрацией Cu. Рентгенограммы на рис. 1а соответствуют осажденным образцам, а на рис. 1б показаны профили отожженных образцов.

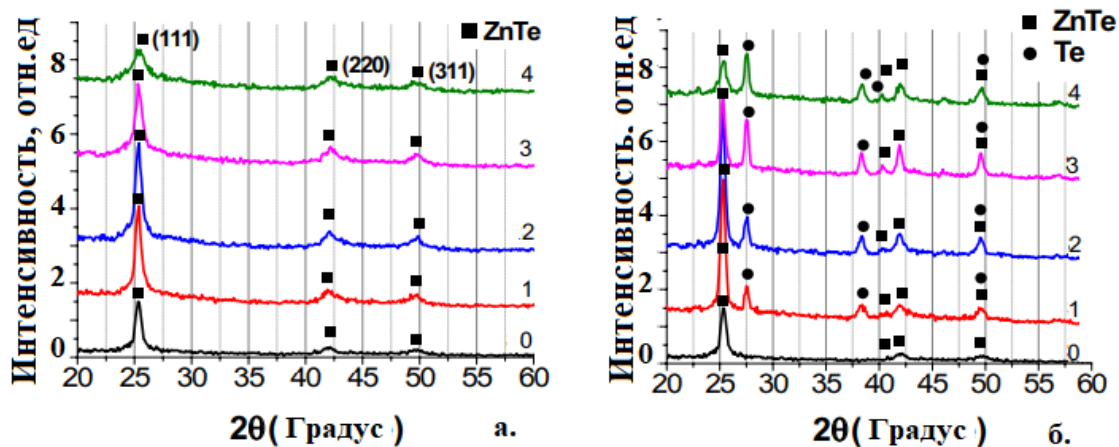


Рис.1. Рентгенограммы, соответствующие осажденным и отожженным пленкам ZnTe. (ат %: 1-0,5, 2-1,3-2,4-4).

На рис. 1а пики, наблюдаемые на рентгенограммах после осаждения образцов, указывают на то, что пленки представляют собой поликристаллические отложения, относящиеся к кубической фазе цинковой обманки (JCPDS № 15-0746, ZnTe, теллурид цинка, поликристаллический, $a=b=c=6,103$ Å, $2\theta=25,226^\circ$) с сильной ориентацией в плоскости (111), расположенной под углом $25,2^\circ$ от 2θ . На рис. 1б появляются пики при $27,56^\circ$, $38,26^\circ$, $40,44^\circ$ и $49,63^\circ$ угла 2θ , что указывает на избыток Te. Все эти результаты согласуются со всеми представленными в ссылке [8].

Из рис. 1а видно, что добавление Cu в ZnTe существенно не влияет на состав пленок ZnTe, следовательно, не появляются вторичные фазы, связанные с Cu. С другой

стороны, легированные образцы при отжиге сохраняют те же пики, что и нелегированные образцы; тем не менее, можно наблюдать большие интенсивности и узкие утечки, связанные с ZnTe. Кроме того, появились новые пики, связанные с Te. Такое поведение можно объяснить процессом диффузии, происходящим во время отжига, когда атомы Cu заменяют атомы Zn, присутствующие в кристаллической решетке, чему способствует эффективный ионный радиус Cu (73 пм), который меньше атомов Zn (75 пм) [9]. Легирование медью изменяет кристаллическую структуру ZnTe. Более того, наличие новых пиков, соответствующих металлическому теллуру, можно объяснить диффузией меди через слой теллурида меди. Теллур остался один; это объясняется пределом избытка или легирования ZnTe.

Полная ширина на полувысоте (FWHM) пиков, наблюдаемых на рентгенограммах для отожженных тонких пленок ZnTe:Cu, уменьшается с увеличением концентрации Cu и показывает, что легирование Cu существенно влияет на степень кристалличности ZnTe. Полуширина обратно пропорциональна размеру кристаллитов и может быть связана с поликристаллической природой пленок [9]. Было определено влияние концентрации Cu на размер кристаллитов в пленках ZnTe, а размеры кристаллитов были рассчитаны по формуле Дебая-Шерера, определяемой следующим образом: где t - диаметр кристаллической частицы, λ - длина волны используемого рентгеновского излучения (1,54 Å, Cu K α 1), B — ширина на полувысоте (радианы), θ — угол рассеяния. Приведенные выше результаты показывают, что легирование медью влияет на кристаллическое качество осажденных пленок ZnTe. Концентрацией можно манипулировать путем правильной регулировки количества лазерных импульсов на мишени легирующей примеси и толщины слоя ZnTe. По данным РФА, атомы Cu замещают позиции Zn в основном материале, что смещается в другую точку решетки, что приводит к расширению кристаллитов. Положение пика (111) смещается в сторону больших углов по мере увеличения содержания Cu, создавая остаточное напряжение, вызванное межзубельным замещением меди и систематического внедрения ионов Cu в узел решетки Zn без изменения его кубической кристаллической структуры.

Оптическое поведение образцов ZnTe определялось методом УФ-ВИД спектроскопия. На рис. 2 представлены спектры пропускания в диапазоне длин волн 300–900 нм. Различное поведение пропускания наблюдалось между легированными образцами с отжигом и без него. Например, на длине волны 900 нм осажденные пленки демонстрируют значения пропускания в диапазоне 60–80%. Обнаружено красное смещение в отожженных образцах.

В пленках ZnTe и ZnTe:Cu значения запрещенной зоны рассчитывали путем построения графика зависимости α^2 от $h\nu$ (энергии фотонов) и экстраполяции линейной части графика на ось $h\nu$. На рис. 3 показано влияние концентрации Cu на значения запрещенной зоны для осажденных и отожженных пленок ZnTe и ZnTe:Cu. Значения запрещенной зоны легированных пленок ZnTe связаны с концентрацией меди и изменяются в диапазоне 2,16–1,96 эВ для отожженных образцов (см. рис. 3). Уменьшение значений запрещенной зоны может быть связано с эффектом сужения запрещенной зоны, который является одним из наиболее важных физических параметров, встречающихся при среднем и высоком легировании, и обычно связывается с появлением примесной зоны, образующейся перекрывающимися примесными состояниями. Это обусловлено увеличением концентрации p -носителей и, как следствие, уменьшением расстояния между электронами зоны проводимости и дырками валентной зоны.

Согласно результатам эффекта Холла, образцы демонстрируют полупроводниковое поведение p -типа. Концентрация носителей для нелегированных пленок ZnTe составляла порядка $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а для легированных пленок ZnTe – от $3,8 \times 10^{18}$ до $1,2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Также замечено, что удельное сопротивление пленки уменьшается в зависимости от концентрации Cu.

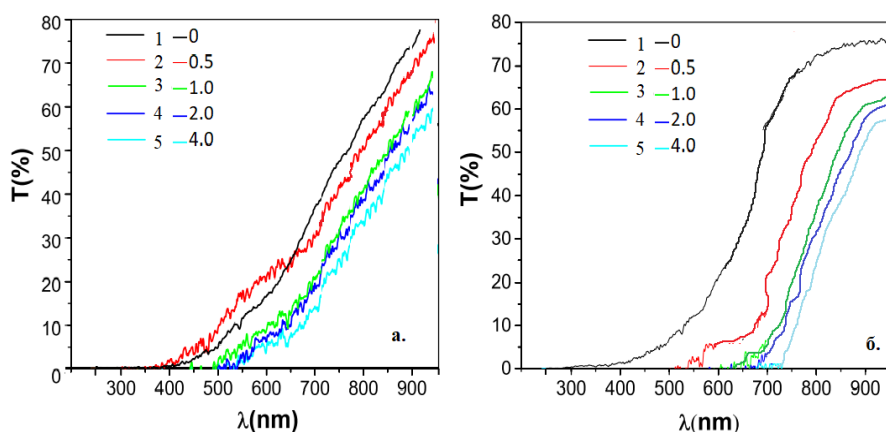


Рис.2. Спектры пропускания легированных (а) и отожженных (б) пленок ZnTe: Cu.

В результате низкая скорость осаждения Cu позволяет лучше контролировать концентрацию носителей, несмотря на изменение количества импульсов за цикл осаждения. На рис. 3б показана зависимость удельного сопротивления от концентрации носителей тока в зависимости от концентрации меди в пленках ZnTe.

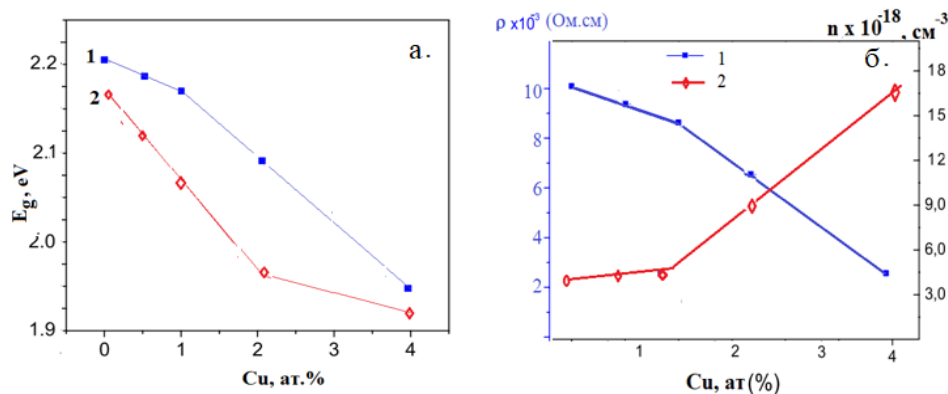


Рис.3. Зависимость запрещенной зоны для осажденных (1) и отожженных (2) пленок ZnTe и ZnTe:Cu (а) и зависимость удельного сопротивления (1) и концентрации носителей тока (2) от содержания меди в пленках ZnTe (б)

По мере увеличения концентрации Cu в пленках ZnTe размер кристаллитов немного увеличивается, как показывают результаты XRD; следовательно, плотность границ кристаллитов уменьшается, и эта характеристика может привести к меньшему накопленному заряду на границах раздела, что приведет к уменьшению сопротивления и удельного сопротивления, главным образом, за счет увеличения концентрации носителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тонкие пленки ZnTe:Cu были успешно получены методом PLD. Структурные, оптические и электрические свойства полученных тонких пленок ZnTe:Cu тесно связаны с составом и последующей обработкой (отжигом). Пленки ZnTe:Cu с отжигом и без него имели кубическую структуру фазы цинк-обманка без пиков примеси Cu. В то же время в отожженных пленках ZnTe:Cu наблюдались новые пики, связанные с избытком Te. Запрещенная зона демонстрировала красное смещение от 2,16 до 1,96 эВ в зависимости от концентрации Cu (от 0,5 до 4 ат.%).

1. *Evanoff D.D., Chumanov G. "Size-controlled synthesis of nanoparticles. 2. Measurement of extinction, scattering, and absorption cross sections," The Journal of Physical Chemistry B, 108 (2004) 13957-13962.*

2. *Noguez C.* "Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment," *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (2007) 3806- 3819.
3. *Herrera G.M., Padilla A.C.* "Surface enhanced Raman scattering (SERS) studies of gold and silver nanoparticles prepared by laser ablation," *Nanomaterials*, 3 (2013) 158-172.
4. *Chen D., Qiao X., Qiu X. J. Chen,* "Synthesis and electrical properties of uniform silver nanoparticles for electronic applications," *Journal of Materials Science*, 44 (2009) 1076-1081.
5. *Naddeo J., Ratti M., O'Malley S.M., Gripenburg J.C., Bubb D.M., Klein E.A,* "Antibacterial Properties of Nanoparticles: A Comparative Review of Chemically Synthesized and Laser-Generated Particles," *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 7 (2015) 1044 – 1057.
6. *Aqili A.K.S., Ali Z., Maqsood A.* Characterization of zinc telluride thin films deposited by two-source technique and postannealed in nitrogen ambient. *J. Cryst. Growth* 317, 47–51 (2011).
7. *Kim D., Park K., Lee S.* Electrochemical synthesis of ZnTe thin films from citrate bath and their electrical properties with incorporation of Cu. *Mater. Chem. Phys.* 179, 10–16 (2016)
8. *Romeo N., Sberveglieri G.* Electrical properties of Sb-doped ZnTe thin films. *Phys. State Solid* 47, 371–374 (1978).
9. *Wu D., Jiang Y., Yao X., Chang Y., Zhang Y., Yu Y., Zhu Z.* Construction of crossed heterojunctions from p-ZnTe and n-CdSe nanoribbons and their photoresponse properties. *J. Mater. Chem. C* 2, 6547–6553 (2014).

ZnTe и ZnTe:Cu NANOKRİSTALLARININ STRUKTUR VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

MƏMMƏDOVA S.A.

ZnTe və ZnTe:Cu nazik təbəqələri impulsu lazer çöküntüsü ilə alınmışdır. Mis (Cu) aşqarının konsentrasiyasının ZnTe nazik təbəqələrinin struktur, optik və elektrik xassələrinə təsirini müəyyən etmək və dəşiklərin konsentrasiyasını artırmaq üçün ZnTe təbəqələri Cu ilə aşqarlanmış, onların elektron cihazlarda potensial tətbiqi imkanları nəzərdən keçirilmişdir. ZnTe və ZnTe:Cu təbəqələrinin rentgen difraksiya analizi, rentgen fotoelektron spektroskopiyası, UB-görünən spektroskopiyası tədqiqatları aparılmış və Holl effekti ölçülmüşdür.

Açar sözlər: nazik təbəqələr, ZnTe, ZnTe:Cu, optik və elektrik xassələr.

STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZnTe AND ZnTe:Cu NANOCRYSTALLITES

MAMEDOVA S.A.

ZnTe and ZnTe:Cu thin films were obtained by pulsed laser deposition. Doping ZnTe films with Cu to increase the concentration of p-type carriers and to determine the effect of Cu concentration on the structural, optical and electrical properties of ZnTe thin films to consider their potential application in electronic devices. X-ray diffraction analysis, X-ray photoelectron spectroscopy, UV-visible spectroscopy and Hall effect studies of ZnTe and ZnTe:Cu films were carried out.

Keywords: Thin films, ZnTe, ZnTe:Cu, optical and electrical properties.

DOI:10.70784/azip.5.20254102

BƏRPA OLUNAN ENERJİ MƏNBƏLƏRİNİN ENERJİ SİSTEMİNƏ İNTEQRASIYASI ZAMANI YARANA BİLƏN PROBLEMLƏR VƏ ONLARIN HƏLLİ YOLLARI

MİRZƏYEVA S.M., HƏSƏNOV A.İ., HEYDƏROV Ə.O.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
sevincmarlen@gmail.com
elekberhydrv@gmail.com
aqil.hasanov.i@asoiu.edu.az

Məqalədə Azərbaycanda bərpa olunan enerjinin hazırkı vəziyyəti müzakirə olunur. Enerji sistemində inteqrasiya zamanı yaranan problemlər nəzərdən keçirilir və onların həlli yolları təklif olunur.

Açar sözlər: Alternativ Enerji Mənbələri, günəş enerjisi, külək enerjisi, hidroenerji, enerji sistemində inteqrasiya problemləri.

Son onilliklərdə dünya birliyi iqlim dəyişikliyi, istixana qazlarının emissiyasının artması və neft, kömür və təbii qaz kimi ənənəvi enerji mənbələrinin tükənməsi problemləri ilə üzləşmişdir. Bu baxımdan, daha davamlı və ekoloji cəhətdən təmiz enerji mənbələrinə keçid zərurəti artır. Bərpa olunan enerji mənbələri (BOEM) bir çox ölkənin enerji strategiyasının əsas faktoruna çevrilmişdir. Onların inkişafı karbo-hidrogen yanacaqlardan asılılığın azalmasına və planetin ekoloji vəziyyətinin yaxşılaşdırılmasına kömək edir [1-4].

Bərpa olunan enerji mənbələri — nisbətən qısa müddət ərzində təbii yolla bərpa olunan resurslardır. Bu mənbələrə günəş enerjisi, külək, su enerjisi, geotermal enerji və bioenerji aiddir. Ənənəvi karbohidrogen yanacaqlarından fərqli olaraq, bunların ehtiyatları məhduddur və bərpa olunan enerji ətraf mühitə əhəmiyyətli zərər vermədən məhdudiyətsiz miqdarda mövcuddur.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin getdikcə daha vacib olmasına səbəb olan bir neçə
amil

var:

1. ekoloji təhlükəsizlik: BOEM-in əsas üstünlüklərindən biri onların ekoloji cəhətdən təmiz olmasıdır. Bərpa olunan enerji mənbələrinin istifadəsi karbon qazı emissiyasının azalmasına, bununla da qlobal istiləşmə prosesinin azalmasına kömək edir;
2. ənənəvi resursların tükənməsi: neft, kömür və qaz ehtiyatları tədricən azalır və uzunmüddətli perspektivdə dünya bu resursların çatışmazlığı ilə üzləşəcəkdir. BOEM gələcəkdə enerji təhlükəsizliyinin əsası ola bilər;
3. iqtisadi fayda: texnologiyaların inkişafı ilə bərpa olunan enerji mənbələrindən enerji istehsalı dəyəri azalır. Uzunmüddətli perspektivdə bu mənbələr karbohidrogen yanacaqlarla müqayisədə daha sərfəli olur;
4. enerji müstəqilliyi: BOEM-in inkişafına investisiya qoyan ölkələr neft-qaz idxalından asılılığı əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər ki, bu da onların iqtisadi və siyasi müstəqilliyini gücləndirir.

Dünya enerji siyasəti getdikcə BOEM-in inkişafına və tətbiqinə yönəlir. Beynəlxalq Enerji Agentliyinin (BEA) proqnozlarına görə, 2040-cı ilə qədər bərpa olunan enerji mənbələrinin qlobal enerji balansındakı payı 30-40%-ə qədər arta bilər. Norveç, İslandiya və Kosta Rika kimi bəzi ölkələrdə BOEM ümumi elektrik enerjisi istehsalının 90%-dən çoxunu təşkil edir. Enerji yığıcı sistemlərinin inkişafı və fotovoltaiq panellərin effektivliyinin

artırılması kimi texnoloji yeniliklər bu prosesi sürətləndirir. Bununla belə, BOEM-in daha da inkişafı üçün siyasi dəstək, investisiyalar və beynəlxalq əməkdaşlıq tələb olunur.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin enerji balansındakı payının artırılması bir çox ölkə və bölgələr üçün vacib strategiyadır. Aşağıda bu prosesin bir neçə əsas aspektinə baxaq: [5]

-ekoloji üstünlüklər: günəş, külək və hidroenerji kimi BOEM-lər, istixana qazlarının emissiyalarını azaltmağa və ətraf mühitin çirklənməsini minimuma endirməyə kömək edir. Bu, iqlim dəyişiklikləri ilə mübarizədə və hava keyfiyyətinin yaxşılaşdırılmasında əhəmiyyətlidir;

-enerji müstəqilliyi: BOEM-lərin inkişafı, karbohidrogen yanacaqların idxalına olan asılılığı azalda bilər, bu da ölkəni dünya bazarındakı qiymət dalğalanmalarına və geopolitik risklərə daha az həssas edir;

- əlavə iş yerlərinin yaradılması: BOEM-lərin payının artması, enerji qurğularının inkişafı, tikintisi və xidmət sahələrində yeni iş yerləri yarada bilər. Bu, xüsusilə iqtisadi çətinliklər yaşayan bölgələr üçün önəmlidir;

-innovasiyalar və texnologiyalar: BOEM sektorunun böyüməsi yeni texnologiyaların və innovasiyaların inkişafına təkan verir ki, bu da istehsal səmərəliliyinin artırılmasına və enerji istehsalının xərclərinin azalmasına səbəb ola bilər;

-dövlət səviyyəsində dəstək: bir çox ölkə, BOEM-lərin inkişafını stimullaşdırmaq üçün vergi güzəştləri, subsidiyalar və BOEM-lərin istifadəsi üçün hədəf kvotaları kimi dəstək siyasətləri və proqramları tətbiq edir;

-inteqrasiya problemləri: BOEM-lərin payının artırılması, infrastrukturun müasirləşdirilməsi, elektrik təchizatının sabitliyinin təmin edilməsi və elektrik enerjisinin keyfiyyətinin idarə edilməsi kimi çağırışlar da yaradır.

Beləliklə, BOEM-lərin payının artırılması dayanıqlı və ekoloji cəhətdən təmiz enerji sisteminə keçidin açar elementidir, lakin yaranan problemlərin həlli üçün kompleks yanaşma tələb edir. Yarana bilən bir neçə problemə nəzər salaq: [6]

-istehsalın proqnozlaşdırıla bilməməsi: BOEM-lər, məsələn, günəş və külək enerjisi, hava şəraitindən asılıdır, bu da onların istehsalını qeyri-sabit və çətin proqnozlaşdırılan edir;

-BOEM-lərin istehsalının dəyişkənliyi səbəbindən sabit enerji təchizatını təmin etmək üçün əlavə gücə ehtiyac olur, bu da enerji sisteminə yük artırır;

-şəbəkənin sabitliyini təmin etmək üçün enerji istehsalı və istehlakını balanslaşdırmaq lazımdır ki, bu da əlavə rezerv mənbələri və ya enerji saxlama sistemləri tələb edə bilər;

-inteqrasiya problemləri: BOEM-lərin mövcud enerji sistemlərinə inteqrasiyası infrastrukturun yenilənməsini və şəbəkələrin daha çevik olmasını tələb edə bilər;

-idarəetmə çətinlikləri: BOEM-lərin payının artması onların dəyişkən istehsalını nəzərə alan daha mürəkkəb idarəetmə sistemlərini tələb edir;

-enerji keyfiyyəti problemləri: BOEM-lər enerji keyfiyyətinin parametrlərinə, məsələn, gərginlik və tezlik kimi təsir göstərə bilər;

Bu problemləri həll etmək üçün enerji saxlama sistemlərindən, ağıllı şəbəkələrin (smart grids) inkişafı və çevik istehsal texnologiyalarından istifadə olunmalıdır.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin (BOEM) işini proqnozlaşdırma problemi onların dəyişkənliyi və proqnozlaşdırıla bilməməsi ilə bağlıdır. Günəş və külək enerjisi cari hava şəraitindən asılıdır və bu şərait qəfil dəyişə bilər. Məsələn, buludluq və ya küləyin istiqamətinin dəyişməsi istehsalı əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər. BOEM-lərin mövsümi dəyişmələri vardır. Məsələn, günəş panelləri yayda qışdan daha çox enerji istehsal edir, külək enerjisi isə ilin dövründən asılı olaraq dəyişə bilər. Qısa müddətli hava dəyişiklikləri də enerji istehsalında kəskin dalğalanmalara səbəb ola bilər. Bu problemlərinin həlli proqnozlaşdırmanın müxtəlif amillərinin (məsələn, hava və istehsal haqqında tarixi məlumatları nəzərə alan mürəkkəb riyazi və statistik modellərin) istifadə olunmasını tələb edir. Lakin, bəzi bölgələrdə iqlim və BOEM-lərin istehsalı ilə bağlı kifayət qədər məlumat olmaya bilər, bu da dəqiq proqnozların yaradılmasını çətinləşdirir.

Bu problemlərin həlli üçün müasir texnologiyalar və monitoring sistemlərindən istifadə olunur. Bu texnologiyalar proqnozların dəqiqliyini artırmağa və enerji idarəetmə sistemlərini uyğunlaşdırmağa kömək edə bilər [7].

Bərpa olunan enerji mənbələrinin (BOEM) istehsalındakı dəyişkənlik, məsələn, günəş və külək elektrik stansiyaları, sabit enerji təchizatını təmin etmək üçün əlavə tədbirlər tələb edir. BOEM-lər elektrik enerjisini hava şəraitindən və gündüz vaxtından asılı olaraq istehsal edir. Məsələn, günəş panelləri aydın günlərdə və gündüz vaxtında daha çox enerji istehsal edir, halbuki külək dəyişkən ola bilər. Bu, enerji istehsalının istehlakdan əhəmiyyətli dərəcədə aşağı olduğu dövrlərə səbəb ola bilər.

Aşağı istehsal dövrlərində enerji çatışmazlığını kompensasiya etmək üçün rezerv mənbələrə ehtiyac var. Bu, tələbat olduqda tez bir zamanda işə salına bilən ənənəvi elektrik stansiyaları ola bilər. Lakin bu, istismar xərclərinin artmasına və karbon tullantılarının çoxalmasına səbəb ola bilər.

Enerji istehsalındakı dalğalanmaları düzəltmək üçün akumulyator batareyaları və ya hidroakkumulyator elektrik stansiyalar kimi enerji saxlama sistemləri tətbiq olunur. Bu sistemlər yüksək istehsal dövrlərində istehsal olunan artıq enerjini saxlamağa və istehsal azaldıqda istifadə etməyə imkan verir. Lakin belə sistemlər baha başa gəldiyindən əhəmiyyətli sərmayə tələb olunur.

Enerji sistemləri tələbin və təklifin dəyişməsinə uyğunlaşa bilməlidir, yəni istehsal və istehlak prosesləri arasında daimi balans saxlanılmalıdır. Bu, infrastrukturun müasirləşdirilməsini və enerji axınlarını daha səmərəli idarə etməyə imkan verən texnologiyaların tətbiqini tələb edir. Ağıllı şəbəkələrin (Smart Grids) istifadəsi enerji istehlakını və istehsalını daha yaxşı proqnozlaşdırmağa imkan verir, bu da resursların daha səmərəli idarə olunmasına və sistemin yükünün azaldılmasına kömək edə bilər.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin (BOEM) mövcud enerji sistemlərinə inteqrasiyası, həqiqətən, infrastrukturun yenilənməsini və şəbəkələrin çevikliyinin artırılmasını tələb edir. Aşağıda nəzərə alınmalı olan bir neçə aspektlərə baxaq:

-proqnozlaşdırma qabiliyyətinin artırılması: BOEM-lərin effektiv inteqrasiyası üçün şəbəkələrin proqnozlaşdırma qabiliyyətinin artırılması lazımdır ki, bu da enerji istehsalındakı dalğalanmalara və pik rejimlərdə yaranan problemlərinin həlli üçün cavab verə bilsin. Bu, yeni transformatorların, elektrik xətlərinin və digər komponentlərin quraşdırılmasını tələb edəcək;

-ağıllı şəbəkələr (Smart Grids): Ağıllı şəbəkə texnologiyalarının tətbiqi enerji axınlarını daha səmərəli idarə etməyə imkan verir, istehsalçılar və istehlakçılar arasında əlaqəni yaxşılaşdırır. Ağıllı şəbəkələr real vaxtda məlumatlardan istifadə edərək sistemin işini optimallaşdırır və onun dəyişikliklərə qarşı dayanıqlığını artırır.

-enerji saxlama sistemləri: Enerji istehsalındakı dalğalanmaları düzəltmək və şəbəkənin stabilliyini təmin etmək üçün akumulyator batareyalar və hidroakkumulyator elektrik stansiyalar kimi enerji saxlama sistemlərinə ehtiyacı var. Bu sistemlər, yüksək istehsal dövrlərində istehsal olunan artıq enerjini saxlamağa və istehsal azaldıqda istifadə etməyə imkan verə bilər.

-idarəetmə çevikliyi: Enerji sistemləri tələbdə və təklifdəki dəyişikliklərə uyğunlaşdırmaq üçün daha çevik olmalıdır. Bu, sürətli şəkildə işə salınabilən və dayandırıla bilən çevik enerji mənbələrinin istifadəsini, həmçinin tələbin idarə edilməsini təmin edən texnologiyaların tətbiqini əhatə edir.

-digər sistemlərlə inteqrasiya: BOEM-lərin yalnız elektrik şəbəkələrinə deyil, həm də istilik və soyutma sistemlərinə inteqrasiya oluna bilməsi vacibdir, bu da daha səmərəli və dayanıqlı enerji sistemləri yaratmağa imkan verə bilər.

İnfrastrukturun yenilənməsi və şəbəkələrin çevikliyinin artırılması əhəmiyyətli sərmayələr və enerji şirkətləri və istehlakçılar arasında birgə səylər tələb edir, bu da, BOEM-lərin uğurlu inteqrasiyası üçün zəruridir [7,8].

Bərpa olunan enerji mənbələri (BOEM) elektrik enerjisinin keyfiyyət parametrlərinə, məsələn, gərginlik və tezliyə təsir göstərə bilər. Aşağıda nəzərə alınmalı olan bir neçə əsas məqamlara baxaq:

1. Gərginlik: BOEM-lərin istehsalındakı dəyişkənlik, xüsusən də külək və günəş qurğuları, şəbəkədə gərginlik dalğalanmalarına səbəb ola bilər. Enerji istehsalı istehlakı aşdıqda, bu, gərginliyin artmasına, istehsalın az olduğu zaman isə gərginliyin düşməsinə səbəb ola bilər. Bu, elektrik cihazlarının və avadanlıqların işləməsinə mənfi təsir göstərə bilər.

2. Tezlik: Elektrik şəbəkəsində tezlik sabit qalmalıdır (adətən 50 və ya 60 Hz bölgədən asılı olaraq). BOEM-lər istehsal və istehlak arasındakı tarazlığa qeyri- müəyyənlik gətirə bilər ki, bu da tezlikdə dəyişikliklərə səbəb ola bilər. Əgər BOEM- lərdən gələn enerji istehsalı kəskin şəkildə azalır və ya artır, bu, tezliyin sabitliyini pozur.

3. Harmonikaların əmələ gəlməsi: BOEM-lər elektrik şəbəkəsində əlavə harmoniklərini yarada bilər. Bu, mütəmadi cərəyanın dəyişdirilməsi üçün konvertorların istifadəsi nəticəsində baş verir. Harmoniklər, kabel və avadanlıqlarda əlavə itkilərə səbəb olur.

4. Sinyal keyfiyyəti: BOEM-lərin istehsalındakı müvəqqəti dəyişikliklər şəbəkədəki signal keyfiyyətinə də təsir göstərə bilər. Bu, işığın yanıb-sönməsinə və elektron cihazların səmərəliliyinin azalmasına səbəb ola bilər.

5. Keyfiyyətin artırılması tədbirləri: BOEM-lərin elektrik enerjisinin keyfiyyətinə mənfi təsirini minimuma endirmək üçün müxtəlif texnologiyalar tətbiq olunur, məsələn, güc idarəetmə sistemləri, reaktiv gücü kompensasiya edən kondensatorlar və harmoniklərin aradan qaldırılması üçün xüsusi filtrlər.

Müasir elektrik sistemlərində, xüsusən də bərpa olunan enerji mənbələrinin (BOEM) payı artdıqca, şəbəkənin inersiyası azalır və nəticədə tezlik sabitliyi daha həssas hala gəlir. Bu səbəbdən qəfil güc itkisi zamanı tezliyin dəyişmə sürətini sadə metodla hesablamaq və onun qarşısını almaq üçün tələb olunan sürətli ehtiyat gücünü müəyyənləşdirmək vacibdir.

İri güc blokunun qəfil itirilməsi zamanı tezliyin saniyədə neçə Hertz dəyişdiyini təyin etmək üçün aşağıdakı düsturdan istifadə olunur:

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot T_{\text{inersiya}} \cdot P_{\text{ümumi}}}$$

Burada:

- $f_0 = 50$ Hz – nominal tezlik
- $\Delta P = 300$ MVt – qəfil güc itkisi
- $T_{\text{inersiya}} = 3$ s – sistemin inersiya sabiti (saniyə ilə)
- $P_{\text{ümumi}} = 8320,8$ MVt – sistemin ümumi gücü (baza gücü)

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{50 \cdot 300}{2 \cdot 3 \cdot 8320,8} \approx 0,37 \text{ Hz/s}$$

Bu o deməkdir ki, 300 MVt qəfil itki zamanı tezlik saniyədə təxminən 0,37 Hz azalır. Bu dəyər beynəlxalq təcrübədə qəbul olunan təhlükəsizlik hədlərindən ($\approx 0,25$ Hz/s) yuxarıdır.

Tezliyin enmə sürətini normativ həddə endirmək üçün əlavə sürətli ehtiyat gücü tələb olunur. İcazə verilən effektiv itki belə hesablanır:

$$\Delta P_{\text{icazə}} = \Delta P \times \frac{(\Delta f / \Delta t)_{\text{hədəf}}}{(\Delta f / \Delta t)_{\text{faktiki}}}$$

və tələb olunan ehtiyat güc:

$$P_{\text{ehtiyat}} = \Delta P - \Delta P_{\text{icazə}}$$

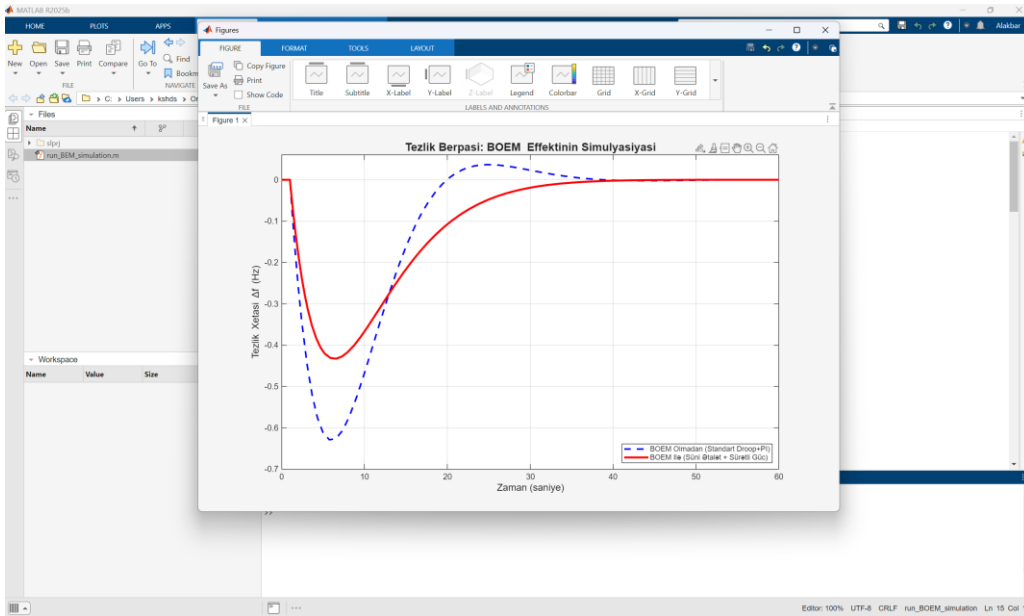
Nəticədə:

$$\Delta P_{icazə} = 300 \times \frac{0,25}{0,37} \approx 202,7 \text{ MVt}$$

$$P_{ehtiyat} = 300 - 202,7 = 97,3 \text{ MVt}$$

Hesablama göstərir ki, tezliyin təhlükəsizlik həddindən artıq enməsinin qarşısını almaq üçün təxminən 97,3 MVt MVt ehtiyat güc lazımdır.

Bu iki hesablamaların məqsədi – BOEM-in yüksək payı şəraitində şəbəkənin inersiyasının azalmasının tezlik sabitliyinə təsirini kəmiyyətlə göstərməkdir. Nəticələr aydın şəkildə sübut edir ki, bərpa olunan mənbələrin inteqrasiyası artdıqca sistem operatoru sürətli ehtiyat gücləri təmin etməli, süni inersiya və çevik texnologiyalardan istifadə etməlidir. Beləliklə, bu sadə qiymətləndirmə həm problemin miqyasını, həm də onun həlli üçün tələb olunan texniki tədbirlərin əhəmiyyətini ortaya qoyur.



Simulyasiya Nəticələrinin Təhlili: Tezlik Dayanıqlığına BOEM Əsaslı Nəzarətin Təsiri
Təqdim olunan qrafik, $t=1$ saniyə anında sistemdə 300 MW-lıq qəfil aktiv güc itkisi ΔP_{itki} baş verdikdə enerji sisteminin dinamik tezlik cavabının müqayisəli təhlilini göstərir. Təhlil iki fərqli ssenari əsasında aparılmışdır:

- **Mavi Xətt (Ssenari 1: BOEM Olmadan):** Yalnız ənənəvi sinxron generatorların nəzarətindən (Droop və Pİ tənzimləyicilər) ibarət klassik sistem.
- **Qırmızı Xətt (Ssenari 2: BOEM İlə):** Ənənəvi nəzarətə əlavə olaraq, inverter əsaslı BOEM-lərin (günəş/külək) "Süni Ətalət" (Virtual Inertia) və "Sürətli Güc Ehtiyatı" (Virtual Droop) funksiyalarını təmin etdiyi təkmilləşdirilmiş sistem.

NƏTİCƏ

Bərpa olunan enerji mənbələrinin artan rolu iqlim dəyişikliyi və təbii ehtiyatların tükənməsi ilə bağlı global problemlərin həllində əsas amildir. BOEM təkə ekoloji davamlılığı təmin etmir, həm də iqtisadi inkişaf və enerji müstəqilliyi üçün yeni imkanlar yaradır. Bərpa olunan enerji mənbələrinin tətbiqi və inkişafı təkə zərurət deyil, həm də bəşəriyyətin daha təhlükəsiz və fırvan gələcəyə doğru bir addımıdır. Beləliklə, BOEM-lərin inteqrasiyası elektrik enerjisinin keyfiyyətinin təmin edilməsi və enerji təchizatının sabitliyi üçün kompleks yanaşma tələb edir.

-
1. Закон Азербайджанской Республики от 24 ноября 1998г. №541- IQ «Об энергетике» // Сборник законодательства Азербайджанской Республики. 1999. 28 февраля. № 2. ст. 53.
 2. *Аммаев*: В Карабахе есть потенциал солнечной и ветровой энергии в 4500 МВт.<https://report.az/ru/energetika/ammaev-v-karabahe-est-potencial-solnechnoj-i-vetrovoj-energii-v-4500-mvt/>
 3. Азербайджан нацелен на строительство около 700 МВт мощностей в сфере ВИЭ. <https://neftgaz.ru/news/Alternative-energy/686150-azerbaydzhan-natselen-na-stroitelstvo-okolo-700-mvt-moshchnostey-v-sfere-vie/>
 4. Азербайджан сможет экономить более 300 млн м3 природного газа/год благодаря проектам Acwa Power и Masdar. <https://neftgaz.ru/news/Alternative-energy/696364-azerbaydzhan-smozhet-ekonomit-bolee-300-mln-kubetrov-prirodnogo-gaza-v-god-blagodarya-proektam-acw/>
 5. Газета «Энергетика и промышленность России». № 23-24 (427-428) декабрь 2021 года. В Азербайджане будут развивать офшорную ветроэнергетику. <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/8997838.htm>
 6. *Наумова Ю.* Альтернативная энергетика в России: что мешает развитию? / Проблемы теории и практики управления. 2016. №10. с. 57-61.
 7. *Вершков А.В.* Альтернативная энергетика - приоритетное направление «зелёной экономики» /В книге: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЭКОНОМИКИ Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Отв. ред. М.В. Кочетков; Ответственный за выпуск: Т.А. Синюшкина. 2016. с. 68-70.
 8. *Эдер Л.В., Филимонова И.В., Проворная И.В.* Долгосрочные тенденции использования и производства ВИЭ в мировой энергетике / Энергия: экономика, техника, экология. 2015. №2. с. 46-55.

ПРОБЛЕМЫ ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

МИРЗАЕВА С.М., ГАСАНОВ А.И., ГЕЙДАРОВ А.О.

В статье обсуждается современное состояние возобновляемой энергетики в Азербайджане. Рассматриваются проблемы, возникающие при интеграции возобновляемых источников энергии в энергетическую систему, и предлагаются пути их решения.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, солнечная энергия, ветровая энергия, гидроэнергия, проблемы интеграции в энергетическую систему.

PROBLEMS ARISING DURING THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE ENERGY SYSTEM AND THEIR SOLUTIONS

MIRZAYEVA S.M., HASANOV A.I., HEYDAROV A.O.

The article discusses the current state of renewable energy in Azerbaijan. It examines the problems that arise during the integration of renewable energy sources into the energy system and proposes possible solutions.

Keywords: alternative energy sources, solar energy, wind energy, hydro energy, problems of integration into the energy system.

DOI:10.70784/azip.5.20254108

SÜNI İNTELLEKT TEXNOLOGİYALARININ ENERJİ SİSTEMLƏRİNƏ İNTEQRASIYASI VƏ TƏSİRLƏRİ

İSMAYILOVA Ş.İ., MUSTAFAYEVA F.M.

*Azərbaycan dövlət neft və sənaye universiteti
ismayilova51@gmail.com
fidan.mustafayeva@asoiu.edu.az*

Süni intellekt enerji sistemlərini əsaslı şəkildə dəyişdirərək davamlılığa, səmərəliliyə və çevikliyə əhəmiyyətli dərəcədə töhfə verir. Süni intellekt enerji təchizatı və tələbi balansını optimallaşdırır, bərpa olunan enerji mənbələrini inteqrasiya etməklə və saxlama idarəetməsini təkmilləşdirməklə şəbəkə sabitliyini yaxşılaşdırır. O, həmçinin karbon ayaq izini azaltmaqla ekoloji davamlılığa töhfə verir. Rəqəmsal enerji infrastrukturaları ilə bağlı artan kibertəhlükəsizlik riskləri süni intellektlə işləyən təhlükəsizlik həlləri ilə azaldılır və avtonom enerji idarəetməsi əməliyyat xərclərini azaldır.

Açar sözlər: enerji sistemləri, süni intellekt, smart şəbəkələr, bərpa olunan enerji.

1. Süni İntellekt Enerji Sistemləri-Bu sistem potensialı və gələcək enerji resurslarının idarə edilməsində rolu ilə diqqəti cəlb edir. Enerji istehsalı, ötürülməsi və paylanması üçün süni intellekt həlləri, xüsusən də avtonom elektrik nəqliyyat vasitələri, ağıllı şəbəkələr və rəqəmsal əkiz texnologiyalar kontekstində araşdırılır. Enerji tələbinin proqnozlaşdırılması və təchizatının idarə edilməsini optimallaşdıran süni intellekt həm də avtonom sistemlərdən istifadə etməklə elektrik enerjisinin kəsilməsini vaxtında aşkar etməyə və həll etməyə imkan verir. Bu kontekstdə ağıllı şəbəkələrin və bərpa olunan enerji mənbələrinin artan inteqrasiyası enerji təhlükəsizliyinə, davamlılığa və fasiləsiz enerji təchizatına nail olmaq məqsədi daşıyır.

Əşyaların İnterneti (IoT) və Power Transmission Communication (PLC) texnologiyaları sayəsində enerji sistemlərinin rəqəmsallaşması sürətlənir. Bu sistemlər enerji paylanması zamanı məlumatların daha sürətli ötürülməsinə imkan verir və şəbəkə rabitəsi və nəzarətini optimallaşdırır. Bundan əlavə, Vehicle-to-Grid (V2G) texnologiyası elektrik nəqliyyat vasitələrinə şəbəkə ilə iki istiqamətli əlaqə yaratmağa imkan verir ki, bu da enerji tələbi balanssızlığının azaldılmasında və şəbəkənin dayanıqlığının artırılmasında əhəmiyyətli irəliləyişdir. Özünü sağaldan enerji ötürmə sistemləri kimi avtonom həllər xətalı tez həll etməklə enerji təhlükəsizliyini yaxşılaşdırır, rəqəmsal əkiz texnologiya isə virtual modelləşdirmə vasitəsilə real vaxt performans təkmilləşdirmələrini təmin edir.

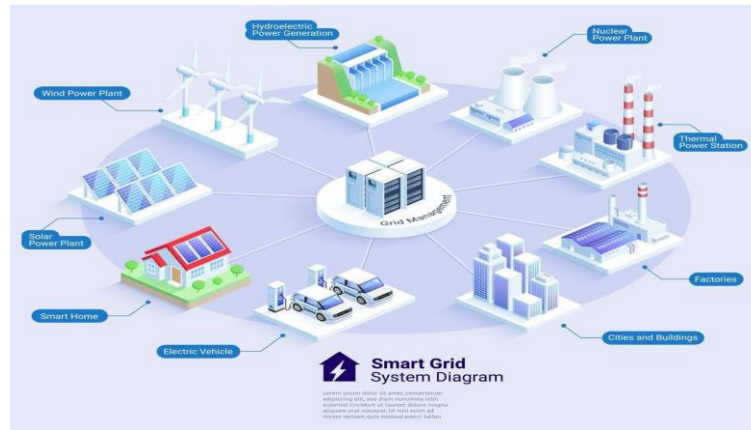
Bu məqalə Sİ-nin enerji sistemlərinə inteqrasiyasının karbon izlərini necə azalda biləcəyini və ekoloji davamlılığı necə təmin edə biləcəyini araşdırır. Ağıllı şəhərlər və evlər IoT əsaslı sistemlərdən istifadə edərək enerji istehlakını optimallaşdırır. Enerji planlaşdırmasının səmərəliliyini artırmaqla süni intellekt həm xərcləri azaltmaq, həm də bəşəriyyətin enerji ehtiyaclarını ödəmək üçün mühüm vasitəyə çevrilir. Bu tədqiqat gələcək enerji sistemlərində süni intellektin strateji əhəmiyyətini vurğulayır.

Giriş. Sürətlə artan qlobal enerji tələbatı və dayanıqlı enerji mənbələrinə keçid süni intellektə əsaslanan enerji idarəetmə həllərini tələb edir. Araşdırmalar göstərir ki, enerji tələbatının 2040-cı ilə qədər 30% artacağı gözlənilir. Bu, enerji infrastrukturunda səmərəliliyin və çevikliyin artırılmasını tələb edəcək. Bu tələblərə cavab olaraq, süni intellekt ağıllı şəbəkə idarəetməsi, mikro və makromiqyaslı enerji resurslarının inteqrasiyası və nasazlığın qarşısının alınması kimi kritik sahələrdə əsas rol oynayır. Əsas monitorinq və optimallaşdırma sistemləri bu gün istifadə olunsa da, süni intellekt tam avtonom enerji idarəetməsini, qabaqcıl nasazlığın qarşısının alınması və bərpa üsullarını və yüksək səmərəli enerji saxlama həllərini təmin edəcəyi proqnozlaşdırılır.

Artan enerji tələbatı bu texnologiyaların əhəmiyyətini daha da artırır. Qlobal enerji tələbatının 2020-2050-ci illər arasında 50% artacağı proqnozlaşdırılır. Bu artımın böyük hissəsi Asiyada sürətli iqtisadi artım və əhalinin artımı ilə bağlıdır. Xüsusilə inkişaf etməkdə olan iqtisadiyyatlarda enerji tələbatı OECD ölkələrindən daha sürətlə artır. Qlobal elektrik tələbatının 2030-cu ilə qədər 75% artacağı gözlənilir ki, bunun da böyük hissəsi elektrikli nəqliyyat vasitələri və soyuducu sistemlər kimi yeni texnologiyalara olan ehtiyacdən irəli gəlir. Elektrik enerjisinə tələbatın 2050-ci ilə qədər 150% artacağı, qlobal enerji istehsalında bərpa olunan enerjinin payının isə 80%-ə çatacağı gözlənilir. Bu məlumatın işığında, enerji idarəçiliyi getdikcə süni intellekt texnologiyalarına və bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyasına etibar edəcək. Süni intellekt həm də enerji istehsalı və istehlakı arasında balansın əldə edilməsi, tələbatın proqnozlaşdırılması və enerji təchizatı təhlükəsizliyinin təmin edilməsi üçün əsas texnologiyaya çevrilir.

Ənənəvi elektrik ötürücü sistemlərinin mərkəzləşdirilmiş strukturu bərpa olunan enerji mənbələrinin və ötürücü və paylayıcı sistemlərin dəyişən istehsal gücü ilə bir araya sığmır. Süni intellekt enerji istehsalı və istehlakı arasındakı balanssızlığı 80%-ə qədər azalda bilər. Almaniyada süni intellekt sayəsində günəş enerjisi istehsalı dalğalanmaları 50%-dən 10%-ə endirilib. Bundan əlavə, rəqəmsal proqnozlaşdırıcı texniki xidmət texnologiyaları enerji infrastrukturunun davamlı monitorinqini təmin etməklə nasazlıqların 90%-nin qarşısını almağa və elektrik enerjisinin kəsilməsinin sayını azaltmağa kömək edir. V2G texnologiyası elektrik nəqliyyat vasitələrinin elektrik enerjisini yenidən şəbəkəyə qaytarmaqla şəbəkə çevikliyi 50% artırır və süni intellektlə işləyən IoT sistemləri enerjiyə 30%-ə qədər qənaət edir. Bu yeniliklər şəbəkə tələbindəki dalğalanmaları kompensasiya etməyə və enerji resurslarının idarə edilməsinin səmərəliliyini və etibarlılığını artırmağa kömək edir.

Süni intellekt nəinki enerji səmərəliliyini təmin edir, həm də ətraf mühitin davamlılığına mühüm töhfə verir. IoT və PLC əsaslı sistemlər kimi texnologiyalar enerji idarəetmə proseslərini sürətləndirir və karbon izlərini azaldır. Bu kontekstdə avtonom enerji sistemləri bəşəriyyətin enerji ehtiyaclarını maneəsiz şəkildə ödəyəcək və ekoloji məqsədlərə nail olmaq üçün mühüm töhfə verəcək.



Şək.1. Süni intellekt əsaslı şəbəkənin ekosistem üzərində təsiri

2. Avtonom sistemlər və ağıllı şəbəkələr-Süni intellektlə işləyən avtonom sistemlər, şübhəsiz ki, ağıllı şəbəkələrin inkişafında həlledici rol oynayır. Ənənəvi enerji sistemləri mərkəzləşdirilmiş istehsal və sabit paylama modellərinə əsaslanarsa da, müasir enerji idarəetmə sistemlərində süni intellektdən istifadə edən smart şəbəkələr daha dinamik və çevikdir. Bu yeni nəsil şəbəkələr böyük verilənlərin analitikası və süni intellekt alqoritmlərindən istifadə etməklə bütün prosesləri – enerji istehsalından istehlaka qədər optimallaşdırır. Bu, real vaxt rejimində enerji təchizatı və təklifinin balanslaşdırılmasına imkan verir, enerji sistemlərini daha avtonom edir. Avtonom enerji idarəetmə sistemləri mərkəzləşdirilmiş idarəetmədən daha çox muxtar struktur təklif edir. Süni intellekt alqoritmləri bu enerji mənbələrinin inteqrasiyasını asanlaşdırır, hər bir şəbəkə komponentindən optimal performansını təmin edir. Bərpa olunan enerji mənbələrinin, xüsusən də günəş və küləklərin qeyri-sabit çıxışı şəbəkənin idarə edilməsi

üçün problemlər yaradır. Bununla belə, süni intellekt hava proqnozları əsasında bu mənbələrin çıxışını proqnozlaşdırma və enerji saxlama strategiyalarını optimallaşdırma bilər. Süni intellekt tələb cavabı və yük balansını kimi mühüm funksiyaları da yerinə yetirir. Ağıllı alqoritmlər enerji təchizatını optimallaşdırmaq üçün tələb proqnozlarını yaradır, eyni zamanda enerji qiymətlərini və istehlakçı davranışını təhlil edir. Bu məlumatdan istifadə enerjiyə qənaət etməyə imkan verir və şəbəkə yükünün dəyişməsinə minimuma endirir. Bu, təkcə enerji təchizatı və tələbinin tarazlaşdırılmasına kömək etmir, həm də enerji sistemlərinin davamlılığını və qənaətcilliyini təmin edir.

Rəqəmsal texnologiyalar enerji sistemlərində süni intellektin təklif etdiyi ən innovativ həllərdən biridir. Bu texnologiyalar real vaxt məlumatlarına əsaslanan sistem performansını simulyasiya edən enerji infrastrukturunun virtual modelləridir. Bu virtual modellər elektrik stansiyaları və şəbəkə komponentlərindən tutmuş elektrik avtomobillərinin enerji doldurma stansiyalarına qədər geniş çeşiddə sistemlərdə istifadə olunur. Rəqəmsal texnologiyalar enerji sistemlərində nasazlıqların proqnozlaşdırılmasına imkan verir və texniki xidmət proseslərini optimallaşdırır. Süni intellektə əsaslanan proqnozlaşdırıcı texniki xidmət sensor məlumatlarını təhlil edərək, əməliyyat xərclərini azaltmaqla və enerji təchizatının etibarlılığını artırmaqla potensial nasazlıqların erkən aşkarlanmasına imkan verir.

Süni intellektlə işləyən bu sistemlər avtomatik idarəetmə mexanizmləri vasitəsilə şəbəkəni sabitləşdirir və enerji tələbatındakı qəfil dəyişikliklərə dərhal reaksiya verə bilər. Bu cür sistemlər enerji sistemlərində həddindən artıq yüklənmələri və enerji itkilərini minimuma endirməklə enerji təchizatının etibarlılığını artırır. Bu, müasir enerji idarəetməsində süni intellektin mühüm rolunu və gələcək potensialını vurğulayır. Koqnitiv enerji idarəetmə sistemlərinin tezliklə sistemlərimizdə üstünlük təşkil edəcəyi gözlənilir.

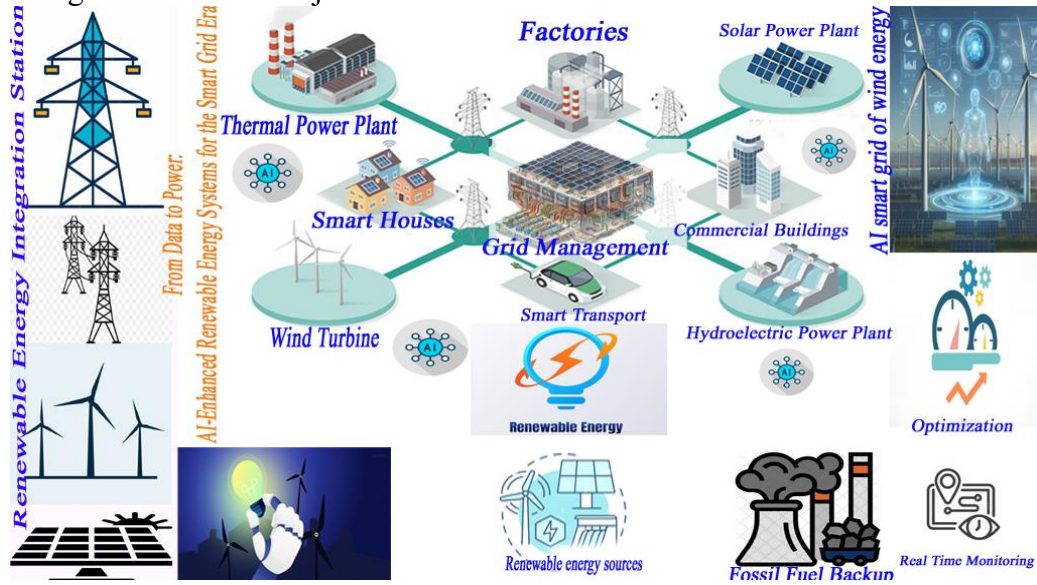
3. Elektrikli nəqliyyat vasitələri və smart sayğaclar. Elektrikli avtomobillər (EV) enerji sektorunda inqilabi irəliləyişi təmsil edir, qalıq yanacaqlardan asılılığı azaltmaq və karbon emissiyalarını əhəmiyyətli dərəcədə azaltmaq üçün nəzərdə tutulmuşdur. Bu nəqliyyat vasitələrinin sayı artdıqca enerji tələbatı əhəmiyyətli dərəcədə artır və bu tələbatı ödəmək üçün mövcud elektrik şəbəkələrinin yenidən qurulması tələb olunur. Bu kontekstdə ağıllı şəbəkələr və süni intellekt texnologiyaları enerji tələbatını daha səmərəli idarə etməyə və optimallaşdırmağa kömək edə bilər.

Elektrikli nəqliyyat vasitələrinin enerji infrastrukturuna inteqrasiyası, xüsusilə plandankənar enerji doldurma səbəbindən şəbəkədə balanssızlığa və tıxaclara səbəb olur. Süni intellektlə işləyən smart şəbəkələr şarj vaxtlarını optimallaşdırmaq və elektrik enerjisinə tələbatdakı dalğalanmaları minimuma endirməklə bu problemin həllini təklif edir. Süni intellekt alqoritmləri şarj stansiyalarını ən uyğun yerlərdə yerləşdirməklə və ən əlverişli doldurma vaxtlarını proqnozlaşdırmaqla şəbəkə yükünü tarazlaşdırır. Bu sistemlər elektrik enerjisi xərclərini optimallaşdırır, şəbəkə tıxaclarının qarşısını alır və günəş və külək enerjisindən səmərəli istifadəni maksimum dərəcədə artırmaq üçün bərpa olunan enerji mənbələri ilə inteqrasiya edir. Beləliklə, ağıllı şarj stansiyaları xərcləri azaldır və davamlı enerji istifadəsini təşviq edərək, elektrikli nəqliyyat vasitələrinin karbon izini azaldır.

Süni intellekt bu prosesin idarə edilməsində əsas rol oynayır: enerji təchizatı və tələbi məlumatlarını təhlil edərək, o, elektrik nəqliyyat vasitələrinin nə vaxt doldurulmalı olduğunu və enerjinin nə vaxt şəbəkəyə qaytarılacağını müəyyənləşdirir. Bu iki istiqamətli enerji axını enerji səmərəliliyini artırır və elektrikli avtomobil sahiblərinə əlavə gəlir imkanları təqdim edir. Ağıllı sayğaclar enerji istehlakının real vaxt rejimində monitorinqinə imkan verir və istehlakçıların enerjiyə qənaət vərdişlərini optimallaşdırır. Süni intellektlə birlikdə smart sayğaclar elektrik enerjisinin kəsilməsinə və ya elektrik enerjisinin kəsilməsinə tez reaksiya verə bilər.

Bu sayğaclar istifadəçilərin istehlakları haqqında ani məlumat verməklə enerjiyə qənaət etməyi asanlaşdırır. Ağıllı sayğacların geniş tətbiqi sayəsində Böyük Britaniyada enerji istehlakı 3% azalıb və istehlakçılar qiymətlərin aşağı olduğu dövrlərdə enerji istehlakını artıraraq qənaət əldə ediblər. NI alqoritmlərinin inkişafı sayəsində bu sayğacların daha effektiv

qənaət və daha real ölçmə təmin edəcəyi gözlənilir. Tam muxtar elektrik şəbəkələri süni intellekt və avtonom sistemlərin enerji istehsalından tutmuş istehlaka qədər bütün prosesləri idarə etdiyi struktur təklif edir. Bu sistemlərdə enerji istehsalı, paylanması və istehlakı tam avtomatlaşdırılıb. Süni intellekt davamlı olaraq enerji təchizatı və tələbini təhlil edir və hər bir şəbəkə komponentinin optimal işləməsini təmin edir. Məsələn, tələbatın az olduğu dövrlərdə enerji istehsalı azalır və enerji saxlama sistemlərinə yönəldilir və ya elektrikle işləyən nəqliyyat vasitələrinə verilir. Bu tam avtonom strukturlar enerji idarəçiliyini mərkəzləşdirmir, səhv riskini azaldır və prosesləri sürətləndirir. Onlar həmçinin enerji istehsalı və istehlakında qəfil dəyişikliklər üçün sürətli və səmərəli həllər təklif edirlər. Bu sistemlər şəbəkənin elastikliyini və etibarlılığını artırarkən enerji xərclərini azaldır.



Şək.1. Ağıllı şəbəkələr və enerji idarəetmə sistemləri.

Gələcəkdə enerji istehsalı böyük, mərkəzləşdirilmiş elektrik stansiyalarından daha çox paylanmış enerji mənbələrinə əsaslanacaqdır. Günəş, külək və biokütlə kimi bərpa olunan enerji mənbələri kiçik istehsal nöqtələrindən şəbəkəyə enerji verəcəkdir. Xüsusilə, günəş paneli texnologiyasının inkişafı ilə insanların əsas elektrik ehtiyaclarını günəş enerjisindən qarşılaya biləcəkləri gözlənilir. Bu paylanmış struktur ənənəvi enerji idarəetmə modellərindən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənəcək. Avtonom enerji sistemləri davamlı olaraq bu mənbələrin performansını və şəbəkə ehtiyaclarını təhlil edərək enerji axını optimallaşdırır. Bu ssenaridə süni intellekt bərpa olunan mənbələrdən enerjini ən səmərəli şəkildə idarə etmək üçün istehsal proqnozlarından istifadə edir. Həddindən artıq istehsal olduqda, bu enerji saxlama sistemlərinə ötürülür və ya elektrik nəqliyyat vasitələri kimi müvəqqəti saxlama həllərinə yönəldilir. Bu, enerji itkisini minimuma endirir və resurslardan səmərəli istifadəni təmin edir.

Süni intellekt təkcə yerli şəbəkələrdə deyil, həm də qlobal enerji idarəetməsində mühüm rol oynayacaq. Gələcəkdə ölkələr arasında enerji axınlarını optimallaşdıran avtonom sistemlər beynəlxalq enerji ticarətini daha səmərəli edəcək. Süni intellekt müxtəlif ölkələrdə enerji təchizatı və təklifini təhlil edərək hansı regionların enerji alacağını və hansının alınmayacağını müəyyən edəcək. Bu qlobal enerji optimallaşdırılması bərpa olunan enerji mənbələrindən daha səmərəli istifadə etməklə karbon emissiyalarını azaltmağa kömək edəcək. Enerji təchizatında qlobal tarazlığın əldə edilməsi dayanıqlı inkişaf məqsədlərinə nail olunmasını sürətləndirəcək. Bundan əlavə, enerji təchizatı təhlükəsizliyi yaxşılaşacaq və enerjiyə çıxış bütün dünyada daha ədalətli olacaqdır. Bu proses nəinki enerji xərclərini azaldacaq, həm də enerji təchizatının davamlılığını təmin edəcək. Gələcəkdə bu həllər enerjiyə çıxışı daha təhlükəsiz edəcək və enerji itkisini minimuma endirəcək.

Ağıllı şəbəkə aşağı itkilərə və yüksək əlçatanlığa malik, qənaətcil və dayanıqlı enerji təchizatı sistemi yaratmağı hədəfləyir. Elektrik enerjisinin paylanması, istehsalının və

ticarətinin özəlləşdirilməsi, liberallaşdırılması və qeyri-mərkəzləşdirilməsi, əhəmiyyətli istehsal boşluğunu aradan qaldırmaq üçün yeni investisiyalar və həm ənənəvi, həm də bərpa olunan enerji mənbələrinin tətbiqi şəbəkə strukturunda əhəmiyyətli dəyişikliklər tələb edir. İndiyə qədər enerji axınının idarə edilməsi və nəzarətində yuxarıdan aşağıya yanaşma üstünlük təşkil edirdi. Mərkəzləşdirilməmiş enerji bazarında bu yanaşmaya yenidən baxılmalı, onu informasiya və kommunikasiyaya aşağıdan yuxarı yanaşma ilə əvəz etmək lazımdır.

Məlumatların qorunması və məxfilik: rəqəmsallaşdırılmış enerji sistemlərinin təhlükəsizliyinin təmin edilməsi. Enerji sistemlərinin rəqəmsallaşdırılması, smart şəbəkələrin yayılması və enerji resurslarının idarə edilməsində süni intellektin istifadəsi məlumatların qorunması və məxfilik məsələlərini daha da vacib edib. Ağıllı şəbəkələr və avtonom enerji sistemləri böyük həcmdə məlumat toplayır və bu məlumatlardan enerji resurslarının idarə edilməsini optimallaşdırmaq üçün istifadə edir. Bununla belə, rəqəmsallaşma həm də şəbəkələri rəqəmsal hücumlara qarşı daha həssas edir. Buna görə də, süni intellektə əsaslanan təhlükəsizlik həlləri enerji sistemlərinin təhlükəsizliyinin təmin edilməsində mühüm rol oynayır.

Süni intellekt enerji sistemlərində rəqəmsal təhlükəsizlik həllərini təkmilləşdirmək üçün istifadə edilə bilər. Maşın və dərin öyrənmə alqoritmləri şəbəkə sistemlərində anormal davranışları aşkar etmək və digər şeylər arasında potensial təhlükələr barədə erkən xəbərdarlıq etmək üçün istifadə edilə bilər. Bu alqoritmlər davamlı olaraq şəbəkə məlumatlarını təhlil edir və qeyri-adi fəaliyyət aşkar edildikdə avtomatik olaraq aşkar edib müvafiq ehtiyat tədbirləri görə bilər.

Ağıllı şəbəkələr təkcə sistemin təhlükəsizliyi ilə deyil, həm də topladığı məlumatların məxfiliyi ilə maraqlanır. İstehlakçılardan toplanan enerji istehlakı məlumatları şəxsi vərdişlər və həyat tərzləri haqqında vacib məlumatları ehtiva edir. Bu məlumatlara zərərli giriş istehlakçıların məxfiliyini təhdid edir. Buna görə də, enerji sistemlərində məlumatların məxfiliyinin qorunması rəqəmsal təhlükəsizlikdən az əhəmiyyət kəsb etmir. Süni intellekt həmçinin məlumatların məxfiliyinə dair təhdidlərlə mübarizə üçün həllər təklif edə bilər. Süni intellektlə işləyən anomaliyaların aşkarlanması alqoritmləri məlumatlara icazəsiz girişi aşkarlaya və qarşısını ala bilər. Bundan əlavə, məlumat şifrələmə texnologiyaları məlumatların təhlükəsiz ötürülməsini təmin edə bilər. Şifrələmə proseslərini optimallaşdırmaqla süni intellekt məlumatların təhlükəsizliyini yaxşılaşdırır və girişi sürətləndirir.

Gələcəkdə süni intellektlə işləyən təhlükəsizlik həlləri enerji sistemlərində standart halına gələcək. Enerji infrastrukturları təkcə enerji təchizatı və tələbini idarə etməyəcək, həm də rəqəmsal hücumlara qarşı daha davamlı olacaq. Süni intellekt təkcə qabaqcıl təhlükəsizlik strategiyaları vasitəsilə enerji sistemlərinin təhlükəsizliyini təmin etməyəcək, həm də hücumlara qarşı dinamik və proaktiv müdafiə mexanizmlərini inkişaf etdirəcək. Təhlükəsizlik səviyyələri yaxşılaşdıqca, enerji sistemləri zəiflikləri müstəqil olaraq aşkar etmək və aradan qaldırmaq qabiliyyətinə malik olacaq. Bu, istehlakçı məlumatlarının məxfiliyini qoruyarkən enerji təchizatının təhlükəsizliyini artıracaq.

Rəqəmsal infrastrukturlar getdikcə bir-birinə bağlandıqca, enerji sistemlərinin rəqəmsal təhlükəsizliyi kritik hala gəlir. Süni intellekt anormal məlumat axınını və icazəsiz girişi aşkar etmək üçün şəbəkə əməliyyatlarına nəzarət edə bilər.

Gələcək enerji həlləri: davamlılıq və iqlimə uyğunluq

Süni intellekt davamlı enerji istehsalı və paylanmasını optimallaşdırmaqla iqlim dəyişikliyi ilə mübarizədə və karbon emissiyalarının azaldılmasında mühüm rol oynayır. Qlobal enerji siyasətinin əsasını təşkil edən bu məqsədlər süni intellekt və bərpa olunan enerji mənbələrindən daha səmərəli istifadə etməyə imkan verir. Enerji istehlakı məlumatlarını təhlil edərək, süni intellekt karbonun azaldılması strategiyalarının hazırlanmasına kömək edir və enerji səmərəliliyi texnologiyalarının tətbiqinə rəhbərlik edir. Bu prosesdə enerji resurslarının davamlı istifadəsi smart şəbəkələr tərəfindən təmin edilir və siyasətçilərə iqlim dəyişikliyi ilə mübarizədə daha effektiv qərarlar qəbul etməyə kömək edir. Nəticədə, süni intellekt enerji siyasətinin işlənilməsi hazırlanmasında, enerji istehsalı və istehlakı proseslərinin inkişafında mühüm alətə çevrilir.

NƏTİCƏ

Süni intellekt enerji sistemlərini əsaslı şəkildə dəyişdirərək davamlılığa, səmərəliliyə və çevikliyə əhəmiyyətli dərəcədə töhfə verir. Süni intellekt enerji təchizatı və tələbi balansını optimallaşdırır, bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyasını yaxşılaşdırır və şəbəkənin dayanıqlığını artıraraq saxlama idarəetməsini təkmilləşdirir. O, həmçinin karbon emissiyalarını azaltmaqla ekoloji davamlılığı dəstəkləyir. Rəqəmsal enerji infrastrukturuları ilə bağlı artan kibertəhlükəsizlik riskləri süni intellektlə işləyən təhlükəsizlik həlləri ilə azaldılır, avtonom enerji idarəetməsi isə əməliyyat xərclərini azaldır. Elektrikli avtomobillər və süni intellektlə optimallaşdırılmış V2G texnologiyaları şəbəkənin çevikliyi artırır və eyni zamanda enerji səmərəliliyini artırır. Gələcəkdə süni intellektlə işləyən avtonom enerji sistemləri enerji proseslərini insanın müdaxiləsi olmadan idarə edəcək, karbon emissiyalarını azaldacaq və enerji idarəetmə siyasətinin əsasını təşkil edəcək. Süni intellekt gələcəyin təmiz, etibarlı və davamlı enerjisi üçün əvəzsiz texnologiya olaraq qalacaq.

1. *Balamurugan, M., Narayanan, K., Raghu, N., Arjun Kumar, G. B. və Trupti, V. N. (2025). Ağıllı şəbəkələrdə süni intellektin rolu - Qısa icmal. Süni İntellektə Sərhədlər, 8:155-1661.*
2. Kuenka Universiteti (Ekvador) və Jaen Universitetindən (İspaniya) müəlliflər. (2024). Süni intellektin paylanmış enerji sisteminin planlaşdırılmasına və smart şəbəkələrdə işləməsinə təsiri. *Enerji, 17(17), 4501.*
3. *Guerrero Sánchez, A. E.; Rivas Araiza, E. A.; Garduño Aparicio, M.; González-Córdova, J. L.; Rodriguez Reséndiz, J. (2024). Ağıllı Elektrik Mikroşəbəkələrinə Tətbiq olunan Süni İntellekt: Ədəbiyyat İcmalı. Latın Amerikası Tətbiqi Tədqiqat.*
4. *"Güc Şəbəkəsinin Transformasiyası: Ağıllı, Dayanıqlı və Təhlükəsiz Enerji Sistemlərinin İnkişafında Süni İntellektin Rolü". Enerji İnformatikası, 2025.*
5. Qabaqcıl AI əsaslı termal modelləşdirmə ilə Ağıllı Şəbəkə Səmərəliliyinin artırılması. *Termal Elm və Texnologiyada Tərəqqi, Cild. 53 avqust 2024-cü il.*
6. *Deokar, T.V.; Shinde, J.N.; Sairisse, R.M. (2024). Ağıllı Şəbəkələrdə Süni İntellekt: Maşın Öyrənməsi və Dərin Öyrənmə Tətbiqlərinin Kompleks İcmalı. ShodhKosh: Vizual və İfa Sənəti Jurnalı, 5(6), 1506-1514.*
7. "Qara qutudan aydınlığa: Kolmogorov-Arnold şəbəkələrindən istifadə edərək süni intellekt əsasında ağıllı şəbəkə optimallaşdırılması." *Vanq, X.; Li, Y.; Li, Y.; Kiş, G. (2024). Çapdan əvvəl arXiv.*
8. *Ogunsuji, Y.M.; Amos, O.R.; Kumar, P.; Chowbey, D. (2024). Ağıllı şəbəkə texnologiyası inteqrasiyası: Süni intellekt və maşın öyrənməsindən istifadə edərək qabaqcıl satınalma strategiyalarının həyata keçirilməsi. World Journal of Advanced Research and Reviews, 23(01), 2985–2998.*
9. *Əlsay, R.; Mehmood, R.; Katib, İ. (2023). Ağıllı enerji sistemlərində süni intellektlə izah edilə bilənlik və nəzarət: Baxış. Enerji Tədqiqatında Sərhədlər, 11:107–1291.*
10. *Lampropulos, G. (2023). Ağıllı şəbəkələrdə süni intellekt: bibliometrik analiz və elmi xəritəçəkmə. Mexatronika, Elektrik Enerjisi və Nəqliyyat Texnologiyaları Jurnalı.*

ИНТЕГРАЦИЯ И ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ИСМАИЛОВА Ш.И., МУСТАФАЕВА Ф.М.,

Искусственный интеллект (ИИ) радикально трансформирует энергетические системы, внося значительный вклад в устойчивость, эффективность и гибкость. ИИ оптимизирует баланс между производством и потреблением энергии, повышает стабильность энергосетей за счёт интеграции возобновляемых источников энергии и

совершенствует управление накоплением энергии. Кроме того, он способствует экологической устойчивости путём снижения углеродного следа. Возрастающие риски кибербезопасности, связанные с цифровой энергетической инфраструктурой, снижаются благодаря решениям на основе искусственного интеллекта, а автономное управление энергосистемами способствует сокращению эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: энергетические системы, искусственный интеллект, интеллектуальные сети, возобновляемая энергия

INTEGRATION AND IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES ON ENERGY SYSTEMS

ISMAYILOVA SH.I., MUSTAFAYEVA F.M.

Artificial intelligence (AI) is fundamentally transforming energy systems by making significant contributions to sustainability, efficiency, and flexibility. AI optimizes the balance between energy supply and demand, enhances grid stability through the integration of renewable energy sources, and improves storage management. Moreover, it contributes to environmental sustainability by reducing the carbon footprint. The growing cybersecurity risks associated with digital energy infrastructures are mitigated by AI-powered security solutions, while autonomous energy management reduces operational costs.

Keywords: energy systems, artificial intelligence, smart grids, renewable energy.

DOI:10.70784/azip.5.20254115

TELEKOMMUNİKASIYA SİSTEMLƏRİNDƏ QEYRİ-BİRCİNSLİ İDARƏETMƏ PROSESLƏRİNİN TƏDQIQAT ÜSULLARI

İSMAYILZADƏ İ.Q., QOÇUYEVA A.F.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq prospekti 20, Bakı,
Azərbaycan, AZ1010
ilkaneismayilzada@gmail.com*

Müasir telekommunikasiya sistemlərində tələb olunan vacib göstəricilərdən biri də qeyri-bircinsli idarəetmə proseslərinin tədqiqat üsullarıdır. Telekommunikasiya sistemlərinin, eləcə də digər mürəkkəb texniki sistemlərin tədqiqatının əsasında sistem yaşaması dayanır. Bu yaşamanın son məqsədi verilmiş keyfiyyətə malik sistemin texniki layihələndirilməsidir. Sistem-texniki layihələndirmə məsələlərinin həlli üçün müxtəlif struktur və funksional təşkilat üsullarının telekommunikasiya sisteminin iş xüsusiyyətlərinə necə təsir etdiyini bilməlidir, əsasən sistemdə analiz məsələlərinin həll edilməsi tələb olunur.

Açar sözlər: qeyri-bircinsli idarəetmə, telekommunikasiya, marşrutlaşdırma alqoritmləri.

GİRİŞ

İqtisadiyyatın intensiv inkişafı texnologiya və istehsalın təşkili sahəsində təkmilləşdirmə ilə, xüsusilə də hesablama texnikası və telekommunikasiya vasitələrinin geniş tətbiqi əsasında həyata keçirilir. İstehsalın səmərəliliyinin artırılmasının formalarından biri çoxprofilli strukturların, mürəkkəb energetik sistemlərin, elastik istehsal sistemlərinin, əlaqə şəbəkələrində telekommunikasiya avadanlıqlarının, ölçmə proseslərinin avtomatlaşdırılmasının idarə olunmasında kompüter şəbəkələrinin istifadəsidir. Bu gün bir çox təşkilat və şirkətlərin uğurlu fəaliyyəti telekommunikasiya vasitələrindən birbaşa asılıdır. İnternet və multimediyanın iş həyatında rolu xeyli artmışdır.

Hazırda istifadəçilərin və müxtəlif tətbiqlərin sayının sürətlə artması səbəbindən telekommunikasiya sistemlərində (TKS) onlarla müxtəlif trafik növü mövcuddur. Bu amil şəbəkə resurslarının daha səmərəli istifadəsi üçün mütləq nəzərə alınmalıdır. Şəbəkə resurslarının bölüşdürülməsinin yollarından biri – onların mövcud prioritetlərə əsasən paylanmasıdır. Telekommunikasiya sistemlərindən (TKS) səmərəli istifadə üçün ölçmə nəticələrinə əsaslanaraq TKS-in fəaliyyət keyfiyyətini qiymətləndirməyə, texniki və proqram təminatları, trafik idarəetmə üsulları dəyişdikdə isə sistemin iş göstəricilərini proqnozlaşdırmağa imkan verən modellər və mühəndis metodlarına malik olmaq vacibdir. TKS-in fəaliyyətinin təhlili xüsusi əhəmiyyət daşıyır, çünki bu mərhələdə əldə edilən nəticələr sintez məsələlərinin həlli üçün əsas rol oynayır. Lakin prioritetli sistemlərə dair riyazi işlərdə təhlil mərhələsinə ya az diqqət yetirilir, ya da bu mərhələ tamamilə buraxılır. Bununla belə, kütləvi xidmət sistemlərində baş verən proseslərin əhatəli təhlilinə həsr olunmuş bir sıra işlər mövcuddur. Bu işlərdə fərqli prioritetli sorğu sinifləri üzrə gözləmə (qalma) vaxtının sistemin ümumi yüklənməsi ilə asılılığı, fərqli xidmət intizamlarında sistemin yüklənməyə qarşı davamlılığı təhlil edilmiş və sintez zamanı istifadə oluna biləcək tövsiyələr şəklində formalaşdırılmışdır. Təhlil və sintez məsələlərinin həlli üçün analitik, statistik və eksperimental tədqiqat metodlarından istifadə olunur.

Analitik metodlar, sistem parametrləri və xarakteristikaları arasında müxtəlif dəyərlər sahəsində birbaşa əlaqələrin qurulmasına imkan verir, statistik metodlar isə bu əlaqələri yalnız ayrı-ayrı nöqtələrdə müəyyən edir.

Bu baxımdan, təhlil və sintez məsələlərində analitik metodlardan istifadə olunması məqsədəuyğun sayılır. TKS sahəsində mövcud vəziyyətin təhlili və aparılmış tədqiqatların icmalı göstərir ki, TKS-də qeyri-bircins trafiklə idarəetmə proseslərinin öyrənilməsi üçün

analitik və statistik metodların birləşdirildiyi çoxsəviyyəli iyerarxik modelləşdirməyə əsaslanan kompleks yanaşma tələb olunur.

NƏTİCƏLƏR VƏ MÜZAKİRƏLƏR

Telekommunikasiya sistemləri – protokollar əsasında kompüterlər arasında məlumat mübadiləsini təmin edən spesifik sistemlərdir. TKS-lərin bu spesifikliyi aşağıdakı amillərlə müəyyən edilir:

- a) şəbəkə texnologiyaları və arxitekturaların müxtəlifliyi;
- b) müxtəlif tip məlumatların ötürülmə keyfiyyətinə olan fərqli tələblər (məsələn, mətn faylları üçün əsas göstərici məlumatın itkisiz və təhrif olunmadan çatdırılmasını təmin edən etibarlılıqdır, audio və video məlumatlar üçün əsas göstərici paketlərin tələb olunan qəbul vaxtına nisbətdə gecikmələrinin (jitter) olmamasıdır);
- c) trafik axınlarının qeyri-bircinsliyi – bu cür trafiklərin idarə olunması üçün müxtəlif mexanizmlər (məsələn, TAN-da giriş metodları, marşrutlaşdırma alqoritmləri, əlaqələrin qurulma üsulları və s.) tətbiq edilə bilər.

Bu mexanizmlər şəbəkələrdə yüklənmənin və bloklanmanın qarşısının alınmasına yönəlmişdir və məlumatların ötürülməsində tələb olunan keyfiyyətin təmin edilməsinə xidmət edir [1, 2].

Müasir telekommunikasiya sistemləri aşağıdakı xüsusiyyətlərlə xarakterizə olunur:

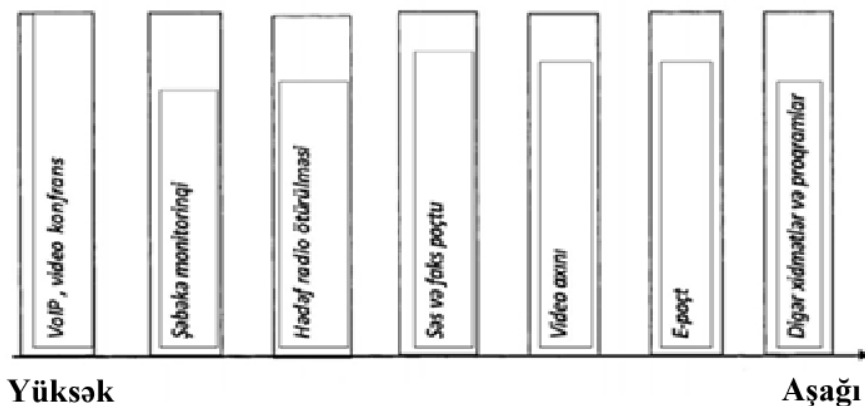
- istifadəçilərə təqdim olunan xidmətlərin müxtəlifliyi;
- istifadəçilərin sayının və ötürülən məlumat həcmının artması;
- istifadəçi xidmətlərinə olan keyfiyyət tələblərinin yüksəlməsi.

Telekommunikasiya sistemlərinə qoyulan bu tələblərin yerinə yetirilməsi aşağıdakılardan asılıdır:

- konkret məlumat ötürmə və emal texnologiyasının seçilməsi;
- kommunikasiya şəbəkəsinin optimal topologiyasının müəyyən olunması;
- şəbəkə avadanlıqlarının və trafik idarəetmə mexanizmlərinin seçilməsi və s.

Bu faktorlar birlikdə TKS-in strukturlu-funksional təşkilinin formalaşdırılmasını təmin edir. Hazırda istifadəçi sayının və müxtəlif tətbiqlərin intensiv şəkildə artması nəticəsində çox xidmətli şəbəkələr geniş yayılmağa başlamışdır. Bu cür şəbəkələrdə onlarla müxtəlif trafik növü mövcuddur. Müasir telekommunikasiya sistemlərinin xarakterik xüsusiyyətlərindən biri də trafiklərin qeyri-bircinsliyidir [3, 4].

Trafiklərin qeyri-bircinsliyi dedikdə, telekommunikasiya şəbəkəsi vasitəsilə müxtəlif tipli paketlərin ötürülməsi nəzərdə tutulur. Bu paketlərə video və audio paketlər, səs paketləri, mətn paketləri və s. aiddir. Bu paketlərin çatdırılması zamanı fərqli keyfiyyət tələbləri irəli sürülür. Şəkil 1-də müxtəlif sinif paketlərin çatdırılma vaxtına qarşı həssaslığı təsvir olunmuşdur. Bu xüsusiyyətləri şəbəkə administratoru nəzərə almalıdır ki, telekommunikasiya sistemlərinin resurslarından daha səmərəli istifadə edə bilsin. Şəbəkə resurslarının idarə edilməsinin bir üsulu – bu resursların mövcud prioritetlərə əsasən bölüşdürülməsidir.



Şəkil 1. Müxtəlif sinif paketlərin çatdırılma vaxtına həssaslığı.

Qeyri-bircinsli trafikın idarəetmə mexanizmlərinə qoyulan tələblər, fərqli növ paketlərin çatdırılma vaxtına qoyulan məhdudiyətlər şəklində formalaşdırılır. Bu məhdudiyətlər iki növdə ola bilər:

1. Ehtimalı şəklində — təyin olunmuş T^* çatdırılma vaxtı məhdudiyətini aşma ehtimalı p^* olaraq müəyyən edilir: $P(T_i > T_i) < p_i = 1, \dots, H$
2. Orta dəyər şəklində — çatdırılma vaxtının ortalama dəyəri T^* məhdudiyətindən kiçik olmalıdır: $T_i < T_i^*$ ($i = 1, H$), burada H — şəbəkədəki paket növlərinin sayı.

Qeyd olunan məhdudiyətlər, xüsusi statik və dinamik kombinə edilmiş trafik idarəetmə mexanizmlərinin tətbiqi ilə təmin edilə bilər, hansılar ki, telekommunikasiya sisteminin (TKS) resurslarını, xüsusilə fərqli növ paketlər arasında rabitə kanalının ötürmə qabiliyyətini, optimallaşdırılmış və maliyyə cəhətdən sərfəli prioritet təyinetməsi vasitəsilə effektiv bölüşdürməyə imkan verir.

Prioritetləşdirmənin mənası, marşrutlaşdırıcıların müxtəlif trafik növlərini ayırd edə bilməsi halında ortaya çıxır. Paket prioritetini göstərmək üçün xüsusi “Xidmət növü” (Type of Service - ToS) baytı istifadə edilə bilər. IPv4-də ToS sahəsinin ilk 3 biti (0-2) səkkiz prioritet səviyyəsini təyin etməyə imkan verir [5]: 111 — şəbəkə idarəetməsi (Network Control); 110 — şəbəkələrarası idarəetmə (Internetwork Control); 101 — SŞT1C/ECP; 100 — fəvqəladə təcili (Flash Override); 011 — təcili (Flash); 010 — dərhal (Immediate); 001 — prioritetli (Priority); 000 — adi (Routine).

Daha sonra gələn 3 bit paket tələb olunan xidmət keyfiyyətini göstərmək üçün istifadə olunur:

bit 3 — gecikmə: 0 — normal, 1 — az gecikmə; bit 4 — ötürmə qabiliyyəti: 0 — normal, 1 — yüksək; bit 5 — etibarlılıq: 0 — adi, 1 — yüksək.

ToS sahəsinin 6 və 7-ci bitləri əvvəllər istifadə olunmurdu. Lakin 1349 sənədinin qəbulundan sonra, əvvəl ayrılmış bitlər 3, 4, 5 və 6 birlikdə ToS sahəsi kimi qəbul edildi. Onlar aşağıdakı xidmət növlərini göstərmək üçün istifadə olunur: 1000 — aşağı gecikmə; 0100 — yüksək ötürmə qabiliyyəti; 0010 — yüksək etibarlılıq; 0001 — aşağı qiymət; 0000 — standart (normal).

ToS sahəsində göstərilən iki parametr — prioritet səviyyəsi və xidmət sinfi arasındakı fərq aşağıdakılardır: prioritet səviyyəsi konkret paket üçün prioriteti göstərməklə nəzərdə tutulub və şəbəkə avadanlığında növbələrin xidmətində nəzərə alınır; xidmət sinfi isə həmin trafik növü üçün ötürmə qabiliyyəti, gecikmə, etibarlılıq və maliyyət arasında optimal nisbəti müəyyən etməyə imkan verir və müvafiq olaraq marşrutu seçmək üçün istifadə olunur.

Çoxlu marşrutlaşdırıcılar ToS sahəsində göstərilən prioritet səviyyəsini və xidmət sinfini müəyyən etməyi bacarır, lakin şəbəkədə bütün marşrutlaşdırıcıların konkret trafik növü üçün eyni səviyyədə xidmət göstərəcəyi zəmanəti verilmir. Bəziləri trafik təsnifatında prioritet səviyyəsindən, digərləri xidmət sinfindən, üçüncülər isə başqa məlumatlardan istifadə edirlər. Müxtəlif cihazlarda növbələrin xidmət mexanizmləri də fərqli ola bilər. Xidmət keyfiyyətinin təmin edilməsi üçün başqa bir yanaşma — diferensial xidmətlər (Differentiated Services - Diff-Serv) modeli üzərində qurulub. Bu model müxtəlif trafik növlərinin uyğunlaşdırılmış şəkildə işlənməsini təmin edir. IETF Diff-Serv işçi qrupu tərəfindən hazırlanmış bu modelə uyğun olaraq, ToS sahəsi DS (Differentiated Services) adını alıb və onun 6 biti Diff-Serv kodu üçün ayrılıb. Bu kodun hər bir dəyəri özünəməxsus Per Hop Behavior Forwarding Class (PHB) - yəni ötürmə sinfi ilə əlaqəlidir və bu sinif xidmət səviyyəsini müəyyən edir. Hər sinfə aid paketlər müəyyən edilmiş xidmət keyfiyyəti tələblərinə uyğun işlənməlidir. Xidmətlərin diferensiasiyası üçün trafik məhdud sayda siniflərə bölünür. Diff-Serv modeli üzrə şəbəkə arxitekturası şəbəkənin nüvəsi və kənar (sərhəd) seqmentlərindən ibarət sistem kimi təqdim olunur. Şəbəkəyə daxil olan trafik sərhəd marşrutlaşdırıcıları tərəfindən təsnif edilir və normallaşdırılır. Trafikin normallaşdırılması xüsusilə onun parametrlərinin ölçülməsi və xidmət təqdimat qaydalarına uyğunluğunun yoxlanılmasını nəzərdə tutur. Şəbəkənin nüvəsində əsas marşrutlaşdırıcılar DS sahəsində göstərilən PHB (Per Hop Behavior) sinfinə uyğun olaraq trafiki ötürürlər. Diff-Serv modelinin üstünlükləri ondan ibarətdir ki, birincisi, bu model

müəyyən edilmiş trafik növünün necə işlənməli olduğunu vahid şəkildə başa düşməyi təmin edir; ikincisi, bütün trafiki ayrı-ayrılıqda hər axını təhlil etmək əvəzinə nisbətən az sayda siniflərə bölməyə imkan verir. Hazırda Diff-Serv çərçivəsində iki trafik sinfi müəyyən olunub: təcili (Expedited Forwarding PHB Group, RFC 2598) və təmin edilmiş çatdırılma (Assured Forwarding PHB Group, RFC 2597). Diff-Serv modelinin ciddi üstünlüyü ondadır ki, əvvəlcədən əlaqə yaradılması və resursların müəyyən edilməsi tələb olunmur, həmçinin şəbəkə avadanlığının yüksək performansına ehtiyac yoxdur. Klassik və Diff-Serv yanaşmalarının təhlili göstərir ki, əgər ToS sahəsi geriye uyğunluq təmin edilmədən dəyişdirilsə, lokal şəbəkə administratorları zərər görərlər, çünki istifadə etdikləri prioritetləşdirmə mexanizmlərinin təsir zonası lokal şəbəkə ilə məhdudlaşacaq. Klassik prioritetləşdirmə mexanizmlərinin qorunması üçün əsas yol özəl, ərazi üzrə paylanmış hesablama şəbəkəsinin yaradılması olacaq. Trafik idarəetmə mexanizmlərinin effektivliyini qiymətləndirmək üçün kütləvi xidmət nəzəriyyəsinin riyazi aparatından istifadə olunan prioritet idarəetmə modelləri hazırlanıb. Telekommunikasiya sistemlərinin effektivliyi şəbəkənin funksional və struktur təşkili, habelə şəbəkədəki yüklənmə (trafik) parametrlərinin kütləvi xidmət modelləri vasitəsilə qiymətləndirilə bilər. Şəbəkədəki yük hesablama yolu ilə müəyyən edilə bilər və ya protokol analizatorları və şəbəkə monitorları vasitəsilə ölçülməlidir [5]. Protokol analizatorlarının əsas funksiyaları məlumat axınından təhlil üçün paketlərin seçilməsi (məlumat axınının filtrasiyası), səhvli paketlərin aşkarlanması, cavab vaxtının ölçülməsi və s.-dən ibarətdir. Protokol analizatorları açıq sistemlərin arxitekturasının bütün səviyyələrində işləyə bilər.

Telekommunikasiya sistemlərinin əsas effektivlik göstəriciləri kimi ötürmə qabiliyyəti, operativlik və etibarlılıq istifadə olunur.

- Telekommunikasiya sisteminin ötürmə qabiliyyəti, vahid vaxt ərzində ötürülən mesajların (paketlərin, çərçivələrin, hüceyrələrin, bitlərin) sayına görə qiymətləndirilir.

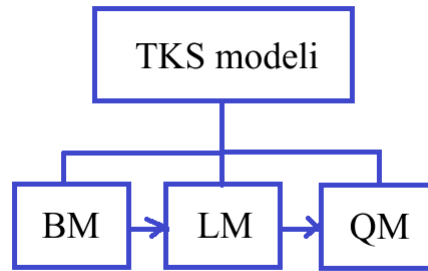
- Telekommunikasiya sisteminin operativliyi isə paketlərin çatdırılması zamanı gecikməsi ilə müəyyən edilir. Bu gecikməyə rabitə kanalının boşalmasının gözləmə vaxtı, paketlərin rabitə kanalında ötürülmə vaxtı, fiziki mühitdə yayılma vaxtı və rabitə düyünlərində paketlərin işlənmə vaxtı daxildir.

Telekommunikasiya sistemlərinin (TKS) layihələndirilməsində sistem yanaşması müasir tədqiqat metodlarının geniş istifadəsini nəzərdə tutur. TKS-də idarəetmə proseslərinin tədqiqi zamanı ierarxik yanaşma istifadə etmək məqsəduyğundur. Bu yanaşma müxtəlif detallılıq səviyyəsində TKS-in funksionallığı, strukturu və yüklənməsinin müxtəlif aspektlərini əks etdirən çoxsaylı baza, lokal və qlobal modellərin hazırlanmasını nəzərdə tutur. "Baza model" (ƏM) termini o deməkdir ki, onun əsasında bütün digər, daha mürəkkəb TKS modelləri qurulur və hesablanır. Lokal modellərə (LM) isə ayrı-ayrı qurğuların (məsələn, rabitə kanalları, kommutatorlar, marşrutlaşdırıcılar), alt sistemlərin, düyünlərin, TKS fraqmentlərinin modelləri aiddir. Qlobal modellər (QM) isə TKS-in bütöv kimi nəzərdən keçirildiyi modellərdir. Modellərin təsnifatı şəkil 2 - də göstərilmişdir.

TKS-in parametrlərinə aşağıdakı qruplar aid edilə bilər: a) struktur parametrlər — sistemin tərkibi və strukturu haqqında məlumat verən kəmiyyətlər (məsələn, düyünlərin sayı, düyünlərin tərkibi — kompyuterlər, rabitə cihazları, terminalların sayı və növləri, düyünlərin növləri, rabitə düyünlərinin məhsuldarlığı, şəbəkə topologiyası, avadanlığın tərkibi və növləri, cihazların texniki göstəriciləri — prosessorların sürəti, əməli və kənar yaddaşın həcmi, rabitə kanallarının ötürmə qabiliyyəti və s.). b) yük parametrləri — TKS-in xarici mühitlə qarşılıqlı təsirini, yəni şəbəkə trafiki tərəfindən yaradılan yükləri təsvir edən kəmiyyətlər (trafik növləri, trafik intensivliyi, mesajların uzunluğu, paketlərin uzunluğu və s.). c) funksional parametrlər — TKS-in funksional təşkili haqqında məlumat verən kəmiyyətlər (məsələn, abunəçilər arasında rabitə kanallarının təşkili üsulları, məlumatların kanallar vasitəsilə ötürülməsi üsulları, məlumatların ötürülmə marşrutlarının seçilməsi alqoritmləri, şəbəkədə trafik idarəetmə üsulları).

TKS-in xarakteristikaları sistemin fəaliyyətinin keyfiyyətini təsvir edən kəmiyyətlərdir: məhsuldarlıq, paketlərin çatdırılmasında gecikmə vaxtı, rabitə kanallarının boşalma vaxtları,

qurğu yüklənməsi, növbələrin uzunluğu və s. Adətən TKS araşdırmaları stasionar rejimin mövcudluğu fərziyyəsi əsasında aparılır, yəni sistemin ehtimal xarakteristikaları zamanla dəyişmir.



Şək.2. Telekommunikasiya sistemlərinin modellərinin təsnifatı.

Baza modeli üçün TKS xidmət xüsusiyyətləri həm hər bir müraciət sinfi üzrə, həm də bütün siniflər üzrə ümumi müraciət axını üçün müəyyən edilir. Sadə halda TKS tədqiqi əsasən göstərilən göstəricilərin orta dəyərlərinin müəyyən edilməsindən ibarətdir. Daha ətraflı tədqiq isə göstərilən göstəricilərin paylanma qanunlarının tapılmasından ibarətdir, bu isə həmişə mümkün olmur. Lakin çox vaxt aşağıdakıları tapmaq mümkündür: a) vaxt xarakteristikalarının (qalma vaxtı, gözləmə və s.) paylanma sıxlıqlarının Laplas çevrilməsi; b) ölçüsüz (kəmiyyət) xarakteristikaların (növbənin uzunluğu, sistemdə müraciətlərin sayı) generasiyaedici funksiyaları.

Bu funksiyalara əsaslanaraq göstərilən xarakteristikaların istənilən dərəcədə ilkin və mərkəzi anları hesablanabilir. TKS-nin vaxt xarakteristikalarını müəyyən etmək üçün açıq (RSeMO) xidmət şəbəkələrindən, məhsuldarlıq qiymətləndirməsi üçün isə bağlı (ZSeMO) xidmət şəbəkələrindən istifadə etmək məqsədəuyğundur, yerli xarakteristikaların müəyyən edilməsində isə baza modelindən istifadə olunur. TKS avadanlığının etibarlılığının sistem fəaliyyətinin keyfiyyətinə təsirini qiymətləndirmək üçün baza modelə paket axınına mütənasib Poisson axını əlavə edilir.

Seçilmiş modelin mürəkkəbliyindən və tədqiq məqsədindən asılı olaraq aşağıdakı metodlar istifadə oluna bilər:

- Analitik;
- Riyazi hesablamalar (rəqəmsal);
- İmitasiya (simulyasiya);
- Eksperimental.

Analitik metodlar — açıq riyazi ifadələrlə həllərin alınmasıdır. Lakin bəzən tənlikləri analitik şəkildə həll etmək mümkün olmur (məsələn, integral funksiyalar üçün ilkin funksiyanın olmaması səbəbindən). Buna görə də yalnız modelin müəyyən xüsusiyyətlərinə malik olduqda açıq analitik həll tapılır. Analitik metodların üstünlükləri:

- Nəticələrin ümumiliyi: nəticələr tədqiq olunan sistemlər sinfinə geniş parametrlər aralığında tətbiq oluna bilər;
- Sadəlik və aydınlıq: nəticələr əsas xüsusiyyətləri və qanunauyğunluqları asanlıqla müəyyən etməyə imkan verir;
- Tətbiq imkanı: nəticələr funksional keyfiyyəti müəyyən olunmuş sistemlərin layihələndirilməsində istifadə edilə bilər.

Açıq həll alınmadıqda, riyazi hesablamalar (rəqəmsal metodlar) tətbiq edilir, məsələn:

- Tənliklərin həlli üçün kord və tangens üsulları;
- Müəyyən inteqraların hesablanması üçün trapesiya və Simpson üsulları və s.

Bu metodlar analitik metodların həll dairəsini genişləndirir. Əgər rəqəmsal metodlar da mürəkkəblilik, hesablamaların səhvlərə həssaslığı və digər səbəblərdən nəticəsiz qalırsa, tətbiq olunur:

- İmitasiya modelləşdirmə - statistik testlərə əsaslanan simulyasiya üsulu. İmitasiya modelləşdirmənin üstünlüyü - universal olmasıdır, yəni istənilən mürəkkəblikdə və detallılıqda sistemlərin analizinə imkan verir. Çatışmazlığı — yüksək hesablamalıdır (çoxlu sayda ədədi əməliyyat tələb edir) və nəticələr konkret nöqtələrdə alınır, yəni ümumi əlaqəni deyil, yalnız müəyyən əvvəlcədən seçilmiş vəziyyətləri göstərir.

Telekommunikasiya sistemlərinin (TKS) fəaliyyətinə dair ən etibarlı məlumat mənbəyi, real sistemlərdə baş verən proseslərin xarakteristikalarının ölçülməsinə əsaslanan və bu ölçmələrin nəticələrinin ən maraqlı asılılıqları üzə çıxarmaq məqsədilə işlənməsini nəzərdə tutan eksperimental metodlardır. Hazırda bu metodlar TKS-nin fəaliyyətinin bəzi aspektləri haqqında məlumatların yeganə mənbəyidir.

Eksperiment nəticəsində əldə edilən məlumatlar yeni sistemlərin layihələndirilməsi zamanı istifadə olunur. Lakin bu metodların imkanları, hazırda mövcud olan TKS-lərlə məhdudlaşır və onların nəticələri yalnız konkret hallar üçün keçərlidir. Hətta məhdud məsələlərin tədqiqində belə bir məsələnin həlli üçün bir neçə metodun istifadəsinə ehtiyac yaranır. Analitik metodlarla məsələlərin həlli zamanı, bu metodlar hər zaman konseptual modelin qurulması və ya riyazi modelin qurulması mərhələsində qəbul olunan sadələşdirici fərziyyələrin istifadəsini nəzərdə tutur. Bu zaman əldə edilən asılılıqlar yalnız qəbul edilmiş fərziyyələrin gətirdiyi metodiki səhvlərin qiymətləndirilməsindən sonra praktik məsələlərin həlli üçün istifadə oluna bilər. Metodiki səhvlərin qiymətləndirilməsi üçün geniş şəkildə imitasiya modelləşdirməsi metodundan istifadə edilir, bu isə istənilən dəqiqliklə rəqəmsal həll əldə etməyə imkan verir.

NƏTİCƏ

Telekommunikasiya sistemlərinin effektivliyinin qiymətləndirilməsi üçün kütləvi xidmət modelləri istifadə oluna bilər, hansılar ki, telekommunikasiya sistemində məlumatların ötürülməsi zamanı yaranan vaxt gecikmələrini göstərir. Telekommunikasiya sistemlərinin, eləcə də digər mürəkkəb texniki sistemlərin tədqiqatının əsasında sistem yanaşması dayanır. Bu yanaşmanın son məqsədi verilmiş keyfiyyətə malik sistemin texniki layihələndirilməsidir. TKS -nin texniki layihələndirilməsi zamanı hər bir parametrin böyük təsiri vardır. Burada yüklənmə artdıqca orta gözləmə vaxtı da sürətlə artır. Eyni zamanda daha yüksək asimmetriya əmsalı (yəni qeyri-simmetrik axın) variasiya əmsalı sabit qalsa belə orta gözləmə vaxtını daha da artırır. Bu, o deməkdir ki, trafikə üçüncü momenti (asimmetriyası) nəzərə alınmadan tərtib olunan modellər real sistemin işini dəqiq əks etdirməyə bilər.

1. ITU-T Recommendation V. 1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services, 2006.
2. ITU-T Recommendation Y. 1540. IP Packet Transfer and Availability Performance parameters. 2002.
3. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. 4-е изд. - СПб.: Питер, 2004.
4. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. - СПб: Наука и техника, 2004.
5. <https://share.google/3h1KrT2QagObT0bL8>.
6. <https://share.google/d1HreVYUzV5A1NZKX>.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

ИСМАИЛЗАДЕ И.К., ГОЧУЕВА А.Ф.

Одним из важных показателей, необходимых в современных телекоммуникационных системах, являются методы исследования неоднородных процессов управления. Исследование телекоммуникационных систем, как и других сложных технических

систем, базируется на системном подходе. Конечной целью этого подхода является техническое проектирование системы с заданным качеством. Для решения задач системно-технического проектирования необходимо знать, как различные методы структурной и функциональной организации влияют на эксплуатационные характеристики телекоммуникационной системы, в основном требуется решение задач анализа в системе.

Ключевые слова: гетерогенное управление, телекоммуникации, алгоритмы маршрутизации.

RESEARCH METHODS OF HETEROGENEOUS CONTROL PROCESSES IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS

ISMAYILZADEH I.Q., GOCHUYEVA A.F.

One of the important indicators required in modern telecommunications systems is the research methods of heterogeneous control processes. The research of telecommunications systems, as well as other complex technical systems, is based on the systems approach. The ultimate goal of this approach is the technical design of a system with a given quality. To solve system-technical design problems, one must know how various structural and functional organization methods affect the operating characteristics of a telecommunications system, mainly solving analysis problems in the system is required.

Keywords: heterogeneous control, telecommunications, routing algorithms.

DOI:10.70784/azip.5.20254122

DAVAMLI ENERJİ TƏCHİZATINDA ƏTRAF MÜHİTİN QORUNMASI TƏDBİRLƏRİNİN EFFEKTİVLİYİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

RƏHİMOV F.A., RƏHİMOVA T.A.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq prospekti 20, Bakı,
Azərbaycan, AZ1010
rahimov_fa@yahoo.com*

Məqalə davamlı və etibarlı enerji təchizatı çərçivəsində ətraf mühitin qorunması tədbirlərinin tətbiqi və effektivliyinin qiymətləndirilməsini müzakirə etmək məqsədi daşıyır. Əvvəlcə davamlı təchizat idarəçiliyinin planlaşdırılması altında ətraf mühitin qorunması tədbirləri və onların əhəmiyyəti təqdim edilir, sonra təchizat çərçivəsində bu tədbirlərinin rolu izah edilir.

Açar sözlər: davamlı enerji təchizatı idarəçiliyi, əsas ekoloji mühafizə tədbirləri, təsir tədbirlərinin qiymətləndirilməsi, ətraf mühitin mühafizə.

1. Davamlı enerji təchizatı idarəçiliyinin əhəmiyyəti.

Qlobal iqtisadiyyatın davamlı inkişafı və ekoloji problemlərin getdikcə daha çox ön plana çıxması ilə davamlı inkişaf həyatın bütün sahələrində diqqət mərkəzinə çevrilmişdir. Bu kontekstdə mühüm bir məsələ kimi davamlı təchizat idarəçiliyinə daha çox diqqət yetirilir. Ekoloji, sosial və iqtisadi amilləri inteqrasiya edərək, davamlı təchizat idarəçiliyi müəssisələrin mənfi ekoloji və sosial təsirlərini minimuma endirməklə yanaşı, onların fəaliyyətlərində iqtisadi fayda əldə etmələrinə kömək edir.

Qlobal olaraq, təchizat zənciri fəaliyyətlərinin ekoloji və sosial təsirləri getdikcə daha əhəmiyyətli olur. Xammal tədarükündən, xammalın nəql edilməsindən, istehsalatdan, logistika paylanmasından tutmuş məhsul satışına və satış sonrası xidmətlərə qədər bütün təchizat zənciri boyu hər bir halqa ekoloji və sosial təsir göstərə bilər. Məsələn, həddindən artıq meşə qırılması ekoloji dağıntılara, yüksək karbonlu istehsal üsulları iqlim dəyişikliyinə, qeyri-qanuni tullantıların atılması torpaq və suyun çirklənməsinə səbəb olur. Buna görə də, davamlı təchizat zənciri idarəçiliyi sisteminin qurulması müəssisələrin davamlı inkişafına nail olmaqda əsas rol oynayır [1].

2. Tədqiqatın məqsədi.

Davamlı təchizat zəncirinin planlaşdırılması müasir iqtisadiyyatın əsas prioritetlərindən biridir və ətraf mühitin mühafizəsi bu prosesin ayrılmaz hissəsidir. Azərbaycan kimi resurslara zəngin ölkələrdə təbii ehtiyatların səmərəli istifadəsi və ekoloji tarazlığın qorunması iqtisadi inkişafın davamlılığını təmin etmək üçün vacibdir. Bu məqalədə ətraf mühitin tətbiqi və effektivliyinin qiymətləndirilməsi, xüsusilə də davamlı təchizat zənciri kontekstində müdafiə tədbirlərinin rolu və Azərbaycanın bu sahədə təcrübəsi təhlil edilir [2].

3. Davamlı Təchizat Zəncirinin Planlaşdırılması və Ətraf Mühit

Davamlı təchizat zənciri (DTZ) iqtisadi, sosial və ekoloji amilləri tarazlaşdıraraq resursların səmərəli istifadəsini və uzunmüddətli ekoloji sabitliyi hədəfləyir. DTZ-nin əsas prinsipləri arasında aşağıdakılar yer alır:

- **Resurs səmərəliliyi:** Enerji, su və xammalın minimum sərfiyyatı ilə maksimum nəticə əldə etmək.
- **Tullantıların azaldılması:** İstehsal və logistika proseslərində tullantıların minimuma endirilməsi.

- **Ekoloji təsirlərin monitorinqi:** Ətraf mühitə təsirlərin sistemli şəkildə qiymətləndirilməsi və idarə edilməsi.

Azərbaycanda Davamlı təchizat zənciri (DTZ)-nin inkişafı neft və qaz sektoruna bağlı olan iqtisadiyyatın diversifikasiyası və yaşıllıq iqtisadiyyata keçid strategiyaları ilə sıx bağlıdır. Məsələn, Azərbaycan Respublikasının Prezidenti tərəfindən 2016-cı ildə təsdiq edilmiş “Kənd Təsərrüfatı Məhsullarının İstehsalına və Emalına Dair Strateji Yol Xəritəsi” ekoloji cəhətdən təmiz texnologiyaların tətbiqini və təbii resursların səmərəli istifadəsini prioritet kimi müəyyənləşdirir [5].

4. Ətraf Mühitin Tətbiqi və Müdafiə Tədbirləri

Ətraf mühitin tətbiqi, təchizat zəncirində ekoloji təsirləri minimuma endirmək üçün konkret tədbirlərin həyata keçirilməsini nəzərdə tutur. Bu tədbirlərə aşağıdakılar daxildir:

1. **Təmiz texnologiyaların tətbiqi:** Bərpa olunan enerji mənbələrindən (günəş, külək, hidroenerji) istifadə, enerji səmərəliliyinin artırılması.
2. **Tullantıların idarə edilməsi:** Təkrar emal, utilizasiya və zərərsizləşdirmə sistemlərinin qurulması.
3. **Ekoloji monitorinq:** Ətraf mühitin vəziyyətini qiymətləndirmək üçün sistemli müşahidə və analiz.
4. **Yaşıl logistika:** Karbon emissiyalarını azaltmaq üçün ekoloji cəhətdən təmiz nəqliyyat vasitələrindən istifadə.

Bir istehsal şirkətinin davamlı təchizat zənciri planlaşdırmasında davamlı inkişafı təşviq etmək üçün bir sıra ekoloji tədbirlər qəbul edilmişdir. Şirkət təchizatçılarla uzunmüddətli və sabit əməkdaşlıq münasibətləri qurmuş, təchizatçılardan ekoloji qanunvericiliyə riayət etməyi, ekoloji sertifikatlı xammal təmin etməyi, xammalın izlənilməsini və ekoloji qorunmasını təmin etməyi və ekoloji riskləri və uyğunluq risklərini azaltmağı tələb edir. Eyni zamanda, şirkət istehsal prosesini optimallaşdırmaq və təkmilləşdirmək, tullantı suları və tullantı qazı emissiyalarını azaltmaq və resurslardan istifadə səmərəliliyini artırmaq üçün təmiz istehsal texnologiyasını tətbiq etmişdir. Həmçinin, təkrar emal və utilizasiya konsepsiyasını təşviq edir, tullantı materiallarını təkrar emal edir, təbii ehtiyatlara olan asılılığı azaldır və ətraf mühitə tullantı çirklənməsini azaldır. Bundan əlavə, müəssisə enerji qənaət və emissiya azaldılması tədbirlərini həyata keçirmiş, logistika nəqliyyat rejimini optimallaşdırmış və nəqliyyat xərclərini və karbon emissiyalarını azaltmışdır. Respublikamızda bu tədbirlərə misal olaraq ARDNŞ-in “Ekoloji Siyasət” sənədini göstərmək olar. Bu sənəd “sıfır tullantı” prinsipinə əsaslanaraq ətraf mühitə neqativ təsirlərin minimuma endirilməsini hədəfləyir. Məsələn, “Bibiheybətneft” və “Neft Daşları” kimi neft-qaz yataqlarında lay sularının təmizlənməsi və utilizasiyası üçün xüsusi qurğular tikilir [6].

5. Effektivliyin Qiymətləndirilməsi

Ətraf mühit tədbirlərinin effektivliyini qiymətləndirmək üçün bir sıra metodologiyalar tətbiq olunur:

- **Ətraf mühitə təsirin qiymətləndirilməsi (ƏMTQ):** Layihələrin ətraf mühitə təsirinə ilkin mərhələdə öyrənmək və zərərli təsirləri azaltmaq üçün tədbirlər görmək. Azərbaycanda 1996-cı ildən etibarən karbohidrogen və tikinti layihələri ƏMTQ-dan keçir.
- **Karbon izinin ölçülməsi:** Təchizat zəncirində emissiyaların həcmi qiymətləndirmək və azaltmaq.
- **Resurs səmərəliliyinin analizi:** Enerji və xammal sərfiyyatının effektivliyini ölçmək.
- **Ekoloji monitorinq sistemləri:** Real vaxt rejimində ətraf mühitin vəziyyətini izləmək və proqnozlaşdırmaq. Azərbaycanda Ekoloji Monitorinq üzrə Dövlət Sistemi təbii mühitin və texnologiya obyektlərin vəziyyətini sistemli şəkildə izləyir.

Beynəlxalq təcrübəyə əsasən, ətraf mühitə təsirin qiymətləndirilməsi layihələrin dəyərini 5-7 il ərzində bərpa edir və təmizləyici avadanlıqların quraşdırılmasından 3-4 dəfə ucuz başa gəlir. Azərbaycanda bu cür qiymətləndirmələr “Azərbaycan Respublikasında ekoloji vəziyyətin

yaxşılaşdırılmasına dair 2006-2010-cu illər üçün Kompleks Tədbirlər Planı” çərçivəsində uğurla həyata keçirilib.

6. Azərbaycanda Bərpa Olunan Enerji və Davamlı Təchizat Zənciri

Azərbaycanın bərpa olunan enerji potensialı (26,940 MVt) təchizat zəncirinin davamlılığını artırmaq üçün böyük imkanlar yaradır. Günəş (23,040 MVt), külək (3,000 MVt), hidroenerji (520 MVt) və bioenerji (380 MVt) mənbələri ekoloji cəhətdən təmiz alternativlər təklif edir. Bu mənbələrin təchizat zəncirində tətbiqi aşağıdakı üstünlükləri verir:

- **Enerji asılılığının azalması:** Neft və qaza alternativ olaraq bərpa olunan enerji istifadəsi karbon emissiyalarını azaldır.
- **İqtisadi səmərəlilik:** Günəş və külək enerjisi layihələri uzunmüddətli investisiyalar üçün sərfəlidir.
- **Ekoloji tarazlıq:** Hidroenerji və bioenerji kimi mənbələr yerli ekosistemlərə təsiri nəzərə alınmaqla tətbiq olunduqda ətraf mühitin mühafizəsinə töhfə verir.

Məsələn, Qaradağda 230 MVt gücündə günəş stansiyası və Xızıda 5.5 MVt gücündə külək stansiyası kimi layihələr Azərbaycanın yaşıl enerjiyə keçidini sürətləndirir. 2030-cu ilə qədər bərpa olunan enerjinin payının 30%-ə çatdırılması hədəfi də bu istiqamətdə mühüm addımdır [5].

7. Çətinliklər və Təvsiyələr

Azərbaycanda davamlı təchizat zəncirinin planlaşdırılması və ətraf mühit tədbirlərinin tətbiqində bəzi çətinliklər mövcuddur:

- **İnfrastruktur məhdudiyyətləri:** Bərpa olunan enerji və təkrar emal sistemləri üçün infrastrukturun inkişafı zəruridir.
- **Maliyyə tələbləri:** İlk investisiyalar yüksək ola bilər, bu da xarici investisiyalara ehtiyacı artırır.
- **Fərdi maarifləndirmə:** Əhəlinin və bizneslərin ekoloji məsuliyyətə cəlb olunması zəifdir.
- **Dövlət dəstəyi:** Bərpa olunan enerji layihələri üçün subsidiyalar və vergi güzəştləri tətbiq edilməlidir.
- **Beynəlxalq əməkdaşlıq:** Xarici təcrübənin (məsələn, BP və Masdar layihələri) tətbiqi genişləndirilməlidir.
- **Təhsil və təbliğat:** Ekoloji maarifləndirmə kampaniyaları və təhsil proqramları ilə əhəlinin məlumatlılığı artırılmalıdır.
- **Monitorinqin gücləndirilməsi:** Real vaxt rejimində ekoloji monitorinq sistemlərinin tətbiqi və avtomatlaşdırılması həyata keçirilməlidir.

NƏTİCƏ

İstehsal müəssisələrinin davamlı təchizat zənciri planlaşdırılmasında ekoloji tədbirlərin tətbiqi yalnız müəssisələrin rəqabət qabiliyyətini və davamlılığını artırmaq üçün deyil, həm də ətraf mühit, iqtisadiyyat və cəmiyyətə müsbət təsir göstərmək üçün çox vacibdir. Təchizatçılarla tərəfdaşlıq qurmaq və ekoloji sertifikatlı xammal tələb etməklə şirkətlər məhsullarının ekoloji cəhətdən təmiz olmasını təmin edə bilər və ekoloji və uyğunluq risklərini azalda bilər. Təmiz istehsal texnologiyalarının tətbiqi, təkrar emal və bərpa olunan istifadə konsepsiyalarının təşviqi, eləcə də enerji qənaət və emissiya azaldılması tədbirlərinin həyata keçirilməsi və logistika və nəqliyyat rejimlərinin optimallaşdırılması müəssisələrin ətraf mühitə mənfi təsirini azaltmağa, resurslardan istifadə səmərəliliyini artırmağa, xərcləri azaltmağa və iqtisadi fayda və ekoloji faydaların qazan-qazan vəziyyətinə nail olmağa kömək edə bilər.

1. *Sarkis, J. & Dhavale, D.G. (2015). Supplier development: Improving supplier performance through knowledge transfer. Journal of Cleaner Production, 86, 275-285.*

2. *Pagell, M. & Wu, Z. (2009). Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of 10 exemplars. Journal of Supply Chain Management, 45(2), 37-56.*
3. *Seuring, S. & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production, 16(15), 1699-1710.*
4. *Handfield, R., Sroufe, R. & Walton, S.V. (2005). Integrating environmental management into supply chain management: A research agenda. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 35(7), 514-539.*
5. Azərbaycan Respublikası Energetika Nazirliyi (2023) Mənbə: Energetika Nazirliyinin rəsmi saytı və “Azərbaycan 2030: Sosial-iqtisadi inkişaf strategiyası”.
6. Azərbaycan Respublikası Dövlət Neft Şirkəti (ARDNŞ) – Ekoloji Siyasət Sənədi (2022). Mənbə: ARDNŞ rəsmi saytı.
7. Azərbaycan Respublikasının “Kənd Təsərrüfatı Məhsullarının İstehsalına və Emalına Dair Strateji Yol Xəritəsi” (2016) Mənbə: Azərbaycan Respublikası Prezidentinin Administrasiyası.
8. Beynəlxalq Enerji Agentliyi (IEA) – Renewable Energy Market Update (2023) Mənbə: IEA rəsmi saytı.
9. Masdar və BP ilə əməkdaşlıq layihələri (2021-2023) Mənbə: Masdar rəsmi saytı və BP Azərbaycan.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ УГЛЕРОДА

РАГИМОВ Ф.А., РАГИМОВА Т.А.

Целью статьи является обсуждение внедрения и оценки мер по защите окружающей среды в рамках устойчивого энергоснабжения. Сначала вводятся меры по защите окружающей среды и их значение в рамках планирования управления устойчивым снабжением, а затем объясняется роль этих мер в рамках снабжения.

Ключевые слова: устойчивое управление энергоснабжением, основные меры по экологической охране, оценка мер воздействия, охрана окружающей среды.

PROSPECTS OF USING NUCLEAR ENERGY TO REDUCE CARBON OXIDES

RAHIMOV F.A., RAHIMOVA T.A.

The article aims to discuss the implementation and evaluation of environmental protection measures within the framework of sustainable energy supply. First, environmental protection measures and their importance under sustainable supply management planning are introduced, and then the role of these measures within the framework of supply is explained.

Keywords: sustainable energy supply management, basic environmental protection measures, assessment of impact measures, environmental protection.

DOI:10.70784/azip.5.20254126

**TƏDRİCƏN İŞƏ SALINAN BÖYÜK GÜCLÜ YÜK NASOSUNUN
ELEKTRİK İNTİQALININ TƏDQIQI****SULTANOV E.F., HƏSƏNOV E.A.**

*“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası” PHŞ
Az1000 Bakı ş. Z.Əliyeva küç.18
elshen_sultanov@mail.ru
hasanov.079@mail.ru*

Məqalədə istismarda olan gəmilərin mövcud yük nasoslarının elektrik intiqallarının işə buraxılmasından bəhs edilir. Gəmilərdə adətən elektrik intiqalının işəburaxılması asinxron mühərrikin stator dolaqlarını ulduz sxemindən üçbucaq sxeminə keçirməklə yerinə yetirilir. Bu işəburaxma üsulu kifayət qədər etibarlı sayılır. UT2 avtomatlaşdırma dərəcəsi olan maye-yük daşıyan gəmilərdə yük nasoslarının elektrik intiqallarının mövcud idarəetmə sistemləri müasir dövrün tələblərinə cavab vermədiyinə görə idarəetmə sistemlərinin etibarlılığını yüksəltmək və elektrik enerjisinin sərfinin azaldılması məsələsi qarşıya məqsəd qoyulmuşdur. Məqalədə asinxron mühərriklərin tədricən işəburaxma qurğusunun elektrik sxemi və tədricən işəburaxma zamanı momentin sürətdən asılılıq xarakteristikası göstərilmişdir. Məqalədə tədricən işəburaxıcılarla işəsalınan mövcud yük nasosunun elektrik intiqalının prinsipial sxemi araşdırılmış, qurğunun iş rejimlərinə baxılmış, asinxron mühərriklərin stator dolağının ulduzdan üçbucağa keçməklə işə buraxma üsulunun mənfi cəhətləri nəzərə alınaraq, yeni hazırlanan AUT2 avtomatlaşdırma dərəcəsi olan maye-yük daşıyan gəmilərdə yük nasosları üçün elektrik intiqalını seçildikdə üstünlük idarəetmə ilə əlaqədar əlavə güc itgisi olmayan tədricən işəburaxma qurğusu ilə işə salınan rotoru qısaqapanmış asinxron mühərrikinə verilməsi təklif olunmuşdur.

Açar sözlər: gəmi, yük nasosu, elektrik intiqalı, asinxron mühərrik, tədricən işəburaxma

Giriş. Nasoslar xidmət sahələrinə görə aşağıdakı qruplara bölünürlər: gəmi mühərriklərinə və buxar güc qurğularına xidmət edən köməkçi nasoslar; ümumgəmi təyinatlı nasoslar; xüsusi təyinatlı nasoslar.

Gəmi daxili yanma mühərriklərini soyudan nasoslar, yarım güc qurğularının içməli su, dövrətdirici və kondensat nasosları, yağ və yanacaq nasosları 1-ci qrupa aiddir.

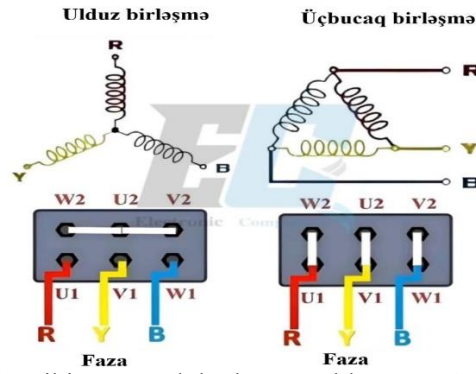
Gəminin təhlükəsiz üzməsinə, gəmi heyətinin və sərnəşinlərin sanitariya-məişət şəraitini təmin edən nasoslar isə 2-ci qrupa aiddir. Yanğın, qurutma, ballast, sanitariya və içməli su nasosları bu qrupa daxildir.

3-cü qrupa gəmi üçün nəzərdə tutulmuş xüsusi təyinatlı nasoslar aiddir. Tankerlərdə istifadə edilən yük və təmizləmə nasosları, buzqırın gəmilərdə istifadə olunan kren nasosları, xilasedici gəmilərdə güclü suvuran nasoslar bu qrupa daxildir.

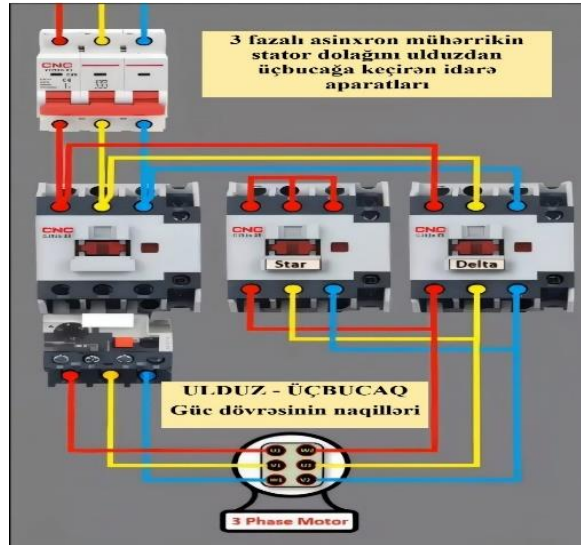
Hazırda gəmilərin yük nasoslarının elektrik intiqallarının işə buraxılması mühərrikin stator dolaqlarını ulduzvaridən üçbucağa keçirməklə əldə edilir. Şəkil 1-də asinxron mühərrikin stator dolaqlarının ulduz və üçbucaq birləşməsi sxemi, şəkil 2-də isə bu birləşməni yerinə yetirən idarə aparatları göstərilmişdir.

Ulduzdan üçbucağa keçdikdə elektrik mühərrikinin stator dolağına $\sqrt{3}$ dəfə az gərginlik verilir. Buna görə də işəsalma momenti də 3 dəfə az olur. Çünki gərginliyin azalmasından başqa cərəyan da yalnız sxemin dəyişdiyinə görə $\sqrt{3}$ dəfə azalır. Əslində isə cərəyan 3.5-4 dəfə aşağı düşür. Buna səbəb gərginliyin azalması nəticəsində induktiv müqavimətlərin artmasıdır [6].

Üsulun çatışmayan cəhəti ondan ibarətdir ki, ulduzvaridən üçbucağa keçdikdə elektrik mühərrikinin cərəyan dövrəsində qısa müddətdə qırılma baş verir və kommutasiya gərginliyi yaranır.



Şək.1. Asinxron mühərrikin stator dolaqlarının ulduz və üçbucaq birləşməsi sxemi.



Şək.2. Asinxron mühərrikin stator dolağını ulduzdan üçbucağa keçirən idarə aparatları.

Mühərrikin keçid prosesində baş verənlərlə əlaqədar, işəsalma zamanı dolaqların cərəyanı nominaldan 4-6 dəfə çox olur. Elektrik mühərrikinin valının fırlanma momenti isə nominal qiymətin 150-200%-nə çatır. Baş verənlər elektrik mühərrikinin mexaniki hissələrinin zədələnməsinə, qidalandırıcı şəbəkədə isə gərginlik itkisinin yaranmasına səbəb olur [13].

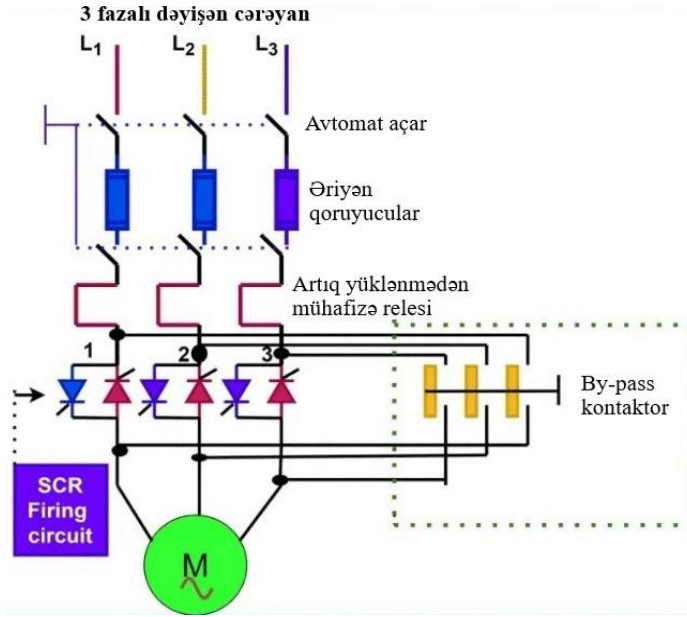
Qeyd etmək lazımdır ki, bu işəsalma üsulu o qədər də etibarlı deyil. Asinxron mühərriklərin stator dolağının ulduzvaridən üçbucağa keçməklə işəsalma üsulunun aşağıdakı mənfi cəhətləri də vardır [6,10].

1. Mühərrikin dolaqlarını ulduzvari sxemdən üçbucaq sxeminə keçirdikdə, cərəyan sıçrayışla böyük qiymət alır.
2. Mühərrikin işəsalma momenti kiçik olur.
3. Ulduzvaridən üçbucağa keçid zamanı elektrik mühərrikində mexaniki zərbələr yaranır.

Əsas hissə. Məsələnin həll məqsədilə praktikada yük cərəyanının tədricən artımı üçün mühərrikin yumşaq işəsalma avadanlığından istifadə edilir. Tədricən işəsalma avadanlıqları ilə aşağıdakılara nail olmaq mümkündür:

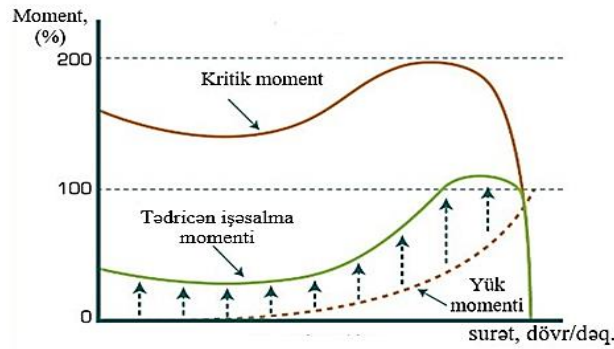
- mühərrikin stator dolaqlarının qızmasının azaldılması;
- işə düşmə zamanı gərginlik itkisinin azaldılması;
- nasosda, borularda hidro zərbələrin azaldılması;
- elektomaqnit küylərin azaldılması;
- mühərrikin kompleks mühafizəsinin (gərginlik itkisi və artımı, mexaniki zərbələr və s.) təmin edilməsi;
- sistemin işinin etibarlı şəkildə təmin olunması.

Rotoru qısaqapalı asinxron mühərrikin idarə olunması üçün stator dövrəsinə tədricən işəsalma qurğusunun (soft-starter) qoşulmasını nəzərdən keçirək. İşəsalma qurğusunun funksional elektrik sxemi şəkil 3-də göstərilmişdir [1,4].



Şək.3. Tədricən işəburaxma qurğusunun funksional elektrik sxemi.

Tiristorun açılma bucağının dəyişməsi ilə əlaqədar, tədricən işəsalma qurğusunun çıxış gərginliyinin tənzimlənməsi həyata keçirilir (şəkil 4). Tiristorun açılma bucağı nə qədər böyük olarsa, mühərriki qidalandıran çıxış gərginliyinin qiyməti də o qədər böyük olar [2,3,5].



Şək.4. Tədricən işəburaxma zamanı momentin sürətdən asılılıq xarakteristikası.

Tədricən işəburaxıcılar vasitəsilə işə salınan yük nasosunun elektrik mühərrikinin prinsiplial sxemi şəkil 4-də göstərilmişdir [8,11].

Sxemdəki elementlər: AM – asinxron mühərrik; Q0 – yük ayırıcı; TR – gərginlik transformatoru; KM1, KM2 – kontaktorlar; U1 – yumşaq işəburaxıcı; F(1-4) – avtomat açarlar; S1, S4 – çevirgəclər; S2, S3, S5, S6, S7 – idarəetmə (start, stop) düymələri; H(1-5) – siqnal lampalar; MQ – motorqoruma reləsi; K(1-5) - idarəetmə (aralıq) relələri; A – ampermetr.

Sxemdəki F(1-4) avtomat açarları idarəetmə dövrəsinin artıq yüklənmədən və qısaqapanmadan mühafizəsi üçün qoyulub. Mühərrikin artıq yüklənmədən mühafizəsini yumşaq işəsalıcı, artıq qızmadan mühafizəsini MQ – mühərriki qoruma (fazqoruma) reləsi yerinə yetirir. Fazqoruma reləsi mühərrikin termistor çıxışına qoşulur. Yük nasosunu 380 V gərginliklə işləyən asinxron mühərriki hərəkətə gətirir. Böyük güclü asinxron mühərriki yumşaq işəburaxıcının köməyi ilə işəsalınır [3,4].

Sxem güc dövrəsindən və idarəetmə dövrəsindən ibarətdir. Mühərriki işə salmaq üçün Q0 yük ayırıcı açarı qapanmalıdır. Q0 açarı qapandıqdan sonra idarəetmə düymələrinin işləməsi üçün F1 və F2 avtomatları işə salınır. F1 avtomatı qapandıqdan sonra gərginlik transformatorundan 220 V idarə gərginliyi alınır. F2 avtomatı qapandıqda işə “Soft Starter”ə idarəetmə gərginliyi verilir. Bu zaman idarəetmə sistemi işə hazır vəziyyətə gəlir. Baxılan sxemin “yerli” və “məsafədən” idarəedilməsi mümkündür.

Yerli idarəetmə panel üzərindən idarəetmə düymələri, məsafədən idarəetmə işə kənardan idarəetmə pultu vasitəsilə aparılır. Yerli idarəetmə üçün S1 çevirgəci “yerli” vəziyyətinə gətirilir.

S3 idarəetmə düyməsindən əlimizi çəkdikdən sonra düymənin kontaktı açılır və sarğıya gərginlik K1 idarəetmə relesinin özünü bloklayan kontaktı vasitəsilə gedir. Mühərrik işə düşüb normal rejimdə işlədikdən sonra tədricən işəburaxıcının R2A və R2C kontaktlarından K3 idarəetmə relesinin sarğısına idarə gərginliyi verilir. K3 idarəetmə relesinin kontaktı qapanır və KM2 kontaktorunun sarğısına idarə gərginliyi verilir. KM2 kontaktorunun güc dövrəsindəki kontaktları qapanır və asinxron mühərrikə gərginlik KM3 kontaktorunun kontaktları vasitəsilə gedir, mühərrik normal iş rejimində işləyir.

Mühərrikin normal iş rejimində işlədiyini panelin üstündə olan H4 siqnal lampası vasitəsilə görmək olar. Mühərriki artıq yüklənmədən mühafizə etmək üçün R3A və R3C kontaktlarından istifadə olunub. Artıq yüklənmə baş verərsə, yumşaq işəburaxıcının R1A və R1C kontaktlarında gərginlik kəsilir. R3A və R3C kontaktları vasitəsilə və K2 idarəetmə relesinin normal qapalı kontaktı vasitəsilə K4 idarəetmə relesinin sarğısına gərginlik verilir. Elektrik mühərriki dayanır və artıq yüklənməni xəbər verən lampə işıqlanır. K4 relesinin kontaktları vasitəsilə artıq yüklənmə barədə siqnallar ötürülür. Asinxron mühərrikin qızmadan mühafizəsi üçün MQ relesinin normal bağlı kontaktından istifadə edilib. Mühərrikdə müəyyən səbəbdən qızma hadisəsi baş verərsə, MQ relesinin normal bağlı kontaktı (qəza kontaktı) açılır və mühərrik dayanır. Bu relenin normal açıq kontaktı vasitəsilə mühərrikin normadan artıq qızdığı göstərən siqnal çıxır. K5 relesinin sarğısında gərginlik siqnal ötürüldüyü üçün relenin kontaktları vasitəsilə mühərrikin artıq qızması barədə siqnallar ötürülür [4,8,9,12].

Qış aylarında mühərrik işləməyən vaxtlarda onun qızdırılmasına ehtiyac yaranır. Bunu etmək üçün F3 və F4 avtomatlarını qapamaq və S4 çevirgəcini qapalı vəziyyətə gətirmək lazımdır. İşləyən mühərriki dayandırmaq üçün S2 stop düyməsini basmaq lazımdır.

S4 çevirgəcini “Məsafədən” vəziyyətinə gətirməklə mühərriki məsafədən idarə edilir. Bu vəziyyətdə mühərrik idarə pultu vasitəsilə hərəkətə gətirilir və yuxarıda qeyd olunan ardıcılıqla “start” düyməsi vasitəsilə onu işə salmaq və “stop” düyməsi vasitəsilə dövrədən ayırmaq olur. A ampermetri vasitəsilə güc dövrəsindən axan cərəyanın qiymətinə nəzarət olunur.

Tədricən işəburaxma qurğularının əsas parametrləri aşağıdakılardır [1,2,3].

1. Tədricən işəburaxma qurğusunun işləmə rejiminin təyini.
2. İşədüşmə müddəti.
3. İşədüşmə cərəyanının maksimal yuxarı həddi.

Qeyd olunanları nəzərə alaraq, yumşaq işəburaxma qurğusunun aşağıdakı rejimləri ortaya çıxır.

- *normal iş rejimi*: işədüşmə müddəti 10-20 saniyə, işədüşmə cərəyanı $3,5I_{nom}$ keçmir.
- *ağır iş rejimi*: işədüşmə müddəti 30 saniyə, işədüşmə cərəyanı $4,5I_{nom}$ aşmamalıdır.
- *daha ağır iş rejimi*: işədüşmə müddətinə məhdudiyət yoxdur, işədüşmə cərəyanı $5,5...8I_{nom}$ ola bilər.

Nəticə. Aparılmış tədqiqatlar zamanı gəmi yük nasosunun elektrik intiqallarında keçid prosesi zamanı mühərrikin işəburaxma cərəyanı nominal cərəyandan 4-6 dəfə çox, onun valındakı fırlanma momenti isə nominal qiymətin 150-200 %-ni təşkil etdiyi məlum olmuşdur. Bu hadisələr elektrik mühərrikinin mexaniki hissələrinin tez sıradan çıxmasına və qidalandırıcı şəbəkədə gərginlik düşküsünə səbəb olur.

Böyük gücə malik yük nasosunun elektrik intiqallarının tədricən işəburaxıcılar vasitəsilə işə salınması ilə əlaqədar olaraq, yük nasosunun elektrik mühərrikinin stator dolaqlarının qızması və mühərrikin işə düşməsi zamanı gərginlik itkisi azalır. Enerji itkisinin azalması ilə yanaşı, tezliyin və amplitudun eyni vaxtda idarə olunması hesabına mühərrikin yüksək faydalı iş əmsali ilə işləməsi də təmin edilir. Bu işəsalma üsulu ilə elektrik mühərrikində baş verən mexaniki zərbələrin qarşısı alınır və yük nasosunun istismarı asanlaşır.

Yük nasoslarının idarəetmə sistemlərinin etibarlılığını yüksəltmək, elektrik enerjisi sərfinin azaldılması məqsədilə istismarda olan və yeni hazırlanan AUT2 avtomatlaşdırma dərəcəsinə malik maye-yük daşıyan gəmilərin böyük güclü elektrik intiqallarının işə buraxılması zamanı tədricən işəburaxıcıların tətbiq olunması təklif olunur.

-
1. *Hasanov E.A.* Asynchronous motor control of ship anchormooring gear in static mode with frequency change // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – 2020. Issue 43, Volume 12, Number 2, – p. 35-39.
 2. *Hasanova L.H., Yusifbayli N.A.*, Starting mode of synchronous machines with massive rotors //Reliability: theory & applications, December, 2023, No.4(76), Vol.18, pp.842–849.
 3. *Kerimzade G.S.* “Structure of the monitoring and tracking electromechanical control system”. // PRZEGLAD Elektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature SIGMA NOT. ISSN 0033-2097, R.100 NR 07/2024. Warszawa.pp. 295-297.
 4. *Sultanov E.F., İsmayilov S.S., Şıxıyev A.S.* Yük nasosunun elektrik intiqalının yumşaq işə buraxıcılar vasitəsilə işə buraxılmasının tədqiqi. 12(1), 97-101. Bakı Mühəndislik Akademiyasının xəbərləri jurnalı. 2020.
 5. *Sultanov E.F., Səlimova A.K., Rüstəmov R.M.* “Gəmi elektrik intiqalının tezlik çeviriciləri ilə idarə olunması”. Dərslik. – Bakı: ADDA. səh.2023-215.
 6. *Sultanov E.F., Bayramova İ.P.* “Elektrik intiqalının nəzəriyyəsi”. dərslik, ADDA, Bakı, səh.2021-342.
 7. *Osmanov S.C.* Elektrik maşınları // II hissə. Dərslik. – Bakı: ADNA. s.2011– 256.
 8. *Sultanov E.F., Məmmədov E.M. Həsənov E.A., İsmayilov S.S.* Application of soft starting and braking for electrical drives of boom mechanism of shipboard cranes. // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – 2023. Issue 56, Volume 15, Number 3, – p. 303-308.
 9. *Sultanov E.F., Abdullayev A.N.* Müasir gəmi elektrik intiqalları. Dərslik. – Bakı: ADDA. 2018-438 səh.
 10. *Клевцов, А.В.* Преобразователи частоты для электропривода переменного тока. – М.: Грифиико, – 2008. – 224 с.
 11. “Koroğlu” tankerinin texniki sənədləri, – 2006.
 12. *Дышин О.А., Габитов И.А., Абасова С.М.* Оперативная оценка межремонтного периода погружных электронасосов с учетом возможного появления опасных отказов. Вестник (2017).
 13. *Романовский, В.В.* Судовые электрические машины: учеб. Учебник для вузов. – СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2019. – 404 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАГРУЗОЧНОГО НАСОСА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ЗАПУСКАЕМОГО УСТРОЙСТВАМИ ПЛАВНОГО ПУСКА

СУЛТАНОВ Э.Ф., ГАСАНОВ Э.А.

В статье рассматриваются вопросы ввода в эксплуатацию электроприводов действующих грузовых насосов судов, находящихся в эксплуатации. Ввод в эксплуатацию электроприводов на судах, как правило, осуществляется переключением обмоток статора асинхронного двигателя со звезды на треугольник. Такой способ ввода в эксплуатацию считается недостаточно надежным. Поскольку существующие системы управления электроприводами грузовых насосов на судах, перевозящих жидкие грузы, с уровнем автоматизации AUT2 не отвечают современным требованиям, была поставлена задача повышения надежности систем управления и снижения расхода электроэнергии. В статье представлена электрическая схема устройства плавного пуска асинхронных двигателей и характеристика зависимости момента от скорости при плавном пуске. В статье рассматривается принципиальная схема электропривода существующего грузового насоса, запускаемого с помощью устройств плавного пуска, исследуются режимы работы устройства и, учитывая недостатки способа запуска обмотки статора асинхронных двигателей переключением со звезды на треугольник, предлагается при выборе

электропривода для грузовых насосов на вновь разрабатываемых судах для перевозки наливных грузов уровня AUT2 отдать предпочтение асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором, запускаемому с помощью устройства плавного пуска, не имеющему дополнительных потерь мощности на управление.

Ключевые слова: судно, грузовой насос, электропривод, асинхронный двигатель, устройство плавного пуска.

STUDY OF THE ELECTRICAL DRIVE OF A LARGE-POWER LOAD PUMP STARTED BY SOFT STARTERS

SULTANOV E.F., HASANOV E.A.

The article deals with the commissioning of electric drives of existing cargo pumps of ships in operation. Usually, electrical drives are commissioned on ships by switching the stator windings of an asynchronous motor from a star circuit to a delta circuit. This commissioning method is not considered reliable enough. Since the existing control systems of electric drives of cargo pumps on liquid cargo ships with an AUT2 automation level do not meet the requirements of the modern era, the aim was to increase the reliability of control systems and reduce electrical energy consumption. The article shows the electrical circuit of the soft-starting device of asynchronous motors and the characteristic of the torque-speed dependence during soft-starting. The article examines the principle circuit of the electrical transmission of the existing cargo pump started with soft-starters, examines the operating modes of the device, and, taking into account the disadvantages of the method of starting the stator winding of asynchronous motors by switching from star to delta, proposes to give preference to a short-circuited rotor asynchronous motor started with a soft-starting device, which does not have additional power losses due to control, when choosing an electrical transmission for cargo pumps on newly developed AUT2-level liquid cargo ships.

Keywords: ship, load pump, electrical drive, asynchronous motor, soft starter.

DOI:10.70784/azip.5.20254133

DEVELOPING OF OBSTACLE BYPASSING MODES OF ECO-AGRO-ROBOT**HASANOV Z.A., GASIMOV S.K., MAMMADOV C.N.**

*Azerbaijan State Oil and Industry University,
Electromechanical department
zakir.hasanov@asoiu.edu.az
sahibgasimov@gmail.com
chingiz.mammadov.02@gmail.com*

In this article, a wheeled agrorobot designed for agricultural tasks is proposed. The straight-line motion and maneuverability of the agrorobot are achieved via regulating the angular speeds of both leading wheels and by reversing. The other two wheels are passive (“royal”) type and do not generate traction. The maneuver and obstacle-avoidance modes of the eco-agrorobot are implemented via the ESP32 processor. Through this software, the eco-agrorobot responds rapidly to obstacles during straight-line motion and determines its movement trajectory based on its localization. The program performs operations in this direction, and ultrasonic sensors are used to monitor obstacles with high accuracy, enabling the obstacle-avoidance maneuver. Subsequently, the robot continues its motion along the specified trajectory.

Key words: frequency regulation, controlled electric drive, wheel driven robot, ultrasonic distance sensor, obstacle avoidance, ESP 32 processor.

In a number of scientific studies [1], [13] various works have been presented on determining the movement trajectories of mechanisms operating in agriculture. The presented works primarily consist of research focused on the control of tractor and trailer systems. During tractor steering, maneuvering is mainly achieved through the turning of the front wheels. During the repositioning, the tractor moves with a large turning radius to reach its new position. The Agrobot presented in this article is also referred to as Eco-Agrorobot due to its use of eco-friendly energy. Traction of Eco Agrorobot (EAR) is performed via the front wheels and, during maneuvering, displacement motion is achieved by the wheels rotating at different speeds. At this time, the right and left wheels move at different speeds depending on the maneuver command, or one wheel remains stationary while the other performs full-speed rotation, or one wheel rotates forward while the other rotates backward to execute the displacement process [2-5].

A small physical model of the Eco Agrorobot has been prepared in laboratory conditions to investigate its maneuvering capabilities. The laboratory model of the Eco AgroRobot is constructed with dimensions of 1.0×0.6 m (Fig. 1). The model is driven by front electric drive, and the drivers consist of two DC motors with a power rating of 35 W. Each motor is independently controlled in a reversible manner, and the speeds on both directions are adjustable between “0” to 1000 rpm at the wheel input (at the gearbox input). The front axle is fitted with conventional rubber tires, whereas the rear axle employs freely rotating “royal” wheels. The front wheels are driven by the motor connected to the gearbox.

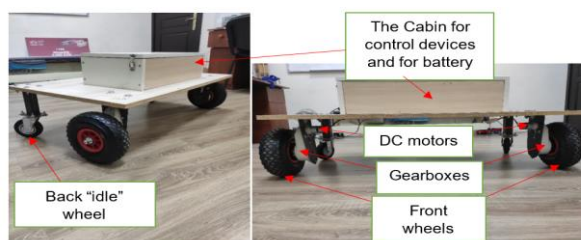


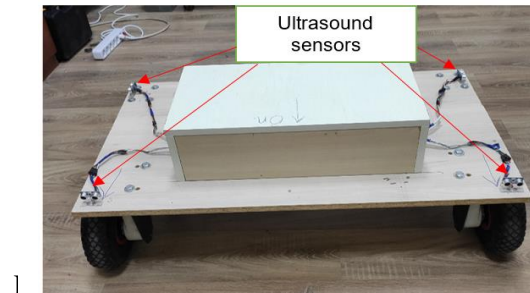
Fig.1. Physical laboratory model of Agrorobot.

Agrorobot’s drive motors are controlled via an ESP32 processor. The model operates both manually and automatically. The movement algorithm of the model is programmed and executed

through the processor. In the previous physical model of the Agrorobot, maneuverability in remote control mode was implemented [8], [12] using Wi-Fi. The aim is to verify that the Agrorobot can turn when encountering obstacles and can evade obstacles. In this approach, the model is not autonomous; it is manually controlled.

The current model operates completely autonomously, maneuvering to avoid obstacles that appear in its path and following a given trajectory. Unlike the previous model, the current model is not managed by an Arduino processor but by an ESP32 processor. The ESP32 processor, in contrast to the Arduino, processes input signals faster, enabling the robot to respond to any maneuver more rapidly, and to avoid obstacles more smoothly and without problems [6,7].

Ultrasonic sensors capable of detecting obstacles are installed at the four corners of the Agrorobot to ensure it does not collide with obstacles and to enable obstacle avoidance during its individual motion (see Fig. 2). The motion trajectory is executed according to the following rules:



When the Agrorobot moves forward, if an obstacle is detected on the left side, the ultrasonic sensor located at the left corner gives a stop command to the robot. The prepared physical model stops; to execute a left turn, the left wheel moves forward while the right wheel moves backward, performing the turning motion [9].

The robot proceeds until the obstacle ends; after the obstacle is over, it stops and begins turning to the left. In this case, the left wheel moves backward and the right wheel moves forward to execute the left-turn maneuver. After the turn is completed, the robot moves straight ahead to the end of the obstacle and, once the obstacle ends, again performs a left turn following the same rule, approaching the starting trajectory; as it nears the trajectory, it turns to the right and resumes straight-ahead motion (see Fig. 3).

In this case, the obstacle-avoidance operation is monitored by an ultrasonic sensor installed at the rear-left side.

When the Agrorobot moves forward, if an obstacle is detected on the right side, all maneuvers perform analogously (Fig. 4).

The control of the DC electric motors installed to the drive system is performed by a microcontroller. The ESP32 microcontroller generates a motor control command that is transmitted to the BTS7960-H bridge-type motor driver to actuate the motor, which is connected to the motor

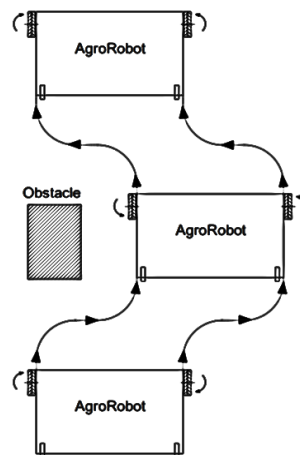


Fig.3. The agrorobot comes across an obstacle located to its left.

power supply and based on the received command, drives the motors at the required speed and in the desired direction to initiate motion [11-14].

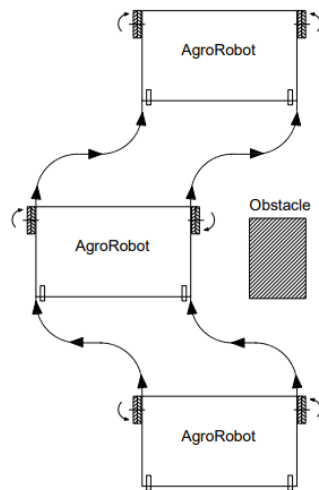


Fig.4. The agrorobot comes across an obstacle located to its right.

The schematic of the motor drive circuit is shown in Figure 5.

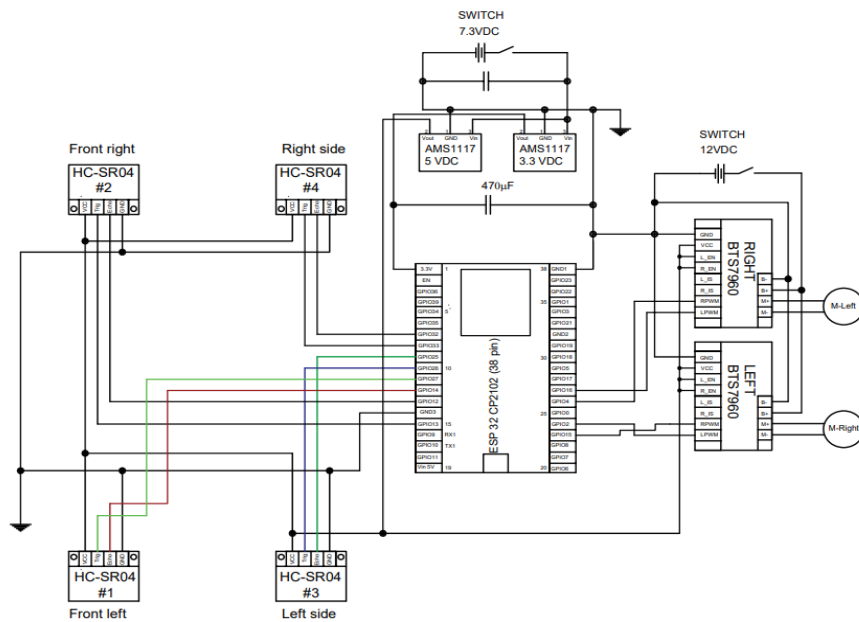


Fig.5. Wiring diagram of control system of agrorobot.

Figure 6b provides a conceptual schematic of the BTS7960 H-bridge motor driver, for reference. This device is the circuit that enables a reversible operation of a high-current H-bridge motor driver rated for 43 A nominal current (Figure 6a).

Figure 7 depicts the assembled motor control circuit integrated with the ESP32 processor.

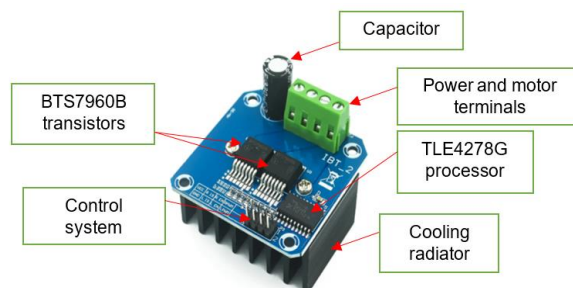


Fig.6 a. BTS7960 motor driver.

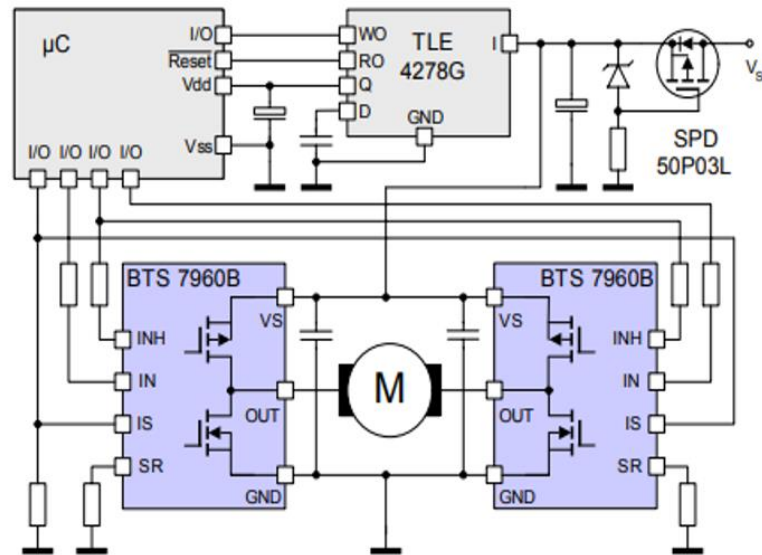


Fig.6b. Internal diagram of BTS7960 H-bridge type motor driver.

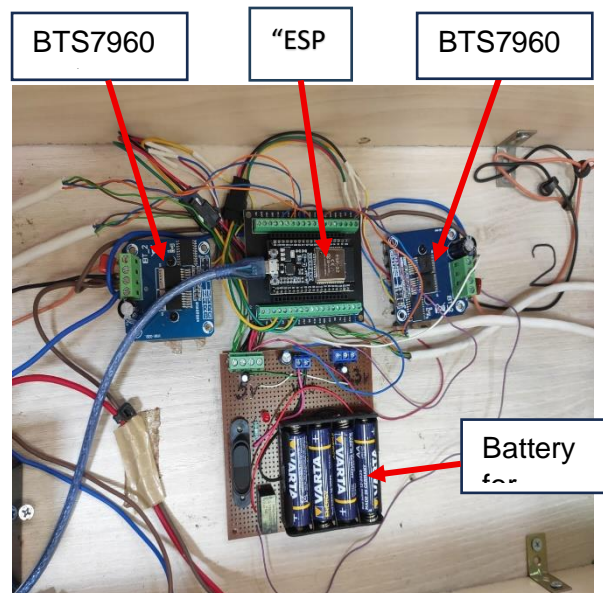


Fig.7. Assembled motor control circuit

Conclusion

1. 1 A physical laboratory model of the Eco Agrorobot has been proposed.
2. It has been demonstrated that the maneuvering of the EAR is achieved by changing the speeds of the two wheels and reversing.
3. The use of “ultrasound” sensors to enable the EAR to detect obstacles and bypass them has been provided.
4. The implementation of the ESP-32 processor to ensure the EAR’s agility has been presented.
5. An algorithm for the EAR to bypass obstacles has been developed.

-
1. *Shelemetyev A.M., Shelemetyeva Y.V., Smirnov A.V.* Razrabotka sistemy upravleniya kolesnym transportnym sredstvom, osnovannoy na raznosti skorostey vrasheniya upravlyayushich koles. Vestnik Chuvashskogo Universiteta. 2016.

2. *Erkan Kayacan, Erdal Kayacan, Herman Ramona, Wouter Saeys*. “Towards Agrobots: Identification of the Yaw Dynamics and Trajectory Tracking of an Autonomous Tractor”. https://www.researchgate.net/publication/350875694Towards_agrobots_Identification_of_the_yaw_dynamics_and_trajectory_tracking_of_an_autonomous_tractor. April 15, 2021
3. *Fang, H., Dou, L., Chen, J., Lenain, R., Thuilot, B., Martinet, P.*, 2011. Robust anti-sliding control of autonomous vehicles in presence of lateral disturbances. *Control Engineering Practice* 19, 468– 478.
4. *Backman, J., Oksanen, T., Visala, A.*, 2012. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear model predictive path tracking. *Computers and Electronics in Agriculture* 82, 32 – 43.
5. *Piyabongkarn, D., Rajamani, R., Grogg, J.A., Lew, J.Y.*, 2009. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 17, 78 – 88.
6. *Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H., Saeys, W.*, 2013. Modeling and identification of the yaw dynamics of an autonomous tractor, in: 2013 9th Asian Control Conference (ASCC), pp. 1–6.
7. *Kayacan E., Kayacan E., Ramon H., and Saeys W.*, “Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, pp. 78 – 87, 2015.
8. *Hasanov Z.A., Jafarov T.D., Khanahmadova S.A., Gasimov S.K.*, “Development of ecoagrorobot powered by solar panels”, The 18th International Conference on “Technical and Physical Problems of Engineering”, pp. 91-98, October 2022.
9. *Khalaji A. and Moosavian S.*, “Robust adaptive controller for a tractor-trailer mobile robot,” *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 943–953, June 2014.
10. *Michalek M. and Kielczewski M.*, “The concept of passive control assistance for docking maneuvers with n-trailer vehicles,” *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 20, no. 5, pp. 2075–2084, Oct 2015.
11. *Derrick and J.B. Bevely D.M.*, “Adaptive steering control of a farm tractor with varying yaw rate properties,” *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 6-7, pp. 519–536, 2009.
12. *Zakir Hasanov, Sahib Gasimov*, “Development of obstacle bypassing method of eco-agrorobot”, E-ISSN: 2674-5224; DOI: 10.36962 / PAHTEI; UDC: 62 (051) (0.034) *Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions*, pp.94-112, February 2024.
13. *Karkee M. and Steward B.L.*, “Study of the open and closed loop characteristics of a tractor and a single axle towed implement system,” *Journal of Terramechanics*, vol. 47, no. 6, pp. 379 – 393, 2010.
14. *Li H. and Yan W.*, “Model predictive stabilization of constrained underactuated autonomous underwater vehicles with guaranteed feasibility and stability,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1185–1194, June 2017.

EKO-AQRO-ROBOT ÜÇÜN MANEƏLƏRDƏN YAN KEÇMƏ REJİMLƏRİNİN HAZIRLANMASI

HƏSƏNOV Z.Ə., QASIMOV S.K., MƏMMƏDOV Ç.N.

Bu məqalədə kənd təsərrüfatı işlərini həyata keçirən təkərli ekoaqrorobot təklif edilmişdir. Ekoaqrorobotun düzxətli hərəkəti və manevr etməsi aparıcı iki təkərin sürətinin tənzim edilməsi və reversi vasitəsilə həyata keçirilir. Digər iki arxa təkər “royal” (passiv) tipli olub dartı qüvvəsi yaratmırlar. Ekoaqrorobotun manevr etmə və maneədən yan keçmə rejimlərinin alqoritmi ESP-32 prosessoru vasitəsilə yerinə yetirilir. Bu proqram vasitəsilə ekoaqrorobot düzxətli hərəkəti zamanı maneəyə rast gəldiyində cəld reaksiya verir və menənin yerləşmə yerinə görə hərəkət

trayektoriyasını təyin edir. Proqramda bu yöndə işləmlər aparılmış və ultrasəs sensorları vasitəsilə maneələr dəqiqliklə nəzarətdə saxlanır və yan keçmə əməliyyatı həyata keçirilir. Daha sonra robot öz hərəkətini verilmiş trayektoriya üzrə davam edir.

Açar sözlər: tezliklə idarə, tənzimlənən elektrik intiqalı, təkərli robot, ultrasəs sensoru, maneələrdən yan keçmə, ESP 32 prosessoru.

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ ЭКО-АГРО-РОБОТОМ

ГАСАНОВ З.А., ГАСЫМОВ С.К., МАМЕДОВ Ч.Н.

В данной статье предлагается колесный агроробот, предназначенный для решения сельскохозяйственных работ. Прямолинейное движение и маневренность агроробота достигаются за счет регулирования скоростей вращения двух ведущих колес и реверса. Два других задние колеса пассивного («коромыслового») типа не создают тяги. Алгоритм маневрирования и обхода препятствий экоагроробота реализован на процессоре ESP-32. Благодаря этой программе экоагроробот быстро реагирует на препятствие при прямолинейном движении и определяет траекторию движения, исходя из его местоположения. Программа разработана с учётом этого, а также обеспечивает точный контроль препятствий с помощью ультразвуковых датчиков и их объезд. После этого робот продолжает движение по заданной траектории.

Ключевые слова: частотное управление, регулируемый электропривод, колесный робот, ультразвуковой датчик, объезд препятствий, процессор ESP 32.

DOI:10.70784/azip.5.20254139

SOLUTIONS TO INCREASE THE POWER FACTOR OF THE METRO – A REVIEW

HASANOVA G.U., ISMAILOVA Sh.I.

*Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan
Azərbaycan, Bakı AZ 1010, Azadlıq prospekti, 34
gultakin.hasanova@asoiu.edu.az*

This article aims to enhance the energy efficiency of the metro power supply system by developing and optimizing methods for reactive power compensation and mitigating nonlinear distortions. Static capacitor banks and passive filters used for reactive power compensation suffer from critical limitations, including the risk of electromagnetic resonance and an inability to adapt to dynamic loads. Moreover, thyristor compensators are incapable of performing real-time harmonic correction. Recent research has focused on active power filters and hybrid systems as solutions for reactive power compensation. The study examines the characteristics of a traction substation equipped with an active rectifier and a power active filter, highlighting their impact on improving power quality. The integration of active filters and rectifiers into the metro's contact network power supply system leads to a reduction in electricity losses by 1–3%, contributing to lower operational costs and improved overall system reliability. Additionally, the article explores the potential benefits of these technologies in minimizing harmonic distortions, stabilizing voltage levels, and enhancing the efficiency of energy distribution within the metro infrastructure.

Keywords: active power filter, traction substation, electrical power system, subway, active rectifier.

Introduction

Today, the metro is one of the main consumers of electricity in modern cities. The metro provides a large number of urban transport services with relatively little time and high traffic safety [1]. Currently passenger transportations in the underground are basically carried out by cars with collector DC motors of series excitation, which are powered from the contact network with a nominal voltage of 825 V. In turn, the contact networks are supplied from surface or underground traction substations, which are connected to the 12 (10) kV network via a three-phase step-down transformer and a six-pulse diode bridge rectifier.

The cost of electricity to power trains in such systems is up to 80-95% of the total cost of electricity [1, 2]. A significant part of the electricity costs are losses at traction substations, in the contact network and traction electric drives.

Relevance of the Problem and Related Research. Static capacitor banks and passive filters used for reactive power compensation can cause electromagnetic resonance in the network due to system inertia [3]. It should be noted that thyristor static compensators cannot perform real-time reactive power compensation. Active power filters can reduce total harmonic distortion (THD) by up to 2% in metro substations, outperforming traditional diode rectifiers [4].

For this reason, the development of devices capable of neutralizing the effects of higher harmonics as well as controlling the reactive power in the urban network has recently become relevant.

The main purpose of this paper is to develop a hybrid system for compensation and control of reactive power in the metro power supply system.

In order to achieve the objective, the following issues are discussed in the paper:

- Description of the working principle of hybrid reactive power compensation system;
- Addressing the issue of developing a hybrid filter control system for compensation system

The relevance of the work lies in the development of a set of solutions to increase the power factor of metro substations, which will significantly increase the energy efficiency of the entire

metro power supply system [7]. A technical solution for compensation of reactive power and high-frequency nonlinear distortions by means of a hybrid power filter is proposed. First, the consequences of the influence of the nature of the load current on the network are considered in detail. Then there is an overview of methods to improve the quality of electricity;

increasing the pulse rate of the rectification circuits, the use of controlled zone-phase rectifiers, reactive power compensation, correction of high-frequency nonlinear distortions using active power filters, the use of hybrid compensation devices

A comparative analysis of compensating devices has been conducted, which allows to identify the advantages and justify the need to use certain compensation methods for different consumers. It is also noted that the choice of a compensating device should be based on an analysis of the energy indicators of the consumer.

Methods

Reducing electricity losses and increasing the capacity of power transmission lines are the most important parts of the overall complex of energy-saving measures. The quality of electricity in the grid is influenced not only by the power plants that generate it, but also by consumers [3]. The influence of electricity consumers in the network is characterized by:

1. the presence of reactive elements, electric motors and other equipment that causes a phase shift of current relative to voltage;
2. non-sinusoidal current consumption, which introduces higher harmonics into the network
3. asymmetric phase loading in 0.4 kV lines;

The reactive energy circulating between the generator and the consumer through the network is the cause of the following negative effects on the network:

the transfer of reactive energy leads to additional loading of network elements, which leads to a decrease in their throughput;

- deterioration of electricity quality indicators for third-party consumers of this network.

With non-sinusoidal current consumption, the negative effect on the network is characterized by the appearance of higher harmonics, which are the cause of: distortion of the shape of the supply voltage, increased losses in transformers due to increased hysteresis losses and the appearance of eddy currents, additional losses in bus bars, interference in nearby communication networks, faster aging of cable line insulation [12].

With asymmetric power consumption by a load in three-phase four-wire 0.4 kV systems, there is:

an increase in the current in the zero wire, occurrence of harmonics in the primary network of multiples of three, distortion of the shape of the supply voltage.

All of the above negative consequences of the impact of load on the network are the reason for increased attention to the quality of electricity from energy companies and require decisions to correct the power factor of consumers.

The appearance of the listed processes of consumer influence on the quality of electricity in the network is the basis for increasing the power factor, the coefficient of nonlinear distortion [15]. According to the results of the analysis of the metro's electricity quality [9], it was revealed that the main consumers of reactive energy in the subway are asynchronous motors for driving escalators and ventilation, as well as pumping and lighting installations. To increase the $\cos\varphi$ of the listed loads, the following organizational measures can be carried out:

- lowering the supply voltage of electric motors that systematically operate with low load;
- disconnection of a part of the power transformers during low loads.
- replacement of asynchronous escalator motors with synchronous motors with permanent magnets of lower rated power;
- reactive power compensation;
- correction of high-frequency harmonic distortion.

The reliability and efficiency of traction substations are largely determined by the type of rectifier adopted [12]. Complex multi-pulse rectification schemes provide an increase in the

voltage level in the traction network, an improvement in the shape of the rectified voltage curve, and a reduction in electrical energy losses.

In general, 12-pulse rectifiers make it possible to increase the power factor of a traction substation, to improve the shape of the current consumption curve and thereby improve the quality of electrical energy, to improve the shape of the rectified voltage curve, to increase the voltage level in the traction network without the use of special voltage regulation devices [10].

Currently, twelve-pulse rectifier units are most often formed by three-phase two-bridge rectifier circuits. They are two three-phase bridges connected at the output either in parallel or in series (Fig. 1 and 2). The transformer included in the twelve-pulse rectifier has two systems of valve windings: one connected by a star, and the other by a triangle. Each of these winding systems feeds its own three-phase bridge.

The most important and effective technical means of increasing $\cos\phi$ is reactive power compensation (Figure 3).

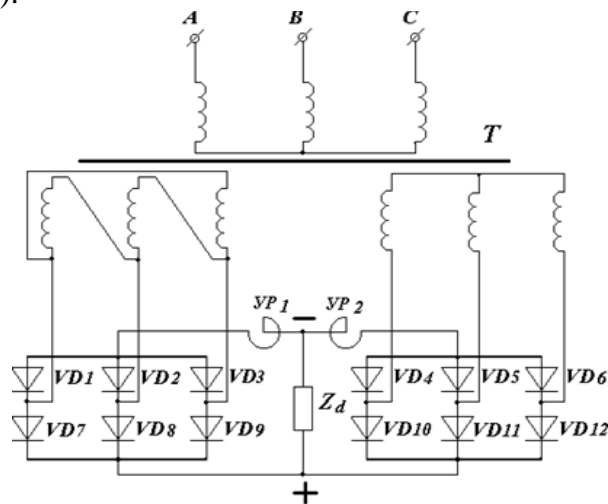


Fig.1. Functional diagram of 12 pulse rectifiers with parallel connection of three-phase bridges.

S, P, Q - total, active and reactive power; I, IR, IQ - total, active, reactive current; Q_1, IQ_1, ϕ_1 - reactive power reactive current and phase angle before reactive power compensation; Q_2, IQ_2, ϕ_2 - reactive power, reactive current and phase angle after compensation; Q_C - reactive power required for compensation.

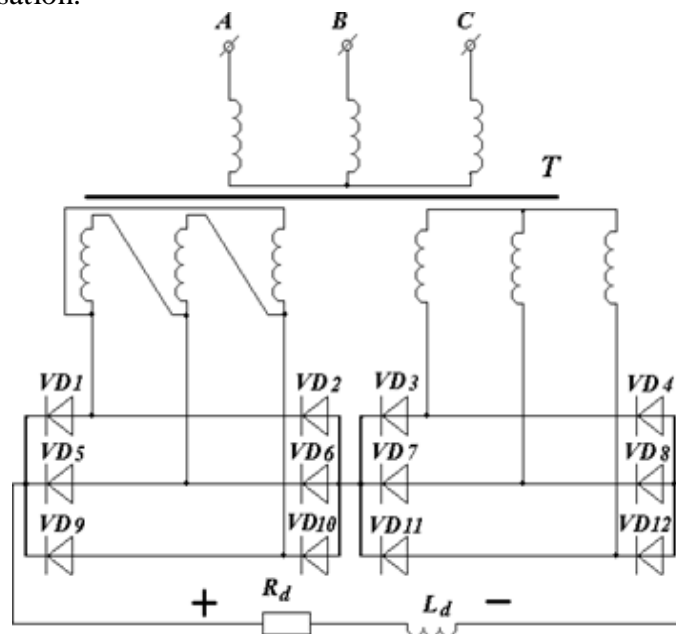


Fig.2. Functional diagram of 12 pulse rectifiers with serial connection of three-phase bridges.

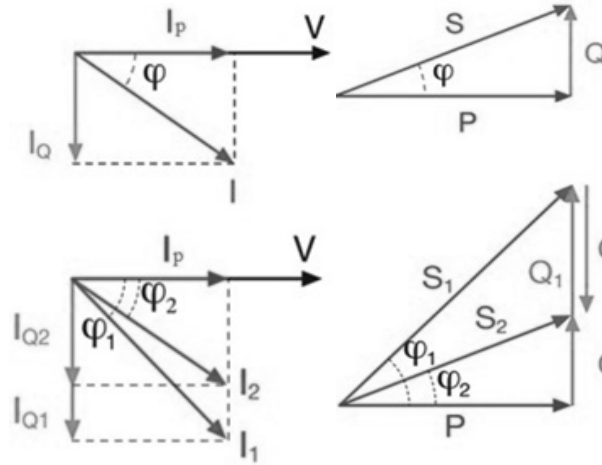


Fig.3. Reactive power compensation.

By reducing reactive power, the load on main equipment is reduced and the throughput of electrical networks is increased, and a reserve is created for connecting additional capacities [5]. The introduction of reactive power compensators makes it possible to ensure a balance of power, and also provides a significant economic effect, which consists in reducing electricity losses in networks due to their heating. Designing a power system with the addition of reactive power compensation means at the development stage allows you to reduce the rated power of transformers and converter units, reduce the cross-section of wires and cables, and also reduce the rated power of other power transmission and distribution equipment [13-16].

The most appropriate place to connect a reactive power compensator is a network point that is physically close to the consumer, in this case the reactive energy circulation circuit between the compensator and the load is reduced [17].

Energy losses in active resistance R and reactive X components of the electrical resistance of the network through active P and reactive power Q can be determined according to the expressions (1):

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R ; \quad \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X \quad (1)$$

Voltage losses in the network during reactive power transmission can be represented as (2):

$$\Delta P = \frac{PR + QX}{U} \quad (2)$$

The current in the line before installing compensating devices is determined by the expression (3):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_R - \dot{I}_{Q1} \quad (3)$$

The load power is equal to (4):

$$\bar{S} = P - jQ_1 \quad (4)$$

After installing compensating devices with power Q_k reactive current and reactive power in the network decrease.

In this case, current will flow in the line (5):

$$I_2 = \dot{I}_R - jI_{Q2} \quad (5)$$

The power will be (6):

$$\bar{S} = P - j(Q_1 - Q_2) \quad (6)$$

Thus, after installing compensating devices, reactive power decreases, in other words, the line is unloaded in terms of reactive power (7). Power and voltage losses are also reduced:

$$\Delta P = \frac{P_1^2 + (Q_1 - Q_k)^2}{U^2} \cdot R_1 \quad \Delta Q = \frac{P_1^2 + (Q_1 - Q_k)^2}{U^2} \cdot X_1 \quad \Delta U = \frac{P_1 R_1 + (Q_1 - Q_k) X_1}{U}$$

In modern times, with the development of power electronics technologies, it became possible not only to perform reactive power compensation, but also to correct distortions caused by high harmonics [18]. A device that enables such issues is called an active power filter. This device realizes the demand or generation of reactive power based on the information it receives about the parameters of the electric network in real time, such as the network network voltage and current. Also, along with this, by receiving information about the non-sinusoidal and harmonic components of the load current, it performs the correction of their non-linear distortions.

An active power filter is connected to the network in two basic ways, that is, both in series and in parallel. In series connection, the total current required by the consumer and the phase voltage to ground are calculated. In such a connection, in order to weaken the total inductive reactance of the transmission line, it is necessary to connect capacitors with a large capacity, which requires a high cost [19-21].

The active power filter consists of a three-phase inverter, and its main components are an insulated bipolar transistor, an inductive coil, capacitor batteries with a reactive energy source, and a microprocessor that generates control signals based on information received from current and voltage transmitters [8]. (Fig.4)

The active power filter has the ability to solve several tasks in parallel. In addition to compensating for the high harmonics created by nonlinear distortions and compensating for the reactive power generated by the main harmonics, the active power filter is also capable of performing load distribution between phases. The presence of such an active power filter allows you to reduce the potential difference between the neutral wire and the ground in a four-wire system [22-24].

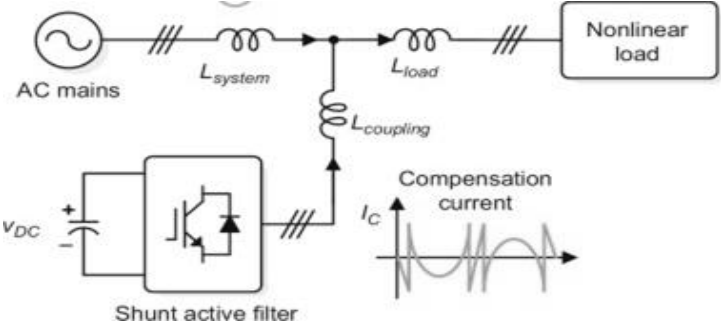


Fig.4. Active filter connection diagram.

A hybrid reactive power compensator can also be used to compensate for reactive power in the subway power supply system [11, 17, 18]. Through it, it becomes possible to regulate the phase current shift relative to the phase voltage and high-frequency distortion in a stepwise form. As a result, the power factor is increased by reducing the shift between current and voltage, as well as by smoothing out harmonic power distortions (Fig.5).

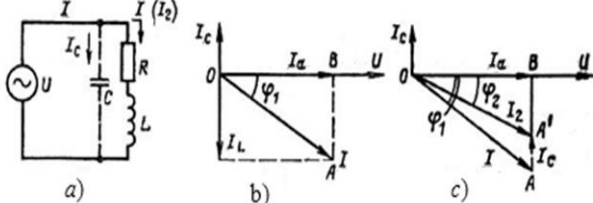


Fig.5. Reducing the sliding angle between current and voltage.

Result

The article extensively studies the impact of reactive power on losses in the metro power supply system.

A comparative analysis of existing reactive power compensation methods, including passive filters, active filters and hybrid solutions, showed that active power filters provide the most effective compensation. Unlike passive filters, which are tuned to specific harmonic frequencies and cannot

adapt well to changing loads, active power filters dynamically adapt to the harmonic spectrum of the system and provide more accurate compensation. In addition, higher-order harmonics, which cause electromagnetic interference and equipment overheating, are reduced to below 1%, which significantly increases the overall efficiency and reliability of the metro power supply system.

1. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Ismayilova S.I.* High and low voltage coordination in electrical power systems. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). - Issue 62, Volume 17, Number 1, Pages 19-31, March 2025 (Serial No: 0062-1701-0325).
2. *Gultakin Hasanova, Sonakhanim Babayeva.* Enhancing the reliability of relay- contactor control systems in industrial and energy applications. Reliability: Theory & Applications. 2025, September 3(86): 743-751, DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2025-386-743-751>.
3. *Zohrabov A.A., Hamidova H.M., Hasanova G.U., Ismayilova Sh.I.* A thermal- based diagnostic method for grounding resistance measurement in high-voltage overhead lines. Journal of IJTPE (IOTPE)-Issue 63, Volume 17, number 2, June 2025 serial N:0063-1702-0625.
4. *Маруфов И.М., Пириева Н.М., Алиева Г.А., Ганиева Н.А.* Анализ надежности энергетической системы. Научно-технический журнал, Проблемы энергетики №3. Баку, 2020. с.70-75.
5. *Rzayeva S.V., Ganiyeva N.A., Piriyeva N.M.* Modern approaches to electrical equipment diagnostics. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) - Issue 58, Volume 16, Number 1, March 2024 (Serial No: 0058-1601-0324), pp.182-189.
6. *Rzayeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A.* Analysis of reliability of typical power supply circuits. Reliability: Theory and Applications, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024.
7. *Пириева Н.М., Велиев Г.А., Аббасов А.И., Сулейманов Э.Э.* «Коммутационные процессы в электрических сетях 10-35 кВ». Проблема энергетики №2, Баку, 2021 стр. 100-106.
8. *Пириева Н.М., Самедова Х.Э.* Компенсация реактивной мощности в системах высоковольтного электроснабжения с преобразовательными устройствами. Международный научный журнал «Вестник науки. №7 (76) том. с.386-391. 2024 г.
9. *Пириева Н.М.* Минимизация потерь активной мощности в обмотках электрических аппаратов. Журнал «Инновационные научные исследования», Научно-издательский центр Вестник науки, №3-2(17) mart 2022, стр.11-21.
10. *Rzayeva S.V., Qaniyeva N.A., Piriyeva N.M.* Investigation of characteristics of a barrier discharge in a water-air environment/ IJ TPE Journal, ISSUE 55. Volume 15. Number 2, (Serial № 0055-1502-0623), IJTPE –June 2023. p.44-49.
11. *Piriyeva N.M., Abdullayeva G.K., Bakhtiyarov A.L.* Engineering approaches to minimizing the environmental impact of thermal power plants. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) – Issue 61, Volume 16, Number 4, December 2024. Pp.231-243.
12. *Piriyeva N.M., Kerimzade G.S. Mamedova G.V.* Issues of design of electrical devices with levitation elements. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” IJTPE Rumiya Issue 56, Vol. 15 No 3. s.120-125.
13. *Пириева Н.М., Гусейнов З.Ф.* Характеристики синхронных двигателей. Международный научный журнал «Вестник науки» № 3 (60) Том 4. с.241-246.
14. *Пириева Н.М.* Асинхронный электродвигатель с эффективной системой охлаждения. Проблем Энергетика №4, Баку, 2020 с 34-40.
15. *Пириева Н.М., Ахмадли А.Н.* Сравнения электрических генераторов применяемые в ветроэлектрических установках. Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ. № 1 (70) Том 3. 2024 с.975-986.

16. *Aliashraf Bakhtiyarov, Gulshan Abdullayeva, Hamid Piriyeu.* Analysis of electrical generators for wind electric installations. Przeglad Elektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature. № 9. Pp. 153-166. Warszawa. 2024.
17. Karimova R.K., Piriyeu H.S. Diagnostics of electrical equipment at thermal plants. Reliability: Theory & Applications RTA, No 4(80) Volume 19, Pp. 441-447. December, 2024.

METROPOLİTENİN GÜC ƏMSALININ ARTIRILMASI ÜÇÜN HƏLLƏR- XÜLASƏ

HƏSƏNOVA G.Ü., İSMAYİLOVA Ş.İ.

Bu məqalənin məqsədi reaktiv gücün kompensasiyasını inkişaf etdirmək və optimallaşdırmaq və qeyri-xətti sürüşməni azaltmaqla metronun enerji təchizatı sisteminin enerji səmərəliliyini artırmaqdır. Reaktiv gücün kompensasiyası üçün istifadə edilən statik kondansator batareyaları və passiv filtrlər elektromaqnit rezonans riski və dinamik yüklərə uyğunlaşmamaq da daxil olmaqla bir sıra əhəmiyyətli məhdudiyyətlərə malikdir. Üstəlik, tiristor kompensatorları real vaxt rejimində harmonik korreksiya etməyə qadir deyildir. Son tədqiqatlar reaktiv gücün kompensasiyası üçün həllər kimi aktiv güc filtrlərinə və hibrid sistemlərə yönəlmişdir. Tədqiqat aktiv düzəldici və güc aktiv filtri ilə təchiz edilmiş dartma yarımstansiyasının xüsusiyyətlərini nəzərdən keçirir və onların enerji keyfiyyətinin yaxşılaşdırılmasına təsirini vurğulayır. Aktiv filtrlərin və rektifikatorların metronun yerüstü əlaqə şəbəkəsinin enerji təchizatı sistemində inteqrasiyası enerji itkilərinin 1-3% azalmasına səbəb olur ki, bu da istismar xərclərini azaltmağa və sistemin ümumi etibarlılığını yaxşılaşdırmağa kömək edir. Bundan əlavə, məqalədə harmonik təhrifləri minimuma endirmək, gərginlik səviyyələrini sabitləşdirmək və metro infrastrukturunda enerji paylanması səmərəliliyini artırmaq üçün bu texnologiyaların potensial faydaları müzakirə olunur.

Açar sözlər: aktiv güc filtri, dartma yarımstansiyası, enerji təchizatı sistemi, metro, aktiv düzləndirici.

РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ МЕТРОПОЛИТЕНА – ОБЗОР

ГАСАНОВА Г.У., ИСМАЙЛОВА Ш.И.

Целью данной статьи является повышение энергоэффективности системы электроснабжения метрополитена путем разработки и оптимизации методов компенсации реактивной мощности и снижения нелинейных искажений. Батареи статических конденсаторов и пассивные фильтры, используемые для компенсации реактивной мощности, имеют ряд существенных ограничений, включая риск электромагнитного резонанса и неспособность адаптироваться к динамическим нагрузкам. Более того, тиристорные компенсаторы не способны осуществлять коррекцию гармоник в режиме реального времени. В последних исследованиях особое внимание уделялось активным фильтрам мощности и гибридным системам как решениям для компенсации реактивной мощности. В исследовании рассматриваются характеристики тяговой подстанции, оснащенной активным выпрямителем и силовым активным фильтром, и подчеркивается их влияние на повышение качества электроэнергии. Интеграция активных фильтров и выпрямителей в систему электроснабжения контактной сети метрополитена приводит к снижению потерь электроэнергии на 1–3%, что способствует снижению эксплуатационных расходов и повышению общей надежности системы. Кроме того, в статье рассматриваются потенциальные преимущества этих технологий для минимизации гармонических искажений, стабилизации уровней напряжения и повышения эффективности распределения энергии в инфраструктуре метрополитена.

Ключевые слова: активный фильтр мощности, тяговая подстанция, система электроснабжения, метрополитен, активный выпрямитель

DOI:10.70784/azip.5.20254146

POLIETİLEN İZOLYASIYALI KABEL XƏTLƏRİNİN İZOLYASIYA VƏZİYYƏTİNİN DİAQNOSTİKASI VƏ NƏZARƏTİN ƏSAS ÜSULLARI

ƏLİYEV Q.K., ŞIXƏLİYEV S.Y.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
“Elektromexanika” kafedrası
saadaasmar@mail.ru
eliyevqurban@gmail.com*

Təqdim edilən məqalədə elektrik kabellərinin etibarlı işləməsini təmin etmək məqsədilə istismara verilməzdən əvvəl və istismar dövründə aparılan sınaqlar və diaqnostik metodlar araşdırılmışdır. Əsas diqqət kabel izolyasiyasının vəziyyətinin qiymətləndirilməsinə və onun köhnəlmə proseslərinin elmi əsaslarla modelləşdirilməsinə yönəlmişdir. İzolyasiya materiallarının, xüsusilə polietilenin, elektrik və termal təsirlər altında məhv olma mexanizmləri təhlil edilmiş, qismən boşalmalar və onların izolyasiyaya təsiri geniş şəkildə izah olunmuşdur. Məqalədə həmçinin, dağıdıcı olmayan diaqnostika üsullarına – dielektrik itki bucağının ölçülməsi, qismən boşalma və qütbləşmə proseslərinin monitorinqinə əsaslanan müasir yanaşmalara yer verilmişdir. Təqdim edilən riyazi model izolyasiya materialının qalıq xidmət müddətini elektrik sahəsinin intensivliyi, temperatur və kimyəvi reaksiyaların sürətinə əsaslanaraq hesablamağa imkan verir. Nəticədə, kabel izolyasiyasının vəziyyətinin real vaxt rejimində qiymətləndirilməsi və onun qalıq ömrünün proqnozlaşdırılması üçün elmi əsaslandırılmış metodoloji yanaşma formalaşdırılmışdır. Məqalədə elektrik enerjisinin ötürülməsində mühüm rol oynayan 6–10 kV-luq polietilen örtüklü izolyasiyalı kabel xətlərinin istismara verilməzdən əvvəl və istismar dövründə aparılan sınaq və diaqnostika üsulları hərtərəfli şəkildə təhlil edilmişdir. Kabel sistemlərinin təhlükəsizliyi və uzunmüddətli davamlılığı üçün kabel damarlarının bütövlüyünün yoxlanılması, izolyasiya müqavimətinin ölçülməsi, sabit və ya dəyişən gərginlik altında keçirilən elektrik sınaqları və torpaqlama müqavimətinin ölçülməsi kimi əhəmiyyətli sınaq metodlarına baxılmışdır.

Açar sözlər: elektrik kabelləri, izolyasiya sınaqları, qismən boşalma (QB), polietilen izolyasiya, dielektrik xüsusiyyətlər, diaqnostika.

Giriş. Elektrik kabellərinin etibarlı işləməsini təmin etmək üçün istismara verilməzdən əvvəl sınaqdan keçirilməlidir. Kabelin cərəyan keçirən damarları (enerji mənbəyinin istehlakçı ilə əlaqəsini təmin etmək üçün) və onların izolyasiyası (qısa qapanmaların qarşısını almaq üçün) sınaqdan keçirilə bilər. Polietilen örtüklü izolyasiyalı 6-10 kV-luq kabel xətləri istismara verilərkən aşağıdakı sınaqlar aparıla bilər:

- 1) Kabel damarlarının bütövlüyünün və mərhələlərinin yoxlanılması.
- 2) İzolyasiya müqavimətinin ölçülməsi. Müqavimətin ölçüsü standartlaşdırılmayıb, müqavimət artan gərginliklə sınaqdan əvvəl və sonra ölçülür.
- 3) Düzəliş edilmiş cərəyanın nominal və ya artan gərginliyi ilə sınaq (bəzi hallarda sınaq sənaye və ya ultra aşağı tezlikli gərginliklə (0,01-0,1 Hz) aparılır).
- 4) Tək damarlı kabellər boyunca cərəyan paylanması ölçülməsi. Kabellərdə cərəyanların paylanmasında qeyri-bərabərlik 10%-dən çox olmamalıdır [1,3,5].
- 5) Olduğu halda antikorroziya örtüyünün vəziyyətinə nəzarət etmək.
- 6) Torpaqlama müqavimətinin ölçülməsi.

İzolyasiya materialları xarici və daxili amillərin təsiri altında məhv olmağa daha həssasdırlar, buna görə də ən böyük izolyasiya sınağına diqqət yetirilməlidir. Standartlaşdırılmış sınaq artan gərginlik ilə izolyasiya üçün dağıdıcıdır, çünki mövcud qüsurları yandırmaqla yanaşı (istehsal prosesi zamanı və ya keyfiyyətsiz quraşdırma nəticəsində) izolyasiya materialının məhv edilməsi prosesi sürətlənir, bu da izolyasiyada yeni qüsurlar əmələ gəlməsinə və onun xidmət müddətinin azalmasına səbəb olur. Bundan əlavə, polietilen örtüklü izolyasiyası olan kabelləri sınaq üçün sabit gərginlikdən istifadə edərkən, onlarda həcm yükü toplanma bilər ki, onların mövcudluğu kabelin tez sıradan çıxmasına səbəb ola bilər. Bununla əlaqədar olaraq, hazırda

izolyasiyanın dağıdıcı olmayan sınaq və diaqnostika üsullarının tətbiqi tendensiyası mövcuddur, bunlar: [2, 4]

- 1) İzolyasiyada qismən atqıların ölçülməsi;
- 2) Dielektrik itki bucağının tangensinin ölçülməsi;
- 3) Dielektrikin qütbləşmə/depolyarizasiya proseslərinin gərginliyinin/cərəyanının ölçülməsi.

İzolyasiya materialının yaşlanma prosesinin fizikası

Qismən boşalma, izolyasiyanın yalnız bir hissəsini idarə edən və elektrodlar arasında gərginlikdə əhəmiyyətli bir dəyişikliyə səbəb olmayan aşağı güclü elektrik boşalmasıdır. Bir qayda olaraq, daxili qüsurların yerləşdiyi yerlərdə izolyasiyada qismən boşalmalar baş verir (qaz baloncukları, bərk çirklərin müxtəlif mikrohissəcikləri) bu yerlərdə elektrik sahəsinin qeyri-bərabərliyi meydana gəldiyinə görə, qüsurun içərisində intensivliyi izolyasiya materialından xeyli yüksək ola bilər [7-9].

Bir qayda olaraq, çirklərin elektrik gücü izolyasiyanın elektrik gücündən əhəmiyyətli dərəcədə aşağıdır, buna görə qüsurların yerində yerli elektrik qəzası baş verir. Yüksək intensivlikli qismi boşalmaların (QB) mənbələri adətən dendritlərdir - izolyasiyanın təbii qocalması nəticəsində materialın məhv edilməsi və ya depolimerləşməsi nəticəsində istehsal və istismar zamanı izolyasiyada əmələ gələn qeyri-homogenliklərdən inkişaf edən ağaca bənzər natamam parçalanma kanalları. Bundan əlavə, QB mənbələri zəif quraşdırma yerləri ola bilər, məsələn, kabel birləşmələri. İstehsal texnologiyasındakı çatışmazlıqlar nəticəsində yaranan izolyasiya qüsurlarının içərisində elektrik sahəsinin təsiri altında iş zamanı dendritlərin böyüməsinə səbəb olan qismən boşalmalar meydana gəlir. Qazlarla doldurulmuş qüsurlar üçün qaz daxil olmalarında qismən boşalmaların baş verməsi üçün daha aşağı elektrik sahəsinin gücü tələb olunur, çünki qazların dielektrik davamlılığı mayelərin və bərk çirklərin keçiriciliyindən azdır. Nəticədə, qüsurların inkişafının ilkin mərhələlərində qismən boşalmaların intensivliyi əhəmiyyətli dərəcədə yüksək ola bilər. İzolyasiyadakı mikroməsələlər izolyasiyada məhlul kimi mövcud olan və ya ətraf mühitdən izolyasiyaya nüfuz edən su ilə doldurula bilər [3, 6].

İzolyasiya vəziyyətinin monitorinqinin qeyri-dağıdıcı üsullarına həmçinin modellərin yaradılması və kabelin əsas parametrlərinin onun iş şəraiti nəzərə alınmaqla sonrakı hesablanması da daxildir. Bu üsullar, xidmət müddətindən asılı olmayaraq, kabel məhsulunun izolyasiyasının vəziyyətini real vaxt rejimində qiymətləndirməyə imkan verir. İzolyasiya aşınmasına qədər iş vaxtının proqnozlaşdırılması probleminin formalaşdırılmasında və sonrakı həllində əsas cəhət riyazi aparatlardan istifadə edərək izolyasiyada baş verən keçici proseslərin fizikasının təsviri və ya xüsusi hazırlanmış proqramlardan istifadə edərək yaşlanma prosesinin modelləşdirilməsidir [11].

Kabel nominal rejimdə işləyərkən, izolyasiya xüsusiyyətlərinin tədricən pisləşməsi baş verir. Bu proses xarici maqnit və elektrik sahəsinin təsiri, temperatur fərqləri, dinamik dartılma və sıxıcı yüklərin yaratdığı mexaniki təsirlər, ətraf mühit amillərinin (ışıq, radiasiya), rütubət, inert qazların təsiri kimi dinamik xüsusiyyətlərin qeyri-xətti dəyişməsi nəticəsində yaranır. Kimyəvi reaksiyalar səviyyəsində xarici təsirlərin molekulun parçalanma sürətinə təsiri prosesi Arrhenius qanunundan istifadə edilə bilər:

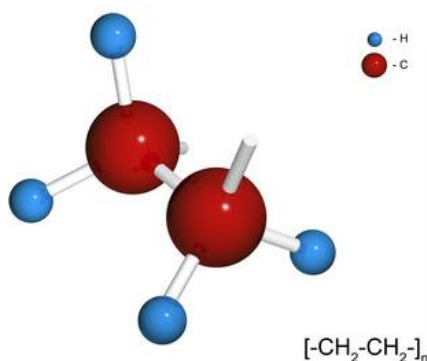
$$K_t = K_r \cdot e^{\frac{-W_a}{k \cdot T}} \quad (1)$$

burada K_t - vahid vaxtda bir molekulun parçalanmasının orta ehtimalıdır, dəyişən kimyəvi reaksiyaların sürətinə cavabdehdir; K_r - reaksiyada iştirak edən maddələrin materialından asılı olan əmsal; W_a - aktivləşdirmə enerjisidir; k - Boltsman sabitinin istinad qiymətidir.

Bu fenomeni daha yaxşı başa düşmək üçün yüksək intensivliyə malik elektrostatik sahədə izolyasiyanın yaşlanmasının xüsusi bir vəziyyəti verilmişdir.

İzolyasiyanın ayrı bir hissəsində elektrik sahəsi fəaliyyət göstərir, bunun nəticəsində bu hissədə qismən boşalmalar baş verir. Qismən boşalmalarda qeyri-xətti artım baş verir və onlar vaxtaşırı təkrar edildikdə, izolyasiyanın məhv edilməsi prosesinə başlayırlar, çünki içərisində mikro çatlar görünür [12]. Elektrik gücünün buraxıla bilən maksimum qiymətinə çatdıqda, qəza

baş verir. İzolyasiya materialının vəziyyətini müəyyən etmək və hesablamaq üçün dielektrik materialda qüsurların əmələ gəlməsi və ayrılması mexanizmini təsvir edən qanun çıxarılmışdır. Test nümunəsi olaraq polietilen seçilmişdir (şəkil 1).



Şək.1. Polietilen molekulunun strukturu.

Polietilenin kimyəvi düsturunda, parçalanma baş verdikdə, bir karbon atomunun qonşu karbon atomları ilə bağları qırılır və sərbəst hidrogen atomları meydana gəlir ki, bu da hava boşluqların meydana gəlməsinə səbəb ola bilər. Nəticədə bağlanmamış hidrogen müsbət yüklü ion H^+ kimi kənara çıxır, bu da öz növbəsində ionlaşmaya və bütövlükdə polietilenin molekulyar strukturunun daha da məhv olmasına kömək edir və sonradan sərbəst elektronu tutaraq neytral olur, karbon isə keçirici mikrohissəcik olur. Bu halda qonşu karbon atomları bir-biri ilə əlaqə yaradır. Bundan əlavə, sərbəst hidrogenin bütöv molekularda qonşu karbon atomları ilə əlaqə yaratması və son qruplar meydana gətirməsi mümkündür. Belə bir əlaqə elektrik sahəsinin təsiri altında pozulduqda, sərbəst hidrogen və qonşu karbon atomu ilə bir son qrup əmələ gəlir [13].

Polietilen izolyasiyada qocalmanın səbəbləri həm texnoloji, həm də əməliyyat baxımından qaçılmazdır. Belə qüsuralara mikroskopik hava boşluqları, xarici daxilolmalar, çatlar və s. daxildir. Onlar izolyasiyada onun istehsalı zamanı və ya kəbellərin çəkilməsi və istismarı zamanı, məsələn, yük şəraitində materialın dövrü sıxılması və genişlənməsi səbəbindən görünür. Bu mikroboşluqlar izolyasiyanın (çarpaz bağlanması və ekstruziyası) istehsal proseslərində su buxarının əmələ gəlməsi və uçucu məhsulların olması səbəbindən qazla doldurulur.

İstismar zamanı kabel izolyasiyasına xarici və daxili amillərin təsirlərinin təhlili.

Çarpaz polietilen izolyasiyalı kabel ötürücü xətlərin istismarı zamanı izolyasiya materialı onun qocalmasına səbəb olan bir sıra xarici və daxili dağıdıcı təsirlərə məruz qala bilər:

1. Temperaturun təsiri çarpaz bağlı polietilenin məhv edilməsi və depolimerləşməsinin kimyəvi reaksiyalarının sürətini müəyyən edir; 2. Ətraf mühitin rütubətinin artması izolyasiyanın nəmlənməsinə və onun xüsusiyyətlərinin pisləşməsinə səbəb ola bilər. Nəmlik dərəcəsini təyin etmək üçün udma əmsalı müəyyən edilir və izolyasiya qurudulur. Bundan əlavə, izolyasiya materialının mikroməsələlərindəki su tərkibi, izolyasiyada qüsurların inkişafını sürətləndirərək, su ağacının fenomeninə səbəb olur; 3. Ultrabənövşəyi şüalanma izolyasiya səthinə dağıdıcı təsir göstərir, çünki ultrabənövşəyi fotonlar yüksək enerjiyə malikdir və onun səthində izolyasiyanın molekulyar strukturunu (parçalanmış yan qruplar, əksər hallarda hidrogen) məhv edir, izolyasiyanın sərtliyinin artmasına, onun qurumasına, çatlamasına və beləliklə, izolyasiyanın xüsusiyyətlərinin pisləşməsinə səbəb olur. Bu hadisəyə fotokimyəvi məhvə də deyilir; 4. Kimyəvi təsirlər izolyasiyaya təsir edən və onu məhv edə bilən müxtəlif kimyəvi maddələrlə ifadə edilir, məsələn, 50% məhlulda polietileni məhv edə bilən azot turşusu və ya havadan oksigenin olması, termo-oksidləşdirici məhv; 5. Atom rabitələrinin enerjisindən yuxarı mexaniki gərginlik yarandıqda mexaniki təsirlər atomlararası rabitələrin məhvinə səbəb olur; 6. Radiasiyanın dielektrikə təsiri molekulyar səviyyədə müxtəlif zədələnmələrə səbəb ola bilər. Maddənin strukturunda, xassələrində və vəziyyətində dəyişikliklər baş verir. Şüalananda yaranan yük daşıyıcıları maddə stasionar və qeyri-stasionar cərəyanlar yaradır və dielektrlərdə kosmik yükün yığılmasına gətirib çıxarır ki, bu da uzun müddət davam edə bilər [11-13].

Bununla belə, bütün sadalanan amillər üçün monitoring sisteminin işlənməsi izolyasiyaya göstərilən bütün sadalanan təsirlərin təbiətinin dərinədən öyrənilməsi zərurəti ilə əlaqədar olduqca mürəkkəb bir işdir. Bundan əlavə, hər bir xüsusi kabelin qalıq ömrünü izləmək üçün fərdi yanaşma tələb olunur, çünki bəzi amillərin izolyasiyaya təsiri əhəmiyyətsiz ola bilər və buna görə də laqeyd qala bilər.

Əvvəllər seçilmiş kabelin dizaynına əsasən, izolyasiya materialının məhv edilməsinin aşağıdakı amillərini nəzərə almamaq qərara alındı [9]:

1. Ətraf mühitin rütubəti, çünki kabelin tərkibində kabellərin islanmasının qarşısını alan su bloklayıcı lentlər var və polietilenin nisbətən aşağı nəm udma qabiliyyətinə malik olduğu da məlumdur;

2. Ultrabənövşəyi şüalanma, çünki o, xarici günəş radiasiyasından qorunmaq üçün kabeldə yerləşən işi izolyasiyasına zərər vermədən yalnız kabel səthinə, yəni onun qabığına dağıdıcı təsir göstərir;

3. Bütün kimyəvi maddələr izolyasiya həcmində az miqdarda ola biləcəyi və izolyasiya materialının məhv edilməsi nəticəsində əmələ gələ bildiyi üçün kimyəvi təsirləri ayrıca nəzərdən keçirməmək qərara alınıb. Buna görə də onlar kabel istismarı zamanı keçirici nüvənin qızması nəticəsində yaranan istilik destruksiyası (məhv etməsi) prosesləri ilə müəyyən ediləcək;

4. Mexanik təsirlər temperaturun dəyişməsi və qrunun yerdəyişməsi (yerdə quraşdırma zamanı) nəticəsində kabellərin əyilməsi (quraşdırma zamanı), sıxılması və dartılması ilə ifadə edilir;

5. Radiasiya yalnız ixtisaslaşdırılmış obyektlərdə, məsələn, atom elektrik stansiyalarında dielektrikə təsir edə bilər. Lakin tədqiqatın məqsədi sənayedə istifadə olunan ümumi təyinatlı kabellərin qalıq ömrünü təyin etmək üçün bir sistemin inkişaf etdirilməsidir [14]:

Beləliklə, kabel konstruksiyası və onların izolyasiyasının məruz qala biləcəyi təsirlərin təhlilinə əsasən, yaşlanma prosesində yüksək intensivlikli elektrik sahəsinin olması nəticəsində yaranan temperaturun və qismən boşalmaların təsirlərini nəzərə almaq kifayətdir.

Qalıq resursun proqnozlaşdırması üçün riyazi modelin işlənilməsi

Qalıq resursun hesablanması sadələşdirilmiş formada izolyasiyanın köhnəlməsinin mövcud modelinə (2) əsaslandırılmışdır:

$$\tau_i = A \cdot E^{-n} \cdot \exp \frac{W_a}{k \cdot T} \quad (2)$$

Yuxarıdakı nəticələrə əsasən, izolyasiyanın xidmət müddəti, S.A. Arrhenius qanunu ilə müəyyən edilmiş, izolyasiya materialının istilik və istilik-oksidləşdirici məhvi zamanı qismən boşalmaların gücü və kimyəvi reaksiyaların sürəti ilə müəyyən edilir.

İzolyasiyanın pozulması ehtimalını nəzərə alaraq (3) formulun təqdimatına baxaq:

$$\tau_i = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{k \cdot T}\right)} \quad (3)$$

burada N_t - zamanın müəyyən anında vahid həcmdə olan maddənin molekullarının sayı, N_0 – dağılma başlamazdan əvvəl vahid həcmdə maddənin molekullarının sayıdır, güman edilir ki, $N_t/N_0 = 0,645$, B-konstantadır, E-elektrik sahəsinin gücüdür, n-materialın növündən və strukturundan asılı olaraq qüvvə göstəricisidir, $K_0(T)=K_0 \cdot e^{(-W_a/k \cdot T)}$ verilmiş temperaturda kimyəvi reaksiyaların sürət əmsalı, K_0 –Arrhenius qanununun reaksiya sürəti sabiti, W_a – aktivləşmə enerjisi, k–Boltsman sabiti, T–Kelvindəki temperatur, c–temperatur və elektrik sahəsinin təsirlərinin sinerjisi ilə müəyyən edilən vurma əmsalıdır. Bu halda qalıq resursu hesablamaq üçün onun parçalanma dərəcəsini müəyyən etmək üçün maddənin verilmiş həcmində materialın məhv edilməmiş molekullarının sayını hesablamaq lazımdır. Sabit güc və temperaturda müəyyən bir anda məhv edilməmiş molekulların sayı (4) düsturla hesablanacaq [8]:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{k \cdot T})} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{k \cdot T})} \quad (4)$$

Vaxt keçdikcə elektrik sahəsinin gücü və temperaturunun, bir qayda olaraq, iş şəraitində xaotik olaraq dəyişməsi şərtini nəzərə alaraq, hesablamanı zamana görə (məsələn, saniyədə bir dəfə) yerinə yetirmək lazımdır. Güc və temperaturun dəyişdirilməsi funksiyalarının xaotik olduğunu nəzərə alaraq, (5) düsturundan istifadə edərək hesablama aparmaq təklif olunur [15-17]:

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt \quad (5)$$

burada $v(t)$ izolyasiyanı məhv edən amillərin birgə təsiri altında materialın dağılma olma sürətinin funksiyasıdır və bu aşağıdakı (6) düsturla müəyyən edilə bilər:

$$v(t) = -\frac{dN}{dT} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{k \cdot T}) \cdot N_0 \cdot e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{k \cdot T})} \quad (6)$$

Bundan əlavə, izolyasiyanın aşınmasını proqnozlaşdırmaq problemini həll etmək üçün müəyyən bir müddət ərzində toplanmış məlumatlar əsasında $N_t(t)$ funksiyasını ekstrapolyasiya etmək lazımdır. Elektrik enerjisi sistemində baş verən proseslərin tsiklik xarakterini nəzərə alaraq, funksiyanın eksponensial xarakterini saxlayacağı güman edilir.

NƏTİCƏ

Tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, elektrik kabellərinin uzunmüddətli və etibarlı istismarını təmin etmək üçün yalnız istismara verilməzdən əvvəl deyil, eyni zamanda istismar müddəti boyunca da onların izolyasiya vəziyyəti mütəmadi şəkildə qiymətləndirilməlidir. Ənənəvi gərginlik sınaqları izolyasiyanın mövcud qüsurlarını aşkarlasa da, bu metodlar bir çox hallarda izolyasiya materialının strukturuna əlavə zərər vuraraq onun qocalma prosesini sürətləndirir.

Bu baxımdan, dağdııcı olmayan diaqnostika üsulları – xüsusilə qismən boşalma ölçüləri, dielektrik itki bucağının təyini və qütbləşmə/depolyarizasiya analizləri – izolyasiyanın real vəziyyətini daha dəqiq və təhlükəsiz şəkildə qiymətləndirmək imkanı yaradır. Təqdim olunan riyazi model, temperatur və elektrik sahəsinin təsiri altında polietilen izolyasiyalı kabellərdə molekulyar parçalanma proseslərini nəzərə alaraq, kabelin qalıq ömrünü proqnozlaşdırmağa imkan verir.

-
1. *Пириева Н.М., Ибадова Ф.А.* //Общие принципы диагностики кабельных линий// Международный научный журнал Флагман науки: научный журнал. Январь 2024. - СПб., Изд. ГНИИ "Нацразвитие" - 2024. №1(12).
 2. *Пириева Н.М., Джавадзаде Т.Э.* Методы определения мест повреждений кабелей со строительной полиэтиленовой изоляцией. Журнал Проблем энергетики №1, Баку, 2023 стр. 85-90.
 3. *Рагимли И.Н., Наджафов С.Г.* Общая характеристика кабелей из сшитого полиэтилена. Международный научный журнал «Вестник науки» № 2 (83) Том 3. Февраль 2025 г. стр.500-507
 4. *Piriyeva N.M., Ganiyeva N.A., Karimova R.K.* Innovative approaches to selective automatic reclosing on overhead cable lines. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). - Issue 62, Vol. 17, Number 1, Pages 32-44 March 2025 (Serial No: 0062-1701-0325)
 5. *Xia Y., Song X., He J., Jia Z., Wang X.*, Simulation and partial discharge detection for typical defects of 10 kV cable joint // Journal of Engineering, Vol. 2019, Issue 16, 2019, pp. 2856–2859.

6. *Jineeth J., Shilpa M., Sindhu T.K.*, Numerical modelling, simulation and experimental validation of partial discharge in cross-linked polyethylene cables // IET Science, Measurement & Technology, Vol. 14, Issue 10, 2021, pp. 862–869.
7. *Radzi M.I., Ali N.H., Ariffin A.M., Rahman M.S., Rameli N., Ahmad M.R., Salleh A.S.*, Development and testing of a partial discharge detection device on medium voltage XLPE cable // Indonesian Journal of Electrical Engineering & Computer Science, Vol. 21, Issue 1, 2020, pp. 8–18.
8. *Serttaş F., Hocaoğlu F.*, Partial discharge detection and localization on medium-voltage XLPE cables with multiclass support vector machines // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 28, Issue 4, 2020, pp. 2331–2344.
9. *Piriyeva N.M., Ganiyeva N.A., Karimova R.K.* Study of selective automatic reclosing on cable-overhead lines. The 20th International Conference on “Technical and Physical Problems of Engineering” 31 October 2024 *International Organization of IOTPE. pp.53-57* ISSN 2309-0553
10. *Kerimzade G.S.*“Structure of the monitoring and tracking electromechanical control system”. PRZEGLADElektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature SIGMA–NOT. ISSN 0033-2097,R.100 NR 07/2024.Warszawa.pp.295-297.
11. *Kerimzade G.S.*, Features of hanging the parameters of induction control support // IJ TPE Journal, ISSN 2077- 3528 ISSUE .Number 1. March, 2025, pp.69-80.
12. *Safiyev E.S., Shikhaliyeva S.Y.*, Analysis of ecology and efficiency of overhead power lines of ultra-high voltage //, IJTPE - Issue 62, Volume 17, Number 1, March 2025, pp. 91-100.
13. *Shikhaliyeva S.Y., Safiyev E.S.*, Extra high voltage on overhead power lines // The 20th International Conference on “Technical and Physical Problems of Engineering” International Organization of IOTPE, 2024, pp. 76-82.
14. *Shikhaliyeva S.Y.* “Analysis of unexplained breaks in power transmission lines”, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Vo. 15, N2 2023, pp. 198-206.
15. *Şixəliyeva S.Y., Aşurova U.İ.*, Azərbaycanın elektrik şəbəkələrində elektrik enerjisi itkilərinin hesablanması, təhlili və tənzimlənməsi təcrübəsi // Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri, III Beynəlxalq elmi konfrans, SDU, Sumqayıt, 27-28 oktyabr 2022, s.130-132.
16. *Rzayeva S.V., Ganiyeva N.A. Piriyeva N.M.*, Modern approaches to electrical equipment diagnostics // İnternational Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) - Issue 58, Volume 16, Number 1, March 2024, pp.182-189.
17. *Piriyeva N.M., Karimova R.K., Abdullayeva G.K.*, High-temperature heat-insulating materials: a compromise between thermal conductivity and reliability // Reliability: Theory & Applications. 2025, June 2(84), pp.408-413.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

АЛИЕВ Г.К., ШИХАЛИЕВА С.Я.

В представленной статье рассматриваются испытания и методы диагностики, проводимые перед вводом в эксплуатацию и в процессе эксплуатации для обеспечения надежной работы электрических кабелей. Основное внимание уделено оценке состояния изоляции кабеля и моделированию процессов ее старения на научной основе. Проанализированы механизмы разрушения изоляционных материалов, особенно полиэтилена, под действием электрических и термических воздействий, подробно изложены частичные разряды и их влияние на изоляцию. В статье также рассмотрены современные подходы к неразрушающим методам диагностики – измерение угла диэлектрических потерь, контроль частичных разрядов и процессов поляризации.

Представленная математическая модель позволяет рассчитывать остаточный ресурс изоляционного материала на основе напряженности электрического поля, температуры и скорости химических реакций. В результате сформирован научно обоснованный методический подход для оперативной оценки состояния изоляции кабеля и прогнозирования ее остаточного ресурса. В статье комплексно проанализированы методы испытаний и диагностики, проводимые перед вводом в эксплуатацию и в процессе эксплуатации кабельных линий с полиэтиленовой изоляцией напряжением 6–10 кВ, играющих важную роль в передаче электроэнергии. Для обеспечения безопасности и долговечности кабельных систем рассматриваются традиционные методы испытаний, такие как проверка целостности жил кабеля, измерение сопротивления изоляции, электрические испытания при постоянном или переменном напряжении, а также измерение сопротивления заземления.

Ключевые слова: электрические кабели, испытания изоляции, частичные разряды (ЧР), полиэтиленовая изоляция, диэлектрические свойства, диагностика.

BASIC METHODS FOR DIAGNOSING AND MONITORING THE INSULATION CONDITION OF POLYETHYLENE INSULATED CABLE LINES

ALIYEV Q.K., SHIKHALIYEVA S.Y.

The presented article considers tests and diagnostic methods carried out before commissioning and during operation to ensure reliable operation of electric cables. The main attention is paid to the assessment of the cable insulation condition and modeling of its aging processes on a scientific basis. The mechanisms of destruction of insulating materials, especially polyethylene, under the influence of electrical and thermal effects are analyzed, partial discharges and their effect on insulation are described in detail. The article also considers modern approaches to non-destructive diagnostic methods - measuring the dielectric loss angle, monitoring partial discharges and polarization processes. The presented mathematical model allows calculating the residual life of the insulating material based on the electric field strength, temperature and rate of chemical reactions. As a result, a scientifically based methodological approach has been formed for the prompt assessment of the cable insulation condition and forecasting its residual life. The article comprehensively analyzes the testing and diagnostic methods carried out before commissioning and during operation of 6-10 kV polyethylene-insulated cable lines, which play an important role in power transmission. To ensure the safety and durability of cable systems, traditional testing methods are considered, such as checking the integrity of cable cores, measuring insulation resistance, electrical testing at direct or alternating voltage, and measuring ground resistance.

Key words: electrical cables, insulation tests, partial discharge (PDC), polyethylene insulation, dielectric properties, diagnostics.

DOI:10.70784/azip.5.20254153

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ STM32 ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ И МЕХАНИЗМОВ

РЗАЕВА С.В., МАМЕДОВ Н.С., АБДУЛЛАЕВА Г.К.

*Азербайджанский Государственный Университет Нефти
и Промышленности AZ1010, Баку, пр. Азадлыг 20
sona.rzayeva@asoiu.edu.az*

Разработана и исследована инкрементальная измерительная система для определения линейного и углового перемещения, предназначенная для применения в энергетических приводах, исполнительных механизмах и подвижных измерительных установках. В основе системы использован оптический инкрементальный датчик с квадратурными выходами и микроконтроллер STM32, обеспечивающий аппаратный подсчёт импульсов с высокой точностью. Представлены структурная схема системы, алгоритм цифровой обработки сигналов, методы повышения разрешающей способности и устойчивости к помехам. Проведена оценка погрешностей, влияния вибраций и нестабильности шага. Полученные результаты подтверждают возможность применения системы в приводах автоматизации, робототехнике и контролируемых перемещениях в энергосистемах.

Ключевые слова: энкодер, STM32, инкрементальный датчик, измерительные системы, привод, энергетика.

Введение. Развитие современного энергетического комплекса сопровождается масштабной автоматизацией технологических процессов, внедрением интеллектуальных приводов, роботизированных диагностических устройств и систем мониторинга состояния оборудования. Все эти направления требуют высокой точности измерения линейного и углового перемещения, от которой зависит корректность управления исполнительными механизмами, безопасность технологических процессов и стабильность работы оборудования.

В энергетике широко применяются регулирующие электроприводы запорной арматуры, механизмы позиционирования изоляторных тележек, роботизированные системы обследования подстанций, диагностические комплексы для кабельных линий и распределительных устройств [1-3]. Для всех перечисленных применений важно обеспечить надёжный контроль положения, скорости и направления движения подвижных узлов.

Инкрементальные оптические датчики занимают ключевое место среди средств измерения перемещений благодаря простоте конструкции, высокой чувствительности и доступности. Однако их практическое применение в энергетическом оборудовании сталкивается с рядом ограничений: повышенным уровнем вибраций, воздействием электромагнитных помех, перепадами температур и наличием длинных сигнальных линий. Эти факторы могут приводить к потере импульсов, дрейбу фронтов, ложным срабатываниям и, как следствие, к снижению общей точности измерения.

Особую актуальность приобретает использование микроконтроллеров STM32, оборудованных аппаратным режимом Encoder Mode, позволяющим существенно повысить точность и надёжность анализа квадратурных сигналов, минимизировать нагрузку на процессор и обеспечить высокую частоту формирования данных. Однако для обеспечения высокой точности измерений необходимо также учитывать алгоритмическую обработку, фильтрацию шумов, калибровку механических узлов и компенсацию температурно-зависимых факторов.

В этой работе рассматривается разработка инкрементальной измерительной системы, адаптированной к специфике энергетических приводов. Исследуются структурные, аппаратные и программные решения, обеспечивающие устойчивость работы в условиях воздействия вибраций, шумов, температурных колебаний и механического износа. Представлены алгоритмы улучшенной цифровой фильтрации и методы повышения точности преобразования импульсных сигналов в физические параметры перемещения.

Предложенная система ориентирована на применение в электромеханических узлах, где требуется надёжное и точное измерение перемещения: исполнительных механизмах, роботизированных комплексах, системах позиционирования, регулирующих приводах и мобильных диагностических установках энергетического профиля.

Дополнительно отметим, что в отличие от традиционных систем подсчёта импульсов, данная работа направлена на создание комплексной модели измерения, объединяющей аппаратные и программные средства коррекции сигналов, математическую калибровку и адаптацию под реальные условия энергетических объектов [4]. Это обеспечивает не только повышение точности, но и расширенную устойчивость измерений, что составляет основу научной новизны и практической значимости исследования.

Постановка проблемы. Точные измерительные системы, применяемые в энергетическом оборудовании, сталкиваются с множеством факторов, которые затрудняют получение достоверной информации о перемещении подвижных узлов. Несмотря на широкое распространение оптических инкрементальных датчиков, их использование в реальных условиях энергетической инфраструктуры сопровождается сложностями, связанными как с конструктивными особенностями механизмов, так и с воздействием окружающей среды.

Одной из фундаментальных проблем является нестабильность формы и длительности квадратурных импульсов, возникающая под действием вибрационных нагрузок, механических люфтов, неравномерности шага вращения и микроколебаний в узлах привода. Колебания амплитудно-временных характеристик сигналов приводят к ошибкам в подсчёте импульсов и к снижению точности определения текущего положения [5-7]. В условиях повышенной электромагнитной активности, характерной для распределительных устройств, дополнительно возникают паразитные наводки, вызывающие ложные срабатывания на входах микроконтроллера.

В энергетическом оборудовании необходимость периодической калибровки определяется не только физическим износом механических элементов, но и естественным дрейфом параметров из-за старения материалов, изменения прилегающих конструкций и циклических нагревов. Поэтому корректировка метрологических характеристик измерительного тракта должна рассматриваться как обязательное условие обеспечения точности в длительной эксплуатации.

Температурные колебания внешней среды в диапазоне от сильных морозов до значительного нагрева под воздействием солнечного излучения изменяют параметры оптической пары внутри датчика. Это приводит к вариациям величины оптического зазора и изменению фронтов сигналов, что особенно критично при высоких скоростях вращения или перемещения [8]. Механические элементы системы, такие как роликовые преобразователи или муфты, также подвержены температурному расширению и износу, в результате чего реальный шаг преобразования может отличаться от номинального, определяемого конструкцией датчика.

Проблема усложняется тем, что математический пересчёт импульсов в линейные и угловые величины предполагает строгое соответствие между физическим перемещением и количеством импульсов. Для любых отклонений необходимо учитывать поправочные коэффициенты. Например, если реальный радиус ролика изменяется на величину ΔR , то линейный шаг измерения

$$S = \frac{2\pi(R + \Delta R)}{N}$$

также изменяется, что приводит к накоплению систематической ошибки при больших длинах хода. Отсутствие адаптивной коррекции таких изменений приводит к значительным расхождениям между измеренными и реальными перемещениями.

Немаловажным аспектом является и то, что большинство микроконтроллеров при программном подсчёте импульсов испытывают значительную нагрузку, особенно при высокочастотных сигналах. В таких условиях возможны пропуски импульсов, что снижает надёжность измерений. Несмотря на наличие аппаратного режима Encoder Mode в STM32, для получения высокой точности требуется тщательно разработанный алгоритм обработки данных, обеспечивающий фильтрацию шумов, интерпретацию направления вращения, а также компенсацию динамических ошибок, возникающих в переходных процессах.

Таким образом, проблема создания точной инкрементальной измерительной системы заключается не только в правильном выборе оптического датчика или микроконтроллера, но и в обеспечении устойчивости всего комплекса к многокомпонентным внешним воздействиям. Необходимо объединить аппаратные и программные методы фильтрации, обеспечить калибровку механических параметров, разработать математическую модель учёта вариаций внешних условий и интегрировать эти решения в единую компактную и легко внедряемую систему для энергетических приводов.

Решение проблемы. Предлагаемое решение основывается на создании измерительной системы, в которой оптический инкрементальный датчик сочетается с микроконтроллером STM32, использующим аппаратный режим подсчёта квадратурных импульсов. Такая структура позволяет значительно повысить точность регистрации перемещений и уменьшить чувствительность к помехам, характерным для энергетического оборудования.

На рисунке 1 представлена общая структурная схема разработанной системы, включающая датчик, блок согласования уровней, фильтрацию сигналов и микроконтроллерный модуль. Схема соответствует классической архитектуре оптических энкодеров, но усилена элементами, обеспечивающими помехоустойчивость при работе рядом с силовым оборудованием.

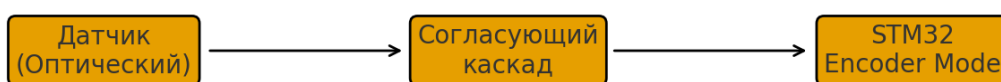


Рис.1. Общая структурная схема инкрементальной измерительной системы.

Сигналы датчика проходят через согласующий каскад, в котором введены RC-фильтры, стабилизирующие амплитуду и форму импульсов. Это особенно важно в условиях вибраций и высокочастотных электромагнитных наводок. Далее обработанные сигналы подаются на входы микроконтроллера STM32, где аппаратный модуль Encoder Mode регистрирует все фронты сигналов А и В. Благодаря фазовому сдвигу между ними достигается четырехкратное увеличение разрешения, определяемое выражением:

$$N = 4 \cdot PPR,$$

что дает возможность получать высокую точность углового и линейного перемещения.

Алгоритм преобразования импульсов в физические величины основан на математической модели, в которой угловой шаг определяется формулой

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N},$$

а линейное перемещение при использовании ролика радиусом R вычисляется как

$$S = \frac{2\pi R}{N}.$$

Калибровка системы проводится по эталонной длине, что позволяет компенсировать температурные и механические изменения параметров ролика. Такой подход уменьшает накопление систематической ошибки при больших перемещениях.

Для обеспечения устойчивости к вибрационным воздействиям разработан алгоритм цифровой обработки сигналов, включающий обнаружение аномальных всплесков и их подавление медианными фильтрами. Благодаря этому значительные колебания мгновенных значений не приводят к ошибкам регистрации при высоких скоростях перемещения.

На рисунке 2 представлена логическая схема обработки квадратурных сигналов, включая определение направления вращения по фазовому сдвигу. Этот механизм позволяет точно фиксировать как величину, так и направление перемещения, что особенно важно в реверсивных приводах энергетического оборудования.

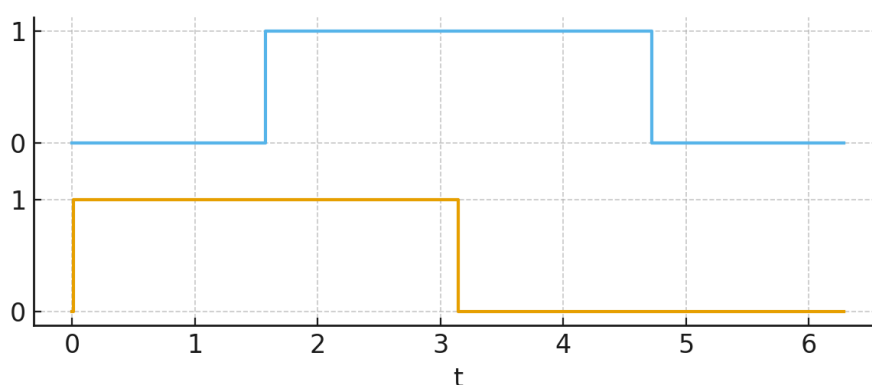


Рис.2. Диаграмма квадратурных сигналов А/В и логика определения направления.

Экспериментальные исследования показали, что сочетание аппаратного подсчёта импульсов и адаптивной цифровой фильтрации обеспечивает погрешность не более 1.1–1.3 %. Температурная коррекция уменьшает отклонение шага до 0.4 %, что подтверждает работоспособность предложенной модели и её применимость в условиях реальных энергетических установок. Система остаётся устойчивой при частоте входных импульсов до 2500 имп/с, что делает её пригодной для быстродействующих исполнительных механизмов.

На рисунке 3 приведена зависимость погрешности измерения от скорости вращения, демонстрирующая характер изменения ошибки при различных динамических режимах. График показывает, что при росте скорости погрешность имеет тенденцию к увеличению, однако применение разработанных методов фильтрации и коррекции существенно улучшает устойчивость показаний.

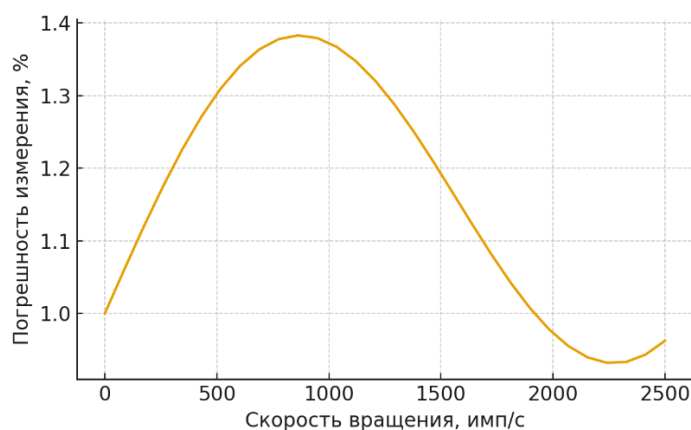


Рис.3. Зависимость погрешности измерения от скорости вращения.

Таким образом, предложенное решение представляет собой компактную, устойчивую и высокоточную систему определения перемещений, адаптированную к условиям эксплуатации энергетического оборудования и применимую как в регулирующих приводах, так и в мобильных диагностических установках.

Для иллюстрации эксплуатационных характеристик разработанной системы представлена обобщённая таблица ключевых параметров, полученных в ходе испытаний:

Таблица 1. Эксплуатационные параметры инкрементальной системы

Параметр	Значение
Диапазон частоты входных импульсов	до 2500 имп/с
Средняя погрешность без коррекции	1.1–1.3 %
Погрешность после температурной компенсации	до 0.4 %
Тип датчика	оптический квадратурный энкодер
Тип микроконтроллера	STM32, режим Encoder Mode
Устойчивость при вибрациях	высокая
Способ фильтрации	медианная, адаптивная цифровая

Таким образом, предложенное решение представляет собой компактную, устойчивую и высокоточную систему определения перемещений, адаптированную к условиям эксплуатации энергетического оборудования и применимую как в регулирующих приводах, так и в мобильных диагностических установках.

Заключение

Проведённые исследования позволили разработать и оценить работоспособность инкрементальной измерительной системы, предназначенной для применения в энергетических приводах и исполнительных механизмах. Использование оптического датчика с квадратурными каналами совместно с микроконтроллером STM32, работающим в аппаратном режиме подсчёта импульсов, обеспечило высокую точность регистрации перемещений даже в условиях вибраций, электромагнитных наводок и температурных воздействий, характерных для эксплуатационной среды энергетического оборудования.

Разработанная математическая модель преобразования импульсов в линейные и угловые величины, дополненная процедурой калибровки по эталонной длине, позволила значительно сократить влияние систематических ошибок, связанных с изменением параметров измерительного ролика и дрейфом механических характеристик. Применение цифровых фильтров и алгоритмов адаптивного подавления аномальных скачков улучшило устойчивость системы к случайным возмущениям, обеспечив стабильность работы при высоких скоростях перемещения и частотах входных импульсов.

Экспериментальные испытания показали, что суммарная погрешность измерения не превышает 1.1–1.3 %, а введённая температурная компенсация снижает отклонение шага до 0.4 %. Эти результаты подтверждают практическую применимость предложенной системы в энергетике, где надёжность и точность определения положения играют ключевую роль при управлении оборудованием.

Таким образом, созданная измерительная система обладает высоким потенциалом для использования в регулирующих приводах, роботизированных диагностических установках, системах позиционирования и других устройствах, требующих точного контроля перемещения. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных моделей компенсации параметрического дрейфа, интеграция средств самодиагностики состояния и применение беспроводных модулей передачи данных для формирования распределённых измерительных систем в составе интеллектуальных энергетических комплексов.

Практическая реализация предложенной системы демонстрирует её пригодность для промышленного внедрения в составе современных энергетических комплексов, включая автоматизированные приводы, диагностические роботизированные платформы и интеллектуальные системы мониторинга состояния оборудования.

1. *Иоффе В.Г.* и др. Архитектура, принципы функционирования и программные средства микроконтроллеров STM32 //Текст: электронный/ВГ Иоффе, АВ Графкин, ВВ Графкин. – 2021.
2. *Конченков, Владимир Игоревич, and Владимир Николаевич Скакунов.* "Семейство микроконтроллеров STM32. Программирование и применение." (2015): 78-78.
3. *Иванов, Роман, and Александр Бородулин.* "Семейство микроконтроллеров stm3214. DSP с батарейным питанием." *Вестник Электроники* 4 (2015): 10-17.
4. *Горобцов И.А., Кирик Д.И.* Применение микроконтроллеров stm 32 при проектировании РЭС //в сборнике: актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018) сборник научных статей. – 2018. – №. 4. – с. 117-121.
5. *Керимзаде Г.С., Рзаева С.В.* Инженерные решения для интеграции устройств и датчиков интернета вещей инженерные решения для интеграции устройств и датчиков интернета вещей //Техническая электродинамика. – 2025. – №. 5.
6. *Ahmedov E., Rzaeva S., Mammadov N.* Analysis and evaluation of the effectiveness of innovative methods in energy //AZƏRBAYCAN ALİ TEXNİKİ MƏKTƏBLƏRİNİN XƏBƏRLƏRİ. – Т. 9. – №. 20. – с. 77.
7. *Mammadov N.S., Mukhtarova K.M.* Methodology for assessing the reliability of ags based on renewable energy sources //Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Т. 19. – №. 4 (80). – с. 648-653.
8. *Mammadov N.S., Mukhtarova K.M.* Methodology for assessing the reliability of ags based on renewable energy sources //Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Т. 19. – №. 4 (80). – с. 648-653.
9. *Ilham Rahimli, Rashida Karimova, Najiba Piriyeva.* Development of a Two-Parameter Inductive Sensor for use in Digital Program Control Systems for Machine Tools. PRZEGLAD Elektrotechniczny ISSN 0033-2097, R.100 NR 08/2024. WARSZAWA. pp.194-197.
10. *Rzaeva S.V., Piriyeva N.M., Guseynova I.A.* Analysis of reliability of typical power supply circuits. Reliability: Theory and Applications, RTA, №3 (79) Volume 19, 173-178 September 2024
11. *Rzaeva S.V., Piriyeva N.M., Ismayilova S.I.* High and low voltage coordination in electrical power systems. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). - Issue 62, Volume 17, Number 1, Pages 19-31, March 2025 (Serial No: 0062-1701-0325)

STM32 ƏSASINDA ENERGETİKA İNTİQALLARI VƏ MEXANİZMLƏRİ ÜÇÜN İNKREMENTAL ÖLÇÜ SİSTEMİNİN İŞLƏNMƏSİ VƏ TƏDQIQI

RAZAEVA S.V., MƏMMƏDOV N.S., ABDULLAYEVA G.S.

Enerji qurğularında tətbiq olunan icraedici mexanizmlər və hərəkətli ölçmə sistemləri üçün xətti və bucaqlı yerdəyişmənin müəyyən edilməsinə imkan verən inkremental ölçü sistemi hazırlanmış və tədqiq edilmişdir. Sistemin əsasını kvadratur çıxışlı optik inkremental sensor və impulsların yüksək dəqiqliklə aparat səviyyəsində sayılmasını təmin edən STM32 mikrokontrolleri təşkil edir. Məqalədə sistemin struktur sxemi, siqnalların rəqəmsal emalı alqoritmi və elektromaqnit təsirlərə davamlılığın artırılması metodları təqdim olunur. Vibrasiya, mexaniki qeyri-sabitlik və addımın dəyişkənliyinin ölçmə dəqiqliyinə təsiri qiymətləndirilmişdir.

Alınmış nəticələr sistemin avtomatlaşdırılmış intiqallarda, robototexnika qurğularında və enerji sistemlərində idarə olunan yerdəyişmələr üçün tətbiq oluna biləcəyini təsdiq edir.

Açar sözlər: enkoder, STM32, inkremental sensor, ölçmə sistemləri, intiqal, energetika.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AN STM32-BASED INCREMENTAL MEASUREMENT SYSTEM FOR ENERGY DRIVES AND MECHANISMS

RZAYEVA S.V., MAMMADOV N.S., ABDULAYEVA G.S.

An incremental measurement system for determining linear and angular displacement has been developed and investigated for use in energy drives, actuator mechanisms, and mobile measurement platforms. The system is based on an optical incremental encoder with quadrature outputs and an STM32 microcontroller providing high-accuracy hardware pulse counting. The structural diagram of the system, the digital signal-processing algorithm, and methods for increasing resolution and noise immunity are presented. The influence of vibration, mechanical instability and step non-uniformity on measurement accuracy has been evaluated. The results confirm the applicability of the proposed system in automated drives, robotics, and controlled movement tasks within power engineering infrastructures.

Keywords: encoder, STM32, incremental sensor, measurement systems, drive, power engineering.

MÜNDƏRİCAT

ELEKTROENERGETİKA

Mərufov İ.M., Muxtarova K.M., Kərimova S.M. Elektrik şəbəkələrində gərginlik və cərəyan harmonikalarının elektrik itkilərinə təsirinin araşdırılması.....	3
Mufidzadə N.A., İsmayılova G.G. Avtotransformatorların ifrat gərginlikdən mühafizəsinin təkmilləşdirilməsi.....	11

ENERGETİKANIN KOMPLEKS PROBLEMLƏRİ

Şıxəliyeva S.Y., Piriyyəva N.M. Su elektrik stansiyası blok transformatorlarının idarə edilməsi üzrə riskli və mövqeli yanaşma.....	20
Süleymanova L.Ç. Rəqəmsal energetika dövründə transformator və veriliş xətlərinin modernləşdirilməsi.....	27
Muradova R.Ə. Hava elektrik veriliş xətlərində kommutasiya gərginliklərindən mühafizə sistemlərinin quruluşu və qiymətləndirmə metodlarının araşdırılması.....	32
Cəlilli N.Ə., Mamedova N.N., Həşimov X.X. Müasir pyezoelektrik elementləri üzərində pyezogeneratorun layihələndirilməsi.....	40
Hüseynova İ.Ə. Hava elektrik xətlərində ildırımından yaranan ifrat gərginliklərin modelləşdirilməsi.....	46

İSTİLİK ENERGETİKASI

Kəlbəliyev F.R. Fokuslaşdırıcı günəş energetik qurğularının istilik enerjisi akkumulyasiyasının inkişaf tendensiyaları.....	53
--	----

ELEKTROFİZİKA

Orucov N.İ., Quliyev H.B., Əliməmmədova S.C. Qövs ifrat gərginliyin yerlə qapanma müqaviməti və şəbəkənin yerə nəzərən faza tutumundan asılılığının 3d modelləşdirilməsi.....	63
Musayeva N.N., Gremenok V.F., Xəlilova N.X., Stançik A.V., Jaludkeviç A.L., Miñçukova O.F., Bişinskiy M.V., İzzətova B.M., Əlizadə M.T. PVP və Na ₂ CO ₃ istifadə edilərək sintez olunmuş SrFe ₁₂ O ₁₉ nanohissəciklərinin maqnit xüsusiyyətlərinin müqayisəli tədqiqi.....	74
Əhədzadə Ş.M., Nurubəyli T.K., İmanova A.Y. ZnO varistorlarının fiziki və elektrik xüsusiyyətlərinin təhlili.....	86
Həsənova X.Ə. Təkdivarlı karbon nanoboruların elektron quruluşunun xirallıqdan asılılığı.....	91
Məmmədova S.A. ZnTe и ZnTe:Cu nanokristallarının struktur və optik xassələri.....	97

ENERJİ MƏNBƏLƏRİ

Mirzəyeva S.M., Həsənov A.İ., Heydərov Ə.O. Bərpa olunan enerji mənbələrinin enerji sisteminə inteqrasiyası zamanı yarana bilən problemlər və onların həlli yolları.....	102
---	-----

DATA ANALİTİK VƏ SÜNİ İNTELLEKT

İsmayılova Ş.İ., Mustafayeva F.M. Süni intellekt texnologiyalarının enerji sistemlərinə inteqrasiyası və təsirləri.....	108
İsmayılzadə İ.Q., Qoçuyeva A.F. Telekommunikasiya sistemlərində qeyri-bircinsli idarəetmə proseslərinin tədqiqat üsulları.....	115

EKOLOGİYA

Rəhimov F.A., Rəhimova T.A. Davamlı enerji təchizatında ətraf mühitin qorunması tədbirlərinin effektivliyinin qiymətləndirilməsi.....	122
--	-----

İŞ TƏCRÜBƏSİNDƏN

Sultanov E.F., Həsənov E.A. Tədrisən işə salınan böyük güclü yük nasosunun elektrik intiqalının tədqiqi.....	126
Həsənov Z.Ə., Qasımov S.K., Məmmədov Ç.N. Eko-aqro-robot üçün maneələrdən yan keçmə rejimlərinin hazırlanması.....	133
Həsənova G.Ü., İsmayılova Sh.İ. Metropolitenin güc əmsalının artırılması üçün həllər- xülasə.....	139
Əliyev Q.K., Şıxəliyeva S.Y. Polietilen izolyasiyalı kabel xətlərinin izolyasiya vəziyyətinin diaqnostikası və nəzarətin əsas üsulları.....	146
Rzayeva S.V., Məmmədov N.S., Abdullayeva G.S. STM32 Əsasında energetika intiqalları və mexanizmləri üçün inkremental ölçü sisteminin işlənməsi və tədqiqi.....	153

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Маруфов И.М., Мухтарова К.М., Каримова С.М. Исследование влияния гармоник напряжения и тока на потери электроэнергии в электрических сетях.....	3
Муфидзаде Н.А., Исмаилова Г.Г. Совершенствование защиты автотрансформаторов от перенапряжений.....	11

КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Шихалиева С.Я., Пириева Н.М. Риск-ориентированные и зависящие от местонахождения подходы к управлению блочными трансформаторами на гидроэлектростанциях.....	20
Сулейманова Л.Ч. Модернизация трансформаторов и линий электропередач в эпоху цифровой энергетики.....	27
Мурадова Р.А. Изучение методов разработки и оценки систем защиты от коммутационных перенапряжений в воздушных линиях электропередачи.....	32
Джалилли Н.Э., Мамедова Н.Н., Гашимов Х.Х. Проектирование пьезогенератора на основе современных пьезоэлектрических элементов.....	40
Гусейнова И.А. Моделирование перенапряжений от молнии в воздушных линиях электропередачи.....	46

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Калбалиев Ф.Р. Тенденции развития технологии аккумуляции тепловой энергии в системах концентрирующих солнечных энергоустановок.....	53
--	----

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Оруджев Н.И., Гулиев Г.Б., Алимамедова С.Д. 3D моделирование зависимости дугового перенапряжения от сопротивления замыканию на землю и фазной емкости сети относительно земли.....	63
Мусаева Н.Н., Гременок В.Ф., Халилова Х.Х., Станчик А.В., Желудкевич А.Л., Минчукова О.Ф., Бушинский М.Б., Иззатов Б.М., Ализада М.Т. Сравнительное исследование магнитных свойств наночастиц $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, синтезированных с использованием PVP и Na_2CO_3	74
Ахадзаде Ш.М., Нурубейли Т.К., Иманова А.Я. Анализ физических и электрических свойств ZnO-варисторов.....	86
Гасанова Х.А. Зависимость электронной структуры одностенных углеродных нанотрубок от хиральности.....	91
Мамедова С.А. Структурные и оптические свойства нанокристаллитов ZnTe и ZnTe:Cu.....	97

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Мирзаева С.М., Гасанов А.И., Гейдаров А.О. Проблемы возникающие при интеграции возобновляемых источников энергии в энергетическую систему и пути их решения.....	102
---	-----

АНАЛИТИКА ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Исмаилова Ш.И., Мустафаева Ф.М. Интеграция и влияние технологий искусственного интеллекта на энергетические системы.....	108
Исмаилзаде И.К., Гочуева А.Ф. Методы исследования неоднородных процессов управления в телекоммуникационных системах.....	115

ЭКОЛОГИЯ

Рагимов Ф.А., Рагимова Т.А. Перспективы использования ядерной энергии для снижения выбросов оксидов углерода.....	122
--	-----

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Султанов Э.Ф., Гасанов Э.А. Исследование электропривода нагрузочного насоса большой мощности запускаемого устройствами плавного пуска.....	126
Гасанов З.А., Гасымов С.К., Мамедов Ч.Н. Разработка режимов обхода препятствий эко-агро-роботом.....	133
Гасанова Г.У., Исмаилова Ш.И. Решения для повышения коэффициента мощности метрополитена – обзор.....	139
Алиев Г.К., Шихалиева С.Я. Основные методы диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий с полиэтиленовой изоляцией.....	146
Рзаева С.В., Мамедов Н.С., Абдуллаева Г.К. Разработка и исследование инкрементальной измерительной системы на базе STM32 для энергетических приводов и механизмов.....	153

CONTENTS

THE ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Marufov I.M., Mukhtarova K.M., Karimova S.M.** Research on the influence of voltage and current harmonics on electrical losses in electrical networks.....3
- Mufidzade N.A., Ismayilova G.G.** Improvement of overvoltage protection for autotransformers.....11

COMPLEX PROBLEMS OF POWER ENGINEERING

- Shikhaliyeva S.Y., Piriyeva N.M.** Risk-oriented and location-specific approaches to managing block transformers at hydroelectric power plants.....20
- Suleymanova L.Ch.** Modernization of transformers and transmission lines in the era of digital energy.....27
- Muradova R.A.** A study of methods for developing and evaluating surge protection systems in overhead power lines.....32
- Calilli N.E., Mammadova N.N., Hashimov X.X.** Design of piezogenerator based on modern piezoelectric elements.....40
- Guseynova I.A.** Modeling of lightning overvoltages in overhead power lines.....46

THE THERMAL POWER ENGINEERING

- Kalbaliyev F.R.** Recent trends in thermal energy storage of concentrated solar power systems.....53

ELECTROPHYSICS

- Orujov N.I., Guliyev H.B., Alimammadova S.J.** 3D modeling of the dependence of overvoltage on grounding resistance and phase-to-ground capacitance of the network.....63
- Musayeva N.N., Gremenok V.F., Khalilova H.Kh., Stanchik A.V., Zhaludkevich A.I., Minchukova O.F., Bushinsky M.V., Izzatov B.M., Alizada M.T.** Comparative study of magnetic properties in SrFe₁₂O₁₉ nanoparticles synthesized with pvp and Na₂CO₃.....74
- Ahadzade SH.M., Nurubeyli T.K., Imanova A.Y.** Analysis of physical and electrical properties of ZnO varistors.....86
- Hasanova Kh.A.** Electronic structure dependence of single-walled carbon nanotubes on chirality.....91
- Mamedova S.A.** Structural and optical properties of ZnTe and ZnTe:Cu nanocrystallites.....97

ENERGY SOURCES

- Mirzayeva S.M., Hasanov A.I., Heydarov A.O.** Problems arising during the Integration of renewable energy sources into the energy system and their solutions.....102

DATA ANALYTICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Ismayilova SH.I., Mustafayeva F.M.** Integration and impact of artificial Intelligence technologies on energy systems.....108
- Ismayilzadeh I.Q., Gochuyeva A.F.** Research methods of heterogeneous control processes in telecommunication systems.....115

ECOLOGY

- Rahimov F.A., Rahimova T.A.** Prospects of using nuclear energy to reduce carbon oxides.....122

FROM OPERATING EXPERIENCE

- Sultanov E.F., Hasanov E.A.** Study of the electrical drive of a large-power load pump started by soft starters.....126
- Hasanov Z.A., Gasimov S.K., Mammadov C.N.** Developing of obstacle bypassing modes of eco-agro-robot133
- Hasanova G.U., Ismailova Sh.I.** Solutions to increase the power factor of the metro – a review.....139
- Aliyev Q.K., Shikhaliyeva S.Y.** Basic methods for diagnosing and monitoring the insulation condition of polyethylene insulated cable lines.....146
- Rzayeva S.V., Mammadov N.S., Abdulayeva G.S.** Development and investigation of an STM32-based incremental measurement system for energy drives and mechanisms.....153

MÜƏLLİFLƏRİN NƏZƏRİNƏ

1. Ümumi qaydalar.

“Energetikanın problemləri” “jurnalında energetikanın kompleks problemləri, elektroenergetika, istilik energetikası, istilik fizikası, elektrofizika, elektrotexnologiya, informatika və yeni texnika sahələrinə həsr olunmuş elmi-texniki məqalələr dərc edilir, eyni zamanda cari xronika da verilir.

Jurnalın əsas məqsədi yüksək elmi keyfiyyət kriteriyalarına cavab verən orijinal elmi-texniki məqalələrin dərc edilməsidir.

Jurnal eyni zamanda konfranslar, sinpoziumlar, elmi məktəblər, ümumiyyətlə elmi həyatda cərəyan edən hadisələr haqqında məlumatları da dərc edir.

Redaksiya heyəti, bu və ya digər səbəblərdən, jurnalın tələblərini təmin etməyən məqalələri dərc etməmək hüququnu üzündə saxlayır.

2. Məqalələrin təqdim edilməsi.

Bütün məqalələr aşağıda göstərilən ünvana, jurnalın redaksiyasına göndərilməlidir:

Azərbaycan, Az-1143, Bakı, HüseynCavidprospekti, 131

Azərbaycan MEAFizikaİnstitutu

Tel.: (994 12) 538 – 16 – 60; (994 12) 539 – 44 - 02; Faks : (994 12) 539 – 31 – 16

E – mail: a.hashimov@physics.science.az;

Məsul katib Qurbanov Kamil Bəxtiyar oğlu.

3. Məqalələrin mətninin dili.

Məqalələr azərbaycan, rus və ingilis dillərində qəbul edilir. Respublika müəlliflərinin məqalələri yalnız azərbaycan və ya rus dillərində, yaxın xarici ölkələrdən olan müəlliflərin məqalələri yalnız rus dilində, uzaq xarici ölkələrin müəlliflərinin məqalələri isə yalnız ingilis dilində qəbul edilir.

4. Məqalələrin tərtib edilməsi qaydaları.

- 4.1. Məqalələr, jurnalın redaksiyasına disket təqdim etməklə, fərdi kompyüterdə, A4 formatlı ağ kağızda, səhifənin parametrləri: yuxarıdan və aşağıdan – 2sm, soldan və sağdan – 2,5 sm məsafə ilə, Times New Roman 12 şriftində yazılaraq, 1 nüsxədə, sətir aralığı 1 interval olmaq şərti ilə çap edilərək, qoşulmuş CD disk ilə təqdim edilir.
- 4.2. Məqalələrin ümumi həcmi, qrafiki materiallar, fotolar, cədvəllər, düsturlar, ədəbiyyatın siyahısı və xülasələr də daxil olmaqla 8 səhifədən yuxarı olmamalıdır.
- 4.3. Məqalələrinin birinci səhifəsinin sol küncündə Universal onluq təsnifatı (UOT) üzrə indeksi göstərilməlidir. Sonra 1 interval aşağıdan, qalın və böyük həriflərlə məqalənin adı yazılır. Sonra 1 interval aşağıdan, qalın və böyük həriflərlə müəllifin (müəlliflərin) soyadı, adı və atasının adının baş hərifləri yazılır. 1 interval aşağıdan məqaləni təqdim edən təşkilatın adı yazılır. 1 interval aşağıdan, məqalənin mətninin dilinə uyğun olan, həcmi 10 sətirdən çox olmamaq şərti ilə, 10 şrifti ilə çap edilən xülasə, açar sözlər (5-6 söz), məqalənin əsas mətninin önündə verilir. Sonra 1 interval aşağıdan məqalənin əsas mətni 12 şrifti ilə çap edilir. Bilavasitə məqalənin mətninin davamı olaraq, heç bir başlıq vermədən, yalnız 20-25 simvolla xətt çəkərək, say sırası ilə istifadə edilən ədəbiyyatın siyahısı verilir. Sonra ardıcıl olaraq rus (və ya azərbaycan) və ingilis dillərində olan xülasələr və açar sözlər (10 şrifti ilə çap edilərək) verilir. Məqalənin mətninin sonunda, əlaqə telefonları, telefakslar və E – mail-ı göstərməklə, müəlliflər məqaləni imzalayırlar.

- 4.4. Məqalənin qrafiki materialları, fotolar, cədvəllər, düsturlar mətnə uyğun yerlərdə yerləşdirilməlidir. Qrafiki materialların şərhinə aid olan yazılar məqalənin mətnində verilməlidir. Qrafiki materiallarda ədədi və ya hərfi işarələr göstərilərək, uyğun izahatlar mətnin içərisində verilməlidir. Qrafiki materialların aşağı hissəsində say sırası verilir və adı yazıla bilər (məsələn üçün, Şəkl.3. Sınaq qurğusunun sxemi).
- 4.5. Ədəbiyyat say sırası qeyd edilməklə, orijinalın dilində verilir. Müəlliflərin soyadı, adı və atasının adı kursivdən istifadə etməklə yazılır. Ədəbiyyatın siyahısı aşağıda verilən nümunələr üzrə tərtib edilir.

Kitablar

1. *Разевиг Д.В., Соколова М.В.* Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М.: Энергия, 1977. - 178 с.
2. *De Gennes P.G.* The Physics of Liquid Crystals. London: Cambridge Univ. Press, 1974.
3. *Скальный А.В.* Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Оникс 21 век. 2004. 216 с.

Jurnallar

4. *Аганов В.Г., Разевиг Д.В.* // Электричество. - 1972. - № 5. - с. 32-36.
5. *Ялякбяров О.З.* // Физика-1999-№ 3- с.44-49.
6. *Гашимов А.М., Нурубейли Т.К., Нуриев К.З., Гурбанов К.Б.* //Журнал технической физики. 2009, т. 79, № 8, с. 99-103,

Deponə edilmiş əl yazması.

7. *Иванов Л.П.* М., 1985. 40с. - Деп. в ВИНТИ 25.10.85, №19233.
8. *Викулина Т.Д.*; 1998. 214 с. – Деп. в ИНИОН РАН 06.10.98, № 53913.

Dissertasiyalar

9. *Петров В.Г.* Дис. канд. физ.-мат. наук. Л.: Институт Высокмолекулярных соединений, 1985.
10. *Сидоров Н.В.* Дис. д-ра хим. наук. Новосибирск: Институт Химии, 1979.
11. *Nurubeyli T.K.* Fiz. üzrə fəlsəfə dok. dis. Bakı: Fizika İnstitutu, 2010

Müəlliflik şəhadətnamələri və patentlər

12. *Алиев С.Г., Джалалов К.Х.* А.С. 163514 СССР // Б.И. 1988. № 4.с.50
13. Пат. 3386968 США // РЖ ФИЗ. 1970, 25, с. 400.
14. *Langsam M., Savoca A.C.L.* Pat. 4759776, USA, 1988.
15. *Həşimov A.M., Nurubəyli T.K., Nuriyev K.Z.*//Pat. İ 2015 0010, Bakı, 2015

Konfranslar, simpoziumlar

16. *Медведев П.Т.* // Тез. докл. III Всесоюз. Совещ. по проблемам энергетики. Л.: Изд. ЛПИ, 1984, с.30.
17. *Нуриев К.З., Гурбанов К.Б., Нурубейли Т.К.,* //Тез. док. IV Всероссийская конференция «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» 2011 г. Москва с. 92

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. Общие правила.

В журнале “Проблемы Энергетики” публикуются научно - технические статьи в области комплексных проблем энергетики, электроэнергетики, теплоэнергетики, теплофизики, электрофизики, электротехнологии, информатики и новой техники, а также приводится текущая хроника.

Основной целью журнала является публикация оригинальных научно-технических статей, отвечающих требованиям высокого научного качества.

В журнале приводятся сведения о работе конференций, симпозиумов, различных научных школ, а также об интересных событиях, происходящих в научном мире.

Редакция сохраняет за собой право не публиковать материалы по тем или иным причинам, не удовлетворяющим требованиям журнала.

2. Представление статей.

Статьи должны быть представлены в редакцию журнала по следующему адресу:

Азербайджан, Аз-1143, Баку, пр. Г. Джавида, 131
Институт Физики НАН Азербайджана
Тел: (994 12) 538-16-60; (994 12) 539-44-02; Факс: (994 12) 539-31-16

E-mail: a.hashimov@physics.science.az;

Ответственный секретарь - Гурбанов Кямилъ Бахтияр оглы.

3. Язык статей.

Статьи принимаются на азербайджанском, русском и английском языках, причем статьи авторов из Азербайджана должны быть представлены на азербайджанском или русском языках, статьи авторов из стран СНГ - только на русском языке, статьи авторов из дальнего зарубежья - только на английском языке.

4. Правила оформления статей.

- 4.1. В редакцию журнала представляются статьи, набранные и напечатанные в одном экземпляре через один интервал на персональном компьютере, на белой бумаге формата А 4, шрифтом Times New Roman, размер шрифта 12, а также представляется в электронном виде на CD диске. Поля сверху и снизу - 2 см, слева и справа - 2,5 см.
- 4.2. Объем статье должен превышать 8 страниц, включая графические материалы, фото, таблицы, формулы, список литературы и аннотации.
- 4.3. В верхнем левом углу первой страницы статьи указывается индекс УДК. Через 1 интервал ниже помещается название статьи жирным и заглавным шрифтом. Через 1 интервал помещается фамилия (фамилии), и инициалы автора (авторов) жирным и заглавным шрифтом. Через 1 интервал указывается наименование организации. Через 1 интервал помещается аннотация на языке статьи объемом не более 10 строк и ключевые слова (5-6 слов) шрифтом 10. Через 1 интервал помещается основное содержание статьи шрифтом 12. В конце основного текста статьи проводится прочерк длиной 20-25 символов, после чего помещается список литературы без какого-либо названия, в порядке нумерации ссылок в тексте статьи. После этого

через 1 интервал помещаются аннотации на двух других языках – русском (или азербайджанском), английском и ключевые слова (5-6 слов) шрифтом 10. В самом конце статьи помещаются контактные телефоны, факсы и E – mail, а также подписи всех авторов.

- 4.4. Графические материалы, фото, таблицы, формулы помещаются в соответствующих разделах текста статьи. Надписи, относящиеся к графическим материалам, помещаются в тексте статьи. В графическом материале указываются буквенные и цифровые обозначения, а их комментарии помещаются в тексте статьи. В нижней части графического материала указывается номер и может указываться название материала (напр., Рис.3. Схема установки....)
- 4.5. Список цитированной литературы приводится на языках оригиналов. Фамилии и инициалы авторов печатаются курсивом. Список литературы оформляется по образцу, приведенному ниже:

Книги

1. *Разевиг Д.В., Соколова М.В.* Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М.: Энергия, 1977. - 178 с.
2. *De Gennes P.G.* The Physics of Liquid Crystals. London: Cambridge Univ. Press, 1974.
3. *Скальный А.В.* Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Оникс 21 век. 2004. 216 с.

Журналы

4. *Аганов В.Г., Разевиг Д.В.* // Электричество. - 1972. - № 5. - с. 32-36.
5. *Ялякбяров О.З.* // Физика-1999-№ 3- с.44-49.
6. *Гашимов А.М., Нурубейли Т.К., Нуриев К.З., Гурбанов К.Б.* //Журнал технической физики. 2009, т. 79, № 8, с. 99-103

Депонированные рукописи

7. *Иванов Л.П.* М., 1985. 40с. - Деп. в ВИНТИ 25.10.85, №19233.
8. *Викулина Т.Д.;* 1998. 214 с. – Деп. в ИНИОН РАН 06.10.98, № 53913.

Диссертации

9. *Петров В.Г.* Дис. канд. физ.-мат. наук. Л.: Институт Высокмолекулярных соединений, 1985.
10. *Сидоров Н.В.* Дис. д-ра хим. наук. Новосибирск: Институт Химии, 1979.
11. *Аношкина Ю.В.* Дис. канд. хим. наук. Томский государственный университет, 2012

Авторские свидетельства и патенты

12. *Алиев С.Г., Джалалов К.Х.* А.С. 163514 СССР // Б.И. 1988. № 4.с.50
13. Пат. 3386968 США // РЖ ФИЗ. 1970, 25, с. 400.
14. *Langsam M., Savoca A.C.L.* Pat. 4759776, USA, 1988.
15. *Гашимов А.М., Гурбанов К.Б.* // Пат. I 2015 0010, Баку, 2015

Конференции, симпозиумы

16. *Медведев П.Т.* // Тез. докл. III Всесоюз. Совещ. по проблемам энергетики. Л.: Изд. ЛПИ, 1984, с.30.
17. *Нуриев К.З., Гурбанов К.Б., Нурубейли З.К.,* //Тез. док. IV Всероссийская конференция «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы» 2011 г. Москва с. 92

FOR THE ATTENTION OF AUTHORS

1. General Rules.

The **Journal of Electric Power** is dedicated to publicize scientific research articles reflecting the current problems in the electric power systems, heat transfer, technology and information technology, and digests.

The main purpose of the Journal is publishing of the original scientific articles, meeting high quality requirements.

The journal also informs about the results of conferences, seminars, various scientific schools, and the events taking place in the scientific society.

The editorial board reserves the right not to publish the submitted documents, which for various reasons do not satisfy the requirements of the Journal.

2. Submission of the papers.

The papers must be submitted to the editorial body at the following address:

Azerbaijan, Aз-1143, Baku, pr. G.Javid, 131
Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan
Tel: (994 12) 539-16-60; 539-44-02; Fax: (994 12) 539-31-16

E-mail: a.hashimov@physics.science.az;
For the Attention of K.B. Kurbanov – the Responsible Secretary

3. The Language

The papers can be accepted in either of Azeri, Russian or English. The papers submitted by Azerbaijani authors must be submitted in Azeri and Russian, the papers of those from CIS countries—in Russian, and those originated from the countries outside CIS—in English.

4. The papers must be submitted in the following format.

- 4.1. The hard copy of the paper must be submitted on the A4 format in 1-line interval, typed in “Times New Roman”, in 12 font, with the borders from top and bottom – 20 mm, from left and right – 25 mm. The electronic copy on a CD-disk should be submitted along with the hard copy.
- 4.2. The paper must not contain more than 8 pages of text, inclusive of any graphs, photos, formulas, reference lists and annotations.
- 4.3. In the upper left corner of the paper the index of UDC must be indicated. Below that, omitting one line, the name of the article must be placed printed in a **BOLD CAPITAL LETTERS**. Underneath the name of the paper, omitting 1 line, the name of the author(s) printed in capital letters must be printed. Below that, omitting 1 line, the name of the organization must be indicated, which supported the research. The abstract follows that, leaving 1 line of blank space, which must be no more than 10 lines, and keywords (5-6 words) of font 10. The text of the paper follows the abstract, leaving 1 line. Drawing a line with the length 20-25 symbols must indicate the end of the text. The reference list is printed below the line,

following the same order as it was referred to in the text. Below the reference list, the summaries and keywords (5-6 words) in Russian and English must follow.
At the end of the paper, the contact details must be placed, and also all the authors must put their signatures.

- 4.4. All graphic materials, photos, tables, formulas must be placed in the corresponding place of the text. The legends must be placed in the text. All the keys to the symbols must be given in the text of the paper. Below the graphic material the number can be indicated followed by the name of the material (e.g. Fig. 3. Schematic drawing of the installation...)
- 4.5. The cited materials must be referred to using their original language. The names of authors must be given in *italics*. The reference list must follow the example below:

Books

1. *Gielen M., Tiekink E.R.T.* Metallotherapeutic Drugs and Metal-Based Diagnostic Agents. N.Y.: Wiley. 2005. 598 p.
2. *Venkatesh Iyengar G., Subramanian K.S., Woittiez J.R.W.* Element Analysis of Biological Samples: Principles and Practices, V II. N.Y.: CRC Press. 1997. 272 p.

Journals

3. *Timerbaev A.R.* // J. Anal. At. Spectrom. 2014. V. 29. № 6. P. 1058–1072.
4. *Guo W., Hu Sh., Zhang J., Hu Zh., Zhang H., Wang Y.* // Talanta. 2012. V. 91. P. 60–64.

Patents

5. *Langsam M., Savoca A.C.L.* Pat. 4759776, USA, 1988.
6. *Hashimov A.M., Qurbanov K.B.*//Pat. İ 2015 0010, Baku, 2015

Deposited manuscripts

7. *Ivanov L.P. M.*, 1985, 40s. - Dep. in VINITI 10/25/85, No. 19233.
8. *Vikulina T.D.*; 1998, 214 s. - Dep. at INION RAN 06.10.98, No. 53913.

Dissertation

9. *Petrov V.G.* Dis. Cand. phys.-mat. sciences. L.: Institute of High Molecular Compounds, 1985.
10. *Sidorov N.V.* Dis. Dr. chem. sciences. Novosibirsk: Institute of Chemistry, 1979.
11. *Anoshkina Yu.V.* PhD in chem. Tomsk State University, 2012

Conferences, symposia

16. *Medvedev P.T.* // Abstracts. report III All-Union. Meeting. on energy problems. L. : Ed. LPI, 1984, p. 30.
17. *Nuriev K.Z., Gurbanov K. B., Nurubeyli Z. K.*// Abstracts of documents. IV All-Russian conference "Mass spectrometry and its applied problems" 2011 Moscow p. 92

QEYD ÜÇÜN

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ENERGETİKANIN PROBLEMLƏRİ

elmi – texniki jurnal

№ 4 2025

AR Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun əməkdaşı Z.A.Tağıyeva tərəfindən yığılıb,
nəşrə hazırlanmışdır

Qeydiyyat №-si: B 507

Tiraj 50 nüsxə

Bakı

Redaksiyanın ünvanları : Bakı, Az-1143, H.Cavid prospekti, 131,
AR Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu
Bakı, Az -1602, H.Zərdabi prospekti, 94, Az.ETE və ELİ