“AZƏRBAYCAN XƏZƏR DƏNİZ GƏMİÇİLİYİ” QSC
“AZƏRBAYCAN DÖVLƏT DƏNİZ AKADEMİYASI” PHŞ

ISSN 2220-1025

AZƏRBAYCAN DÖVLƏT DƏNİZ AKADEMİYASININ

ELMİ ƏSƏRLƏRİ

PROCEEDINGS OF

AZERBAIJAN STATE MARINE ACADEMY

№2

BAKI-2025

Baş redaktor
h.ü.f.d. ***E.A. Qocayev***

Redaksiya heyəti

t.ü.f.d., dos V.B. Sadıqov
Elmi redaktor

t.e.d., prof. A.S. Vaskov
Uşakov adına Dövlət Dəniz Universiteti
(Rusiya)

t.e.d., prof. S.Q. Çulkin
adm. Makarov adına Dövlət Dəniz və Çay Donanması Universiteti
(Rusiya)

t.e.d., prof. O.A. Farxi
Varna Texniki Universiteti
(Bolqarıstan)

t.e.n., dos. S.A. Oqay
adm. Nevelski adına Dövlət Dəniz Universiteti
(Rusiya)

t.e.d., prof. V. Priednieks
Latviya Dəniz Akademiyası
(Latviya)

t.e.d., prof. N.Ş. İsmayılov
(məsul katib)

Bölmələr üzrə redaktorlar:

1. Gəmiqayırma və gəmi təmiri texnologiyası: *t.e.d., prof. A.T.Məmmədov;*
t.e.d., prof. N.Ş.İsmayılov;
t.ü.f.d., dos. İ.A.Xankişiyev

2. Gəmiçilik və su nəqliyyatının istismarı: *t.e.d., prof. Z.Ə.Rüstəmov;*
t.ü.f.d., dos. E.O.Abbasov;
t.ü.f.d., dos. F.M.Kəlbiyev.

3. Gəmiçilik texnikası: *t.e.d., prof. A.M.Qafarov; t.ü.f.d., dos. E.F.Sultanov;*
t.ü.f.d., dos. A.Ş.İsmayılov; t.e.d., prof. F.A.Vaskeviç (Rusiya);
t.e.d., prof. A.Y.Samoylenko (Rusiya).

4. Gəmiçilikdə təbiət elmləri problemləri: *t.e.d., prof. V.P.Buşlanov (Rusiya);*
t.e.d., prof. Y.N.Həsənov; r.ü.f.d., dos. B.K. Ağarzayev.

****

Redaksiya:
E-mail: elvina.abdullayeva@asco.az
http://adda.edu.az

"ADDA-nın Elmi Əsərləri" jurnalı AAK-ın nüfuzlu elmi nəşrləri siyahısına daxildir və elmi dərəcə iddiaçılarının orijinal tədqiqatlarının nəticələrini dərc edir.

ISSN 2220-1025
Qeydiyyat nömrəsi - 311, ildə iki nömrə nəşr edilir.

© "Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ, 2025

MÜNDƏRİCAT

GƏMİQAYIRMA VƏ GƏMİ TƏMİRİ TEXNOLOGİYASI

Оруджев Ф.С., Садыгов В.Б., Мамедов Э.Д., Бабаев Л.В. Повышение износостойкости рабочих частей вырубных штампов на основе порошковых сталей…..... 7
Abdullayeva N.B., Zeynalzadə H.A., Rəhmanov M.X., Bayramova F.İ. Müasir rəqəmsal proqramlarla idarəedilən honlama dəzgahlarında səthin emal dəqiqliyinin təhlili…….. 13
Cabbarov T.Q., Axundova X.Y. Bərabərkanallı bucaqaltı presləmə və termiki emal proseslərinin BT6 markalı titan ərintisinin mexaniki xassələrinə təsiri..... 17
Фатьянова Н.В. Современные тенденции разработки судовых лакокрасочных материалов с наномодификаторами и биоцидными добавками: анализ и перспективы 21
Həsənov Y.N., Çələbi İ.Q., Rəhimov B.R. Gəmi avadanlıqlarının təmirində ehtiyat hissələrə olan tələbatın proqnozlaşdırılması..... 29
Həsənov Y.N., Əziz S.Ş. Müasir RPİ honlama dəzgahlarında səthin keyfiyyət göstəricilərinin texnoloji üsüllarla artırılması…….....…… 34
Xankişiyev İ.A., Paşazadə S.Q., Həmzəyev X.Q. Gəmi interyer obyektlərinin ağırlıq mərkəzinin hesablanması üçün rhinoceros 3D-də Python skriptin tətbiqi imkanlarının araşdırılması..... 41
Xankişiyev İ.A., Quliyev Y.M., Paşazadə S.Q. Gəmi gövdə konstruksiyalarında möhkəmliyin standartlaşdırılması və təsnifat cəmiyyətləri qaydalarının analizi..... 45
Məmmədov A.T., İsmayılzadə S.B. Detalların bərpasında istifadə olunan innovativ üsulların təhlili..... 49
Məmmədov A.T., İsmayılov N.Ş., Babayev A.İ., Hüseynov M.Ç. Yerli resurslar əsasında legirli poladlar istehsalı proseslərinin nəzəri və texnoloji əsaslandırılması..... 54

GƏMİÇİLİK VƏ SU NƏQLİYYATININ İSTİSMARI

Гулиев Н.Н. Оценка эффективности систем пожаротушения на судах специализированного флота, оснащённых системой динамического позиционирования (DP) 62
Məcidov E.İ. Azərbaycanda dəniz limanlarinin inkişafi və liman obyektlərində yeni“EMI” kompozit beton-plastik materialinin tətbiqinin texnoloji və ekoloji təhlili..... 70
Мамедов А.Т., Исмаилов Н.Ш., Бабаев А.И., Гусейнов М.Ч. Меры предосторожности при транспортировке губчатого железа на морском транспорте……. 76
Sarsenbayev B.S., Malov K.V., Zhumayev Zh. The influence of european policy on maritime safety and navigation standards ……. 82
Temirbulatov E.M., Abbasov E.O. DP3 sinifli dinamik mövqeləndirmə sisteminin “Qurban Abasov” kran gəmisində tətbiqi və təhlükəsizlik perspektivləri..... 85

GƏMİÇİLİK TEXNİKASI

Абдуллаева С.А. Комплексная система технического обслуживания и восстановления износа коммутационных аппаратов..... 91
Balayeva Ə.H., Əliquliyeva X.V., Şirinova A.Y., Harunov A.T. Dəyişən cərəyan elektrik maşınlarında birqatlı dolaqlar və onların fazalara görə birləşdirilmə metodikası..... 99
Əlicanov R.R. Alternativ enerji mənbələrindən istifadə etməklə gəmi elektrik stansiyasının enerji balansının tənzimlənməsi üsulları..... 106
İsmayılov A.Ş., Məmmədov R.R. Üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindəki temperaturun dizelin işçi tsiklinin hesabında nəzərə alınması..... 111

İsmayılov A.Ş., Məmmədov R.R. Üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindəki temperaturun CAT 3608 markali baş gəmi dizelinin işinə təsirinin nəzəri tədqiqi..... 116
İsayeva T.M. Qeyri-xətti yüklü yüksək gərginlikli şəbəkələrdə güc itkilərinin azaldılması üsullarının tədqiqi..... 122
Muradəliyev A.Z., Hüseynov K.Ş. Elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatı üçün mikro şəbəkə modellərinin texniki və ekoloji qiymətləndirilməsi..... 131
Qafarov A.V. Qlobal dənizdə fəlakət zamanı əmniyyətli rabitə sistemində (QDFƏRS) radiosiqnalların maneələrə davamlılığı: Mövcud texnologiyalar və perspektivlər…… 135
Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Məmmədov E.M. Hibrid enerji texnologiyalarından istifadə etməklə gəmilərdə elektrik enerjisi təchizatının yaxşılaşdırılması..... 141
Sultanov E.F., Bayramova İ.P., Həsənov E.A. Gəmi elektrik mühərriklərinin fırlanma sürətlərinin tiristor gərginlik tənzimləyiciləri ilə tənzim olunmasının üstünlükləri..... 147
Sultanov E.F., Əlicanov R.R. Gəmi enerji paylama sistemlərində Siemens S7-1200 seriyalı proqramlaşdırılan məntiq kontrollerlərinin (PLC) tətbiqi..... 152
Sultanov E.F., Səlimova A.K., Əlicanov R.R. Gəmi elektroenergetik sistemlərinin ekoloji problemləri..... 158
Şıxəliyeva S.Y., Balayeva Ə.H., Ələkbərov İ.M. Elektrik şəbəkəsinin etibarlılıq vəziyyətinin təhlili..... 164
Zeynalova N.F. Elektrik təchizat sistemində gərginlik səviyyəsinin STATCOM vasitəsilə qorunması..... 175

GƏMİÇİLİKDƏ TƏBİƏT ELMLƏRİNİN PROBLEMLƏRİ

Ağarzayev B.K., Abdullayeva A.R. Hiperbolik funksiyaların tətbiqilə inteqralların hesablanması 180
Aghayeva G.A., Asgarov R.X., Hasanova L.A. Analysis of boundary value problems for operator differential eguations in hilbert spaces……. 183
Ağarzayev B.K., Hüseynova M.M. Müəyyən inteqralın mexanika məsələlərinə tətbiqi..... 187
Bayramov A.M. Kəsilmə nöqtələrində qoşma şərtlərilə verilən gecikən arqumentli məsələnin asimptotikası..... 191
Hasanov Y.N., Ahmadov B.B., Yusibov Sh.T., Aziz S.Sh. Application aspects of internaional quantum standarts in electrical measurements..... 198
Həsənov Y.N., Şıxaliyeva H.P. Suyun əsas fiziki və kimyəvi xassələri və metroloji təminatı 203
İmanova A.Y. Yarımkeçirici-polimer əsaslı kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki xassələri..... 208
Zakiyeva I.H., Suleymanli M.A., Huseynova Sh.M., Samadova U.F. The role of some perovskite materials in the photocatalytic reduction of carbon dioxide……. 211

CONTENT

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR TECHNOLOGY

Orujov F.S., Sadigov V.B., Mamedov E.D., Babaev L.V. Increasing the wear resistance of working parts of cutting dies based on powder steels..... 7
Abdullayeva N.B., Zeynalzade H.A., Rahmanov M.Kh., Bayramova F.I. Analysis of surface processing accuracy on honing machines controlled by modern digital programs..... 13
Jabbarov T.G., Akhundova X.Y. The effect of equal-channel angular pressing and thermal treatment processes on the mechanical properties of BT6 titanium alloy……. 17
Fatyanova N.V. Modern trends in the development of marine paints and varnishes with nanomodifiers and biocidal additives: analysis and prospects…… 21
Hasanov Y.N., Chalabi I.G., Rahimov B.R. Forecasting the demand for spare parts in the repair of ship equipment..... 29
Hasanov Y.N., Aziz S.Sh. Increasing surface quality indicators on modern RPI honing machines by technological methods..... 34
Khankishiyev I.A., Pashazade S.G., Hamzayev X.G. Investigation of the possibilities of applying python script in Rhinoceros 3D for calculating the center of gravity of ship interior objects..... 41
Khankishiyev I.A., Guliyev Y.M., Pashazade S.G. Standardization of strength in ship hull structures and analysis of classification societies' rules..... 45
Mammadov A.T., Ismayilzade S.B. Analysis of innovative methods used in the restoration of details..... 49
Mammadov A.T., Ismayilov N.Sh., Babayev A.I., Huseynov M.Ch. Theoretical and technological substantiation of alloy steel production processes based on local resources.... 54

SHIPPING AND EXPLOITATION OF WATER TRANSPORT

Guliev N.N. Evaluation of the effectiveness of fire extinguishing systems on specialized fleet vessels equipped with a dynamic positioning (DP) system…….. 62
Majidov E.I. Technological and ecological analysis of the development of seaports in Azerbaijan and the application of the new “EMI” composite concrete-plastic material in port facilities…… 70
Mamedov A.T., Ismailov N.Sh., Babaev A.I., Guseinov M.Ch. Precautionary measures during transportation of sponge iron by sea……... 76
Sarsenbayev B.S., Malov K.V., Zhumayev Zh. The influence of european policy on maritime safety and navigation standards ……. 82
Temirbulatov E.M., Abbasov E.O. Application and safety prospects of DP3 class dynamic positioning system on the crane vessel “Gurban Abasov”..... 85

SHIPPING TECHNIQUE

Abdullayeva S.A. Technical maintenance and wear recovery system for complex switching apparatus…… 91
Balayeva A.H., Aliguliyeva Kh.V., Shirinova A.Y., Harunov A.T. Study of united windings in ac machines and the method of their connection by phase…….. 99
Alicanov R.R. Methods of regulatıng the energy balance of a shıp power plant usıng alternatıve energy sources..... 106

Ismayilov A. Sh., Mammadov R.R. Taking into account the additional blowing pressure and the temperature in the engine compartment in the calculation of the diesel operating cycle 111
Ismayilov A.Sh., Mammadov R.R. Theoretical study of the effect of the blowing pressure and the temperature in the engine room on the operation of the main ship diesel engine of the brand CAT 3608..... 116
Isayeva T.M. Investigation of methods for reducing power losses in high voltage networks with non-linear loads…….. 122
Muradaliyev A.Z., Huseynov K.Sh. Technıcal and ecologıcal evaluatıon of mıcrogrıd models for electrıfied marıtıme transport..... 131
Gafarov A.V. Maın dırectıons for ımprovıng the operatıng characterıstıcs of speed-regulated shıp electrıc drives…… 135
Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Mammadov E.M. Improving electrical power supply on ships using hybrid energy technologies…… 141
Sultanov E.F., Bayramova İ.P., Hasanov E.A. Advantages of regulatıng the rotatıon speeds of shıp electrıc engınes wıth thyrıstor voltage regulators..... 147
Sultanov E.F., Alicanov R.R. Analysis of the application of siemens S7-1200 series plcs in ship power distribution systems……. 152
Sultanov E.F., Salimova A.K., Alicanov R.R. Ecological problems of ship power systems.. 158
Shikhaliyeva S. Y., Balayeva A.H., Alakbarov I. M. Analysıs of the relıabılıty status of the electrıcıty network..... 164
Zeynalova N.F. Voltage level protectıon ın electrıcal supply systems usıng STATCOM…... 175

NATURAL SCIENCE PROBLEMS IN NAVIGATION

Agarzaev B.K., Abdullayeva A.R. Calculation of ıntegrals using hyperbolic functions..... 180
Aghayeva G.A., Asgarov R.X., Hasanova L.A. Analysis of boundary value problems for operator differential eguations in hilbert spaces…… 183
Ağarzayev B.K., Hüseynova M.M. Application of the definite integral to problems in mechanics..... 187
Bayramov A.M. Asymptotics of a delayed argument problem given by connection conditions at intersection points..... 191
Hasanov Y.N., Ahmadov B.B., Yusibov Sh.T., Aziz S.Sh. Application aspects of internaional quantum standarts in electrical measurements…… 198
Hasanov Y.N., Shıkhaliyeva H.P. The main physical and chemical properties of water and its metrological assurance..... 203
Imanova A.Y. Mechanical properties of non-linear composite resistors based semiconductor-polymer……. 208
Zakiyeva I.H., Suleymanli M.A., Huseynova Sh.M., Samadova U.F. The role of some perovskite materials in the photocatalytic reduction of carbon dioxide……. 211

GƏMİQAYIRMA VƏ GƏMİ TƏMİRİ TEXNOLOGİYASI

УДК 621.762.1:621.785.6:669.14.018.58

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ЧАСТЕЙ ВЫРУБНЫХ ШТАМПОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ

Оруджев Ф.С., Садыгов В.Б., Мамедов Э.Д., Бабаев Л.В.

ПЮЛ «Азербайджанская Государственная Морская Академия»
Аз1000, г. Баку, ул. З. Алиевой, 18
E-mail: fazil.orujov@asco.az , vuqar.mirsadiq@asco.az , elxan.mammadov@asco.az, lachin.babayev@asco.az

Аннотация. *В статье представлены результаты исследований порошковой инструментальной стали Х12МСТ, полученной методом распыления жидкого металла. Установлено, что частицы порошка имеют округлую форму, гладкую поверхность и мелкодисперсную дендритно-ячеистую структуру. Для компактирования таких порошков наиболее эффективным является горячее изостатическое прессование при температуре 1150°С и давлении 110 МПа.*

После прессования и последующей горячей пластической деформации структура стали становится мелкозернистой и однородной, с равномерно распределённой карбидной фазой. Из порошка ПР-Х12МСТ были изготовлены заготовки матриц для вырубных штампов, прошедшие холодное прессование и спекание при 1150–1200°С. Оптимальные режимы термообработки определены: ковка — 1100–1150°С, отжиг — 840–860°С, закалка — 1020–1040°С, отпуск — 220–240°С.

Механические испытания показали: предел прочности при изгибе 2900–3000 МПа, твёрдость HRC 62–66. По износостойкости порошковая сталь превосходит компактную сталь того же состава в 1,5–2 раза, а стойкость штампов увеличена на 75–80 %. Таким образом, высокая дисперсность, равномерное распределение карбидов и легированность твердого раствора обеспечивают порошковой стали Х12МСТП повышенные эксплуатационные характеристики и экономическую эффективность при производстве рабочих частей штампов.

Xülasə*. Məqalədə işçi hissələrin hazırlanması üçün ovuntu metallurgiyası üsulu ilə əldə edilən Х12МСТ markalı poladdan istifadə imkanları tədqiq olunmuşdur. Tədqiqatlar ərintinin əridilmiş halda püskürdürülməsi (ikinci variant) üsulu ilə alınmış polad ovuntu üzərində aparılmışdır. Elektron və optik mikroskoplarla aparılan müşahidələr nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, ovuntu hissəcikləri dairəvi formalı, hamar səthli və yüksək dispersliyə malikdir. Belə ovuntuların sıxlaşdırılması üçün ən səmərəli üsulun isti qazostatik presləmə olduğu müəyyən edilmişdir.*

1150°С temperaturda və 110 MPa təzyiqdə 4 saatlıq presləmə nəticəsində sıx struktur və homogen xassələr əldə edilmişdir. Sonrakı isti plastik deformasiya zamanı poladın mikrostrukturu daha da xırdalanmış və karbid fazası bərabər paylanmışdır.

Məqalədə həmçinin Х12МСТ ovuntusundan hazırlanmış matris hissələrinin soyuq presləmə və sinterləmə texnologiyası sınaqdan keçirilmişdir. Mexaniki sınaqlar göstərmişdir ki, bu üsulla alınmış poladın əyilmə möhkəmliyi 2900–3000 MPa, bərkliyi isə HRC 62–66 təşkil edir. Ovuntu poladı kompakt poladdan möhkəmlik baxımından bir qədər zəif olsa da, aşınmaya davamlılığı 1,5–2 dəfə, işləmə zamanı dözümlülüyü isə 75–80% yüksək olmuşdur. Nəticədə

X12MCTП markalı toz poladın qəlib və ştampların uzunömürlülüyünü əhəmiyyətli dərəcədə artırdığı sübut olunmuşdur.

Abstract*. The article presents the results of research on the production and properties of the powder tool steel X12MCT, obtained by atomizing molten metal (the second production method). It was found that the powder particles have a spherical shape, smooth surface, and a fine dendritic–cellular microstructure. Due to the poor pressability of such powders, the most effective consolidation method is hot isostatic pressing (HIP) at a temperature of 1150°C and a pressure of 110 MPa.*

After HIP and subsequent hot plastic deformation, the microstructure of the steel becomes fine-grained and homogeneous, with a uniform distribution of carbides. Using the obtained PR-X12MCT powder, matrix inserts for blanking dies of electric motor laminations were manufactured by cold pressing and sintering at 1150–1200°C. The optimal heat treatment regimes were determined as follows: Forging: 1100–1150°C, Annealing: 840–860°C, Quenching: 1020–1040°C, Tempering: 220–240°C

Mechanical tests showed a bending strength of 2900–3000 MPa and a hardness of HRC 62–66. Although the powder steel is slightly inferior to conventional (wrought) steel in terms of strength, it exhibits 1.5–2 times higher wear resistance and 75–80% higher tool life between regrinds.

Thus, the high alloying, fine dispersion, and uniform carbide distribution in X12MCTП powder steel provide enhanced thermal conductivity, wear resistance, and operational durability, making it a cost-effective and advanced material for producing the working parts of stamping and cutting dies.

Ключевые слова: *порошковая металлургия, штамповые стали, горячее изостатическое прессование, микроструктура, механические свойства, термическая обработка*

Açar sözlər: *ovuntu metallurgiyası, ştamp poladları, isti izostatik presləmə, mikrostruktur, mexaniki xassələr, termiki emal*

Key words*: powder metallurgy, die steels, hot isostatic pressing, microstructure, mechanical properties, heat treatment*

Введение. В настоящее время порошковая металлургия является одним из перспективных направлений получения инструментальных материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Использование порошковых сталей позволяет значительно снизить расход дефицитных легирующих элементов, повысить равномерность структуры и улучшить износостойкость готовых изделий. Для изготовления рабочих частей вырубных штампов из порошковой стали возможно использовать три варианта получения материала:

- получение стали смешиванием отдельных компонентов для установления требуемого химического состава;
- получение порошка путем распыления расплава стали того же состава, из которого изготавливается инструмент;
- получение изделий из стружковых порошков стали необходимой марки.

В данной работе рассматриваются результаты исследований второго варианта – получения порошка методом распыления жидкого металла.

Целью работы является исследование структуры, технологических свойств и эксплуатационных характеристик порошковой штамповой стали марки Х12МСТ, полученной методом распыления жидкого металла, а также определение оптимальных параметров горячего газостатического прессования и последующей термомеханической обработки.

Основное содержание. Стальной порошок был изготовлен из стали Х12МСТ методом распыления жидкого металла с фракцией 5–800 мкм. Химический состав порошка приведен в таблице.

Таблица

Химический состав порошка из стали Х12МСТ

Марка стали	Химический состав, % по массе								
	Fe	C	Cr	Ni	V	Mo	Ti	Si	Mn
ПР-Х12МСТ	основн.	1,65-1,95	10,9-12,6	н.б.-0,4	0,23-0,57	0,55-1,05	0,35-0,75	0,6-1,1	0,2-0,7

Перед компактированием исследована форма и микроструктура частиц порошка (рис.1) на электронном микроскопе «Тесла» (а) и на оптическом микроскопе «Неофат» (б). Установлено, что частицы имеют округлую форму и гладкую поверхность, микроструктура их высокодисперсная, дендритно-ячеистая.



а x3000



б x1000

Рис. 1. *Форма частиц порошков Х12МСТ*

Как известно [1-4] легированные порошки, полученные распылением, в связи с округлой формой и гладкой поверхностью частиц, а также повышенной твердостью и недостаточно высокой дисперсностью плохо прессуются и трудно спекаются. Поэтому для компактирования подобных порошков (рис. 2) более приемлемой технологией может явиться горячее газостатическое прессование в капсуле.

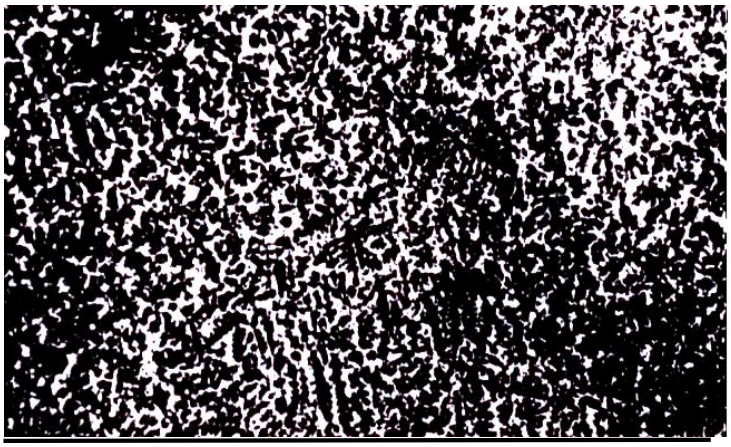


Рис. 2. *Микроструктура частицы распыленного порошка: x1000*

Порошки были загружены в капсулы диаметром 76мм, затем в условиях опытного завода газостатическим методом при температуре 1150^0 и под давлением 110МПа прессовались.

Цикл горячего газостатического прессования длился 4,0 часа. Такая технология обеспечивается более мелкозернистую структуру металла, большую однородность свойств изделий, включает в себя меньшее число операций, дает экономию сырья и материалов является наиболее дешевой и прогрессивной технологией.

Микроструктуры прессовок после горячего газостатического прессования часто отличаются резкой неоднородностью (рис. 3), под микроскопом в них четко видны отдельные порошковые частицы с недостаточно развитий карбидной сеткой, вокруг которых расположены деформированные частицы с неравномерным распределением карбидов. Но после дополнительной горячей пластической деформации микроструктура порошковой стали (рис. 4) характеризуется высокой дисперсностью и однородностью распределения карбидной фазы, несвойственными металлу обычной металлургической технологии.

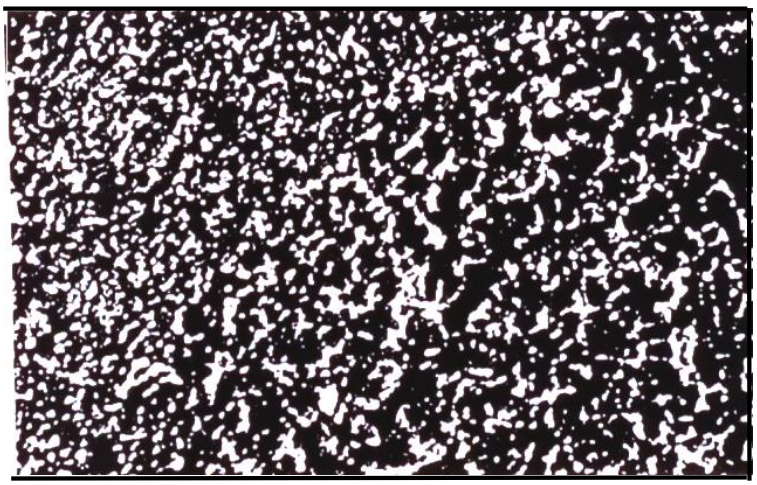


Рис. 3. *Микроструктура прессованных порошковых заготовок: X500*

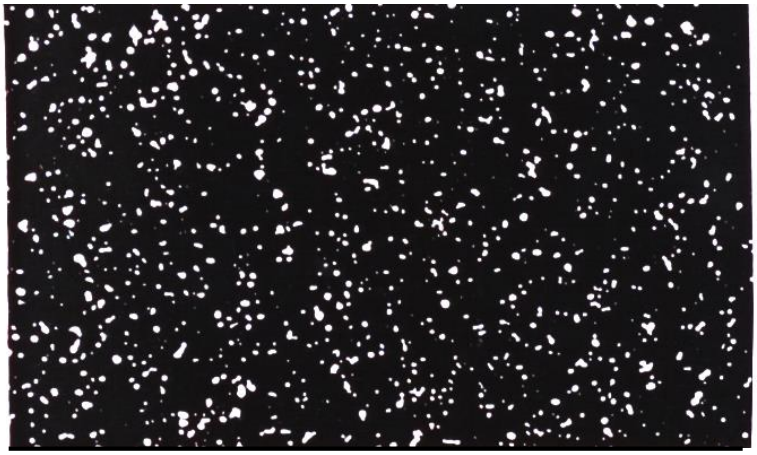


Рис. 4. *Микроструктура порошковых заготовок после горячей пластической деформации: X500*

Кроме того, в условиях Бакинского филиала ВНИИЭлектромаш из порошка ПР-Х12МСТ были изготовлены комплекты точных заготовок секретов матриц штампов для вырубки листов магнитопроводов электродвигателей серии 4А–80. Заготовки получали методом холодного прессования с последующим спеканием при температуре 1150–1200°С.

Непосредственно после спекания при температуре 1000–1100°С заготовки подвергались пластическому деформированию в направлении вырубного усилия с деформацией 10–20%. Проведение этой операции позволило дополнительно повысить плотность заготовок и их сопротивление малым пластическим деформациям при эксплуатации штампов.

По структуре заготовки, полученные холодным прессованием и спеканием, не отличаются от заготовок, изготовленных методом горячего газостатического прессования, однако по пределу прочности при изгибе и ударной вязкости они уступают последним на 15–20 %.

Исследованием твердости и микроструктуры установлены оптимальные режимы термической обработки порошковой штамповой стали Х12МСТП:

- ковка — 1100–1150°С;
- отжиг — 840–860°С;
- закалка — 1020–1040°С;
- отпуск — 220–240°С.

Также установлено, что при повышении температуры закалки выше 1060°С закаливаемость и прокаливаемость стали уменьшаются. Это объясняется образованием многочисленных закалочных пор вакансионного характера и увеличением количества остаточного аустенита, что приводит к снижению твердости и предела прочности порошковой стали [5–8].

После оптимальной закалки и отпуска структура стали (рис. 5.10, б, в) состоит преимущественно из мелкокристаллического мартенсита с равномерно распределёнными карбидами хрома, ванадия и титана. Твердость составляет HRC 62–66, а предел прочности при изгибе — 2900–3000 МПа.

По механическим свойствам исследуемый материал несколько уступает компактной стали, однако по износостойкости превосходит её в 1,5–2 раза. При этом по усилиям резания при точении и шлифовании в сыром и закалённом состоянии порошковая сталь практически не отличается от компактной стали Х12МСТ (ЭП 952).

Средняя стойкость штампов из порошковой стали Х12МСТП между переточками составляет 200–230 тыс. вырубок, что на 75–80% выше, чем у штампов, изготовленных из компактной стали аналогичного состава.

Заключение. Проведенные исследования показали, что порошковая штамповая сталь Х12МСТП, полученная методом распыления жидкого металла, обладает:

- высокой однородностью структуры и дисперсностью карбидной фазы;
- повышенной теплопроводностью и износостойкостью (в 1,5–2 раза выше, чем у компактной стали);
- увеличенной эксплуатационной стойкостью (на 75–80% выше).

Для обеспечения экономически эффективного варианта порошковых штамповых сталей рекомендуется использовать технологию вторичной обработки – переработку стружковых отходов инструментальных сталей в порошок и последующее их использование для изготовления заготовок.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01

Литература

1. Геллер Ю. А., Моисеев В. Ф., Аранович А. О. Износостойкие штамповые стали с повышенным содержанием ванадия // Материаловедение и термическая обработка металлов. –1971. – №3. – с. 17–19.
2. Гогаев К. А., Штакун В. А., Ульшин В. И. Технология получения режущих инструментов из порошков быстрорежущих сталей, распыленных газом // Порошковые быстрорежущие стали (Структура, свойства, технология производства инструментов). — Киев: Наукова думка, 1990. – с. 97–108.
3. Гогаев К. А., Штакун В. А. Исследование сопротивления деформированию порошковых быстрорежущих сталей при высокоскоростном нагружении // Порошковая металлургия. – 1992. – №8. –с. 70–72.
4. Алиев Э.М., Гасанов Ш.М. Исследование свойств инструментальных сталей, полученных методом порошковой металлургии // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. – №1. – с. 92–97.
5. Гогаев К.А., Пашкевич М.С. Влияние параметров горячего изостатического прессования на структуру и свойства порошковых быстрорежущих сталей // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – №4. – с. 45–51.
6. Мамедов Ф.Э., Гафаров А.Р. Анализ технологических параметров получения изделий из порошковых сталей методом газового распыления // Вестник Бакинского инженерного университета. – 2018. – №3. – с. 54–60.
7. Гусейнов Э.Ш., Ибрагимов Р.Р. Микроструктура и износостойкость порошковых инструментальных сталей после термообработки // Металлургия и материаловедение. – 2020. –№2. – с. 27–32.
8. Rzayev, N.M., Hajiyev, R.F. Study of wear resistance of hot-work tool steels produced by powder metallurgy methods // Azərbaycan Texniki Universitetinin Elmi Əsərləri. – 2021. – №2. – s. 77–84.

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. İsmayılov N.Ş.

UOT 621.923.5

MÜASİR RƏQƏMSAL PROQRAMLARLA İDARƏEDİLƏN HONLAMA DƏZGAHLARINDA SƏTHİN EMAL DƏQİQLİYİNİN TƏHLİLİ

[1]Abdullayeva N.B., [2]Zeynalzadə H.A., [1]Rəhmanov M.X., [1]Bayramova F.İ.

[1]"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
[2]Mingəçevir Dövlət Universiteti
Az4500, Mingəçevir şəh., D.Əliyeva küç., 21
E-mail: nazila.abdullayeva@asco.az, farina.abdullayeva@asco.az,
muqabil.rahmanov@asco.az, hamida.zeynalzade@aztu.edu.az

Xülasə. *Məqalədə 08X18H10T markalı poladdan hazırlanmış və RPİ honlama dəzgahında honlama əməliyyatı aparılan detalların emal dəqiqliyinin formalaşması qanunauyğunluğuna baxılmışdır. Bu məqsədlə materialın kimyəvi tərkibi və bəzi fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri analiz edilmişdir. Honlam əməliyyatının əsas giriş parametrlərinin səthin ölçü dəqiqliyə təsiri üzrə eksperimental tədqiqatların nəticələri qrafiki olaraq təqdim edilmişdir. Müasir RPİ honlama dəzgahlarında ölçü dəqiqliyinə təsir edən əsas amillər təyin edilmiş və emalın optimal şəraiti seçilmişdir. Daxili silindrik səthlərin emalında honlama əməliyyatının tətbiqinin müasir metodları göstərilmiş, ölçü dəqiqliyinin formalaşma xüsusiyyəti və emal rejmi parametrlərinin secilməsinin ümumi qanunauyğunluğu araşdırılmışdır.*

Abstract. *The article explores the regularities governing the formation of dimensional accuracy in components manufactured from 08X18H10T stainless steel and subjected to the honing process on a CNC honing machine. For this purpose, the chemical composition, along with selected physical, mechanical, and technological properties of the material, have been analyzed. The influence of the main input parameters of the honing operation on surface dimensional accuracy has been experimentally investigated, and the results are presented in graphical form. Key factors affecting dimensional accuracy in modern CNC honing machines have been identified, and optimal machining conditions have been determined. The study also outlines contemporary methods for applying honing processes to the machining of internal cylindrical surfaces. Furthermore, the research examines the characteristics of dimensional accuracy formation and investigates the general regularities governing the selection of machining regime parameters.*

Аннотация. *В статье рассматриваются закономерности формирования размерной точности деталей из нержавеющей стали 08X18H10T, подвергнутых хонингованию на хонинговальном станке с ЧПУ. Проведен анализ химического состава, а также ряда физико-механических и технологических свойств материала. Экспериментально исследовано влияние основных входных параметров операции хонингования на размерную точность поверхности, результаты представлены в графическом виде. Выявлены основные факторы, влияющие на размерную точность на современных хонинговальных станках с ЧПУ, и определены оптимальные режимы обработки. В работе также изложены современные методы применения хонингования для обработки внутренних цилиндрических поверхностей. Кроме того, изучены особенности формирования размерной точности и выявлены общие закономерности выбора параметров режимов обработки.*

Açar sözlər: *RPİ honlama dəzgahları, kələ-kötürlük, honlama, bərklik, xüsusi təzyiq, ölçü dəqiqliyi*

Key words: *CNC honing machine, surface roughness, honing process, hardness, special pressure, accuracy*

Ключевые слова: *хонинговальный станок ЧПУ, шероховатость поверхности, процесс хонингования, твердость, удельное давление, точность*

Giriş. 08X18N10T markalı paslanmayan poladın istehsalı zamanı kimyəvi tərkibin dəqiq şəkildə qorunması son dərəcə vacibdir. Lakin materialın tələb olunan texniki və istismar xüsusiyyətlərinə malik olması da az əhəmiyyət daşımır. Poladın struktur göstəricilərini artırmaq üçün hazır məhsulda austenitin sabitləşdirilməsi zəruridir. Bunun üçün polad 1020°C-dən 1100°C-yə qədər temperatur diapazonunda tablandırılır.

Bu markalı polad müxtəlif formalı metal prokatı, o cümlədən fasonlu-GOST 5949-75, GOST 2590-2006, GOST 2591-2006, GOST 2879-2006, çubuq-GOST 8559-75, GOST 8560-78, GOST 7417-75, metallik örtükçəkmə-GOST 14955-77, GOST 18907-73, qalın təbəqə-GOST 7350-77, GOST 19903-74, GOST 19904-90, nazik təbəqə-GOST 5582-75, lentşəkilli-GOST 4986-79, lövhə-GOST 4405-75, GOST 103-2006, döymə məhsulları-GOST 1133-71, GOST 25054-81 və ən əsası isə müxtəlif diametrli borular-GOST 9940-81, GOST 9941-81, GOST 11068-81, GOST 10498-82, GOST 14162-79. şəklində kütləvi şəkildə istehsal olunur. 08X18N10T markalı polad ABŞ-ın AISI 321, Almaniyanın X6CrNiTi18-10 və Yaponiyanın SUS321 markalı poladları ilə eyni təsnifat qrupunda durur. Qüvvədə olan DIN 1.2312 Tool-Steel və ГОСТ 9940-81 standartlarına uyğun olaraq, 08X18N10T poladı qızmar-yayılma halında çox geniş diapazonda buraxılır. Müxtəlif texniki məqsədlər və xüsusi istifadə üçün nəzərdə tutlmuş bu hissələrin konstruktiv ölçüləri də müxtəlif götürülür [7, 8].

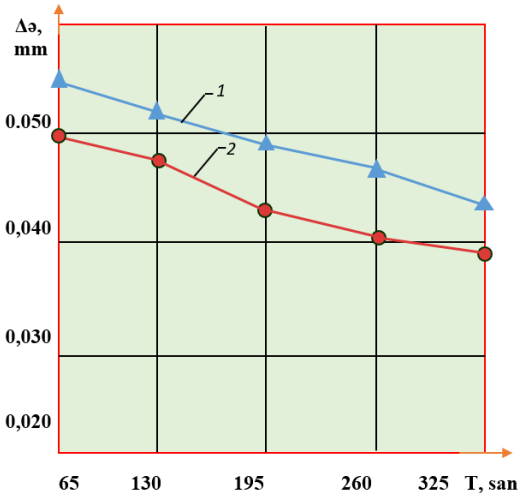
Honlama kimi çox incə texnoloji əməliyyatın daha yüksək dəqiqliklə aparılması üçün materialın standart üzrə verilmiş kimyəvi tərkibindən əlavə olaraq, onun həm də həqiqi kimyəvi tərkibi müəyyənləşdirilməlidir ki, bunu da Almaniyanın "BRUKER" firmasının istehsalı olan Ultra-Compact Metal Analyzer Q-2-İON stasionar spektroskopik qurğusu vasitəsilə nəzarət edilmişdir və alaınmış fərq buraxılabilən həddi aşmamışdır. Cədvəldə 08X18N10T markalı poladın DIN 1.2312 Tool-Steel standartı üzrə kimyəvi tərkibi verilmişdir.

08X18H10T markalı poladın kimyəvi tərkibi, %

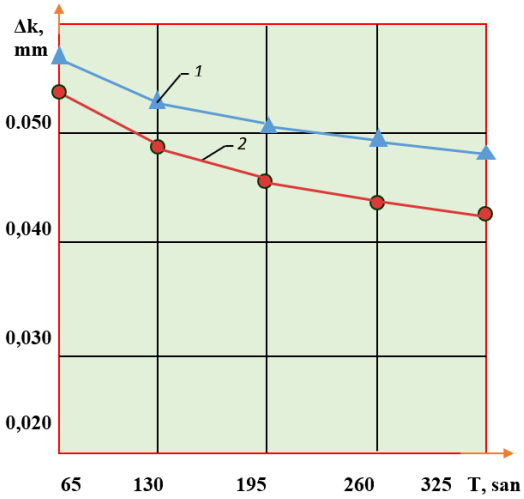
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
≤0,08	**≤0,8**	**≤2**	**≤0,02**	**≤0,035**	**9-11**	**17-19**	**≤0,3**

Əsas hissə. Yüksək dəqiq maşın hissələrinin honlama əməliyyatı ilə emalı texnoloji proses kimi səth və səth qatına qoyulmuş keyfiyyətin yüksək dəqiqliklə formalaşdırılması məqsədi ilə həyata keçirilir. Honlama əməliyyatı zamanı baş verən fiziki-mexaniki hadisələr və texnoloji qanunauyğunluqları analiz etməklə belə nəticəyə gəlmək olar ki, səthin formalaşması prosesi əsasən məmuldakı xətaların aradan qaldırılması zamanı və onun qismən növbəti emal mərhələsinə ötürülməsi ilə həyata keçirilir [1,5]. Bu amillərin təsir intensivliyi detal və hon başlığının hərəkət sxemindən, kontakta girən bülovün dənəvərliy dərəcəsindən və təzyiqin qeyri-bərabər paylanmasından, kəsmə qüvvələrinin təsir xarakterindən və s. asılıdır [2,6]. Emalın mümkün ola biləcək ən kiçik kəsmə qüvvələrilə aparılması məqsədilə, honlama prosesinin əsas giriş parametrlərinin (başlığın irəli-geri–$V_{i\text{-}g}$ və fırlanma–V_f hərəkət sürətləri, xüsusi təzyiq–$P_{x.t}$, bülövün dənəvərliyi–Z və emal müddəti–T) kəsmə qüvvəsi təşkiledicilərinə təsiri analiz edilmişdir [13,14].

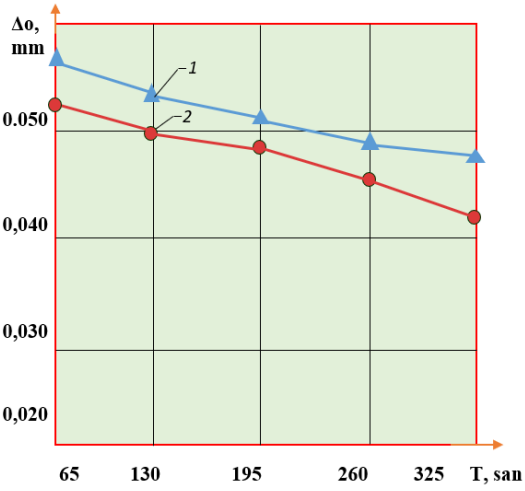
Verilmiş giriş parametrləri avtomatik şəkildə tənzimlənə bilən RPİ honlama dəzgahında 08X18N10T markalı poladın emalı zamanı əyrioxluq ($\Delta_ə$), konusluq (Δ_k) və ovallıq (Δ_o) qiymətlərinin emal müddəti (T)-dən asılılığı Qrafik 1,2 və 3-də müvafiq ardıcıllıq üzrə göstərilmişdir [9, 11, 12]. Burada, 1 və 2 uyğun olaraq, başlanğıc əyriliyi müxtəlif olan detallardır. Dəzgah şpindelinin (hon başlığının) irəli-geri və fırlanma hərəkət sürətlərinin nisbəti ($V_f/V_{i.g}$) ənənəvi olaraq 1,1÷4,1 intervalında götürülməsi tövsiyə olunur.



Qrafik 1. *Əyrioxluq qiymətinin ($Δ_ə$) emal müddətindən (T) asılılığı;*
(1, 2 - uyğun olaraq, başlanğıc əyriliyi müxtəlif olan detallar)



Qrafik 2. *Konusluq qiymətinin ($Δ_k$) emal müddətindən (T) asılılığı;*
(1, 2 – uyğun olaraq, başlanğıc əyriliyi müxtəlif olan detallar)



Qrafik 3. *Ovallıq qiymətinin ($Δ_o$) emal müddətindən (T) asılılığı;*
(1, 2 – uyğun olaraq, başlanğıc əyriliyi müxtəlif olan detallar)

Aparılmış nəzəri və eksperimental tədqiqatlara əsaslanaraq deyə bilərik ki, emaldan əvvəl və sonra pəstahın konusluq və diametral göstəriciləri arasındakı "gizli" bir bağlılıq vardır. Başlığının profili və emalın giriş parametrlərindən asılı olaraq, konusluq 32-65%, ölçü xətası isə 55-80% həddlərində dəyişirə bilər.

Deşiklərin incə emalı üçün tətbiq edilən honlama əməliyyatında yaranan kəsmə qüvvələri formalaşan səthin keyfiyyət və dəqiqlik göstəricilərin araşdırılması və tədqiqi zamanı vacib aspektlərindən biri sayılır [3, 4, 10]. Yüksəkdəqiqlikli detalların istehsalı zamanı tətbiq edilən texnoloji əməliyyatlar üçün seçilmiş alət və texnoloji-təchizat vasitələrinin konstruksiyaları kifayət qədər sərt və istiliyə, həmçinin vibrasiyaya davamlı olması kəsmə qüvvələrinin araşdırılması baxımından zəruri hesab edilir.

Eksperimentlər NCH-450 markalı rəqəmli-proqramla idarə olunan honlama dəzgahında aparılmışdır. Bu dəzgah 45-75 mm diametrli və 500 mm-ə qədər isə dərinliyi olan yuvaları emal etmək qabiliyyətindədir (şəkil).



NCH-450 markalı rəqəmli-proqramla idarə olunan honlama dəzgahı

Nəticə. 08X18N10T markalı poladda honlama əməliyyatının tətbiqindən sonra ölçü dəqiqliyinin formalaşma qanunauyğunluğuna təsir göstərən faktorlar müəyyənləşdirilmişdir. Dəqiqliyin artırılması istiqamətində həllivacib məqamlar tapılmış və optimal emal şərtlərinin təyini üçün müasir tədqiqat metodlarından istifadə imkanları göstərilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, emal dəqiqliyinə təsir göstərən çoxsaylı faktorlar, xüsusən də dəzgah parametrlərinin dəqiqləşdirilmiş hesabı hissələrin ölçü dəqiqliyinə əhəmiyyətli təsir göstərir.

Ədəbiyyat

1. Eziz, S. Sh. Kinematic features of the lapping process and determination of its basic parameters // − Moskow: Computational Nanotechnology, − 2020. №3 (Vol.7), − p. 11-16. 11-16
2. Əziz S.Ş. Daxili silindrik səthlərin sürtmə əməliyyati ilə emalının əsas xüsusiyyətləri // AMA Xəbərləri, 2018, №3. s.44-50
3. Ümid Yusif. M., Xəlilov Ə.H. Maşınqayırma texnologiyasının əsasları. Bakı: AzPİ, 1987, 121s.

4. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20. (In Russian).
5. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Model of machining process control on multi-tool single-carriage adjustments // MACHINE SCIENCE. - 2023.- № 1 – P. 22-27
6. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Models of Machining Accuracy in Multi-Tool Adjustments. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME). vol. 17, no. 3, pp. 8067-8085, Oct. 2020. Malaysia.
7. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Dadashov R.Y. Theoretical basis for the development of an algorithmic unified complex of mathematical models of cutting forces// Machine Science. - 2023.- № 1 – p. 55-60.
8. Гафаров А.М. Ротационное хонингование. Баку, ЭЛМ, 1999, 132 с.
9. Гафаров А.М. Прогрессивные методы механической обработки. Баку, "ЭЛМ", 2001. в двух томах т.1, 286 с, т.2, 310 с.
10. Jianxiu, S., Rui, X., Yipu, W., Jiejing, L., Haixu, L. Study on Lapping Paste of 6H–SiC Single-Crystal Substrate in Tribochemical Mechanical Lapping: [Electronic resource] /Journal of The Institution of Engineers India, 2020.
11. Nərimanov V. Ə. Cihazqayırma texnologiyasının əsasları. Bakı: Müəllim, 2006, 456 s.
12. Rəsulov N.M. Maşın istehsal texnologiyası, Bakı: Təhsil, 2010, 432 s.
13. Gleason, E.A. Viewpoint: Soft Metal Gains Hulk-Like Strength: [Electronic resource] / Physics 12, 125. – November 11, 2019.
14. Əziz S.Ş. 32CrMoV12-10 markalı poladların honlama ilə emalında ölçü dəqiqliyinin formalaşması, ADDA, Elmi Əsərləri №1, 2024, 21-27 s. https://adda.edu.az/uploads/Elmi%20eserler%20%E2%84%96%201.pdf

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UOT 669.295.5:621.785:621.77.016.3:620.191

BƏRABƏRKANALLI BUCAQALTI PRESLƏMƏ VƏ TERMİKİ EMAL PROSESLƏRİNİN BT6 MARKALI TİTAN ƏRİNTİSİNİN MEXANİKİ XASSƏLƏRİNƏ TƏSİRİ

Cabbarov T.Q., Axundova X.Y.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Az1010, Bakı şəh., Azadlıq pr., 20
E-mail: tahir196041@gmail.com; tahir-cabbarov@mail.ru

Xülasə. *Yüksək möhkəmliyə və dağılmaya qarşı müqavimətə eyni zamanda nail olmaq konstruksiya metal materiallar sahəsində daim aktual olan bir problemdir. Müasir materialşünaslıq və texnologiyalarla yüksək möhkəmlik əldə etmək çətin deyil. Lakin materiallarda möhkəmlik və plastiklik sıx şəkildə əlaqəlidir və möhkəmlik artdıqca zərbə özlülüyü azalır. Bir çox konstruksiya metal materiallar möhkəmliyinə görə deyil, daha çox qırılmaya davamlığına görə məhdudlaşır.*

Müəyyən edilmişdir ki, BT6 titan ərintisi ilkin (qızmar yayılmış) vəziyyətdə qarışıq qlobulyar–lövhəvari quruluşa malik olmuşdur və burada α-fazasının qlobulyar hissəsinin həcm payı təxminən 65 % təşkil etmişdir. Termiki emal və bərabərkanallı bucaqaltıı presləmə əməliyyatından

sonra ərintidə α-fazasının orta dənə/subdənə ölçüsü (240 ± 60) nm olan ultra xırda dənəli (UXD) strukturun payı artmış və təxminən 70 % olmuşdur.

Tədbiq edilən rejimlər üzrə aparılan bərabərkanallı bucaqaltıı presləmə prosesi BT6 ərintisinin bərkliyini 1,2 dəfə, möhkəmlik xüsusiyyətlərini 1,3 dəfə artırmışdır, plastiklik isə 1,6 dəfə azalmışdır.

Abstract. *Achieving both high strength and resistance to fracture simultaneously remains a persistent challenge in the field of structural metallic materials. With modern materials science and technology, attaining high strength is not difficult. However, strength and plasticity in materials are strongly correlated, and impact toughness decreases as strength increases. Many structural metallic materials are limited not by their strength but rather by their fracture toughness.*

It has been established that BT6 titanium alloy, in its initial (hot-rolled) state, possesses a mixed globular–lamellar structure, with the volume fraction of the globular component of the α-phase being approximately 65%. After heat treatment and equal-channel angular pressing (ECAP), the fraction of the ultra-fine-grained (UFG) structure with an average α-phase grain/subgrain size of (240 ± 60) nm increased to about 70%.

The applied ECAP regimes increased the hardness of the BT6 alloy by 1.2 times and its strength properties by 1.3 times, while its plasticity decreased by 1.6 times.

Аннотация. *Достижение одновременно высокой прочности и сопротивления разрушению остаётся постоянной и актуальной проблемой в области конструкционных металлических материалов. Современные материалы и технологии позволяют без особых трудностей получать высокую прочность. Однако прочность и пластичность материалов тесно взаимосвязаны, и с увеличением прочности ударная вязкость снижается. Многие конструкционные металлические материалы ограничены не прочностью, а в большей степени их трещиностойкостью.*

Установлено, что титановый сплав ВТ6 в исходном (горячекатаном) состоянии имеет смешанную глобулярно-пластинчатую структуру, при этом объёмная доля глобулярной составляющей α-фазы составляет около 65 %. После термической обработки и равноканального углового прессования (РКУП) доля ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с средним размером зёрен/субзёрен α-фазы (240 ± 60) нм увеличилась и достигла примерно 70 %.

Проведение РКУП по применённым режимам повысило твёрдость сплава ВТ6 в 1,2 раза и его прочностные характеристики в 1,3 раза, при этом пластичность снизилась в 1,6 раза.

Açar sözlər: *möhkəmlik, titan ərintisi, termiki emal, deformasiya, xırda dənəlilik, bərabərkanallı, zərbə özlülüyü, faza, metal, dağılma*

Ключевые слова: *прочность, титановые сплавы, термическая обработка, деформация, мелкозернистость, равноканальная, ударная вязкость, фаза, металл, разрушение*

Key words: *strength: titanium alloys, heat treatment, deformation, fine-grained, equal-channel, impact toughness, phase, metal, fracture*

Məsələnin müasir vəziyyəti. Eyni zamanda yüksək möhkəmliyə və dağılmaya qarşı müqavimətə nail olmaq konstruksiya metal materialları sahəsində daim aktual bir problemdir.

Məlum olduğu kimi [1,2], materialların müəyyən mexaniki xassə səviyyəsinə nail olmaq üçün materiala eyni zamanda termiki və mexaniki emal üsullarının tətbiqindən istifadə olunur. Termiki emal həm müstəqil, həm də əlavə emal üsulu kimi tətbiq edilir. Hazırda bərklik və möhkəmlik xassələrini artırmaq üçün ən geniş yayılmış üsullardan biri bərabərkanallı bucaqaltı presləmə (BKBP) üsuludur. Termo-mexaniki emal (TME) nəticəsində materialın strukturu, bərkliyi, möhkəmliyi və zərbə özlülüyü dəyişir.

Materialların quruluşuna və xassələrinə effektiv şəkildə nəzarət etmək üçün kombinə olunmuş emal üsullarından istifadə olunur. İntensiv plastik deformasiya (İPD) üsulları daim təkmilləşir və bu da müxtəlif üsul və rejimlərdə İPD tətbiqi ilə alınmış nanokristallik quruluşa malik metalların və ərintilərin hərtərəfli öyrənilməsi zərurətini gündəmə gətirir [3].

Son illərdə tədqiqatçılar materiallarda ultraxırda dənəli (UXD) vəziyyətin əldə olunması üsullarına xüsusi maraq göstərirlər. UXD quruluş materialın bir sıra mühüm xassələrini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırmaq qabiliyyətinə malikdir [4]. Həcmli UXD materialların alınması üçün perspektivli üsullardan biri intensiv plastik deformasiyadır**.** Bu proses bərabərkanallı bucaqaltı pressləmə (BKBP) vasitəsilə həyata keçirilir. Bu üsul, pəstahın geometrik ölçülərini dəyişmədən materialda UXD quruluşun formalaşdırılmasına imkan verir [5].

Bu gün titan ərintiləri geniş yayılmış, asanlıqla əldə edilən mühəndislik metalları hesab olunur və paslanmayan polad, xüsusi polad növləri, nikel əsaslı ərintilər və kompozit materiallarla birbaşa rəqabət aparır**.**

Beləliklə, intensiv plastik deformasiya (İPD) üsulları ilə əldə olunmuş ultraxırda dənəli titan materialları otaq temperaturunda yüksək mexaniki xassələrə malikdir. Bununla belə, bu materialların yüksək temperaturlarda istismar xassələrinə dair tədqiqatlar hələ azdır. Halbuki iki fazalı Ti–6Al–4V tipli ərintilər aviasiyada və mühərrikqayırmada geniş temperatur intervalında işləyən detallar üçün ən çox istifadə olunan materiallar sırasındadır.

Tədqiqat materialı və metodikası. Tədqiqat obyekti kimi iki fazalı α+β tipli BT6 titan ərintisi seçilmişdir. Bu ərinti öz yüksək xüsusi möhkəmliyi, yaxşı korroziyaya davamlılığı və geniş temperatur intervalında sabit mexaniki xassələri ilə xarakterizə olunur. Məhz bu xüsusiyyətlərinə görə BT6 ərintisi aviasiya, mühərrikqayırma və digər yüksək texnoloji sahələrdə geniş tətbiq edilir.

Ərintinin kimyəvi tərkibi cədvəl 1-də göstərilmişdir. Tərkibində əsas komponent titan (Ti) olmaqla yanaşı, vanadium (V) və alüminium (Al) əlavələri ərintiyə yüksək möhkəmlik və istiliyədavamlılıq qazandırır. Alüminium α-fazasını sabitləşdirir və möhkəmlik artırır, vanadium isə β-fazasını sabitləşdirərək plastiklik və texnoloji işlənmə qabiliyyətini yaxşılaşdırır.

Cədvəl 1

BT6 titan ərintisinin kimyəvi tərkibi

Element	Ti	V	AL
%	89.04	5.95	5.01

Bu ərinti tədqiqatlarda ilkin iri dənəli (İD) vəziyyətdə pəstahların qızmar yayıqlanması nəticəsində əldə olunmuşdur və bərabərkanallı bucaqlı pressləmədən (BKBP) sonra əldə edilmiş ultraxırda dənəli (UXD) vəziyyətdə öyrənilmişdir.

BT6 ərintisinin BKBP texnoloji prosesi aşağıdakı mərhələlərdən ibarət olmuşdur:

1. Pəstahın homogenləşdirici tabalınması.

Diametri 20 mm və uzunluğu 100 mm olan ərinti pəstahı homogenləşdirici tabalmaya məruz qoyulmuşdur. Bu əməliyyatın məqsədi materialın plastiklik qabiliyyətini artırmaq olmuşdur.

2. Tablama.

Pəstah 960 °C temperaturda 1 saat saxlanıldıqdan sonra suda soyudulmaqla tablandırılmışdır.

3. Tabəksiltmə

Tablandırılmış pəstah 675°C temperaturda 4 saat ərzində tabəksiltməyə məruz qalmışdır.

4. Bərabərkanallı bucaqaltı pressləmə (BKBP).

Pəstah 650°C temperaturda BC marşrutu üzrə, $\varphi = 120°$ bucaq altında və $n = 6$ keçid olmaqla BKBP prosesindən keçirilmişdir.

Ərintinin Rokvell üsulu ilə bərkliyə sınaqları TimeGroup TH 300 bərklikölçən cihazında aparılmışdır TimeGroup TH 300 bərklikölçən cihazı materialın bərkliyini avtomatik ölçmə rejimində yüksək dəqiqliklə müəyyən etməyə imkan verir. Ərinti nümunələri iki mərhələdə

sınaqdan keçirilmişdir: birinci dəfə ilkin (İD) vəziyyətdə, ikinci dəfə isə RKBP prosesindən sonra UXD vəziyyətində.

Statik dartılma sınaqları Tinius Olsen H50KT universal sınaq maşınında aparılmışdır. Bu maşın GOST 28840 standartına uyğun gəlir. Dartılma sınaqları üçün diametri 3 mm olan silindrik nümunələr hazırlanmışdır.

V-şəkilli gərginlik konsentratoruna malik BT6 ərintisi nümunələrinin zərbə sınaqları 150 Coul enerjiyə malik TimeGroup JB-W300 tipli mayatnikli sınaq qurğusunda aparılmışdır. Sınaqlar otaq temperaturu intervalında, GOST 9454-78 standartına uyğun olaraq həyata keçirilmişdir.

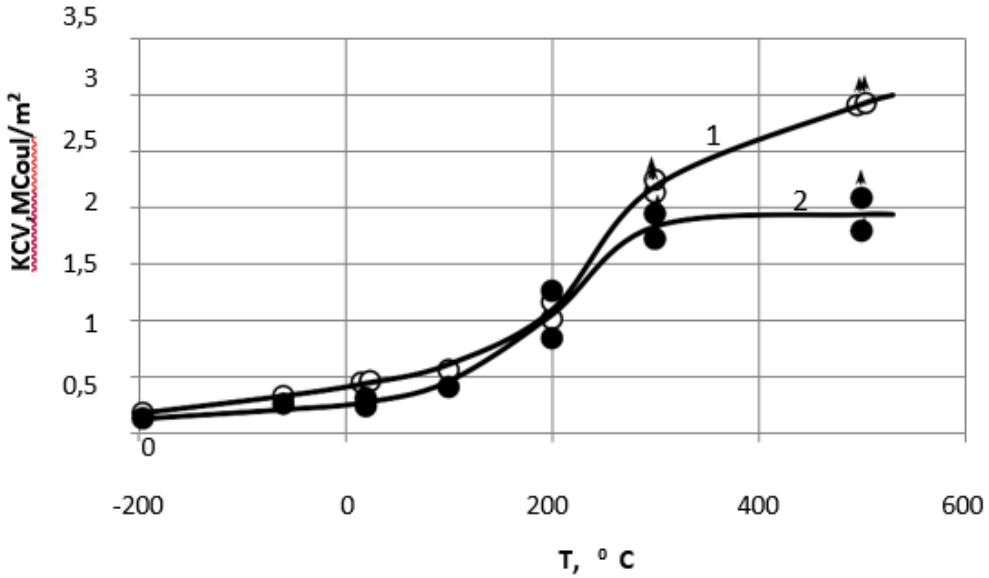
Tədqiqat nəticələri. Tərəfimizdən aparılmış texnoloji rejimlər üzrə aparılmış BKBP prosesi BT6 ərintisinin bərkliyini 1,1 dəfə artıraraq 34 MPa-dan 36 MPa-a qədər yüksəldir, eyni zamanda möhkəmlik xassələri 1,2 dəfə artmış, orta dənə ölçüsü isə 0,24±0,06-ya qədər azalmışdır. Həmçinin göründüyü kimi, plastiklik 1,4 dəfə azalmışdır (cədvəl 2).

Cədvəl 2

BT6 ərintisinin dənələrinin orta ölçüsü və mexaniki xassələri

Ərintinin vəziyyəti	$d_{ср.}$, мкм	HRC	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
İlkin	15±5	34	950±20	849±30	12±1,5
BKBP-dən sonra	0,24±0,06	36	1090±30	990±40	8±0,3

BT6 markalı titan ərintisindən hazırlanmış nümunələrin zərbə özlülüyünə dair sınaqların nəticələri göstərmişdir ki, sınaq temperaturunun -186°C-dən 200°C-dək artırılması ilə ərintinin zərbə özlülüyü (KCV) həm ilkin (İD) vəziyyətdə, həm də BKBP-dan (UXD vəziyyəti) sonra demək olar ki, eyni olur və 0,1–0,2 MCoul/m²-dən 0,8–1,2 MCoul/m²-dək artır (şəkil). 300 və 500°C sınaq temperaturlarında nümunələr tamamilə dağılmamışdır (şəkil). Lakin belə nümunələr sındırıldıqdan sonra onların bəzi makrofraqtoqrafik göstəriciləri ölçülmüşdür.



BT6 ərintisinin zərbə özlüyünun (KCV) temperaturdan asılılığı:
1-ilkin vəziyyətdə; 2- BKBP –dən sonra

Beləliklə, BKBP –dən sonra BT6 ərintisinin plastiklik göstəriciləri azalsa da, UXD quruluşa malik ərintinin zərbə özlülüyü (KCV) sınaq temperaturlarının -186°C-dən 200°C-ə qədər olan intervalında ilkin (İD) vəziyyətdəki ərintinin KCV göstəricilərindən demək olar ki, fərqlənmir, bu da ərintini konstruktiv möhkəmlik baxımından müsbət səciyyələndirir.

Nəticə. 1. Təyin edilmişdir ki, tədqiqatda nəzərdə tutulmuş rejimlər üzrə aparılmış BKBP prosesi BT6 ərintisinin bərklik dərəcəsini 1,1 dəfə, möhkəmlik xassələrini isə 1,2 dəfə artırmış, plastiklik göstəricilərini isə 1,4 dəfə azaltmışdır.

2. Göstərilmişdir ki, BKBP–dən sonra BT6 ərintisinin plastiklik göstəriciləri azalsa da, UXD quruluşa malik ərintinin zərbə özlülüyü (KCV) sınaq temperaturlarının -186°C-dən 200°C-ə qədər olan intervalında ilkin (İD) vəziyyətdəki ərintinin KCV göstəricilərindən demək olar ki, fərqlənməmişdir, bu isə ərintini konstruktiv möhkəmlik baxımından müsbət səciyyələndirmişdir.

Ədəbiyyat

1. Шляхова Г.В., Данилов В. И., Зуев Л.Б., Карташов Е.Ю. Разрушение ультрамелкозернистого титана // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 2016, №3
2. Черняева Е.Ю., Семенова И.П. Влияние деформации и термообработки на коррозионное поведение двухфазных титановых сплавов // Вестник УГАТУ. 2011. №1 (41).
3. Сурикова Н.С., Панин В.Е, Деревягина Л.С., Микромеханизмы деформации и разрушения слоистого материала из титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении // Физ. мезомех. 2014. №5.
4. Салищев Г. А., Кудрявцев Е. А., Жеребцов С. В. Структурные изменения и механическое поведение при низкотемпературной сверхпластичности наноструктурного сплава ВТ6 // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 2012. №17 (136).
5. Исламгалиев Р. К., Ганеев А. В., Никитина М. А., Караваева М.В. Структура и свойства ультрамелкозернистой мартенситной стали // Вестник УГАТУ. 2016. №3 (73).

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: dos. Xankişiyev İ.A.

УДК 656.6:620.193; 656.6:620.197

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ СУДОВЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОМОДИФИКАТОРАМИ И БИОЦИДНЫМИ ДОБАВКАМИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Фатьянова Н.В.

ПЮЛ "Азербайджанская Государственная Морская Академия"
Аз1000, г. Баку, ул. З.Алиевой, 18
E-mail: nice.natali92@mail.ru

***Аннотация**. В статье представлен аналитический обзор современных тенденций в разработке судовых лакокрасочных материалов (ЛКМ) с использованием наномодификаторов и биоцидных добавок. Рассмотрены физико-химические механизмы повышения антикоррозионных и противообрастающих свойств покрытий, а также влияние наночастиц на структуру и долговечность ЛКМ в условиях агрессивных морских сред. Проведено сравнение мировых технологий и нормативных требований, включая экологические аспекты применения биоцидов. Выявлены ключевые проблемы внедрения инновационных компонентов и намечены перспективные направления дальнейших исследований.*

***Xülasə.** Məqalədə nanomodifikatorlar və biosid əlavələr tətbiq olunan gəmi lak-boya materiallarının (LBM) hazırlanmasında müasir meyllərin analitik icmalı təqdim olunur. Örtüklərin*

antikorroziya və yapışma əleyhinə xüsusiyyətlərinin artırılmasının fiziki-kimyəvi mexanizmləri, həmçinin aqressiv dəniz mühitlərində LBM-in quruluşuna və dayanıqlığına nanosistemlərin təsiri araşdırılır. Dünyada tətbiq olunan texnologiyalar və normativ tələblər, eləcə də biosidlərin ekoloji aspektləri müqayisə edilmişdir. İnnovativ komponentlərin tətbiqində əsas problemlər müəyyən edilmiş və gələcək tədqiqat istiqamətləri göstərilmişdir.

Abstract. *The article presents an analytical review of current trends in the development of marine coatings incorporating nanomodifiers and biocidal additives. The physicochemical mechanisms of enhancing anticorrosive and antifouling properties of coatings are discussed, along with the impact of nanoparticles on the structure and durability of paints under aggressive marine conditions. A comparative analysis of global technologies and regulatory requirements is provided, with special attention to the environmental aspects of biocide application. Key challenges to the adoption of innovative components are identified, and future research directions are outlined.*

Ключевые слова: *судовые покрытия, наноматериалы, биоциды, антикоррозионная защита, противообрастающие свойства, морская среда, экологическая безопасность*

Açar sözlər: *gəmi örtükləri, nanomateriallar, biosidlər, antikorroziya mühafizəsi, yapışma əleyhinə xüsusiyyətlər, dəniz mühiti, ekoloji təhlükəsizlik*

Key words: *marine coatings, nanomaterials, biocides, anticorrosion protection, antifouling properties, marine environment, environmental safety*

Введение. Современная судостроительная и судоремонтная отрасль испытывает постоянную потребность в эффективных методах защиты металлических поверхностей от коррозии и биологического обрастания. Лакокрасочные материалы (ЛКМ) являются одним из ключевых средств, обеспечивающих долговечность и надежность судовых конструкций в агрессивных условиях морской среды. Однако классические рецептуры ЛКМ часто демонстрируют ограниченную стойкость к многофакторному воздействию, включая соленую воду, ультрафиолетовое излучение, механическое истирание и рост морских организмов.

В последние десятилетия в области разработки судовых покрытий отмечается интенсивное внедрение нанотехнологий и биоцидных компонентов, которые существенно расширяют функциональные возможности ЛКМ. Наномодификаторы, такие как наномел, диоксид титана и графен, способствуют улучшению барьерных и механических свойств покрытий, повышая их устойчивость к коррозионным процессам. Биоцидные добавки, включая оксид меди и оксид цинка, обеспечивают надежную защиту от биообрастания, снижая эксплуатационные расходы и повышая безопасность мореплавания.

Данная статья ставит своей целью комплексный анализ современных тенденций в разработке судовых лакокрасочных материалов с использованием наномодификаторов и биоцидных добавок. В работе рассматриваются физико-химические механизмы повышения антикоррозионных и противообрастающих свойств покрытий, проводится сравнение мировых технологий и нормативных требований, а также выделяются основные проблемы и перспективы развития в данной области.

Основная часть. Современные судовые лакокрасочные материалы (ЛКМ) представляют собой сложные композиционные системы, основная задача которых — создание прочного защитного слоя на металлических поверхностях судов, способного противостоять коррозии и биологическому обрастанию в условиях агрессивной морской среды.

Традиционные судовые покрытия преимущественно базируются на пентафталевых лаках (например, ПФ-115), эпоксидных и полиуретановых смолах. Они обладают хорошей адгезией, механической прочностью и умеренной химической стойкостью. Однако при длительной эксплуатации в морской среде возникают ряд проблем:

- Проникновение влаги через микропоры и микротрещины, что ускоряет коррозионные процессы.

- Низкая устойчивость к ультрафиолетовому излучению, приводящая к выцветанию и потере прочности.
- Недостаточная эффективность против биообрастания, что увеличивает эксплуатационные расходы на очистку и ремонт.
- Экологические ограничения, связанные с применением токсичных компонентов, особенно биоцидов.

Для преодоления этих ограничений ведется активное внедрение новых технологий, в частности наномодификаторов и биоцидных добавок, способных значительно улучшить эксплуатационные характеристики покрытий.

Внедрение наноматериалов в состав судовых лакокрасочных материалов стало одним из ключевых направлений модернизации покрытий благодаря их уникальным физико-химическим свойствам. Наночастицы обладают высокой удельной поверхностью и способны улучшать структуру покрытия на микроскопическом уровне, что значительно повышает его защитные функции.

Основные наномодификаторами, которые применяются в судовых ЛКМ являются:

- **Наномел (наноразмерный мел)** — широко применяется как наполнителе для улучшения барьерных свойств покрытия, повышения механической прочности и стойкости к истиранию. Наномел способствует уменьшению пористости пленки, что снижает проникновение влаги и агрессивных ионов к металлической поверхности.
- **Диоксид титана (TiO_2)** — обладает фотокаталитическими свойствами, что позволяет использовать его для самоочищающихся и антибактериальных покрытий. Кроме того, TiO_2 улучшает устойчивость ЛКМ к ультрафиолетовому излучению и повышает механическую прочность.
- **Графен** — двухмерный углеродный наноматериал с исключительной прочностью, гидрофобностью и электропроводностью. Включение графена в ЛКМ улучшает защиту от коррозии за счет формирования плотного барьера и уменьшения адгезии коррозионных продуктов.

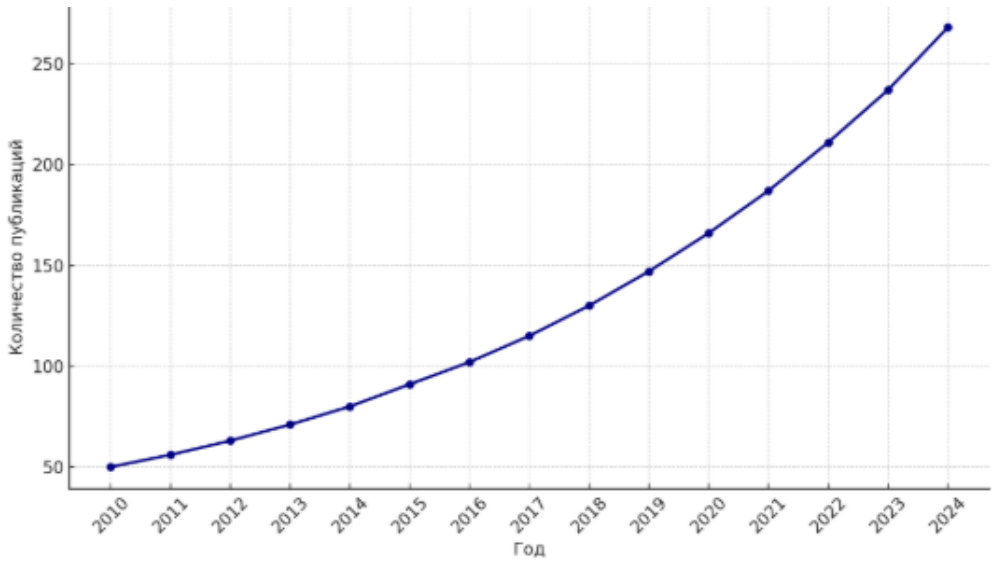


Рис. 1. *Динамика публикаций по наноматериалам в судовых ЛКМ (2010-2024)*

Анализ публикаций в международных научных базах данных (Scopus, Web of Science) демонстрирует стабильный рост числа исследований, посвящённых применению наноматериалов в судовых покрытиях за последние 15 лет. Это свидетельствует о возрастающем интересе и перспективности данного направления.

На рис. 1 представлен модельный график динамики публикаций по теме наноматериалов в судовых лакокрасочных материалах за 2010–2024 гг. Как видно из графика в последние годы наблюдается устойчивый рост интереса исследователей к наноматериалам.

Однако в морской среде судовые покрытия подвергаются не только коррозионному, но и биологическому воздействию, связанному с обрастанием поверхности микро- и макроорганизмами. Для предотвращения данного процесса в состав ЛКМ вводят биоцидные добавки, обеспечивающие подавление жизнедеятельности морской флоры и фауны на границе раздела «покрытие – морская вода». Использование биоцидов позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы, связанные с очисткой корпусов судов, а также улучшить гидродинамические характеристики и долговечность покрытий.

Биоциды для судовых покрытий можно условно разделить на две основные группы:

1. **Минеральные биоциды** – неорганические соединения с пролонгированным действием.

- **Оксид меди (Cu_2O)** — традиционный компонент с высокой биоцидной активностью, но с определёнными экологическими ограничениями.
- **Оксид цинка (ZnO)** — обладает умеренной биоцидной активностью, повышает белизну и стойкость покрытия к УФ-излучению.
- **Оксид церия (CeO_2)** — в первую очередь антикоррозионный ингибитор, но также замедляет развитие биоплёнок за счёт влияния на адгезию микроорганизмов.

2. **Органические биоциды** – синтетические соединения, разрушаемые в морской воде за определённый период, обеспечивающие контролируемое высвобождение активного вещества.

- Имидазолы, изотиазолиноны, трибутилоловянные соединения (в ряде стран запрещены).

Механизм действия минеральных биоцидов заключается в постепенном высвобождении ионов, которые нарушают метаболизм микроорганизмов и предотвращают их прикрепление к поверхности покрытия, оказывая нижеследующие эффекты:

- **Цитотоксическое воздействие** – разрушение клеточных мембран микроорганизмов (Cu_2O, органические биоциды).
- **Фотокаталитический эффект** – образование активных форм кислорода под действием света (ZnO, CeO_2).
- **Ингибирование адгезии** – создание поверхностных условий, препятствующих прикреплению организмов (CeO_2, гидрофобные органические модификаторы).

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика минеральных и органических биоцидов.

Как показывает мировой опыт, разработка и применение судовых лакокрасочных материалов с наномодификаторами и биоцидными добавками во многом определяется региональными стандартами, экологическими нормами и технологическим уровнем судостроительной отрасли в конкретных странах. При этом международные организации играют ключевую роль в формировании единых требований к защитным покрытиям:

- **IMO (International Maritime Organization)** – регламентирует использование противообрастающих покрытий, устанавливая запрет на органоолово-содержащие соединения и ограничивая использование высокотоксичных биоцидов.
- **REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)** – европейское регулирование, требующее оценки экологической и токсикологической безопасности всех химических компонентов ЛКМ.
- **BPR (Biocidal Products Regulation)** – дополняет REACH и определяет порядок регистрации и допуска биоцидных веществ в ЕС.

- **US EPA (United States Environmental Protection Agency)** – контролирует применение биоцидов в морских покрытиях в США, включая предельные нормы содержания меди и цинка.
- **Японские и корейские стандарты** — акцентируют внимание на долговечности покрытий и устойчивости к биообрастанию в условиях интенсивного судоходства.

Таблица 1

Сравнительная таблица минеральных и органических биоцидов

Биоцид	**Тип**	**Эффективность против водорослей**	**Эффективность против моллюсков**	**Антикоррозионный эффект**	**Экологическая безопасность**
Cu_2O	Минеральный	Высокая	Высокая	Средний	Средняя (ограничения норм)
ZnO	Минеральный	Средняя	Средняя	Средний	Высокая
CeO_2	Минеральный	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Изотиазолиноны	Органический	Высокая	Средняя	Нет	Средняя
TBT (запрещён)	Органический	Очень высокая	Очень высокая	Нет	Низкая

В таблице 2 представлены сравнительные нормативные требования к судовым ЛКМ со стороны международных организаций по использованию минеральных и органических биоцидов.

Как показывает мировая практика внедрения наномодификаторов и биоцидов в составы судовых ЛКМ, в европейских странах доминирует применение высокотехнологичных многофункциональных покрытий, сочетающих антикоррозионные и противообрастающие свойства. Большое внимание уделяется экологической безопасности — биоциды проходят строгую регистрацию в рамках REACH и BPR. Наблюдается рост интереса к нанокомпозиционным покрытиям с TiO_2, ZnO и CeO_2, которые обеспечивают долговечность и снижают частоту обслуживания судов.

В Японии и Южной Корее распространены системы с повышенной стойкостью к истиранию и воздействию морских микроорганизмов, ориентированные на долгосрочную эксплуатацию в условиях интенсивного судоходства. Китай активно инвестирует в разработку бюджетных, но эффективных наномодифицированных ЛКМ, в том числе с применением наномела и оксидов металлов. При этом экологические ограничения здесь мягче, чем в ЕС, что ускоряет внедрение инноваций.

США и Канада делают акцент на энергоэффективности судоходства за счёт снижения гидродинамического сопротивления. Популярны покрытия с низкой шероховатостью, в том числе силиконовые и фторполимерные, модифицированные наночастицами. Контроль за экологической безопасностью веществ осуществляется Агентством по охране окружающей среды (EPA), при этом допускаются более широкие диапазоны концентраций ZnO и Cu_2O, чем в ЕС, но с обязательным мониторингом выщелачивания.

Таблица 2

Сравнительные нормативные требования к судовым ЛКМ

Регламент / Страна	**Ограничения по биоциду Cu_2O**	**Ограничения по ZnO**	**Запреты на органические биоциды**	**Особенности**
IMO	Нет прямого запрета, но контроль по экотоксичности	Нет прямого запрета	Запрет TBT и аналогов	Международный стандарт
REACH (EC)	Требуется регистрация, оценка токсичности	Требуется регистрация	Ограничение по содержанию	Жёсткий экологический контроль
BPR (EC)	Подробная процедура допуска	Подробная процедура допуска	Полный контроль списка веществ	Усиленные требования к доказательной базе
US EPA (США)	Ограничение по концентрации	Ограничение по концентрации	Контроль отдельных веществ	Региональная специфика
Япония / Корея	Регулирование по сроку выщелачивания	Нет прямого запрета	Контроль органики	Ориентация на долговечность

Несмотря на значительные успехи в разработке судовых лакокрасочных материалов (ЛКМ) с наномодификаторами и биоцидными добавками, их широкое внедрение сопровождается рядом сложностей, связанных как с технологическими, так и с экологическими и экономическими факторами.

Мировая практика демонстрирует постепенное ужесточение норм, регулирующих применение биоцидов в судовых покрытиях. Международные и региональные регламенты (IMO, REACH, BPR, US EPA) требуют детальной оценки токсичности и долговременного воздействия используемых веществ. Особенно это касается медьсодержащих и органических биоцидов, которые при неконтролируемом выщелачивании могут негативно влиять на экосистемы портовых зон.

Интеграция наночастиц в традиционные ЛКМ требует оптимизации рецептуры, так как наноматериалы могут агломерироваться, снижая эффективность модификации. Кроме того, введение биоцидов в присутствии наномодификаторов может влиять на равномерность распределения активных веществ и адгезию покрытия.

Высокая стоимость синтеза и подготовки наноматериалов, а также регистрация новых биоцидных добавок увеличивают себестоимость готовой продукции. Для судовладельцев это может стать сдерживающим фактором, особенно в сегменте коммерческого флота с невысокой маржинальностью перевозок.

Отсутствие универсальных стандартов по оценке эффективности наномодифицированных и биоцидных покрытий в реальных морских условиях затрудняет их сертификацию и международное признание результатов испытаний. Это особенно актуально для инновационных составов, в которых применяются новые наноструктурированные материалы.

Как показывает анализ разработок иностранных ученых, в ближайшие годы прогнозируется значительный рост наноматериалов и биоцидов в ЛКМ. Это представлено графиком, показанным на рис. 2.

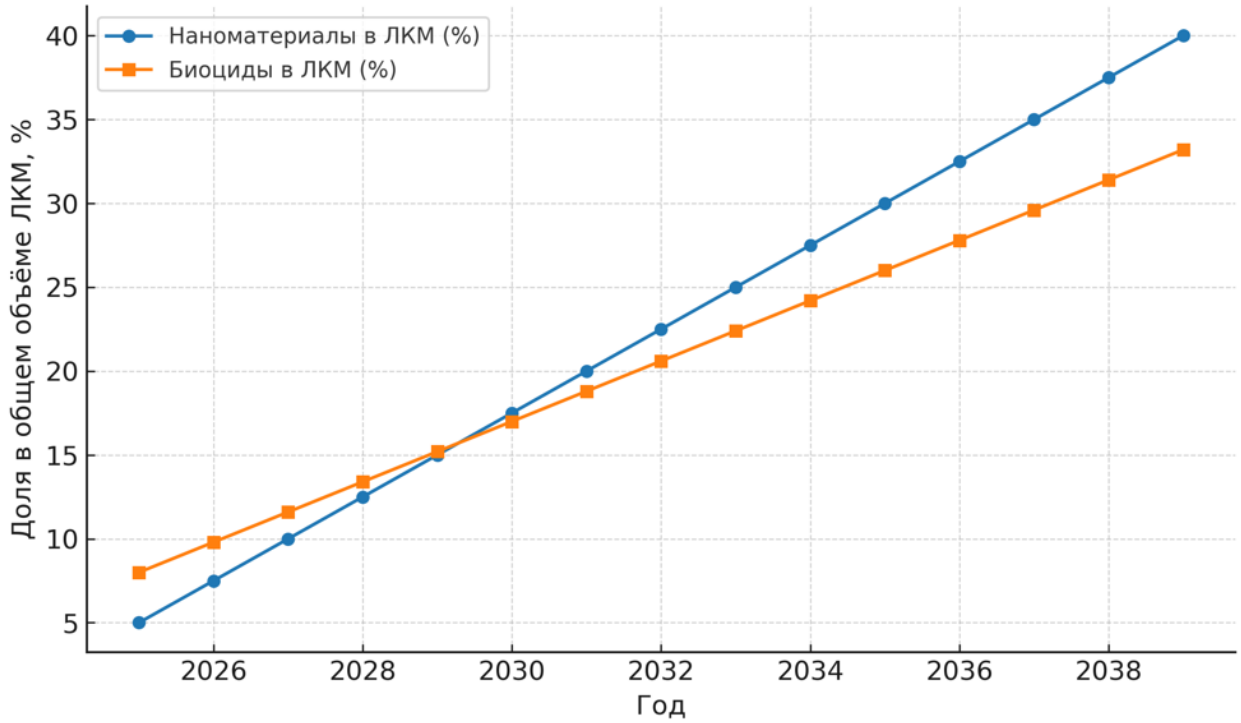


Рис. 2. *Прогноз развития технологий ЛКМ для судостроения (2026-2038)*

В ближайшие 10–15 лет развитие судовых лакокрасочных покрытий будет определяться сочетанием инновационных материалов, ужесточающихся экологических требований и переходом к технологиям «умных» покрытий.

Ключевыми направлениями развития станут:

- **Интеграция многофункциональных нанокомпонентов** (ZnO, CeO_2) в традиционные полимерные матрицы для повышения срока службы покрытия до 15–20 лет.
- **Разработка био- и экосовместимых биоцидов** на основе меди, цинка и редкоземельных элементов, обеспечивающих пролонгированный эффект против обрастания.
- **Применение интеллектуальных покрытий**, способных изменять свои свойства в зависимости от температуры, солёности воды и интенсивности обрастания.
- **Внедрение технологий аддитивного производства** (3D-печать элементов покрытия) и роботизированного нанесения ЛКМ на корпус судна.
- **Снижение содержания летучих органических соединений (ЛОС)** и переход к водоразбавляемым или высокотвёрдым системам, что соответствует мировым экологическим трендам.

Согласно модельному прогнозу (рис. 3), наибольший рост ожидается в сегменте ЛКМ с наномодификаторами на основе оксида цинка и оксида церия, обладающих одновременно высокими антикоррозионными и противообрастающими свойствами. Эти материалы будут востребованы в связи с их устойчивостью к агрессивным морским условиям и совместимостью с экологическими стандартами IMO и MARPOL.

Прогнозируется, что в течение ближайших 5–7 лет доля инновационных ЛКМ с нанокомпонентами на мировом рынке достигнет 35–40%, а к 2040 году – превысит 65%. При этом произойдёт смещение акцента от традиционных медьсодержащих биоцидов к многофункциональным нанодобавкам, обеспечивающим пролонгированную защиту. Также

ожидается более активное использование гибридных связующих, сочетающих свойства органических и неорганических полимеров, что позволит увеличить срок службы покрытий до 12–15 лет без ремонта.

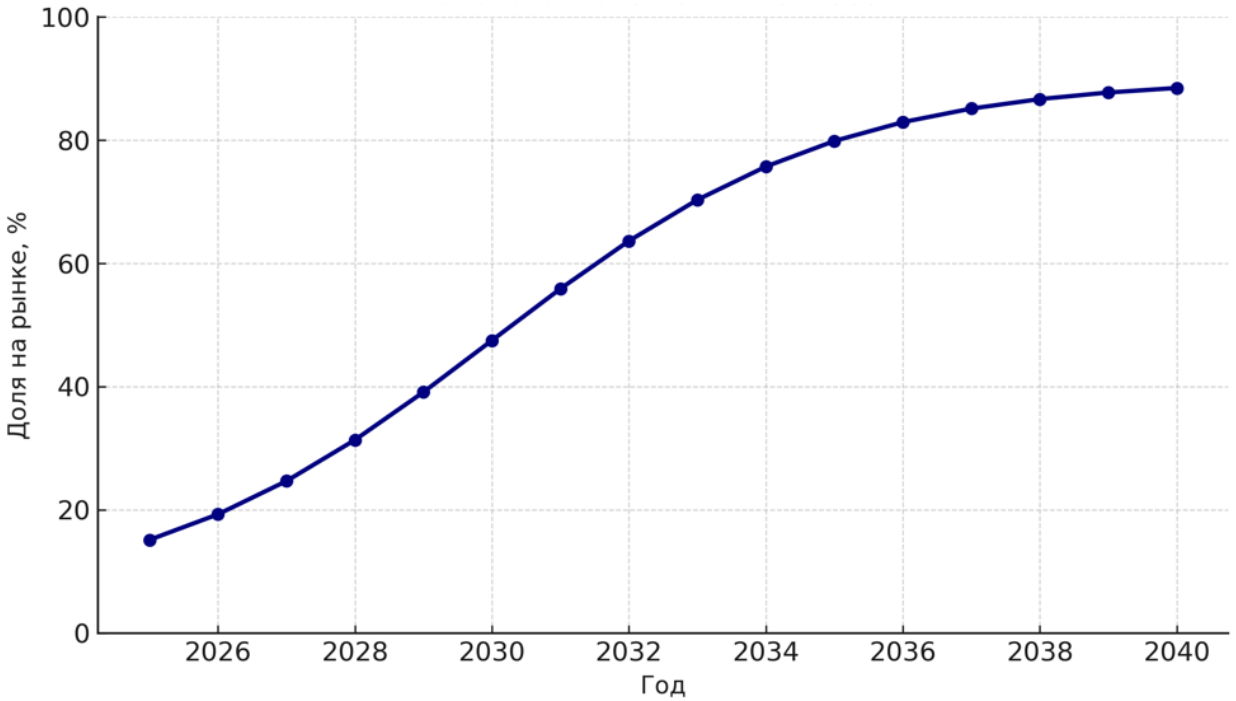


Рис. 3. *Модельный прогноз темпов внедрения инновационных судовых ЛКМ с нанокомпонентами ZnO и CeO_2*

Выводы.

1. Введение нанокомпонентов оксида цинка (ZnO) и оксида церия (CeO_2) в состав судовых лакокрасочных покрытий ПФ-115 обеспечивает комплексное улучшение их эксплуатационных характеристик в агрессивных морских условиях, включая повышение коррозионной стойкости, устойчивости к биообрастанию и механической прочности.
2. Результаты анализа показывают, что оксид цинка проявляет выраженные фотокаталитические и антибактериальные свойства, препятствующие развитию биопленок, а оксид церия играет роль мощного ингибитора коррозии, формируя защитную оксидную пленку на металлической поверхности.
3. Моделирование прогнозов на 10–15 лет указывает на значительное увеличение доли применения наномодифицированных ЛКМ в судостроении и судоремонте, что связано с их более длительным сроком службы и снижением затрат на обслуживание.
4. Комплексное применение ZnO и CeO_2 позволяет добиться синергетического эффекта: увеличение срока междокового периода эксплуатации судов, сокращение частоты перекрасок, снижение суммарных эксплуатационных расходов.
5. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация содержания нанокомпонентов, разработка новых композиционных матриц с наноструктурированными модификаторами, а также испытания покрытий в реальных морских условиях с учетом климатических и биологических факторов.
6. Внедрение наномодифицированных ЛКМ с ZnO и CeO_2 может стать ключевым технологическим трендом в судостроительной отрасли, обеспечивая переход к более экологичным и ресурсосберегающим решениям.

Литература

1. Хавкин, А.Я. Антикоррозионные лакокрасочные материалы: теория и практика. – М.: Химия, 2018. – 356 с.
2. Шульга, В.Н., Жуков, А.В. Наноматериалы в лакокрасочной промышленности. – СПб.: Политехника, 2019. – 284 с.
3. Nguyen, T., et al. "Nanostructured Coatings for Marine Anti-Corrosion Applications." *Progress in Organic Coatings*, vol. 142, 2020, 105–118.
4. Yuan, J., et al. "Synergistic Effect of ZnO and CeO_2 Nanoparticles on the Anti-corrosion Performance of Epoxy Coatings." *Corrosion Science*, vol. 180, 2021, 109–126.
5. ISO 20340:2020 – Paints and varnishes – Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures.
6. Callow, M.E., Callow, J.A. "Trends in the Development of Environmentally Friendly Fouling-Resistant Marine Coatings." *Nature Communications*, 2020, 11:146.
7. Ларионов, А.В., Смирнов, К.П. "Противообрастающие покрытия для морского флота: перспективы развития." *Судостроение*, №4, 2022, с. 21–28.
8. Li, Y., et al. "Cerium-based Conversion Coatings for Corrosion Protection: A Review." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, 2021, 157–188.

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. İsmayılov N.Ş.

UOT 629.5.083

GƏMİ AVADANLIQLARININ TƏMİRİNDƏ EHTİYAT HİSSƏLƏRƏ TƏLƏBATIN PROQNOZLAŞDIRILMASI

[1]Həsənov Y.N., [1,2]Çələbi İ.Q., [1] Rəhimov B.R.

[1] "Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
AZ1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç, 18
[1,2] "Azərbaycan Texniki Universiteti" PHŞ
AZ1073, Bakı şəh., H. Cavid pr., 25
E-mail: yusif_nadiroglu@mail.ru i_chalabi@aztu.edu.az

Xülasə. *Məqalədə gəmi avadanlıqlarının müxtəlif komponentlərinin yenilənməsi məqsədi ilə ehtiyat hissələrinin müəyyən istismar dövrü ərzində və ya təmir tsikli üzrə tələb olunan miqdarının proqnozlaşdırılması məsələsinə baxılmışdır. Bu məqsədlə həmin komponentlərin imtinalarının paylanma qanunlarını düzgün seçmək və imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığını müəyyənləşdirmək mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Yalnız lazım olan sayda ehtiyat hissələrinin saxlanması ambar xərclərinin minimum olmasına imkan verir. Ambarlarda həmişə ehtiyat hissəsinin olması isə imtinalar zamanı boşdayanmaların azalmasına, istehsalat prosesinin intensivləşməsinə və əmək məhsuldarlığının yüksəlməsinə səbəb olur. Elektrik mühərrikləri misalı üzərində irəli sürülən metodika tətbiq olunmuş və 10 il istismar dövründə illər üzrə tələb olunan ehtiyatın miqdarı təyin olunmuşdur.*

Abstract. *The article considers the issue of forecasting the required number of spare parts for a certain period of operation or for a repair cycle in order to update various components of the ship's equipment. To this end, it is important to choose the right laws for the distribution of failures of these components and determine the dependence of the failure rate on time. Storing only the*

required number of spare parts minimizes storage costs. And the constant availability of spare parts in warehouses leads to reduced downtime in case of failures, intensification of the production process and increased labor productivity. Using the example of electric motors, the proposed methodology was applied and the amount of requested stock was determined by year over 10 years of operation.

Аннотация. *В статье рассмотрен вопрос прогнозирования требуемого количества запасных частей на определенный период эксплуатации или на ремонтный цикл с целью обновления различных узлов судового оборудования. С этой целью важно правильно выбрать законы распределения отказов этих компонентов и определить зависимость интенсивности отказов от времени. Хранение только необходимого количества запасных частей позволяет минимизировать складские расходы. А постоянное наличие запасных частей на складах приводит к уменьшению простоев при отказах, интенсификации производственного процесса и повышению производительности труда. На примере электродвигателей была применена предложенная методика и определена количество запрашиваемого запаса по годам в течение 10 лет эксплуатации.*

Açar sözlər: *gəmi avadanlıqları, təmir, ehtiyat hissələri, imtinaların paylanma qanunu, imtinalar intensivliyi*

Key words: *marine equipment, repairs, spare parts, failure distribution, failure rate*

Ключевые слова: *судовое оборудование, ремонт, запасные части, закон распределения отказов, интенсивность отказов*

Giriş. Gəmilərin və onlar üzərində quraşdırılan avadanlıqların əksər komponentlərinin iş qabiliyyəti bərpa olunan texniki sistemlərə aid olduğu üçün təmir prosesində boşdayanma vaxtının azaldılması üçün ehtiyat hissələrinin lazımi sayının ambarda saxlanması mühüm əhəmiyyət daşıyır. Buraya ilk növbədə avadanlıqların yeyilməyə məruz qalan və periodik olaraq dəyişdirilən detal və düyünləri, təsadüfi imtinalar nəticəsində sıradan çıxan elektrik və elektromaqnit komponentlər və s. aiddir. Belə komponentlərə dişli çarx reduktorlarını, friksion və elektromaqnit muftaları, elektrik mühərriklərini və s. daxil etmək olar. Bir çox hallarda avadanlığın hər hansı bir blokunun, məsələn reduktorun, elektrik mühərrikinin və s. bərpa olunması mümkünsüz ola bilər. Ona görə də bu cür komponentlərin müəyyən sayda ehtiyatının ambarda saxlanması zəruridir.

Tələb olunan ehtiyat hissələrinin təyini. Ehtiyat hissələrinə olan tələbatın proqnozlaşdırılması adətən layihələndirmə mərhələsində yerinə yetirilir. Amma bu mərhələdə ehtiyat hissələrinin adətən yalnız nomenklaturu müəyyən edilir. Ehtiyat hissələrinin tələb olunan sayı isə yalnız sınaq nümunələrinin sınağından alınan və analoq avadanlığın istismarı prosesində əldə olunan statistik informasiyaların analizindən sonra dəqiqləşdirilir. Bu analizi avadanlığın əvvəlcə ən böyük blok və düyünləri üçün, sonra isə daha kiçik komponentləri və detalları üçün aparmaq daha məqsədyönlüdür. Ümumi halda ehtiyat hissələrin nomenklaturunun təyini aşağıdakı sıralama ilə aparılır [1, 2]:

1) İstismar müddətində komponentin yenilənmə sayının riyazi gözləməsi təyin edilir:

$$a = nN\lambda T. \tag{1}$$

burada N – ehtiyat hissələri tələb olunan avadanlıqların sayı;
n – bir avadanlıqda olan eyni tip komponentlərin sayı;
λ – baxılan komponentin yenilənmələrinin intensivliyi;
T – avadanlığın istismar müddətidir.

2) Ehtiyat hissələrin dəyişdirilməsi ilə bağlı xərclər aşağıdakı ifadə ilə hesablanır:

$$C_e = \frac{C_{aq} + aC_d}{N}. \quad (2)$$

burada C_{aq} – ehtiyat hissənin dəyişdirilməsində istifadə olunan alət və qurğuların dəyəri;
C_d – dəyişdirilən ehtiyat hissənin dəyəridir.

3) İstismar müddəti ərzində ehtiyat hissələrin dəyişdirilməsi yolu ilə bir avadanlığın bərpa olunmasına sərf olunan zaman (saatlarla) təyin olunur:

$$T_{mb} = \frac{a \cdot t_e}{N}. \quad (3)$$

burada t_e – bir ehtiyat hissənin dəyişdirilməsinə sərf olunan zaman müddətidir.

(1) ifadəsi avadanlığın hər hansı komponentinin imtinadan sonra yenilənməsi üçün tələb olunan ehtiyat hissələrinin bütün istismar müddəti ərzində miqdarını təyin etməyə imkan verir. Lakin avadanlığın sıradan çıxan komponentlərinin bütün istismar müddəti ərzində lazımi ehtiyatının saxlanması böyük məsrəf və ambar sahəsi tələb edir. Digər tərəfdən, imtinalar intensivliyinin qiyməti çox nadir hallarda bütün istismar müddəti ərzində sabit olur. Bu o deməkdir ki, hər hansı bir komponentə görə tələb olunan ehtiyat hissələrinin miqdarı istismarın müxtəlif mərhələlərində imtinalar intensivliyinin qiymətindən asılı olaraq dəyişə bilər. Ona görə də ehtiyat hissələri saxlanılacaq komponentlərin imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığını düzgün təyin etmək və bunun əsasında müəyyən istismar mərhələləri üzrə tələb olunan miqdarda ehtiyat hissələrinin saxlanması mühüm iqtisadi əhəmiyyət kəsb edir. Məsələn, aylar, rüblər, illər və ya təmir tsiklləri üzrə tələb olunan ehtiyat hissələrinin miqdarının təyin edilməsi daha optimaldır. Qeyd olunanları nəzərə alaraq müəyyən Δt_i istismar dövrü ərzində (ay, rüb, il və s.) tələb olunan ehtiyat hissələrinin miqdarını [2]-də irəli sürülən metodika əsasında aşağıdakı kimi təyin etmək olar:

$$m_i = n \cdot N \cdot \lambda(t_i) \cdot \Delta t_i, \text{ əgər } \lambda(t_i) \cdot \Delta t_i \leq 0{,}2 \text{ olarsa;} \quad (4)$$

və ya

$$m_i = n \cdot N \cdot \left(1 - e^{-\lambda(t_i) \cdot \Delta t_i}\right), \text{ əgər } \lambda(t_i) \cdot \Delta t_i > 0{,}2 \text{ olarsa.} \quad (5)$$

Burada Δt_i – ehtiyat hissələrinin miqdarının təyin olunduğu istismar dövrü;
$\lambda(t_i)$ – baxılan istismar dövründə imtinalar intensivliyinin riyazi gözləməsidir.

(4) və (5) ifadələrindən göründüyü kimi istismarın hər hansı bir dövründə tələb olunan ehtiyat hissələrinin sayını təyin etmək üçün imtinalar intensivliyinin həmin zaman intervalında qiyməti məlum olmalıdır. Avadanlığın hər hansı bir komponentinin imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığını müəyyən etmək üçün onun həyat tsiklinin son mərhələsində - yəni istismar prosesində yaranan imtinalar haqqında statistik məlumatların əldə olunması mühüm əhəmiyyət daşıyır. Lakin bu məlumatların əldə olunması üçün bütün istismar dövrü ərzində çox sayda avadanlıq üzərində sınaq və müşahidələrin aparılması lazım gəlir. Bu isə böyük vaxt və zəhmət tələb edən bir prosesdir, ona görə də praktikada etibarlığın qiymətləndirilməsi üçün mövcud statistik modellərdən istifadə edirlər. Hal-hazırda avadanlıqların və onların struktur elementlərinin etibarlığının qiymətləndirilməsində onlarla müxtəlif statistik model - klassik paylanma qanunu istifadə edilir. Hər bir avadanlığın etibarlığının düzgün qiymətləndirilməsində statistik modelin və onun parametrlərinin düzgün seçilməsi mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Seçilən statistik model imtinaların faktiki paylanmasını kifayət qədər düzgün əks etdirməlidir.

İmtinalar intensivliyinin paylanma qanununun seçilməsi. Gəmi avadanlıqlarında geniş istifadə olunan elektrik mühərriklərinə ehtiyat hissəsi kimi olan tələbatın proqnozlaşdırılması məsələsinə baxaq. Eksperimentlər əsasında sübut olunmuşdur ki, elektrik mühərriklərində sıradan çıxma səbəblərinin təxminən 92 - 95%-i faza sarğılarının sıradan çıxması və yalnız 2 - 5%-i

yastıqlarda yaranan nasazlıqlarla bağlıdır [3]. Elektrik mühərriklərində ən tez sıradan çıxan komponentin faza sarğıları olması onların çoxsaylı olması və ardıcıl birləşdirilməsidir. Hər hansı bir sarğının izolyasiya qatında yaranan nasazlıq qısa zamanda digərlərinə də təsir göstərir və nəticədə bütün sistem sıradan çıxır. Sarğı naqillərinin izolyasiyasının yüksək etibarlığa malik olmasını təmin etmək üçün xüsusi materialların və texnologiyanın tətbiqi tələb olunur. Bu isə çox baha başa gəlir və məhsulun maya dəyərinin artmasına gətirir. Müəyyən olunmuşdur ki, elektrik mühərriklərinin ümumi imtinalarının 35%-i hazırlanma xətaları ilə, 50%-i istismar şərtlərinin pozulması (məsələn, qızmanın qarşısının alınmaması) ilə və yalnız 15%-i konstruksiyaetmədə yol verilən xətalar ilə əlaqədardır.

[4] və [5]-də aparılan araşdırmalar göstərmişdir ki, elektrik mühərrikinin imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığı aşağıdakı düsturla ifadə edilə bilər:

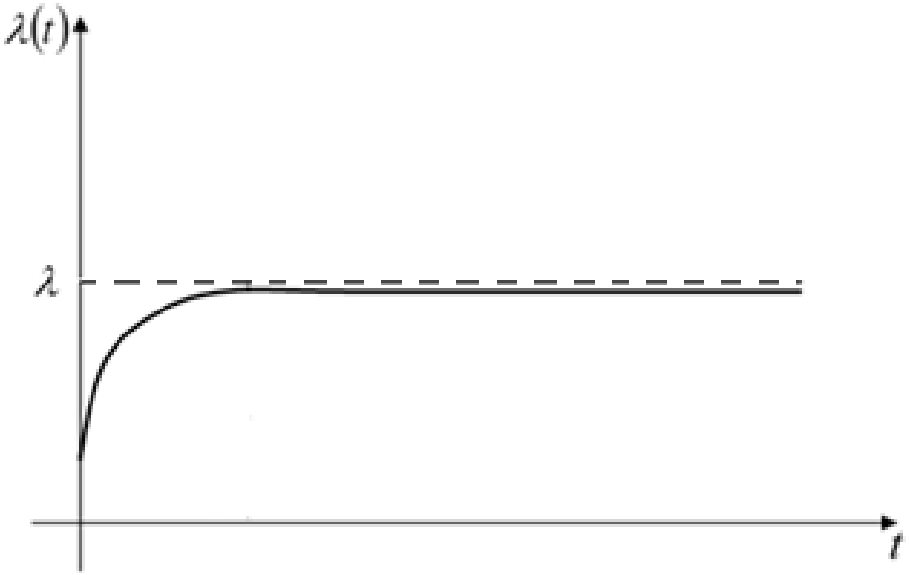
$$\lambda(t) = \lambda\left(1 + \alpha \cdot e^{\beta t}\right). \tag{6}$$

burada λ – istismarın başlanğıcında imtinalar intensivliyinin qiymətini nəzərə alır. λ-nın kiçik qiymətlərində istismarın başlanğıc dövründə imtinalar intensivliyi də kiçik olur;

α – paylanmanın forma əmsalıdır;

β – imtinalar intensivliyinin zamandan asılı olaraq dəyişmə xarakterini göstərir.

Şəkildə təklif olunan paylanmanın qrafiki əks olunmuşdur.



Şəkil. *İmtinalar intensivliyinin zamandan asılılığı*

Aparılan araşdırmalar göstərmişdir ki, elektrik mühərrikləri üçün təklif olunan paylanmanın parametrləri λ=0,08 il^{-1}; α=-1; β=-1 il^{-1} olmuşdur [5]. Təqdim olunan metodika əsasında gəmi avadanlıqlarında istifadə olunan N=100 sayda elektrik mühərrikinin istismarı zamanı T=10 il ərzində illər üzrə tələb olunan ehtiyat hissələrinin sayını təyin edək. İmtinalar intensivliyinin qiymətlərini (4) və (5) düsturlarında nəzərə almaqla illər üzrə tələb olunan ehtiyat hissələrin sayını təyin etmək olar. Aparılan hesablamaların nəticələri cədvəldə daxil edilmişdir. Cədvəldən göründüyü kimi, 10 il istismar müddəti ərzində N=100 sayda elektrik mühərriki üçün tələb olunan ehtiyat hissələrin sayı imtinalar intensivliyinə uyğun şəkildə dəyişir.

Elektrik mühərriki üçün tələb olunan ehtiyat hissələrinin sayı

İnterval №-si	Zaman intervalı, il	İmtinalar intensivliyinin riyazi gözləməsi, $\lambda(t_i)$	İntervallar üzrə tələb olunan ehtiyat hissələrinin sayı, m_i
1	0 – 1	0,032	3
2	1 - 2	0,062	6
3	2 - 3	0,073	7
4	3 - 4	0,078	8
5	4 - 5	0,079	8
6	5 - 6	0,08	8
7	6 - 7	0,08	8
8	7 – 8	0,08	8
9	8 – 9	0,08	8
10	9 - 10	0,08	8
Cəmi			72

Nəticə. Beləliklə, gəmi avadanlıqlarının müxtəlif komponentlərinin yenilənməsi məqsədi ilə ehtiyat hissələrinin müəyyən istismar dövrü ərzində və ya təmir tsikli üzrə tələb olunan miqdarını proqnozlaşdırmaq üçün həmin komponentlərin imtinalarının paylanma qanunlarını düzgün seçmək və imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığını müəyyənləşdirmək mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Yalnız lazım olan sayda ehtiyat hissələrinin saxlanması ambar xərclərinin minimum olmasına imkan verir. Ambarlarda həmişə ehtiyat hissəsinin olması isə imtinalar zamanı boşdayanmaların azalmasına, istehsalat prosesinin intensivləşməsinə, əmək məhsuldarlığının yüksəlməsinə səbəb olur və beləliklə də praktikada yüksək səmərə verə bilər.

Ədəbiyyat

1. Бабаев С.Г. Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования. Учебник// С.Г. Бабаев, И.А. Габибов, Р.Х. Меликов. - Баку: - изд. АГНА, -2015. - 400 с.
2. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. Монография/В.М. Труханов. Москва: «Машиностроение», -2003. - 320 с.
3. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – Москва: «Академия», -2010. – 288с.
4. Гирфанов А.А. Электромагнитная совместимость погружного электрооборудования предприятий нефтедобычи и разработка комплекса мер по повышению надежности его работы/Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. –Самара: -2005. – 229 с.
5. Гасанов Ю.Н. Регулирования триботехнических характеристик поверхностей деталей. Monoqrafiya Элм .Баку 2001, 315 стр.
6. Гасанов Ю.Н. Износ поверхности вада с учётом контактирующего взаимодействия с втулкой. Проблемы прикладной механики. №1(16), Тбилиси 2002.
7. Chalabi I. An alternative failure distribution for reliability evaluation of diverse technological systems//Journal of Failure Analysis and Prevention. 2021. https://doi.org/10.1007/s11668-021-01244-1

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. İsmayılov N.Ş.

UOT 621.923.5

MÜASİR RPİ HONLAMA DƏZGAHLARINDA SƏTHİN KEYFİYYƏT GÖSTƏRİCİLƏRİNİN TEXNOLOJİ ÜSÜLLARLA ARTIRILMASI

[1]Həsənov Y.N., [2]Əziz S.Ş.

[1]"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
AZ1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
[2]"Azərbaycan Texniki Universiteti" PHŞ
AZ1073, Bakı şəh., H. Cavid pros., 25
E-mail: yusif_nadiroglu @mail.ru, sarvan_e@hotmail.com

Xülasə. *Məqalədə gəmiqayırma sənayesində istifadə olunan yüksək dəqiqlikli detalların istehsalında istifadə olinan RPİ honlama dəzgahlarında keyfiyyət göstəricilərinin yüksəldilməsi məsələlərinə baxılmışdır. Seçilmiş dəzhahın mexaniki emal imkanları, eləcə də pəstah materialının fiziki-mexaniki və texnoloji xüsusiyyətlərinin analizi əsasında səth keyfiyyətinin formalaşmasının texnoloji qanunauyğunluğu analiz edilmişdir. RPİ honlama dəzgahlarında texnoloji əməliyyatların tətbiqi zamanı səthin mikrohəndəsəsi, həmçinin səth qatı keyfiyyətinin formalaşmasına təsir göstərən əsas faktorlar analiz edilərək, optimal keyfiyyətin əldə olunması üçün emal prosesinin əsas giriş parametrlərinin təyini üzrə aparılmış təcrübələrin nəticələri təqdim edilmişdir.*

Abstract. *This article examines improving quality performance on CNC honing machines used to produce high-precision parts in the shipbuilding industry. Based on an analysis of the mechanical capabilities of the selected machine, as well as the physical, mechanical, and technological properties of the workpiece, the technological principles of surface quality formation are studied. The key factors influencing surface microgeometry and surface layer quality during CNC honing operations are analyzed. The results of experiments to determine the key input parameters of the machining process to achieve optimal quality are presented.*

Аннотация. *В статье рассматриваются вопросы повышения показателей качества на станках хонингования с ЧПУ, применяемых при производстве высокоточных деталей в судостроительной промышленности. На основе анализа механических возможностей выбранного станка, а также физико-механических и технологических свойств обрабатываемого материала, изучены технологические закономерности формирования качества поверхности. Проанализированы основные факторы, влияющие на микрогеометрию поверхности и качество поверхностного слоя при выполнении технологических операций на станках хонингования с ЧПУ. Представлены результаты экспериментов по определению основных входных параметров процесса обработки для достижения оптимального качества.*

Açar sözlər: *RPİ honlama dəzgahı, bərklik, xüsusi təzyiq, ölçü dəqiqliyi, kələ-kötürlük*
Key words: *CNC honing machines, hardness, special pressure, accuracy, surface roughness*
Ключевые слова: *станках хонингования с ЧПУ, твердость, удельное давление, точность, шероховатость поверхности*

Giriş. X5CrNi18-10 (DIN/EN 1.4301, AISI 304) markalı polad gəmiqayırma sənayesində bir çox məsul detalların istehsalında geniş tətbiq olunur və "EN 10250-4: 2000 Stainless steels" standartının tələbləri əsasında istehsal olunur. Kimyəvi tərkibi bir çox legirləyici elementlərlə zəngindir və əsasən "Austenitic stainless steel" klassifikasiyası üzrə təsnif olunur.

Tərkibindəki xrom nə nikelin məlum miqdarı bu markanın fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, korroziyaya davamlığı və əsasən də mexaniki emalolunma qabiliyyətini şərtləndirir. Bu markalı poladların yüksək mexaniki emalolunma və qənaətbəxş fiziki-mexaniki xassələri vardır. Bir çox

təsnifatına görə bu poladdan müxtəlif təyinatlı yayma boruları və s. istehsal olunur ki, bəzi hallarda da bunlar hanlama əməliyyatına cəlb olunur.

Cədvəldə **X5CrNi18-10 (1.4301): EN 10088-2-2005** markalı poladın əsas kimyəvi tərkibi verilmişdir.

Cədvəl

X5CrNi18-10 markalı poladın kimyəvi tərkibi

C	*Si*	*Mn*	*Ni*	*P*	*Cr*	*S*	*N*
mak. 0,07	**mak. 1**	**mak. 2**	**8- 10,5**	**mak. 0,045**	**17,5-19,5**	**mak. 0,015**	**mak. 0,11**

Mexaniki emalolunma xüsusiyyətinə əsasən materialın bərklik göstəricisi təsir göstərir ki, adıçəkilən poladın bərkliyi – Vikkers (HV), (+CR) 220-450, Brinel (HB), (+AT) 215 kimidir. Bərklik ədədinin artması ilə materialın kəsilməyə qarşı müqaviməti də artır, bu da öz növbəsində kəsmə qüvvəsinin yüksək qiymətdə seçilməsini şərtləndirir. Nəticə olaraq texnoloji sistem elementlərinin titrəməsi daha böyük diapazonlarda dəyişir ki, bu da səthin kələ-kötürlüyünün yüksəlməsinə gətirib çıxarır.

Hal-hazırda dünyada əsasən ABŞ-ın Sunnen (Şəkil 1 a) və Almaniyanın Kadia (Şəkil 2 b) Dəzgahqayırma Şirkətlərinin istehsalı olan RPİ honlama (şaquli və üfüqi) dəzgahları geniş yayılmışdır. Bu daəzgahlar yüksək dəqiqlik və həm manual, həm də rəqəmli proqramla idarəolunma xüsusiyyətinə malikdirlər.



a)

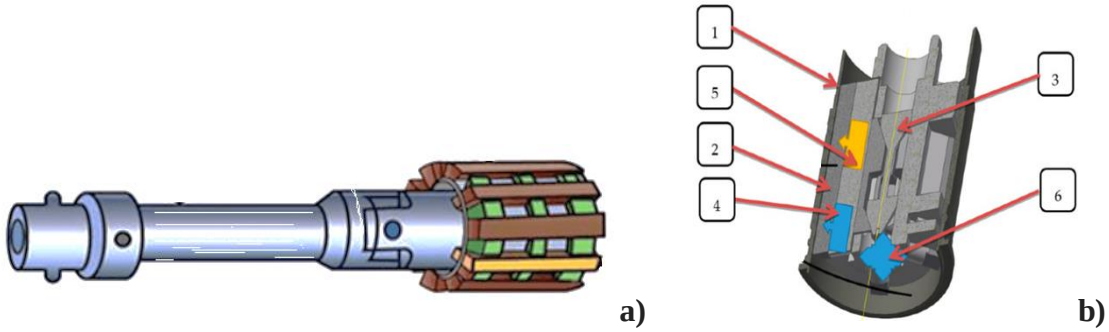


b)

Şəkil 1. *Müasir rəqəmli-proqramla idarəolunan honlama dəzgahları:*
a) Sunnen SV-15 FHM markalı RPİ honlama dəzgahı,
b) Single-spindle honing machine M 1200

Əsas hissə. Honlanma əməliyyatı tamamlama əməliyyatı olaraq, mikrometrik həddə həndəsi forma sapması (Δ) və səth keyfiyyətini (Rz, Ra) minimal həddlərdə formalaşdıran əvəzolunmaz texnoloji əməliyyat kimi tətbiq olunur. Yüksək dəqiqlikli detalların mikrohəndəsi ölçüləri, səth və səth qatı keyfiyyəti və səthin yeyilməyə davamlığının lazımi hədlərdə formalaşması üçün honlama əməliyyatı müxtəlif metodlarla aparılır. İstehsalatda RPİ honlama dəzgahlarının seçilməsi emal rejimi elementlərinin avtomatik tənzimlənməsi və nəticə olaraq, səthin kələ-kötürlük dərəcəsinin lazımı hədlərdə saxlanılmasını şərtləndirir. Hon başlığının ağırlığının profil müstəvisi üzrə emal olunan səthə təsirini nəzərə alaraq, bir çox hallarda dəzgah şpindelini şaquli vəziyyətdə yerləşdirirlər. Nəzərə alsaq ki, bütün honlama dəzgahlarında hon başlığı dəzgahın şpindeli ilə birlikdə konsol tir şəklində hazırlanır [2, 7].

Rəqəmli proqrqmla idarəolunan dəzgahlarda əsas etibarilə özütənzimlənən “smart” honlama başlıqlarının seçilməsi keyfiyyət göstəricilərinə müsbət təsir göstərir. Şəkil 2-də sadə konstruksiyalı (a) və özütənzimlənən (b) sürtmə başlıqları təsvir edilmişdir [5].



Şəkil 2. *Honlama başlıqlarının əsas konstruksiyaları:*
(a) sadə konstruksiyalı və (b) özütənzimlənən sürtmə başlıqları

Emal olunan səthin keyfiyyət göstəricisi kimi kələ-kötürlük (Ra) öz aralarında qarşılıqlı əlaqələri olan çoxsaylı amillərdən asılıdır

Yüksək keyfiyyət göstəricilərinin əldə edilməsi üçün aparılmış təcrübələrin nəticələrinin adekvatlığı Koxren kriteriyası ilə yoxlanılmışdır. Amillərin kodlaşdırılmış qiymətləri üçün prosesin reqresiya modeli əldə edilmişdir. Qurulmuş riyazi modeldən məlum olur ki, səth keyfiyyətinə əsas təsiri x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 amilləri göstərir. Fişer kriteriyasına görə yoxlama α=0,05 qiymət səviyyəsi üçün seçilmiş modelinin adekvat olduğunu təsdiqləyir [3].

$$\hat{y}_{Ra} = 0{,}29 - 0{,}012x_1 - 0{,}021x_2 + 0{,}014x_3 + 0{,}019x_4 - 0{,}021x_5 - \\ -0{,}016x_2 - 0{,}010x_1x_4 - 0{,}015x_1x_5 + 0{,}027x_2x_3 + 0{,}015x_2x_4 - \\ -0{,}015x_2x_5 + 0{,}019x_3x_5 + 0{,}018x_4x_5 + 0{,}012x_1^2 + 0{,}026x_2^2 + \\ +0{,}016x_3^2 + 0{,}015x_4^2 - 0{,}031x_5^2 \quad (1)$$

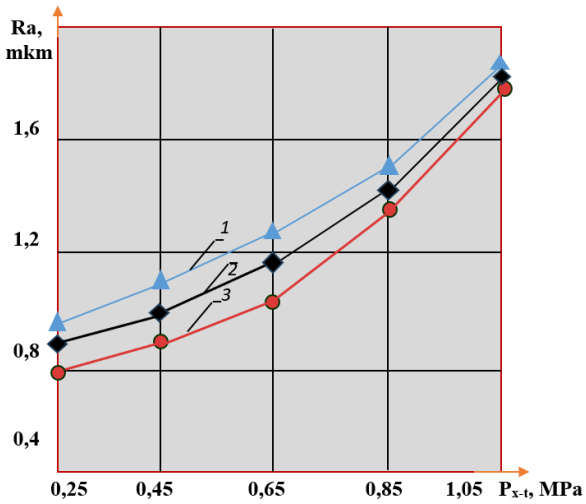
Hesablamalar üzrə müvafiq çevirmələrdən sonra əldə edilmiş asılılıq (1) amillərin natural qiymətləri üçün aşağıdakı formada olmuşdur:

$$R_a = 0{,}158 + 0{,}029V_{i-g} - 0{,}124V_f + 0{,}223P_{x.t} + 0{,}399Z - 0{,}27T + \\ +0{,}339V_{i-g}V_f - 0{,}018V_{i-g}V_fZ - 0{,}149V_fP_{x.t} + 0{,}261P_{x.t}T + \\ 0{,}237P_{x.t}Z + 0{,}014V_{i-g}^2 + 0{,}155V_f^2 + 0{,}279P_{x.t}^2 + 0{,}329Z^2 - 0{,}271T^2 \quad (2)$$

Seçilmiş metodikaya əsasən, RPİ dəzgahların əsas giriş parametrləri avtomatik şəkildə tənzimlənən honlama əməliyyatı üçün səthin optimal kələ-kötürlüyünün təmini məqsədilə, prosesin əsas parametrlərinin optimal qiymətləri təyin edilmişdir - **$V_{i.g}$=0,19 m/san, V_f=0,45 m/san, $P_{x.t}$=0,69 MPa, Z=174 mkm, T=88 san.**

X5CrNi18-10 markalı poladın daxili silindrik səthinin honlama əməliyyatının əsas parametrlərinin işçi səthin kələ-kötürlüyünə təsirinin ümumi texnoloji qanunauyğunluğu eksperimental olaraq tədqiq olunmuş və müvafiq funksional asılılıqlar əldə olunmuşdur. Səthə göstərilən xüsusi təzyiqin (Px.t) qiymət artımı materialın fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərinin, eləcə də səthin kələ-kötürlüyünün pozulması ilə nəticələnir. ($P_{x.t}$)-nin qiymət artımı ilə səthin kələ-kötürlüyü (R_a) da artır (Qrafik 1). Təzyiqin artması ilə soyuducu-yağlayıcı səth qatı dağılır, kəsilən metal qatına düşən yük artır, bu da istiliyin ayrılmasına–səth qatı materialının plastiklənməsinə gətirib çıxarır ki, nəticədə detal səthinin möhkəmliyi azalır [3, 8, 17]. Daxili slindrik səthlərin honlama prosesində xüsusi təzyiqin artması hesabına hon başlığı ilə detal arasında optimal araboşluğun faktiki olaraq yaranmaması kəsmə zonasından yonqarın kənar olunmasını çətinləşdirir və başlığın səthi üzrə dənəciklərin bərabər paylanma şərtini pozur. Nəticədə emal olunan səthdə cızıqlar və şırımlar yaranır və onların üzərində kiçik ölçülü yonqar və abraziv dənələri yığılır [1,

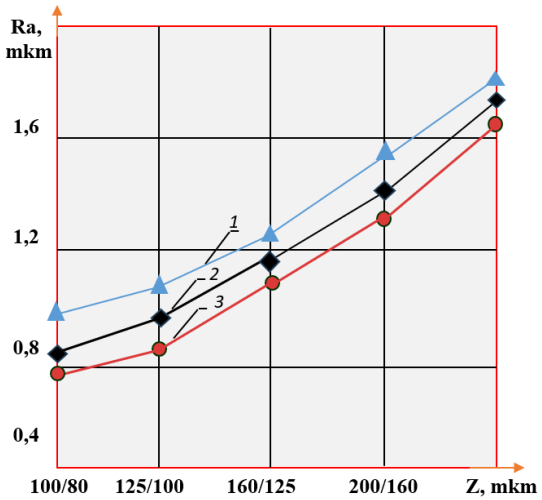
6]. Səthə istiqamətlənmiş aşağı təzyiqlərdə plastik deformasiya yalnız səthin nahamarlıqlarının (çıxıntıların) uc hissələrinin kəsilməsində müşahidə olunur.



Qrafik 1. *Kələ-kötürlüyün xüsusi təzyiqdən asılılığı: (1, 2, 3 – uyğun olaraq, irəli-geri hərəkət sürətinin V_{i-g}=0,12, 0,16 və 0,21 m/san qiymətlərində)*

Kələ-kötürlüyün qiyməti azaldıqca, səthin abraziv dənəcikləri ilə təması ciddi şəkildə artır və prosesin sonuna yaxın dənəciklər parçalanır. Bu hal honlama gücünün artması, kəsmə zonasında temperaturun yüksəlməsi və üst səthin yumşalmış materialının abraziv dənəcikləri ilə gücləndirilmiş qaydada tutulması ilə nəticələnə bilər [6, 7, 17]. Xüsusi təzyiqin qiymətinin 0,78-dən 1,05 MPa qədər artırılması səthdən metal çıxarılmasını tədricən artırır, sonrakı artımda isə alət suvaqlaşır ki, bu da metal çıxarılmasının azalmasına gətirib çıxardır.

Qrafik 2-dən göründüyü kimi dənəvərliyinin (Z) artması ilə emal olunan səthin kələ-kötürlüyü (R_a) əhəmiyyətli dərəcədə artır. Səthin kələ-kötürlüyü R_a-nın artması dənəvərliyinin artması, həm də dənələrin həndəsi forma quruluşundan asılılığı güman olunur. Belə ki, dənəvərliyin yüksəlməsi ilə hər bir vahid dənəciyin çıxardığı qatın sahəsi artır, bu da səth qatının mikrorelyefindəki qanovcuqların en kəsiklərinin artmasına gətirir, nəticədə səthin kələ-kötürlüyü R_a-nın qiyməti artır.

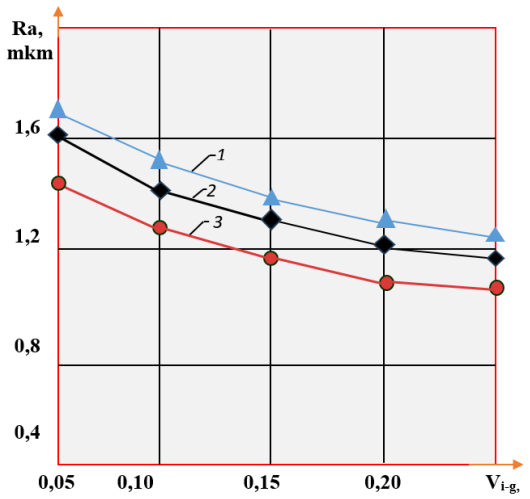


Qrafik 2. *Kələ-kötürlüyün abraziv dənəvərliyindən asılılığı; (1, 2, 3–uyğun olaraq, irəli-geri hərəkət sürətinin V_{i-g}=0,12, 0,16 və 0,21 m/san qiymətlərində)*

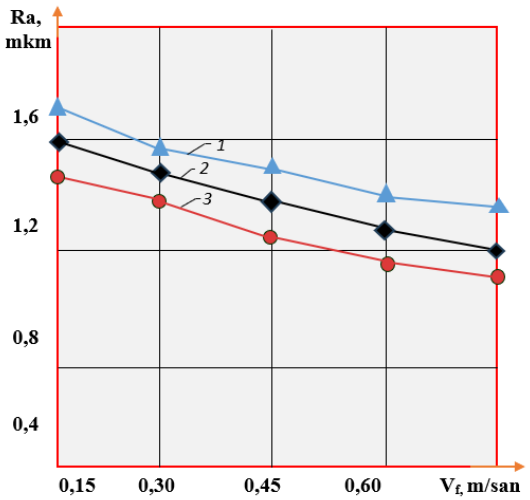
Dənəvərliyin dəyişilməsi ilə ümumilikdə kəsmə prosesi, həm də emal olunan metalla dənəcik arasındakı bütün növ əlaqə də dəyişilir. Bu qarşılıqlı təsirə kontakt zonasındakı dənələrin vəziyyəti və hərəkətləri də nəzərəçarpacaq dərəcədə təsir göstərir [8, 11]. Əgər xırda abraziv dənələri emal prosesində nisbətən stabil vəziyyətə malikdirsə, daha böyük dənələri olan bülöv daşları tətbiq olunduqda mexaniki kəsmənin payı artır.

Qrafik 3 və 4-dən göründüyü kimi, honlama başlığının irəli-geri (V_{i-g}) və fırlanma (V_f) hərəkət sürətlərinin artması ilə emal olunan səthin kələ-kötürlüyü azalır. Honlama başlığında müəyyən təzyiq olduqda abraziv dənəcikləri ilə kəsmə baş verir, fırlanma sürətinin aşağı qiymətlərində üst səth qatındakı metalın yumşalması üçün lazım olan istilik miqdarı və mikrorelyefin plastik hamarlanması yetərli olmur. Bu problemin həlli üçün istiliyin artırılması məqsədilə V_{i-g} və V_f parametrləri qiymətlərinin artırılması zəruridir. X5CrNi18-10 markalı polad materialın emalı timsalında oprimal keyfiyyətin alınması üçün $V_{i.g}$=0,19-0,22 m/san və V_f=0,47-0,58 m/san sürətlərində işləmək daha əlverişlidir.

Təcrübələrlə müəyyən edilmişdir ki, hon başlığının irəli-geri və fırlanma hərəkət sürətlərinin V_{i-g}=0,16-0,18 m/san və V_f=0,46-0,52 m/san qiymətlərindən kiçik sürətlərində səthdə R_a=1,1 mkm-dək aşağı dayanıqlı kələ-kötürlüyün alınması mümkün olmur.



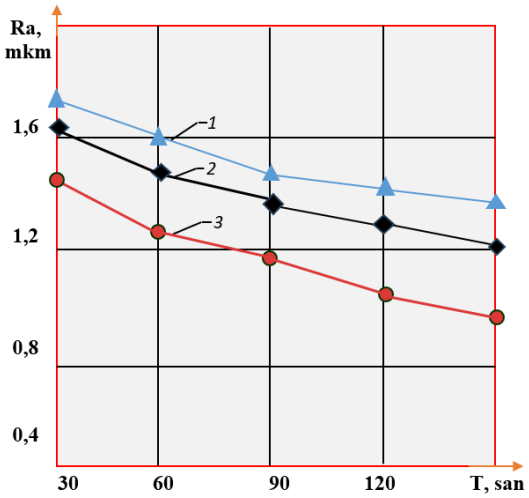
Qrafik 3. *Kələ-kötürlüyün irəli-geri hərəkət sürətindən asılılığı;*
(1, 2, 3–uyğun olaraq, xüsusi təzyiqin P_{x-t}=0,47, 0,67 və 0,87 MPa qiymətlərində)



Qrafik 4. *Kələ-kötürlüyün fırlanma hərəkət sürətindən asılılığı;*
(1, 2, 3–uyğun olaraq, xüsusi təzyiqin P_{x-t}=0,45, 0,65 və 0,85 MPa qiymətlərində)

Metalların mexaniki xassələri ilə onun yonulma qabiliyyəti arasında qənaətbəxş korrelyasiya yoxdur. Məlumdur ki, bərkliyin və möhkəmliyin artması metalın sürətlə yonulma qabiliyyətini, kimyəvi tərkibindən asılı olmayaraq azaldır. Lakin bərkliyin eyni qiymətində, struktur və kimyəvi tərkibi müxtəlif olan metalların yonulma qabiliyyəti arasında xeyli fərq olur. Yonulma qabiliyyətinə təsir edən amillərdən ən əhəmiyyətlisi metalların istilikkeçirmə xüsusiyyətidir [7,10,15]. Sürət parametrləri qiymətlərinin artması ilə kəsmə zonasında temperatur artır, bu da hər bir dənəciyin emal olunan səth üzrə kəsmə yolunun artması ilə əlaqədardır.

Səth keyfiyyətini xarakterizə edən əsas texnoloji amillərdən bir də emal vaxtıdır. Emal vaxtının (T) artması ilə emal olunan səthin kələ-kötürlüyü azalır (Qrafik 5). Emal müddətinin artması ilə metal çıxarılma intensivliyi yüksəlir. Lakin burada birbaşa asılılıq yoxdur, çünki emal müddətinin artması həm də bülöv daşının yeyilməsini artırır. Yeyilmə intensivliyi sürtgünün işçi səthində olan dənələrin sayından asılıdır [16, 17]. Səthin kələ-kötürlüyünün azalması emal müddətinin artması ilə tam əlaqəlidir. Qeyd etmək lazımdır ki, emal müddətinin artması ilə kəsmə zonasında temperatur yüksəlir ki, bu başlanğıc mərhələdə sıçrayış xarakterli olur və sonradan tədricən stabilləşir.



Qrafik 5. *Kələ-kötürlüyün emal müddətindən asılılığı; (1, 2, 3 – uyğun olaraq, xüsusi təzyiqin $P_{x\text{-}t}$=0,45, 0,65 və 0,85 MPa qiymətlərində)*

Nəticə. RPİ honlama dəzgahlarında səth keyfiyyətinin optimal qiymətinin əldə olunması həm pəstah materialının texnoloji göstəriciləri, emal rejimi parametrləri və bir sıra digər texnoloji göstəricilərin optimal qiymətlərinin əldə olunması ilə mümkündür. Keyfiyyətə təsir göstərən ən əsas parametr kimi honlama şpindelinin irəli-geri və fırlanma hərəkət sürətlərini qəbul edə bilərik. Avtomatik tənzimləmə sistemində bu qiymətlərin minimumdan maksimuma qədər dəyişdirilməsi digər üç parametrin – xüsusi təzyiq, dənəvərlik və emal müddətinin qiymətlərinin tənzimlənməsinə nəzərən daha asan idarə olunur. Ümumiləşdirilmiş şəkildə deyə bilərik ki, honlama prosesində səthin tələb olunan kələ-kötürlüyünün təmin olunması çoxsaylı texnoloji, konstruktiv və təşkilati amillərdən asılı olan mürəkkəb texnoloji məsələdir.

Ədəbiyyat

1. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Dadashov R.Y. Theoretical basis for the development of an algorithmic unified complex of mathematical models of cutting forces// Machine Science. - 2023.- № 1 – p. 55-60.
2. Гафаров А.М. Ротационное хонингование. Баку, ЭЛМ, 1999, 132 с.

3. Ю.Н.Гасанов Регулирования триботехнических характеристик поверхностей деталей. Баку ЕЛМ 2001,стр.312
4. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897212010651
5. Y.N.Həsənov və başqaları. Patent İ20170030, Daxili silindrik səthlərin emalı üçün xoninqləmə başlığı. Bakı, 11.04.2018.
6. Aziz S. Sh, İmproving surface quality in flat grinding operations using modern technological methods, Baku, ATU, Mashine Science - 2024, №2, - p. 59-64, https://msj.aztu. edu.az/uploads/msj_v6.pdf
7. Aziz S. Sh. Characterıstıcs of qualıty formatıon ın processıng of 32CrMoV12-10 steel by honıng, 2nd International Scientific-Practical Conference "Machine Building and Energy: New Concepts and Technologies", December 4-5, 2023, AzTU -Baku, Azerbaijan https: //www.researchgate.net/publication/379628736 Characteristics of quality formation in processing of 32CrMoV12-10 steel by honing
8. Eziz, S. Sh. Theoretical studies of the dynamic characteristics of the internal lapping process // − Magnitogorsk: Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, − 2020. №2 (Vol.18), − p. 30-37
9. Rasulov, N.M., Alekberov, M.Z., Nadirov, U.M. More Efficient Copy Grinding of Complex Surface. Russ. Engin. Res. 41, 829-831 (2021). https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X21090227
10. V.I.Guzeev, N.D.Yusubov, H.M.Abbasova, R.Y.Dadashov, Optimization of the number of machining stages workpieces for mechanical engineering parts, Machine science, N2, pp.4-12, 2024. https://doi.org/10.61413/VZRV4922
11. Piotr Sender, Irene Buj-Corral, Influence of Honing Parameters on the Quality of the Machined Parts and Innovations in Honing Processes, Metals, 13(1), 140, Barcelona, Spain, 2023
12. Eziz, S. Sh. Kinematic features of the lapping process and determination of its basic parameters // − Moskow: Computational Nanotechnology, − 2020. №3 (Vol.7), − p. 11-16
13. Əziz S.Ş. Daxili silindrik səthlərin sürtmə əməliyyati ilə emalının əsas xüsusiyyətləri // AMA Xəbərləri, 2018, №3. s.44-50
14. Ümid Yusif, Xəlilov Ə.H. Maşınqayırma texnologiyası. Bakı: AzPİ, 1987, 121 s.
15. Гафаров А.М. Прогрессивные методы механической обработки. Баку, "ЭЛМ", 2001. в двух томах т.1, 286 с, т.2, 310 с.
16. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Models of Machining Accuracy in Multi-Tool Adjustments. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME). vol. 17, no. 3, pp. 8067-8085, Oct. 2020. Malaysia.
17. Əziz S.Ş., Abbasov E.O, Kəlbiyev F.M., Hüseynzadə E.M, Honlama prosesində səth keyfiyyətinin müasir texnoloji üsullarla yüksəldilməsi, Bakı, ADDA, səh 53-66. https://adda.edu.az/uploads/EE_N_1_2025.pdf

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. Yusubov N.D.

UOT 629.5.015.2:004.942

GƏMİ İNTERYER OBYEKTLƏRİNİN AĞIRLIQ MƏRKƏZİNİN HESABLANMASI ÜÇÜN RHİNOCEROS 3D-də PYTHON SKRİPTİN TƏTBİQİ İMKANLARININ ARAŞDIRILMASI

Xankişiyev İ.A., Paşazadə S.Q., Həmzəyev X.Q.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
E-mail: isaq.xankishiyev@asco.az, pasazade.selim@gmail.com, khaganihamzayev@gmail.com

Xülasə. *Bu məqalədə gəmi interyerində yerləşdirilən mebel obyektlərinin ağırlıq mərkəzinin (Center of Gravity – CG) yüksək dəqiqliklə və operativ şəkildə hesablanması məqsədilə Rhinoceros 3D mühitində hazırlanmış, süni intellekt (Artificial Intelligence – AI) dəstəyi ilə optimallaşdırılmış Python skripti təqdim olunur. Təklif olunan alqoritm seçilmiş obyektlərin həcm və kütləsini avtomatik müəyyənləşdirir, hər bir obyektin uzununa (Longitudinal Center of Gravity – LCG), eninə (Transverse Center of Gravity – TCG) və hündürlük üzrə (Vertical Center of Gravity – VCG) koordinatlarını hesablamaqla qrup üzrə ümumi ağırlıq mərkəzini çıxarır. Hesablama nəticələri, Python-un openpyxl kitabxanası vasitəsilə Excel formatında ixrac edilir ki, bu da məlumatların digər hesablama və analiz sistemləri ilə inteqrasiyasını asanlaşdırır. Məqalədə metodologiyanın mərhələləri, istifadə olunan proqram təminatı və kitabxanalar (Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, AI) detallı şəkildə təsvir edilir, skriptin funksional strukturu kod nümunələri ilə dəstəklənir. Təcrübə mərhələsində nümunə mebel dəsti üzərində aparılmış hesablama nəticələri təqdim edilərək, skriptin ənənəvi manual üsullarla müqayisədə hesablama sürəti, dəqiqliyi və resurs qənaəti baxımından üstünlükləri müzakirə olunur. Alınan nəticələr gəmi dizaynında interyer avadanlıqlarının kütlə paylanmasının optimallaşdırılmasına mühüm töhfə verir.*

Abstract. *This paper presents a Python script developed within the Rhinoceros 3D environment, optimized with Artificial Intelligence (AI) support, for accurate and efficient calculation of the Center of Gravity (CG) of furniture objects installed in ship interiors. The proposed algorithm automatically determines the volume and mass of selected objects, calculates their Longitudinal Center of Gravity (LCG), Transverse Center of Gravity (TCG), and Vertical Center of Gravity (VCG) coordinates, and subsequently computes the overall CG of the group. Calculation results are exported in Excel format via the openpyxl library, facilitating integration with other computational systems. The methodology stages, software tools, and libraries used (Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, AI) are described in detail, with code snippets illustrating the functional structure of the script. Case studies on a sample furniture set demonstrate the script's advantages in terms of calculation speed, accuracy, and resource efficiency compared to traditional manual methods. The findings provide significant contributions to optimizing mass distribution of interior equipment in ship design.*

Аннотация. *В данной статье представлен Python-скрипт, разработанный в среде Rhinoceros 3D и оптимизированный с поддержкой искусственного интеллекта (ИИ), для точного и оперативного вычисления центра тяжести (Center of Gravity – CG) мебели, установленной в интерьере судна. Предложенный алгоритм автоматически определяет объем и массу выбранных объектов, рассчитывает их продольный (Longitudinal Center of Gravity – LCG), поперечный (Transverse Center of Gravity – TCG) и вертикальный (Vertical Center of Gravity – VCG) центры тяжести, а затем вычисляет общий центр тяжести группы объектов. Результаты вычислений экспортируются в формат Excel с помощью библиотеки openpyxl, что облегчает интеграцию с другими вычислительными системами.*

В статье подробно описаны этапы методологии, используемое программное обеспечение и библиотеки (Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, ИИ), а также функциональная структура скрипта с примерами кода. На примере набора мебели представлены результаты расчетов, демонстрирующие преимущества скрипта по сравнению с традиционными ручными методами в части скорости, точности и экономии ресурсов. Полученные результаты вносят значительный вклад в оптимизацию распределения массы интерьерного оборудования при проектировании судов.

Açar sözlər: *Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, ağırlıq mərkəzi, gəmi interyeri, mebel, Excel*

Key words: *Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, center of gravity, ship interior, furniture, Excel*

Ключевые слова: *Rhinoceros 3D, Python, openpyxl, центр тяжести, интерьер судна, мебель, Excel*

Giriş. Gəmi layihələndirilməsində obyektlərin ağırlıq mərkəzinin (Center of Gravity – CG) dəqiq müəyyənləşdirilməsi gəminin dayanıqlığının təmin olunması baxımından kritik əhəmiyyət daşıyır [1]. Obyektlərdən ibarət sistem üçün ümumi CG, hər bir obyektin kütləsinin onun koordinatları ilə vurulmuş momentlərinin cəminin ümumi kütləyə bölünməsi ilə hesablanır [1]. Gəmi interyerində yerləşdirilən mebel kimi əlavə kütlələr gəminin trim və ya qarşı təsir edən momentlərinin formalaşmasında mühüm rol oynayır. Xüsusilə, aşağı yerləşən CG gəminin düzəlmə momentini artıraraq dayanıqlığını yaxşılaşdırır [1]. Lakin çoxsaylı obyektlərin manual üsulla hesablanması vaxt itkisinə səbəb olmaqla yanaşı, hesablama səhvlərinin artmasına gətirib çıxarır. Bu səbəbdən, Rhinoceros 3D mühitində Python skriptinin tətbiqi mühəndislik dizayn prosesinin səmərəliliyini artırmaq məqsədilə aktualdır. Belə ki, dizayn mərhələsində obyektlərin ağırlıq mərkəzinin operativ və dəqiq hesablanması layihələndirmə prosesini optimallaşdırır. Təklif olunan skript, obyektlərin uzununa (LCG), eninə (TCG) və hündürlük üzrə (VCG) koordinat sistemində yerləşməsini nəzərə alaraq qrupun ümumi ağırlıq mərkəzini müəyyən edir.

Əsas hissə. Bu işin əsas məqsədi gəmi interyerində istifadə olunan mebel obyektlərinin ağırlıq mərkəzinin avtomatik hesablanması üçün alətin hazırlanmasıdır. Qarşıya qoyulan əsas tapşırıqlar aşağıdakılardır: (1) Rhino 3D mühitində Python skripti vasitəsilə seçilmiş obyektlərin həcm hesabının aparılması, sıxlıq parametri əsasında kütləyə çevrilməsi və müvafiq həcmi mərkəz koordinatlarının çıxarılması; (2) əldə olunan nəticələrin openpyxl kitabxanası vasitəsilə Excel sənədinə ixracı; (3) manual hesablama ilə müqayisədə prosesin sürətləndirilməsi və hesablama səhvlərinin minimuma endirilməsi. Skript çərçivəsində obyektlərin seçilməsi, hər bir obyektin uzununa (LCG), eninə (TCG) və şaquli (VCG) istiqamətlər üzrə koordinatlarının hesablanması və yekun ümumi CG-nın təyini funksional şəkildə təmin edilir. Həmçinin, Python kodunda Rhino-nun VolumeMassProperties və SurfaceVolume metodlarından istifadə olunması planlaşdırılır ki, bu da Rhino geometrik obyektlərindən həcm və kütləvi mərkəz məlumatlarının effektiv şəkildə əldə edilməsinə imkan yaradır. Skript, obyektlərin kütlələrinə görə ümumi (LCG, TCG, VCG) koordinatlarını hesablamaqla konstruktorlara avadanlıqların balansını qiymətləndirmək imkanı təqdim edir.

İşdə Rhinoceros 3D ilə Python inteqrasiyası tətbiq olunmuşdur. Həcm və kütləvi mərkəzin hesablanması üçün RhinoScriptSyntax funksiyaları və RhinoCommon siniflərindən geniş istifadə edilmişdir. Məsələn, rs.SurfaceVolume(object_id) funksiyası bağlı səthin həcmini hesablayır [2, 6], rs.SurfaceVolumeCentroid(object_id) isə həmin səthin həcmi (ağırlıq) mərkəzini müəyyən edir [3]. Bundan əlavə, Rhino.Geometry.VolumeMassProperties sinfi obyektin həcm və həcm mərkəzini əldə etməyə imkan verir [4].

Skript aşağıdakı ardıcıllıqla işləyir:

1. **Obyektlərin seçimi:** İstifadəçi Rhino səhnəsindən mebel obyektlərini seçir.
2. **Sıxlığın təyini:** Seçilmiş obyektin materialına uyğun sıxlıq təyin olunur.

3. Həcm hesabı və kütləyə çevirmə: Hər bir obyekt üçün həcm, qeyd olunmuş sıxlıq əsasında Python funksiyaları ilə hesablanır (məsələn, massprop = rs. SurfaceVolume(obj) və ya VolumeMassProperties.Compute). Əldə olunan həcm ρ sıxlıq göstəricisi (məsələn, 540 kg/m³) ilə vurularaq obyektin kütləsi müəyyən edilir.

4. Həcmi mərkəz koordinatları: Hər bir obyektin LCG (Longitudinal Center of Gravity), TCG (Transverse Center of Gravity) və VCG (Vertical Center of Gravity) koordinatları onun həcmi mərkəz nöqtəsi kimi təyin olunur (centroid = rs. SurfaceVolume Centroid (obj)[0] və ya mp.Centroid).

5. Ümumi CG hesabı: Bütün obyektlərin kütlə və koordinat məlumatlarından istifadə edilərək ümumi CG koordinatları hesablanır. Məsələn, uzununa (LCG) ox üzrə ümumi ağırlıq mərkəzi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$LCG = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i}, \quad (1)$$

burada m_i – i-nömrəli obyektin kütləsi, x_i — onun LCG koordinatı. Analoji formulalar TCG və VCG koordinatları üçün də tətbiq edilir [1]. Bu yanaşma CG-nin momentlərinin ümumi kütləyə nisbəti kimi hesablanmasını əks etdirir.

6. Nəticələrin Excel-ə yazılması: Python skripti openpyxl kitabxanasından istifadə etməklə hesablanmış nəticələri Excel faylına ixrac edir. openpyxl Python mühitində Excel 2010 (.xlsx) formatlı fayllar üzərində oxuma və yazma funksionallığını təmin edən güclü bir kitabxanadır [5]. Skriptdə nümunə olaraq aşağıda təqdim etdiyimiz kod hissəsi istifadə olunur:

7.
```
from openpyxl import Workbook
wb = Workbook()
sheet = wb.active
# Başlıqlar
sheet.append(["Obyekt", "Həcm (m³)", "Kütlə (kg)", "LCG (m)", "TCG (m)", "VCG (m)"])
# Hər obyekt üçün nəticələr əlavə olunur
# ...
# Nəticə cədvəli saxlanılır
wb.save("CG_neticeleri.xlsx")
```

Beləliklə, skript VolumeMassProperties və ya SurfaceVolume vasitəsilə obyektlərin həcmini müəyyən edir, hər bir obyektin kütləsini hesablayır və sonrakı mərhələdə openpyxl kitabxanası ilə hesablama nəticələrini Excel sənədinə ixrac edir. Bu yanaşma Rhinoceros 3D əsaslı dizayn prosesinə birbaşa inteqrasiya olunmuşdur. Kodun əsas funksionallıqları və istifadə olunan riyazi formulalar yuxarıda təqdim edilmişdir.

Praktiki tətbiq. Skriptdən əldə olunan nəticələri qiymətləndirmək məqsədilə nümunə kimi gəminin yaşayış və xidməti yerlərində yerləşdirilmiş mebel dəsti götürülmüşdür. Cədvəldə hər bir obyektin həcm, kütlə və fərdi ağırlıq mərkəzi koordinatları təqdim edilmişdir (həcm hesablamalarında sıxlıq 540 kg/m³ götürülmüşdür). Məsələn, birinci masa obyektinin həcmı 0.043 m³, kütləsi 23.047 kg, LCG=18.367 m, TCG=1.166 m, VCG=1.747 m kimi müəyyən edilmişdir.

Cədvəldə göründüyü kimi, obyektlərin ümumi kütləsi 350.89 kq (təqribən 0.351 ton) təşkil etmiş, ümumi ağırlıq mərkəzi isə LCG=18.926 m, TCG=0.012 m və VCG=1.876 m kimi müəyyən edilmişdir. Bu nəticələr avtomatlaşdırılmış skript tərəfindən əldə olunmuş, manual hesablama ilə müqayisədə yüksək uyğunluq göstərmişdir.

Hazırlanmış skript manual üsullarla müqayisədə bir neçə mühüm üstünlük təqdim edir. İlk növbədə, skript böyük obyekt qrupları üzərində çox daha sürətli işləyir – bir neçə obyektin həcm və CG-nin hesablanması saniyələr ərzində həyata keçirilir. Manual hesablamalarda isə hər bir obyekt üçün ayrıca işləmək vaxt itkisinə və insan faktoru səbəbindən xətaların artmasına gətirib

çıxarır. İkinci üstünlük hesablama dəqiqliyindədir; riyazi formullara əsaslanan avtomatlaşdırılmış yanaşma insan faktoru səbəbindən yaranan xətaları minimallaşdırır. Üçüncüsü, "openpyxl" kitabxanası vasitəsilə Excel formatında ixrac funksiyası nəticələrin digər proqramlarda asanlıqla təkrar istifadəsinə və analizinə imkan yaradır. Bu isə mühəndislərə və konstruktorlara obyektlərin kütlə paylanmasını dərindən analiz edib, zəruri hallarda optimallaşdırmalar aparmaq üçün effektiv alət təqdim edir.

Mebel obyektlərinin həcmi, kütləsi və fərdi CG koordinatları, eləcə də ümumi kütlə və ümumi CG (LCG, TCG, VCG)

Obyekt	Həcm (m³)	Kütlə (kg)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
Masa 1	0.043	23.05	18.367	1.166	1.747
Şkaf 1	0.133	71.96	18.399	2.729	2.264
Masa 1	0.127	68.40	19.675	2.729	1.529
Dönən stul 1	0.023	12.24	18.886	1.146	1.778
Masa 2	0.043	23.05	18.367	-1.070	1.747
Dönən stul 2	0.023	12.24	18.886	-1.055	1.778
Şkaf 2	0.133	71.96	18.399	-2.729	2.264
Masa 2	0.126	67.99	19.675	-2.731	1.528
Toplam	—	**350.89**	**18.926**	**0.012**	**1.876**

Nəticə. Aparılmış tədqiqat və təcrübələr nəticəsində hazırlanmış Python skripti gəmi interyerində yerləşdirilmiş konstruktiv elementlərin və mebel avadanlıqlarının ağırlıq mərkəzinin dəqiq və sürətli şəkildə müəyyən edilməsini təmin etmişdir. Rhinoceros 3D mühiti ilə Python skriptinin inteqrasiyası mühəndis-texniki əməyin həcmini azaldaraq hesablama proseslərini tam avtomatlaşdırmış və layihələndirmə mərhələsinin səmərəliliyini artırmışdır.

Ənənəvi manual üsullarla müqayisədə, çoxsaylı obyektlərin həcm, kütlə və kütləvi mərkəz koordinatlarının müəyyən olunması üçün tələb olunan vaxt əhəmiyyətli dərəcədə azalmışdır. Məsələn, 50-yə qədər obyektin manual hesablaması saatlarla vaxt apararkən, skript vasitəsilə eyni əməliyyatlar saniyələr içində başa çatdırılmışdır. Bu isə layihə müddətlərinin optimallaşdırılması, insan faktorundan irəli gələn xətaların aradan qaldırılması və nəticələrin geniş yayılmış Excel formatında əldə olunması kimi mühüm üstünlüklər gətirmişdir.

Metodun tətbiqi layihə mərhələsində interyer avadanlıqlarının kütlə paylanmasının və gəminin ümumi dayanıqlılığına təsirinin operativ qiymətləndirilməsinə şərait yaratmışdır. Bu isə gəminin ilkin dayanıqlılığının proqnozlaşdırılması və optimallaşdırılmasına imkan verir. Gələcək tədqiqat istiqamətləri kimi skript funksionallığının genişləndirilməsi, müxtəlif material sıxlıqlarının avtomatik tətbiqi, obyektlərin qruplaşdırılması və nəticələrin qrafik vizuallaşdırılması nəzərdə tutulur. Belə avtomatlaşdırılmış yanaşma gəmiqayırma sənayesində CAD əsaslı mühəndislik işlərinin vaxt və resurs baxımından effektivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır.

Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir – Qrant № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01

Ədəbiyyat

1. Fish W., Papanikolas F. Ship Stability. Mermaid Consultants [online]. – Available: https://www.mermaid-consultants.com/ship-stability.html (Accessed: 13.08.2025).
2. RhinoScriptSyntax – SurfaceVolume və SurfaceVolumeCentroid funksiyaları. Rhino Developer Documentation. [online]. – Available:
3. https://developer.rhino3d.com/api/RhinoScriptSyntax/ (Accessed: 13.08.2025).
4. Rhino.Geometry.VolumeMassProperties sinfi. Rhino Developer Documentation. [online]. – Available:https://developer.rhino3d.com/api/rhinocommon/rhino.geometry.volumemassproperties (Accessed: 13.08.2025).

5. Using Python Packages, Rhino Developer Guides (Rhino 7) – openpyxl dəstəyi. [online]. – Available: https://developer.rhino3d.com/guides/rhinopython/python-packages/ (Accessed: 13.08.2025).
6. Christopher Botha, Steve Baer. Simpler way to get Centroid of multiple items. McNeel Forum. [online]. – Available: https://discourse.mcneel.com/t/simpler-way-to-get-centroid-of-multiple-items/39789 (Accessed: 13.08.2025).
7. Xankişiyev, İ.A. Additiv texnologiya ilə çap edilmiş polimer materiallarin müxtəlif istismar rejimlərində mexaniki xassələrinin tədqiqi / İ.A. Xankişiyev, S.Q. Paşazadə, X.Q. Həmzəyev //Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı – 2025, – №1, – s. 60-66

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. Məmmədov A.T.

UOT 629.5.018

GƏMİ GÖVDƏ KONSTRUKSİYALARINDA MÖHKƏMLİYİN STANDARTLAŞDIRILMASI VƏ TƏSNİFAT CƏMİYYƏTLƏRİ QAYDALARININ ANALİZİ

Xankişiyev İ.A., Quliyev Y.M., Paşazadə S.Q.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
E-mail: isaq.xankishiyev@asco.az, yaquliyev@mail.ru, pasazade.selim@gmail.com

Xülasə. *Bu məqalədə gəmi gövdə konstruksiyalarının möhkəmliyi məsələsi Təsnifat Cəmiyyətlərinin texniki qaydaları kontekstində təhlil olunur. Yorğunluq, limit möhkəmlik və qeyri-xətti davranış modelləri əsas götürülərək, müasir normativlərin üstünlükləri və məhdudiyyətləri araşdırılır. Möhkəmliyin layihələndirilməsində material xüsusiyyətləri, texnoloji proseslər və istismar şəraiti kimi amillərin rolu vurğulanır. İngiltərə Lloydu və Rusiya Dəniz Gəmiçiliyi Registri kimi nüfuzlu təsnifat cəmiyyətlərinin qaydalarına əsaslanaraq, gəmi konstruksiyalarında təhlükəsizlik və etibarlılığın təmin olunması yolları təqdim olunur.*

Abstract*. This article analyzes the structural strength of ship hulls based on the regulatory frameworks of classification societies. Fatigue, strength limit, and nonlinear structural behavior models are discussed. The influence of material properties, technological processes, and operational conditions is evaluated. Rules of prominent societies such as Lloyd's Register and the Russian Maritime Register are compared to highlight safety assurance practices.*

Аннотация*. В статье рассматриваются вопросы прочности корпусов судов с учетом требований классификационных обществ. Анализируются факторы усталости и предельной прочности, а также модели нелинейного поведения конструкций. Приводится обзор нормативных документов классификационных обществ, таких как Lloyd's Register и Российский морской регистр судоходства.*

Açar sözlər: *gəmi gövdəsi, möhkəmlik, yorğunluq, təsnifat cəmiyyətləri, limit möhkəmliyi, normativ tələblər*

Key words: *ship hull, structural strength, fatigue, classification societies, ultimate strength, standards*

Ключевые слова: *корпус судна, прочность, усталость, классификационные общества, предел прочности, нормативы*

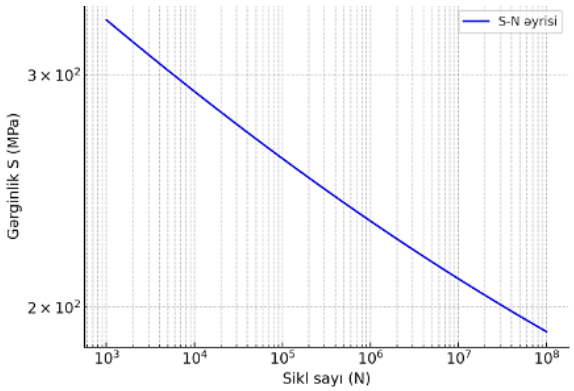
Giriş. Gəmi gövdə konstruksiyalarının möhkəmliyi müasir gəmiqayırma sənayesində ən mühüm və aktual məsələlərdən biridir. Bu mövzu yalnız nəzəri aspektlərdən deyil, həm də praktiki baxımdan yüksək əhəmiyyətə malikdir. Gəmilər müxtəlif iqlim şəraitlərində, açıq okeanlarda, güclü dalğalar və fırtınalar altında uzunmüddətli istismara məruz qalır. Belə şəraitdə struktur dayanıqlığının təmin edilməsi, gəmi heyətinin təhlükəsizliyinin qorunması, yüklərin itkisiz daşınması və qəza risklərinin minimuma endirilməsi üçün əsas şərtlərdən biridir [1,3].

Gövdə konstruksiyalarının möhkəmliyi mürəkkəb və çoxşaxəli bir anlayış olmaqla yanaşı, çoxsaylı faktorların qarşılıqlı təsiri nəticəsində formalaşır. Bu, həm yorğunluq səbəbli mikroçatların yaranması, onların inkişafı və nəticə etibarilə makroskopik qırılmalara gətirib çıxarması, həm də qəza xarakterli ekstremal yüklənmələr altında baş verən qırılma, lokal deformasiyalar, davamlılığın itirilməsi və ya daimi zədələrin meydana gəlməsi ilə əlaqələndirilir [3, 5].

Ənənəvi yanaşmalar konstruksiya elementlərin sadələşdirilmiş modellər üzrə təhlilinə əsaslansa da, müasir tələblər bu yanaşmaların təkmilləşdirilməsini, kompüter əsaslı riyazi modellərin tətbiqini və mövcud standartların real istismar şəraitinə uyğunlaşdırılmasını tələb edir. Gəmi gövdəsinin möhkəmliyi həm statik, həm də dinamik yüklənmələr kontekstində qiymətləndirilməlidir. Bu baxımdan, gəmiqayırma sahəsində fəaliyyət göstərən Təsnifat Cəmiyyətləri tərəfindən müəyyən olunmuş standartlar və qaydalar gəmi gövdəsinin möhkəmliyinin təmin olunmasında mühüm rol oynayır [1, 2, 5, 6].

Məsələnin qoyuluşu. Gəmi gövdələrinin layihələndirilməsində və istismara buraxılmasında əsas normativ sənədlər Təsnifat Cəmiyyətlərinin Qaydalarıdır. Bu qaydalar möhkəmliyin təmin olunmasında iki əsas kriteriyanı ön plana çəkir: yorğunluq möhkəmliyi və limit (sərhəd) möhkəmliyi. Hər iki yanaşma gəminin istismar müddəti ərzində dayanıqlı və təhlükəsiz fəaliyyətini təmin etməyə yönəlmişdir [1, 3, 5].

Yorğunluq möhkəmliyi. Yorğunluq – metal konstruksiyalarda təkrarlanan dinamik yüklənmələr nəticəsində meydana gələn mikroçatların zamanla inkişaf edərək makro səviyyədə qırılmalara səbəb olması ilə xarakterizə olunur. Gəmilərdə bu cür yüklənmələr dalğaların ritmik təsiri, mühərriklərin vibrasiyası və digər dinamik faktorlarla əlaqədardır. Yorğunluq nəticəsində yaranan zədələr adətən vizual baxışla aşkar olunmur və qəfil qırılmalara səbəb ola bilər [3].



Şəkil 1. *Yorğunluq üçün S-N əyrisi (sikl – materialın bir dəfə tam yüklənmə və boşalma prosesidir)*

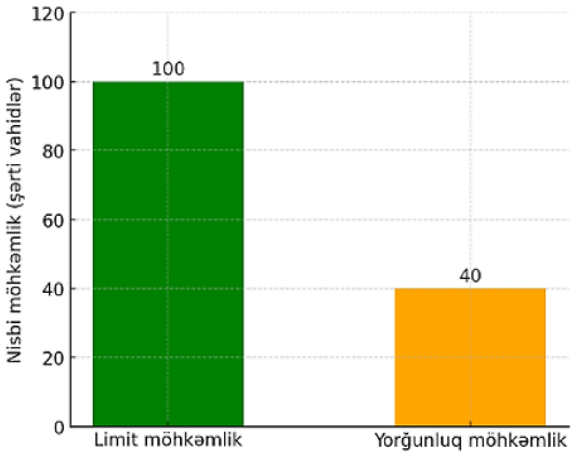
Yorğunluq analizləri zamanı "S-N əyriləri" (gərginlik – sikl sayı) istifadə olunur (şəkil 1). Müxtəlif materiallar üçün bu əyrilər təcrübə nəticəsində müəyyən edilir və strukturun hansı dövr sayında qırılma ehtimalı olduğunu təxmin etməyə imkan verir [3].

Limit möhkəmlik. Limit möhkəmlik isə strukturun birdəfəlik, ani və yüksək yüklənmələrə qarşı dözümlülüyünü ifadə edir. Bu tip yüklənmələr zərbələr, toqquşmalar, ağır hava şəraiti və ya

strukturda gözlənilməz dəyişikliklər nəticəsində meydana çıxır. Bu kriteriya altında strukturun axma həddi, plastik deformasiyaların sərhədi və qırılma limiti əsas götürülür [1, 4].

Gəmi gövdəsi elementləri – məsələn, tirlər, qovşaq elementləri, şaquli və üfüqi divar panelləri – yüksək yüklənmələr zamanı bükülmə, burulma və ya lokal çökmələrə məruz qala bilər. Limit möhkəmlik hesablamaları zamanı bu hallar xüsusi ilə nəzərə alınmalı və sınaq metodları ilə təsdiqlənməlidir [2].

Alınmiş nəticələrin analizi. Yorğunluq və limit möhkəmliyə təsir edən bir sıra mühüm amillər vardır. Bu amillərin analizi və onların qarşılıqlı təsirlərinin öyrənilməsi gəmi konstruksiyalarının təhlükəsizlik səviyyəsinin artırılmasında əvəzsiz rol oynayır (şəkil 2):



Şəkil 2. *Limit və yorğunluq möhkəmliyinin müqayisəsi*

1. Gərginlik konsentrasiyası. Sərt keçid sahələri, kəskin bucaq altında yerləşdirilmiş elementlər və qaynaq birləşmələrinin olduğu bölgələrdə gərginlik konsentrasiyası daha yüksək olur. Bu sahələrdə mikroçatların yaranma riski artır və zamanla strukturun yorğunluq səbəbli sıradan çıxma ehtimalı yüksəlir [3, 4].

2. Material xüsusiyyətləri. Materialın plastiklik dərəcəsi, özlülüyü və daxili qüsurlarının olması möhkəmliyə ciddi təsir göstərir. Əgər materialda daxili boşluqlar, inklüziya və ya heterogenliklər varsa, bu, onun yorğunluq və limit möhkəmliyini azalda bilər. Bu səbəbdən istifadə olunan materiallar standartlara cavab verməli və müvafiq sınaqlardan keçməlidir [3].

3. Qaynaq keyfiyyəti və qalıq gərginliklər. Qaynaq əməliyyatı zamanı düzgün olmayan temperatur rejimi, qeyri-bərabər soyuma və ya operator səhvləri nəticəsində qüsurlar yarana bilər. Bu qüsurlar həm çatların başlanğıc nöqtəsi, həm də struktur zəifliyi kimi çıxış edə bilər. Bundan əlavə, qaynaqdan sonra strukturda yaranan qalıq gərginliklər, əlavə yüklənmələr olmadan belə yorğunluq çatlarının inkişafını sürətləndirə bilər [1].

4. Dinamik və qeyri-sabit yüklənmələr. Real istismar şəraitində gəmilər müntəzəm olaraq dinamik yüklənmələrə məruz qalır. Bunlara dalğa təsirləri, vibrasiyalar, təkanlar və zərbələr daxildir. Belə yüklənmələr, xüsusilə proqnozlaşdırılması çətin olan hallarda, strukturun möhkəmliyinə mənfi təsir göstərir. Vibrasiyaların uzunmüddətli təsiri struktur yorğunluğunu artırır və təhlükəli çatların yaranmasına səbəb ola bilər [4].

5. İstehsal və montaj texnologiyası. Layihələndirmə nə qədər dəqiq aparılsa da, istehsal mərhələsində buraxılmış səhvlər strukturun ümumi möhkəmliyinə mənfi təsir göstərə bilər. Qüsurlu montaj, yanlış qaynaq və ya konstruktiv uyğunsuzluqlar layihənin effektivliyini azaldır. Bu səbəbdən istehsal prosesində dəqiq ölçmə və keyfiyyətə nəzarət metodları tətbiq olunmalıdır [2].

Bu və digər amillərin nəzərə alınması ilə yanaşı, layihələndirmə mərhələsində istifadə edilən düsturlar da optimallaşdırılmalıdır. Təsnifat Cəmiyyətləri tərəfindən təklif olunan sadələşdirilmiş düsturlar çox vaxt təhlükəsizlik baxımından konservativ qiymətləndirmələr təqdim edir. Məsələn, materialın minimal qalınlıqları və icazə verilən maksimal gərginliklər, axma həddi ilə müqayisəli şəkildə verilir ki, bu da qəza riskini azaltmağa xidmət edir [1, 5].

Təsnifat Cəmiyyətlərinin rolu. Təsnifat Cəmiyyətləri gəmiqayırmada normativ baza rolunu oynamaqla yanaşı, həm də qlobal təhlükəsizlik səviyyəsinin formalaşmasında mühüm rol oynayır. Bu qurumlar mütəmadi olaraq real qəza hadisələrinin təhlili əsasında öz qaydalarını yeniləyir, risk faktorlarını optimallaşdırır və təcrübəyə əsaslanan texniki yenilikləri sənədlərə daxil edirlər.

Məsələn, İngiltərə Lloydu bu sahədə 265 illik fəaliyyət tarixinə malikdir və gəmiqayırma sənayesində ən nüfuzlu Təsnifat Cəmiyyətlərindən biridir. 2008-ci ilin statistikasına əsasən, dünya gəmi donanmasının 28%-i bu Cəmiyyətin nəzarəti altındadır, İngiltərə bayrağı altında üzən gəmilərin isə təqribən 80%-i LR tərəfindən klassifikasiyadan keçirilmişdir [1].

Eyni zamanda, DNV (Det Norske Veritas), ABS (American Bureau of Shipping), RMRS (Russian Maritime Register of Shipping) kimi digər Cəmiyyətlər də bu sahədə mühüm elmi və praktiki işlər görməkdədir. Hər birinin yanaşması bir qədər fərqli olsa da, ümumi məqsəd – gəmiqayırma sənayesində təhlükəsizliyin təmin olunmasıdır [2, 5].

Nəticə. Gəmi gövdələrinin layihələndirilməsi və möhkəmliyinin analizində Təsnifat Cəmiyyətlərinin qaydalarına riayət olunması zəruridir. Bununla belə, bu qaydalar müəyyən dərəcədə sadələşdirilmiş və konservativ yanaşmalara əsaslandığı üçün, bəzi risk faktorlarını tam şəkildə əhatə etmir. Bu səbəbdən layihələndirmə prosesində əlavə təhlükəsizlik tədbirləri, keyfiyyətə nəzarət və qeyri-xətti analiz metodlarının tətbiqi tövsiyə olunur.

Xüsusilə, müasir hesablama üsulları – məsələn, Sonlu Elementlər Metodu (SEM**)** – gəmi gövdəsinin real şəraitdəki yüklənmələrə qarşı davranışını daha dəqiq modelləşdirməyə və riskləri öncədən müəyyən etməyə imkan verir [3,4,6]. Belə metodlar vasitəsilə konstruksiyadakı çatışmazlıqlar daha erkən mərhələdə aşkar olunur və optimal konstruktiv həllər təklif edilə bilir. Gələcəkdə gəmiqayırma sənayesində süni intellekt, rəqəmsal əkizlər (digital twins) və avtomatik monitorinq sistemlərinin tətbiqi möhkəmlik məsələlərinin daha səmərəli və proqnozlaşdırıla bilən şəkildə həllini mümkün edəcək.

Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir – Qrant № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01

Ədəbiyyat

1. Lloyd’s Register of Shipping. Rules and Regulations for the Classification of Ships. London, 2020.
2. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2021.
3. Smith, D. "Fatigue and Fracture in Ship Structures", Marine Structures Journal, 2019.
4. Ochi, M.K. Ocean Waves and Their Impact on Ship Structures, Ocean Engineering Series, 2018.
5. Det Norske Veritas (DNV). “Ship Structure Rules.” DNV Publications, 2020.
6. Xankişiyev, İ.A. Additiv texnologiya ilə çap edilmiş polimer materiallarin müxtəlif istismar rejimlərində mexaniki xassələrinin tədqiqi / İ.A. Xankişiyev, S.Q. Paşazadə, X.Q. Həmzəyev //Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı – 2025, – №1, – s. 60-66

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: prof. İsmayılov N.Ş.

UOT 621.742

DETALLARIN BƏRPASINDA İSTİFADƏ OLUNAN İNNOVATİV ÜSULLARIN TƏHLİLİ

Məmmədov A.T., İsmayılzadə S.B.

[1]Azərbaycan Texniki Universiteti
Az1073, Bakı şəh., Hüseyn Cavid pr., 25
[2]Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Az1010, Bakı şəh., Azadlıq pr., 20
E-mail: ariff1947@mail.ru, sismayilzadahh00@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə istifadədə olmuş detalların bərpa prosesində innovativ üsulların təhlili aparılır. Bu üsullar içərisində örtükçəkmə texnologiyası daha effektli hesab olunur. Örtük çəkmə üçün qaynağın müxtəlif üsulları ilə üstəritmə əməliyyatı daha üstünlük təşkil edir. Örtükçəkmədə qaynağın digər üsulu-elektrokontakt qaynaq üsulu daha məhsuldar üsul sayılır. Bu istiqamətdə digər mütərəqqi üsul kimi qazotermiki püskürtmə ilə ovuntuların bərpa ediləcək səthində örtük yaratmasıdır. Lakin bu kontekstdə mütərəqqi üsullardan biri də kiməvi-termiki emal hesab olunur. Lakin əksər hallarda səthin bərpası ilə yanaşı onun legirlənməsi də tələb olunur. Aparılmış tədqiqatlar bu istiqamətdə elektroqığılcım üsulu ilə legirləməni ön plana çəkir.*

Abstract. *This article analyzes innovative methods used in the restoration of used parts. Among these methods, coating technology is considered the most effective. For coating application, surfacing using various welding methods is preferred. Another welding method for applying coatings is electric resistance welding, which is considered more productive. A more advanced method in this area is the creation of a coating on the surface of the parts being restored using thermal spraying. However, in this context, one of the advanced methods is chemical-thermal treatment. However, in most cases, alloying is required in addition to surface restoration. Research conducted in this area highlights alloying using the electric* spark method.

Аннотация. *В статье анализируются инновационные методы в процессе восстановления деталей, бывших в употреблении. Среди этих методов наиболее эффективной считается технология нанесения покрытий. Для нанесения покрытий предпочтительнее операция наплавки различными методами сварки. Другим методом сварки при нанесении покрытий является метод электроконтактной сварки, который считается более производительным. Более прогрессивным методом в этом направлении является создание покрытия на поверхности восстанавливаемых деталей методом газотермического напыления. Однако в данном контексте одним из прогрессивных методов является химико-термическая обработка. В то же время в большинстве случаев наряду с восстановлением поверхности требуется ее легирование. Проведенные исследования в этом направлении выделяют легирование электроискровым методом.*

Key words: *coating, surfacing, electric contact welding, electric spark alloying*
Açar sözlər*: örtük çəkmə, üstəritmə, elektrokontakt qaynağ, elektroqığılcım legirləmə*
Ключевые слова: *покрытие, наплавка, электроконтактная приварка, электроискровое легирование*

Giriş. Bərpa prosesində müxtəlif maşın və mexanizmlərin detallarının zədələnmiş səthləri aradan qaldırılır, bərpa örtükləri çəkilir, səthlərin plastiki deformasiyası yerinə yetirilir, səthlərə tələb olunan forma, ölçü, onların qarşılıqlı yerləşməsini təmin etmək və kələkötürlüyünü azaltmaq üçün mexaniki emal həyata keçirilir, lazımi xassələri vermək üçün detallar terniki emal edilir və o

tarazlaşdırılır. Üstəritmə və tozlandırılmış örtüklər detalların bərpa olunacaq səthlərinə bilavasitə çəkilir. Qalvanik və polimer örtüklərin çəkilmə prosesləri çoxlu miqdarda zərərli maddələrin ayrılması ilə müşayət olunduğu üçün bu proseslər ayrıca qapalı sahələrdə yerinə yetirilir.

Bərpa olunmuş detallar texniki nəzarətdən keçirildikdən sonra dəstləşdirmə sahəsinə və oradan isə maşın və mexanizmlərin yığılması və ya hazır məhsul kimi satış anbarına göndərilir.

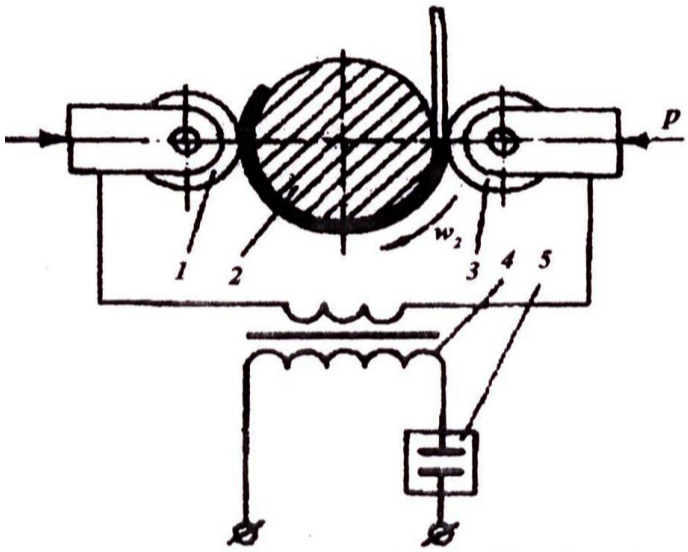
Detalların bərpa prosesində qaynağın rolu əvəzsizdir [2-5]. Təmir, bərpa və möhkəmləndirmə proseslərində əsasən qaynaqla üstəritmə əməliyyatından geniş istifadə olunur. Bu halda bərpa olunacaq hisənin işçi səthi ərimə temperaturunadək qızdırılır və onun üzərinə maye elektrod materialının damcıları oturdulur və bərkidikdən sonra örtük qatı yaranır.

Üstəritmə əməliyyatları çoxlu üsullarla, o cümlədən özünü mühafizə edən məftillə, flüs altında, karbon qazı mühitində və ya arqon qazı mühitində elektroqovslə titrəyişli və plazmalı qövslə, qaz alovu ilə və s. digər üsullarla aparılır.

Üstəritmə vasitəsilə məsaməsiz, lazımi qalınlıqda, detalın səthilə möhkəm birləşmiş, tələb olunan kimyəvi tərkibdə, verilən strukturlu örtük qatını almaq mümkündür.

Lakin üstəritmə əməliyyatı əsasən kobud işlərin görülməsində geniş tətbiq olunur. Eyni zamanda emal olunan hissə yüksək termiki təsirə məruzə qalır, onun səthi çox kələkötür olur, böyük qalıq gərginlikləri yaranır. Odur ki, bu əməliyyatdan sonra digər əlavə əməliyyatların aparılması lazım gəlir, bu da bərpa işlərinin həcmini kəskin artırır.

Bərpa prosesinin innovativ üsullarının təhlili. İşçi səthlərə qat çəkmənin bir üsulu da elektrokontakt qaynağı ilə səthdə örtük yaratmadır. Bu üsulda əsasən diyircəkli elektrokontakt qaynağından istifadə edirlər. Üsul yeyilmiş səthə əlavə örtük qatını Coul-Lens qanunu üzrə detalda və qatda ayrılan istilikdən istifadə etməklə çəkməkdən ibarətdir. Elekrokontakt qaynaqla örtük qatının yeyilmiş səthə çəkilmə sxemi şəkil 1-də verilir.



Şəkil 1. *Elektrokontakt qaynaqla metal qatının səthə birləşdirmə sxemi:*
1 və 3-diyircəklər; 2-bərpa edilən hissə; 4-transformator; 5-kontaktor

Bu üsul ilə örtük qatını yeyilmiş səthə bir başa və aralıq cisimdən istifadə etməklə çəkmək olar [6-10]. Ən effektli variant araqatı materialından istifadə etməklə qaynaq prosesinin aparılmasıdır, çünki bu halda həm birləşdirilən hissələr arasında birləşmənin keyfiyyəti yüksək olur, az enerji sərf etmək mümkündür, termiki təsir zonası dar olur, həm də qalıq gərginliklərinin qiyməti kiçik olur. Bu araqatının gərginlikləri relaksasiya edicilik qabiliyyətilə izah olunur.

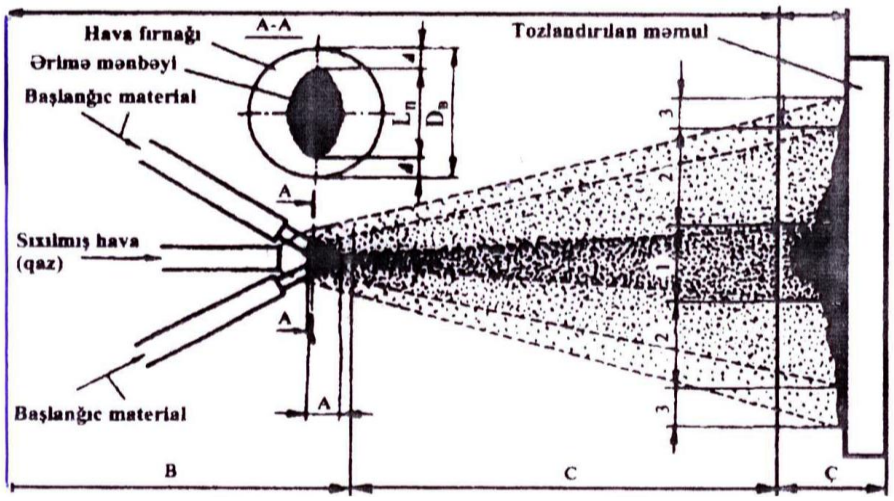
Son zamanlar araqatı materialı kimi metal folqalar, lentlər və zolaqlar əvəzinə müxtəlif metal və ərintilərinovuntularının istifadəsi daha effektli sayılır [11-15]. Bu halda daha az istilik və mexaniki enerji sərf etməklə yüksək keyfiyyətli birləşmə almaq mümkün olur.

Lakin nəzərə almaq lazımdır ki, elektrokontakt qaynaq üsulunda heç də həmişə əsas metalın möhkəmliyinə bərabər olan birləşmə almaq mümkün deyil, nisbətən böyük termiki təsir zonası yaranır, işçi səthin kimyəvi tərkibini tələb olunan istiqamətdə idarə etmək mümkün deyildir. Eyni zamanda araqatı materialı kimi ovuntulardan istifadə olunarsa, bu halda bütöv birləşmə alma məsələsi çətinləşir.

Həm üstəritmə, həm də elektrokontakt qaynağı ilə örtük çəkmədə incə örtük qatları almaq qeyri mümkündür. Müasir maşın və mexanizimlərdə bərpa, möhkəmləndirmə işlərində əsas tələbat incə örtüklərdir. Bu örtüklər qalınlığına görə nazik, möhkəmləndirmə dərəcəsinə görə isə daha möhkəm olmalıdırlar.

Bu mənada baxılan üsullarla müqaisədə materiallara püskürdülmək ilə örtük çəkmə daha mütərəqqi üsul sayıla bilər. Bu halda bərpa olunan material özü bərk fazada qalır, əriyən isə yalnız çəkilən material olur .

Ovuntu materiallarından örtükləri qazatermiki püskürtmə və qaz - ovuntu üstünə metal əridilməsi, induksion bişirmə və digər üsullarla həyata keçirirlər. Püskürdülən material yüksək temperaturlu mühitdə (yanma məhsulları, elektrik qövsü, plazma və burulğanlı cərəyanların keçdiyi sahə) istiliyin dəyişdirilməsi hesabına qızır. Bir sıra hallarda o əritmə yolu ilə bütöv materialdan parçalanır, onun zərrəcikləri qovulur və qaz şırnağı ilə köçürülür, plastiki vəziyyətdə hissənin səthinə oturur. Böyük kinetik və istilik enerjisinə malik olduqlarına görə zərrəciklər zərbə ilə səth dəyirlər, deformasiya olunurlar, səthin üzərində öz cəmlənmiş enerjisini sərf edir və bərkiyirlər (şəkil 2).



Şəkil 2. *Püskürtmə prosesinin sxemi:*
A-materialın ərimə zonası; B-püskürtmə zonası; C-məşəl; 1,3-doydurma ləkələri, uyğun olaraq maksimum və minimum; 2-orta doydurma həlqəsi; D-hava şırnağının diametri; L_n-ərimə mənbəyinin ölçüsü; Ç-üstünü örtmə

Püskürtmənin xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, əsas metalın səthi ərimir, nəticədə detalın səthi əhəmiyyətli dərəcədə deformasiya olunmur. Metal zərrəciklərin detalın səthilə və öz aralarında birləşməsi əsasən mexaniki xarakterlidir, yəni məsamələrin və xüsusi "fasiləli yiv" şəklində hazırlanmış profilin köməkliyilə alınır. Fiziki qarşılıqlı təsirdə olan qüvvələr (məsələn, Vander-

Vaals qüvvələri), elektronların valent kollektivləşməsi hesabına metal əlaqəsi qüvvəsi və kovalent tipli rabitələr səthlə örtük arasında yaranır.

Materialın qızması və bir sıra hallarda onun oksidləşdirici mühitdə olması strukturun dəyişməsinə və səthin oksidləşməsinə gətirir. Zərrəciklərin qaz mühiti təsiri altında və öz aralarında zərbələşməyə görə plastiki deformasiyası onlara yastılaşmış forma verir, materialda pərçimlənmə gedir, onun teksturası dəyişir, ancaq səthdə oksid təbəqəsi qismən dağılır, püskürdülmüş örtüyün mikrostrukturu onun birləşmiş zərrəcikləri arasında oksid təbəqəsinin mövcudluğu ilə bərabər, qatvari quruluşa malik olur. Əsas metalla örtük arasında sərhəddin ayrılması açıq-aydın görünür.

Püskürdülən materialın qızma və parşalanma qabiliyyətinə görə sərf olunan istilik enerjisinin mənbəyinin növündən asılı olaraq aşağıdakı əsas püskürtmə növlərini fərqləndirirlər: elektroqövs, qazalovu, detanasiyalı və plazmalı. Plazmalı tozlandırma da öz növbəsində induksiyalı və plazmalı-qövslüyüyə bölünür.

Yuxarıda qeyd olunduğu kimi püskürdülmüş zərrəciklər və əsas metalın səthi arasında möhkəm metallik əlaqə yaranır, əksər hallarda səth oksidləşir, qatvari struktur yaranır. Bu qusuları ləğv etmək və səthin mexaniki emal payını azaltmaq məqsədilə əlavə əməliyyat - örtüyə yüksək temperaturlu sıxlaşdırma tətbiq olunur. Bu proses səthi lokal qızdırma və təzyiqin tətbiqilə həyata keçirilir. Yalnız bu halda çatlar və məsamələr azalır və ya tamamilə yox olur. Əksər hallarda (əsasən kimyəvi aktiv metal və ərintilər püskürdüldükdə), örtüklə əsas metalın ayrılma sərhəddində oksid təbəqəsi mövcud olur, bu isə birləşmənin möhkəmliyinə ciddi xələl gətirir.

Bərpaetmənin ən sadə üsullarından biri kimyəvi və elektrokimyəvi örtük çəkmədir. Digər üsullarla müqaisədə bu üsulun xeyli üstünlükləri vardır [21]:

- detalların struktur və mexaniki xassələrinə lazım olmayan təsirlər yoxdur:
- örtüklər verilən ölçüdə və yüksək dəqiqliklə alınır, bu ona gətirir ki, sonrakı emal payı və əmək tutumu minimuma enir, yaxud emal aradan götürülür;
- örtüklərin qalınlıqları üzrə qeyri sabit fiziki-mexaniki xassələri qatların çəkilmə imkanları vardır;
- çoxsaylı hissələrin eyni zamanda bərpası əmək tutumunu və məhsulun maya dəyərini aşağı salır;
- prosesin asanlıqla avtomatlaşdırılma mümkünlüyü vardır.

Lakin nəzərə almaq lazımdır ki, kimyəvi və elektrokimyəvi örtük çəkmənin ən böyük qüsurları kimi örtüklə əsasın yaxşı birləşməməsi, yəni örtük qatının asanlıqla dağılması, prosesin zərərli olması, əsas materialın legirlənmə imkanlarının mümkünsüzlüyü, qalın qatların alınmamasını göstərmək olar.

Bərpa etmənin ən geniş yayılmış üsullarından biri detalların yeyilmiş səthlərinin kimyəvi-termiki emala (KTE) uğradılmasıdır. Məsələn, poladların KTE-da sementitləmədə, borlaşdırmada, azotlaşdırmada, nitrosementitləmədə onların səthlərində doydurucu elementlərin (C, B, N) təsiri nəticəsində müxtəlif faza tərkibli və mikrostrukturlu diffuziya qatları yaranır. Eyni zamanda bu halda detalların həndəsi ölçüləri (qalınlıq 5¸ 10%-dək) dəyişirlər [22-24].

KTE-ın bir növü olan detalların yeyilmiş səthlərinin diffuzion metallaşdırılması da bərpa və təmir işlərində geniş yer tutur. Bu halda birkomponentli və çoxkomponentli (xromlama, nikelləmə, silisumlama, xromborlama və s.) diffuzion metallaşdırma həyata keçirilir.

Lakin istər kimyəvi, elektrokimyəvi, istərsə də diffuzion örtük çəkmə əməliyyatların da öz qüsurları vardır. Burada ən vacib qüsur bu proseslərin ekoloji cəhətdən zərərli olmalıdır. Digər tərəfdən, əgər kimyəvi və elektrokimyəvi üsullarda örtük qatı ilə əsas səth arasında möhkəm rabitə yaranmırsa, diffuzion metallartırmada bu rabitə yaransa da proses özü yüksək temperaturlu və uzun müddətlidir. Nəticədə, bir tərəfdən, emal olunan detalın özək hissəsinin strukturu və xassələri arzuolunmaz tərəfə dəyişir, digər tərəfdən əmək tutumu artır, məhsulun maya dəyəri kəskin yüksəlir.

Təmir və bərpa işlərində qeyri-metal örtüklərin çəkilməsi də geniş yer tutur. Bu halda örtük materialı kimi əsasən polimer materialdan istifadə olunur. Bu örtüklər əksər hallarda antifiriksion xassəli və korroziyaya dözümlü olurlar [25]. Lakin presizion və məsul təyinatlı detalların bərpasında qeyri-metal örtüklərdən istifadə etmək mümkün deyildir, çünki onlar ölçülərin kəskin böyüməsilə və örtüyün əksər hallarda asanlıqla qopması ilə səciyyələnirlər. Həm də bu halda detalın səthinin möhkəmləndirilməsindən söhbət gedə bilməz.

Detalların səthlərinin möhkəmləndirməsi üçün onları plastiki deformasiya etmə üsulları geniş istifadə olunur. Bu məqsədlə səthlərin diyirləndilməsi kalibrləmə, dornalama, oturtma, almazla şumallama və s. üsullar tətbiq edilir. Mexaniki təsir nəticəsində detalların səth qatlarında kristal qəfəslərdə onların ikinci növ təhrifi və nəticədə qəfəslərdə yaranan qalıq gərginlikləri hesabına səthlərin möhkəmlənməsi baş verir [26].

Plastiki deformasiya üsullarında xarici səthlərin böyüməsi yox, əksinə kiçilməsi gedir, yalnız bəzi hallarda daxili səthləri bu üsul ilə bərpa etmək mümkün olur. Bu möhkəmləndirmə üsulları əsasən yeni hazırlanmış detalların emalında daha məqsədə uyğun sayılır. Eyni zamanda plastiki deformasiyanın heç bir üsulu ilə detaların səthini legirləmək və bununlada kimyəvi tərkibi dəyişmək mümkün olmur. Mexaniki təsir nəticəsində səth qatlarında alınan struktur qeyri müvazinətli olur, ona görə də iş prosesində müəyyən, hətta kiçik temperaturlarda (100-200°C) möhkəmləndirilmiş səth öz bərkliyini itirir. Ona görə də işçi səthə mexaniki təsir üsulları geniş tətbiqini tapmır.

Əgər detalların səthində incə qat yaratmaq, ifrat möhkəmləndirmək və legirləmək lazımdırsa, onda elektroqığılcım üsulu ilə emal daha effektli sayıla bilər. Elektroqığılcım üsulunda elektrodlar arası fəzada yaranan plazmanın temperaturu təxminən aşağıdakı düsturla hesablanır [1]:

$$T=7200+450S^{1/3}$$

burada S-toplayıcı kondensatorların həcmidir, mkF.

Elektrik boşalmasının qısa müddətli olması (mks-ə qədər) və detala nəql olunan anod mikro həcmlərin qızmasının lokallığı nəticəsində metal ani müddətdə soyuyur. Poladların bu üsul ilə emalında səth qatlarında yüksək bərkliyə qədər böyük surətlə tablama baş verir. Qığılcım impulslarının çoxdəfəli təsirinə görə detalın səthində anod (elektrod) materialının xassələrinə yaxın xassəli örtük yaranır, eyni zamanda səth qatlarının legirlənməsi baş verir.

Elektroqığılcım emalda aşağıdakı hadisələr baş verir:

- anod materialının qızması və onun ucunun qazşəkilli vəziyyətə gəlməsi;
- qövs araboşluğunda materialın anoddan katoda (emal olunan detala) daşınması:
- bərpaya uğradılan səthdə yaranan maye metalın dərin qatlara diffuziyası;
- maye fazanın tez bərkməsi nəticəsində bərk məhlulların və incə dispers karbidlərin yaranması və soyuma böyük sürətlə getdiyindən lokal tablamanın baş verməsi.

Elektroqığılcım emal ilə yeyilmiş detalları bərpa etmək, onların üzərinə antikorrozion, bantifriksion, friksion və ifrat bərk qatlar çəkmək mümkündür. Adətən sürtünmədə iştirak edən səthlərin bərpasında qatın qalınlığı 0,25mm-ə qədər olur.

Gəmi dizel mühərriklərinin yanacaq aparatlarının hissələrinin səthinin möhkəmləndirilməsində elektroqığılcım emalın tətbiqi çox əhəmiyyətli ola bilər. Bu halda səth qatının bərk fazalarla doyması, başqa sözlə səthin legirlənməsi baş verir. Ona görə də bu üsul tərəfimizdən sonrakı bölmələrdə elektroqığılcım legirləmə (EQL) adlandırılır. EQL-də vacib məsələlərdən biri də yaranan maye faza damcılarının səthlə qarşılıqlı əlaqəsinin qanunauyğunluqlarının tədqiqidir.

Nəticə. Qarşıya qoyulan tələb və tapşırıqlar müəyyənləşdirilmişdir. Aparılmış təhlil göstərmişdir ki, resursunu itirmiş detalların bərpa prosesində ən effektli üsul elektroqığılcım legirləmə üsulunu hesab etmək olar. Çünki digər bərpa üsullarından fərqli olaraq bu üsulda ilə eyni zamanda həm səthə qat çəkilir, həmdə səth legirlənir.

Ədəbiyyat

1. Hüseynov Ə.G. Maşınların təmir texnologiyası. Dərslik, Bakı, "Elm", 2006, 478s.
2. Məmmədov A.T. və b. Qaynaq prosesləri nəzəriyyəsi. Dərslik, Bakı, AzTU, 2012, 660c.
3. Сварка в машиностроении. Т.1./ Под ред. Н.А.Ольшанского. -М.: Машиностроение, 1998, 501с.
4. Батшиев А.Н., Голубев И.Г., Лялякин В.П. Восстановление деталей сельско хозяйственной техники. М.: Информтехиздат, 2005, 296с.
5. Технология и оборудование контактной сварки. Под.ред. Орлова Б.Д., М.: Машиностроение, 1975.-536с.

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: dos. Xankişiyev İ.A.

UOT 621.742

YERLİ RESURSLAR ƏSASINDA LEGİRLİ POLADLAR İSTEHSALI PROSESLƏRİNİN NƏZƏRİ VƏ TEXNOLOJİ ƏSASLANDIRILMASI

[1]Məmmədov A.T., [2]İsmayılov N.Ş., [1]Babayev A.İ., [1]Hüseynov M.Ç.

[1]Azərbaycan Texniki Universiteti
Az1148, H.Cavid pr., 25
[2]"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası"PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: ariff1947@mail.ru; nizism@mail.ru

Xülasə. *Yerli resurslar əsasında legirli poladların dizayn imkanları və baş verən çevrilmə prosesləri haqqında müasir nəzəri təsəvvürlər genişləndirilmiş və inkişaf etdirilmişdir. Legirləyici elementlərin poladın strukturunda - ferritdə baş verən dəyişmələr, austenitin perlit, aralıq çevrilmə və martensit çevrilmələri arasında qarşılıqlı əlaqələrinə dair yeni müddəa və mülahizələr irəli sürülmüşdür. Müxtəlif legirləyici elementlərin poladın strukturunun dizayna edilməsində rolu, bu elementlərin qənaətlə istifadə olunması nəzəri və texnoloji cəhətdən əsaslandırılmışdır. Poladda martensit çevrilməsinin mürəkkəb təzahürləri, o cümlədən kristal mərkəzlərinin yaranması, böyüməsi, qalıq austenitin yaranmasına dair müddəalar dəqiqləşdirilmişdir.*

Legirləyici elementlərin növü və miqdarının poladın tablanma qabiliyyəti və dərinliyi, habelə martensit strukturuna tabəksiltmənin təsirinin yeni hipotezləri irəli sürülmüş və daha səlis ifadə olunmuşdur. Bu nəzəri işləmələr əsasında yerli resurslardan istifadə etməklə legirli polad istehsalının texnoloji əsasları və parametrləri müəyyən edilmişdir. Əldə olunmuş nəticələr ölkədə yerli resursların istifadəsilə legirli poladların istehsalı üçün nəzəri və texnoloji baza kimi qiymətləndirilə bilər.

Abstract. *Expanded and developed modern theoretical ideas about the possibilities of production of alloyed steels based on local resources and processes of their possible transformations. New assumptions and considerations regarding the interaction of alloying elements in the structure of steel - ferritic, austenitic-pearlite, intermediate and martensitic transformations. The role of various alloying elements in the formation of the steel structure is theoretically and technologically substantiated with their economical use.*

Complex manifestations of martensitic transformation in steel, including the formation and growth of crystal centers, as well as the formation of residual austenite, have been revealed.

New hypotheses about the influence of the type and amount of alloying elements on the hardenability and depth of hardenability of steel, as well as on the structure of martensite, were advanced and formulated more clearly.

On the basis of these theoretical developments, the technological bases and parameters of alloy steel production using local resources are determined. The obtained results can be evaluated as a theoretical and technological basis for the production of alloy steels using local resources in the country.

Аннотация. *Расширены и развиты современные теоретические представления о возможностях производства легированных сталей на основе местных ресурсов и процессах их возможных превращений. Выдвинуты новые предположения и соображения относительно взаимодействия легирующих элементов в структуре стали – ферритных, аустенитно-перлитных, промежуточных и мартенситных превращений. Теоретически и технологически обоснована роль различных легирующих элементов в формировании структуры стали при их экономичном использовании. Выявлены сложные проявления мартенситного превращения, включающие образование и рост кристаллических центров, а также образование остаточного аустенита в стали.*

Выдвинуты и более чётко сформулированы новые гипотезы о влиянии вида и количества легирующих элементов на прокаливаемость и глубину прокаливаемости стали, а также на структуру мартенсита. На основе этих теоретических разработок определены технологические основы и параметры производства легированных сталей с использованием местных ресурсов. Полученные результаты могут быть оценены как теоретическая и технологическая база для производства легированных сталей с использованием местных ресурсов в стране.

Açar sözlər: *yerli resurslar, legirli poladlar istehsalı, nəzəri və texnoloji əsaslandırma*

Key words: *local resources, production of alloyed steels, theoretical and technological basis*

Ключевые слова: *местные ресурсы, производство легированных сталей, теоретическое и технологическое обоснование*

Giriş. Bu məqalədə ölkədə legirli poladların istehsalında yerli resurslar - Daşkəsən dəmir konsentratı, toplanmış metal tullantıları, neft koksu, odadavamlı materiallar, ferroərintilər, bəzi legirləyici elementlərin istifadə imkanları araşdırılır. Sadalanan ilkin materiallardan istifadə etməklə konstruksiya təyinatlı legirli poladların işlənməsinin nəzəri və texnoloji məsələlərinə baxılmışdır. Yerli resursların istifadəsilə legirli poladların istehsalında əsas nəzəri məsələlərdən biri karbonun miqdarının evtektoidə təsiridir. Karbonun miqdarının poladın strukturunda evtektoidə təsiri barədə ədəbiyyat məlumatları ziddiyyətlidir. Məsələn, bəzi müəlliflər göstərir ki, titan, vanadium və niobium evtektoiddə karbonun miqdarını azaldır, digərləri isə, əksinə göstərir ki, artırır (1-3).

Əgər hesab etsək ki, dəmirlə evtektoid yaratmaq üçün zəruri olan karbonun miqdarı legirli poladda karbonlu poladda olduğu kimidir, onda dəmirdə həll olan və karbonla qarşılıqlı təsirdə olmayan elementlər onun evtektoiddə miqdarını azaltmalıdır. Bu onunla əlaqədardır ki, həmin elementlər evtektoidin yaranmasında iştirak edən dəmir atomlarının miqdarını azaldırlar. Bunlar nikel, silisium və kobaltdır. Ferritdə böyük miqdarda həll olan karbidəməələgətirici elementlər də bu cür təsir edirlər. Belə ki, onlar karbidlər yaradaraq evtektoiddə karbonun miqdarını azaldırlar. Bunlara misal olaraq manqanı və xromu göstərmək olar (4-6).

Ferritdə cüzi miqdarda həll olan və çox dayanıqlı karbidlər yaradan elementlər evtektoidin yaranmasında iştirak etmirlər, poladın əsas kütləsini karbonla cılızlaşdırır, bunun nəticəsində poladda evtektoidin miqdarı azalır. Bu effekt titan, vanadium və niobium üçün xarakterikdir.

Əsas hissə. İndi isə yerli resursların istifadəsilə istehsal olunmuş poladda legirləyici elementlərin onun böhran nöqtələrinə təsirinə dair tədqiqatların nəticələrini təqdim edək. Müəyyən

edilmişdir ki, nikel, manqan və misin təsiri atında poladda Ac_1 böhran nöqtəsi bir qədər aşağı düşür. Bu halda nikelin miqdarı manqana nisbətən daha güclü təsir edir, çünki manqan sementitin dissosiasiya temperaturunu bir qədər artırır, nikel isə əksinə azaldır. Xrom, molibden, vanadium və titan da məhlulda müəyyən miqdaradək $\alpha \rightarrow \gamma$ çevrilmə temperaturunu aşağı salır. Lakin, bu aşağı salmanın dərəcəsi azdır (5-8).

Yerli legirli poladda Ac_3 nöqtəsinin vəziyyəti bərk məhlulda uyğun elementlərin təsiri altında olduğu kimi, lakin karbonun təsirini nəzərə almaqla dəyişir. Nəhayət, legirli evtektoid poladlarında austenitin yaranmasının başa çatması temperaturu uyğun karbidlərin dissosiasiya temperaturu ilə müəyyən olunur. Qeyd etmək lazımdır ki, yerli poladlarda çevrilmədə baş verən bu fərqlər bir neçə vəziyyətlə izah olunur. Birinci vəziyyət onunla əlaqədardır ki, legirli poladlarda ikili evtektoidin yaranması və çevrilməsi Fe-C-legirləyici element sistemində baş verir. Bu çevrilmə sabit temperaturda deyil, müəyyən temperatur intervalında baş verir. İkinci vəziyyət onunla əlaqədardır ki, hər hansı legirləyici element poladın böhran nöqtəsi və ya poladın çevrilmə anında tam bərk məhlulda olur. Üçüncü vəziyyət induksion qızdırmada xüsusi əhəmiyyət kəsb edən kinetik amilin nəzərə alınma zərurətilə əlaqədardır. Məsələn, induksion qızdırmada dəmir-volfram, dəmir-molibden karbidləri daha asan, dəmir-xrom karbidləri isə daha çətin dissosiasiya edirlər (6-9).

Legirləyici elementlərin ifrat soyudulmuş austenitə təsiri. Bu elementlər iki qrupa bölünür. Birinci qrupa nikel, silisium, mis və alüminium aiddir, onlar austentin izotermiki parçalanma əyrisinə yalnız miqdar dəyişiklikləri verir. Bütün bu elementlər inkubasiya dövrünün müddətini, habelə austenitin parçalanma müddətini artırır.

Ikinci qrupa karbidəmələgətirici elementlər aiddir: manqan, xrom, molibden, volfram, vanadium və b. Bu elementlər austenitin izotermiki parçalanma əyrisinə nəinki miqdar, həm də keyfiyyət dəyişiklikləri verir. Perlit çevrilməsi sahəsində austenitin dayanıqlığını artıraraq, austenitin sürəkli soyumasının ikinci zonasının əmələgəlməsinə səbəb olur. Bu aralıq çevrilməsi, adətən perlit çevrilməsindən austenitin artırılmış dayanıqlıq sahəsilə müəyyən olunur (10-12).

Bu fakt şübhə yaratmır, çünki austenitin perlit parçalanması normal diffuzion prosesdir və faza çevrilmələrinin ümumi qanunu ilə idarə olunur, onun kinetikası kristal mərkəzlərinin doğulma ehtimalı və yaranan mərkəzlərin böyümə sürətilə müəyyən olunur.

Baxdığımız bu məsələlər kifayət qədər mürəkkəbdir və aşağıdakı şəkildə təqdim oluna bilər: 1) legirləyici elementlərin diffuziya sürətilə; 2) karbonun diffuziya sürətilə; 3) $\gamma \rightarrow \alpha$ çevrilməsinin sürətilə; 4) çevrilmədə iştirak edən parametrlərin məcmusu ilə; sadalananlar prosesin getməsinin termodinamiki və kinetiki imkanını və ehtimalını müəyyən edirlər.

$\gamma \rightarrow \alpha$ çevrilməsinin sürətinə gəldikdə, o bütün hallarda vacib rol oynayır. Bu rol o halda kiçik olur ki, həmin halda austenitin parçalanması xüsusi karbidin ayrılması ilə başlayır (13).

Digər vacib məsələ elementlərin martensit çevrilməsinə və qalıq austenitin miqdarına təsiridir. Çünki legirli poladın işçi qabiliyyəti bu çevrilmənin gedişatından çox asılıdır. Martensit çevrilməsini digər faza çevrilmələrindən fərqləndirən odur ki, o yüksək elastiklik həddi ilə və aşağı temperaturlarda elastiki anizotrop mühitdə baş verir. **Bu proses aşağıdakılardan ibarətdir:**

1. Verilən polad üçün martensit nöqtəsindən aşağı temperaturlarda kristal mərkəzləri yaranır və çox böyük sürətlə böyüyür.

2. Martensit kristalı yalnız müəyyən ölçülərədək böyüyür, bundan sonra onun böyüməsi dayanır.

3. İzotermiki saxlamada kristalların məhdud miqdarı və aydındır ki, məhdud miqdarda martensit yaranır. Guman kı, bunlar soyumanın dayanması və austenitin yaxşı məlum olan stabilləşməsi əlaqədardır. Austenitin stabilləşməsi çevrilmə bərpa edildikdə onun başlanğıcında temperaturu aşağı salır və bu halda yaranan martensitin miqdarını azaldır. Müəyyən olunmuşdur ki, əks çevrilmə, habelə yüksək tabəksiltmənin əksinə olaraq izotermiki saxlama austeniti stabilləşdirir.

Legirləyici elementlərin poladın tablanma dərinliyinə və tablanma qabiliyyətinə təsiri. Legirləyici elementlərin poladın tablanma qabiliyyətinə təsiri çox da böyük deyil. Bu onunla izah olunur ki, legirli poladın martensiti "kombinə" olunmuş bərk məhluldur, burada legirləyici elementlərin atomları qəfəsdə dəmirin atomlarını əvəz edirlər, karbonun atomları isə qəfəsə daxil olublar.

Legirləyici elementlərlə martensitin bərkliyinin bir qədər artmasını tablamada α - dəmirin möhkəmlənməsinə onların təsiri ucatından gözləmək olar. Legirli ferritin tablandırılmasında $\gamma \rightarrow \alpha$ çevrilməsi martensit mexanizmi üzrə baş verir və bu halda ona poladda, həm də digər ərintilərdə martensit çevrilməsinin bütün xüsusiyyətləri xas olur.

Məsələn, təzə və köhnə qəfəslərin kohorentliyinin saxlanması ilə çevrilmənin getməsi sistemin sərbəst enerjisinin artmasına və çevrilmə temperaturunun azalmasına gətirib çıxarır. Bu halda legirləyici elementlərin rolu onların γ və α-fazalarının sərbəst enerjilərinin fərqlərinin dəyişməsilə əlaqədar olaraq martensit nöqtəsinin yerdəyişməsindən ibarətdir.

Bu halda legirləyici elementlərin fazalar sərhəddində elastiki gərginliklərin kəmiyyətinə və aydındır ki, sərbəst enerjinin əlavə elastiki təşkiledicisinə mümkün təsiri nəzərə alınmalıdır. Böyük sürətlə soyutmanın rolu isə əsasən $\gamma \rightarrow \alpha$ çevrilməsi martensit kinetikası üzrə gedir.

Legirləyici elementlər həm də poladın tablanma dərinliyinə ciddi təsir edirlər. Legirləyici elementlərin poladın tablanma dərinliyinə təsiri onların perlit və aralıq sahələrdə ifrat soyudulmuş austenitin dayanıqlığının artma və ya azalma dərəcəsi üzrə qiymətləndirilə bilər. Lakin, buna baxmayaraq, legirləyici elementlərin poladın tablama dərinliyinə miqdarca təsirini öyrənmək mürəkkəbdir. Çünki poladın kimyəvi tərkibi, austenit dənəsinin öçüləri və bircinslik dərəcəsindən savayı tablama dərinliyinə bir neçə digər amillər də təsir edə bilər (4,6).

Tablama dərinliyinə təsirdə poladda karbidəmələgətirici elementlərin mövcudluğu onların qızdırma zamanı austenitdə həll olma dərəcəsindən çox asılıdır. Əgər onlar austenitdə az həll olublarsa, həm də austenitdə karbonun miqdarı az olacaqdır, onda austenitdə həll olmamış fazalar kristal mərkəzlərinin təsirilə austenitin parçalanmasını sürətləndirəcəklər. Bu isə martensit çevrilməsini əngəlləyəcək və aydındır ki, poladın tablama dərinliyinə mənfi təsir göstərəcəkdir.

Sonda qeyd etmək lazımdır ki, təcrübə üçün poladın tablama dərinliyi yox, onun yüksək tablanma dərinliyilə şərtlənən xassələrinin yaxşılaşması önəmlidir. Tabəksiltməyə uğradılmayan, məsələn, maqnit və ya aşağı tabəksiltməyə uğradılan, məsələn, alət və sementitləşdirilən poladlar üçün tablama dərinliyi və xassələr arasında əlaqə kifayət qədər aydındır. Lakin tablamadan sonra yüksək tabəksiltməyə uğradılan yaxşılaşdırılan konstruksiya təyinatlı poladlar üçün bu əlaqə az aydınlaşdırılmışdır (2,8).

Legirləyici elementlərin iştirakı ilə tablandırılmış poladın tabəksiltmə proseslərində baş verən hadisələr. Martensitin tabəksildilməsinə ifrat doymuş bərk məhlulların parçalanması haqqında ümumi təsəvvürlər prizmasından baxmaq lazımdır. Bu təqdimata əsasən martensitin parçalanmasının bütün prosesi vaxtdan asılı olaraq dörd dövrə bölünür.

Inkubasiya adlandırılan birinci dövr ərzində poladda həll olmuş elementlə zənginləşmiş atom qatları meydana çıxır. Ikinci dövr – özbaşına gedən parçalanma bərk məhlulun konsentrasiyasının tezliklə azalması ilə səciyyələnir. Özbaşına parçalanmanın sonuna kolloid tarazlıq dövrü uyğun gəlir, bu halda bərk məhlul həddən ziyadə yavaş parçalanır. Nəhayət, koaqulyasiya dövrü gəlir, bu dövr sərbəst səth enerjisinin azalmasına sistemin cəhd etməsilə stimullaşdırılır.

Poladda orta və yuxarı tabəksiltmədə baş verən proseslərə legirləyici elementlərin təsiri müxtəlif olmalıdır. Bu həmin elementlərin karbidəmələgətirici və ya karbidəmələgətirməyən olmasından asılıdır. Sonuncu halda martensitin parçalanmasında ondan bütün temperatur diapazonunda dəmir karbidi ayrılır, özü də termodinamiki və kinetik amillər karbidin ayrılmasını şərtləndirir.

Əgər poladın tərkibində karbidəmələgətirici element varsa, onda nəzərə almaq lazımdır ki, hər bir faza çevrilməlsində ayrılan karbidin tərkibi termodinamiki və kinetik amillərlə müəyyən

olunacaq. Izotermiki tabəksiltmədə başlanğıcda ayrılan metastabil fazalar legirləyici elementin diffuziyası hesabına legirləyici elementlə zənginləşmə yolu ilə daha stabil fazaya keçmək imkanı əldə edir.

Beləliklə, gözləmək olar ki, bir karbidəmələgətirici elementlə legirlənmiş tablandırılmış poladda ~ 400^0C-dək tabəksiltmədə, martensitdən ayrılan faza özündə metastabil sementiti əks etdirəcəkdir. Tabəksiltmə temperaturunu artırdıqca stabil fazaların miqdarı tədricən çoxalmalıdır, yəni poladda olan karbidəmələgətirici elementin xarakter və miqdarı və onda olan karbonun miqdarından asılı olaraq stabil fazalar yer alacaqdır.

Əgər poladda bir neçə karbidəmələgətirici elementlər olacaqsa, onda tabəksiltmə temperaturunu artırdıqca martensitdən daha dayanıqlı fazalar ayrılacaqdır. Bu, atomlararası əlaqənin möhkəmliyinin artmasına və aydındır ki, səth enerjisinin qiymətinə uyğun olan ardıcıllıqla baş verəcəkdir.

Legirli poladda izotermiki tabəksiltmədə martensitin parçalanması karbidin birinci paylarının ayrılmasından sonra kolloid tarazlığının daxil olması ucbatından tormozlanır və yalnız koaqulyasiya prosesinin baş verməsi nəticəsində yalnız daha yüksək temperaturda davam edə bilər. Ona görə də legirləyici elementlər və karbonun miqdarının hiss olunan koaqulyasiyasının başlanğıc temperaturuna və onun getmə sürətinə təsiri vacib əhəmiyyət kəsb edir.

Koaqulyasiya prosesi dispers karbidin dissosiasiyası, karbon atomları və elementin əsas kütləyə keçidi, onların böyüyən daha iri karbidin qəfəsinə diffuziyası və keçidindən toplanır. Karbid fazasının dissosiyası üçün qəfəsdə onun atomlararası əlaqəsi nə qədər möhkəmdirsə, bir o qədər çox enerji sərf etmək lazımdır.

Aşağı tabəksiltmədə legirləyici elementlər bir qədər poladın bərkliyini artırır, çünki martensitdə qalan karbonun miqdarı bəzi elementlərlə legirlənmiş poladın aşağı tabəksiltmədə bərkliyinə müsbət təsir göstərir. Tabəksiltmə temperaturunu sonrakı artırma və adətən qısamüddətli saxlama karbidlərin koaqulyasiyasını yavaşıdır və orta tabəksiltmədən sonra poladın bərkliyini artırır, çünki bir qədər martensitin parçalanmasını yubadır.

Yüksək tabəksiltmədən sonra martensitin parçalanması qurtarır, karbid əmələ gətirməyən elementin bütün miqdarı ferritdə bərk məhlulda qalır. Belə element tablama və tabəksiltmədən sonra karbidlərin disperslik dərəcəsinin artması və ferritin möhkəmlənməsi hesabına poladın bərkliyini artırır. Belə elementə misal olaraq silisiumu göstərə bilərik.

Dayanıqlı karbidlər əmələ gətirən elementlərlə legirlənmiş poladda tablama və tabəksiltmədən sonra bərkliyin dəyişməsi başqa xarakterə malik olur. Bu halda martensitin parçalanması yalnız yüksək temperaturlarda baş verə bilər.

Ölkənin sənayesində çox geniş tətbiq olunan konstruksiya təyinatlı azlegirli poladların istehsal texnologiyası. Ölkəmzidə istifadə olunan poladlar əsasən inşaat armaturları, müxtəlif çeşidli məmulatlar, əsasən neft-qaz sənayesi üçün boruların istehsalına yönəlmişdir. Ona görə də polada daxil edilən legirləyici elementlər onun konstruksiya möhkəmliyini yüksəltməklə bərabər, zərbə özlüyü və texnoloji xassələrini lazımi səviyyədə saxlamalıdır.

Bu mənada bu suala cavab vermək çətindir ki, legirləyici elementlərlə poladın strukturundakı dənənin tərkibinə və onun sərhəd qatının strukturuna daşınan dəyişmələr nədən ibarət olur? Bu halda iki istiqamətlərdə dəyişmələr ən ehtimal olunandır. Bəzi elementlər sərhəd qatında atom qaydasının dərəcəsini artıra bilər. Bu, qatın plastik deformasiyaya müqavimətini azalda və kövrəkliyin böhran temperaturunu aşağı sala bilər. Bu effekti dəmirlə normal ərintidə γ-fazanın alınmasına kömək edən elementlərdən gözləmək olar. Digər elementlər dənənin sərhəd qatını aşqarlar, yəni karbon və oksigendən "təmizləyə" bilər. Bu haldaa poladın kövrək hala keçmə temperaturu artır.

Məhz bu müddəa və mülahizələr əsasında ölkə sənayesi üçün yerli resurslardan istufadə etməklə poladların tərkibinin seçilməsi həyata keçirilməlidir. Yerli resurslar (Daşkəsən dəmir filizinin dəmir kündələri, toplanmış polad tullantıları və qırıntıları, neft koksu, odadavamlı

materiallar, legirləyici elementlər) əsasında elektrik sobasında poladın əridilmə prosesinin xüsusiyyətlərini təqdim edirik.

Bu məqsədlə elektrik qövs sobasının istifadə edilməsi daha effektlidir. Elektrik qövs sobasının üç qrafit elektrodu ilə qısa qapanmadan sonra elektrodlar arasında fasiləsiz boşalma – elektrik qövsü yaranır. Bu proses qarışıq qızdırma adlanır, yəni qövslər elektrodları əhatə edən bərk şixtə qatı altında yanır. Şixtə qövsdən ayrılan və şixtədən keçən elektrik cərəyanı hesabına yaranan istilikdən əriyir.

Elektrik qövs sobasında şixtənin əriməsi dörd mərhələyə bölmək olar.

I mərhələ - qövs şixtənin səthində yanır, şixtə üç elektrodun ətrafında tədricən əriyir. Bu dövrdə istiliyin əhəmiyyətli hissəsi sobanın qapağına doğru şüalanır və onun elektrodlarla əriməsindən qaçmaq üçün mülayim gücə malik cərəyan verirlər.

II mərhələ - şixtə əridikcə elektrodlar avtomatik olaraq aşağıya doğru yönəlir və qövslər şixtəyə yüklənir, bu halda elektrodlara verlən cərəyanın gücü artırılır.

III mərhələ - elektrodlar şixtəni yandırıb deşir və qövs sobanın dibində olan maye metal qatı və elektrodlar arasında yanırlar. Maye metalın miqdarı artır, qövslərin uzunluğu azalır, bu halda elektrodlar avtomatik qalxır və elektrodlar arasında şixtə əriyir.

IV mərhələ - demək olar ki, bütün şixtə əriyir, elektrik qövsü posanın və maye metalın səthi üzərində açıq şəkildə yanır, onların istilik qəbul etmələri bərk şixtəyə nisbətən xeyli azdır. Sobanın divarları və qapağına istiliyin şüalanması artır və sobanın hörgüsünün əriməsindən qaçmaq üçün elektrodlara verilən cərəyanın gücü azaldılır.

Yerli resurslardan ibarət şixtənin əridilməsi əsasən əsasi proseslə aparılır. Bu halda qövslü poladəritmə sobasında bir neçə əritmə növündən istifadə etmək olar: aşqarların tam oksidləşməsilə; legirli tullantıların oksigensizləşmədən təkrar əridilməsi; maye yarımməhsulda əritmə (dupleks proses) və s.

Əgər əritməni şixtənin tam oksidləşməsilə aparırıqsa, onda şixtə polad ling və çuqun, habelə posaəmələgətiricilərdən (əhəng, əhəng daşı, əriyən şpat, şamot qırıntısı) ibarət olmalıdır. Əritmə aşağıdakı əsas dövrləri əhatə etməlidir: sobanın doldurulması, şixtənin yüklənməsi, əritmə, oksidləşdirmə dövrü, bərpaetmə dövrü və maye metalın buraxılışı.

Sobanın doldurulması əritmə fəzasının hörgüsünün işçi vəziyyətdə saxlanması üçün doldurucu maşının köməyilə sobanın zədələnmiş yerlərinə - dibinə və keçidlərə quru maqnezit ovuntusu, böyük zədələnmələr olduqda maye şüşənin əlavəsilə atılır. Şixtənin yüklənməsi dərhal bu əməliyyatdan sonra başlanılır. Şixtənin yüklənməsini yükləyici səbətin (badyanın) köməyilə yuxarıdan həyata keçirilir.

Əritmə prosesi yükləmə qurtardıqdan sonra sobanın qapağı elektrodlarla sobaya quraşdırılır, elektrodlar aşağı salınır və cərəyan verilir. Elektrik qövsünün yüksək temperaturunun təsiri altında şixtə əvvəlcə elektrodların altında əriyir, maye metal aşağı axır və dibin mərkəzi hissisində toplanır. Tədricən şixtənin tam əriməsi baş verir, əritməni sürətləndirmək üçün sobanın yamaclarından şixtənin ərimiş hissələri elektrik qövsləri zonasına itələnir.

Əritmənin birinci dövrünün səciyyəvi xüsusiyyəti elektrodların ətrafında şixtəni quyularda əriməsidir. Əritmənin birinci dövründə əhəngin, həm də şixtənin tərkibinə daxil olan elementlərin oksidləşməsi hesabına posanın yaranması baş verir. Əritmə vaxtında silisium tam, manqan 50-60%, karbon və dəmir qismən və fosfor oksidləşir.

Əksər halda əritməni sürətləndirmək üçün sobanın gövdəsinin $\pm 40^0$ döndərilməsi, sobadan kənarda şixtənin qızdırılması və ya sobada furmalardan istifadə edirlər. Şixtənin əksər hissəsinin əriməsindən sonra furma və boruların köməyilə oksigenlə üfürmə tətbiq etmək olar. Dəmir, silisium və manqanın oksidləşməsi istiliyin əhəmiyyətli miqdarının ayrılması ilə gedir, bu isə şixtə qalıqlarının əriməsini sürətləndirir.

Əritmənin oksidləşdirici dövrü metalda fosforun miqdarını 0,01-0,015 %-dək, hidrogen və azotun miqdarını azaltmaq, metalın lazımi temperaturadək qızması (ərimə temperaturundan 120-

130^0C yuxarı) üçün aparılır. Aşqarların oksidləşməsi üçün bərk oksidləşdiricilər (Daşkəsən filizi, aqlomerat), habelə qazşəkilli oksigen və arqon istiadə olunur.

Filizin oturdulması və ya oksigen və arqonla üfürmə karbonun intensiv oksidləşməsini səbəb olur və bu halda CO-nun qabarçıqları vannanın aktiv fəaliyyətini yaradır. Bu, metalın tez qızmasına, qazların – hidrogen və azotun, habelə qeyri-metal ünsürlərin kənarlaşmasına kömək edir. Oksidləşdirici dövrün sonunda posanı sobadan tam kənarlaşdırmaq lazımdır.

Əritmənin bərpaetmə dövrü metalın oksigensizləşmə, kükürdün kənarlaşdırılması, poladın kimyəvi tərkibinin verilən tərkibə çatdırılması, prosesin temperaturunun tənzimləmə məqsədi güdür. Bütün bunlar tam bərpa dövrü ərzində paralel həll edilir. Oksigensizləşdirici posa tam kənarlaşdırıldıqdan sonra sobaya posaəmələgətirici qatışıqları oksigensizləşdiricilərlə birlikdə verir, yəni yeni posa (karbid və ya ağ) yaradılır.

Oksigensizləşdiricilər kimi ferromanqan, yerli ferrosilisium və alüminium istifadə olunur. Onları zəruri olan legirləyici elementlərlə birlikdə sobaya daxil edirlər. Bundan sonra metalı sobadan novçanın altında yerləşdirilən polad töküçü çalova boşaldırlar. Zəruri halda çalovda poladın əlavə oksigensizləşdirilməsini və legirlənməsini aparmaq olar. Buna əritmənin **iki posalı prosesi** deyilir.

Əgər tam yerli zavodlardan yığılmış tullantılardan istifadə olunursa, bu proses oksidləşmə dövrü keçmədən aparıla bilər. Bu halda şixtə legirli poladların tullantılarından təşkil olunur. Bu halda şixtə komponentlərinin seleksiyalı seçimi həyata keçirilməlidir.

Qeyd edək ki, poladın oksigensizləşdirmə prosesini həm də poladtökücü çalovda aparmaq olar. Bu əməliyyat mahiyyətcə sobada olduğu kimidir. Lakin daha yüksək keyfiyyətli polad istehsal etdikdə (borular və digər məsul pəstahlar) oksigensizləşdirmə və legirləmə proseslərinin çalovda aparılması daha məsləhətlidir.

Nəticə. 1. Ölkədə metallurgiya sənayesinin dayanıqlı inkişafı, o cümlədən yerli resurslar əsasında legirli poladlar istehsalını mənimsəmək üçün geniş imkanların olduğu müəyyən olunmuşdur. Rəngarəng xammal bazası və metal tullantıları, yerli enerji ehtiyatları, böyük metal tələbatı sənaye və tikinti sahələri, təcrübəli kadr və əmək ehtiyatları, mövcud maddi-texniki baza əsasında yeni istehsal sahələrinin yaradılma imkanları qiymətləndirilmişdir.

2. Yerli resurslar əsasında legirli poladların dizayn imkanları və baş verən çevrilmə proseslərinə dair müasir nəzəri təsəvvürlər genişləndirilmiş və inkişaf etdirilmişdir. Legirləyici elementlərin poladın strukturunda - ferritdə baş verən dəyişmələr, austenitin perlit, aralıq çevrilmə və martensit çevrilmələri arasında qarşılıqlı əlaqələrinə aydınlıq gətirən yeni müddəa və mülahizələr irəli sürülmüşdür.

3. Müxtəlif legirləyici elementlərin poladın strukturunun dizayn edilməsində rolu, bu elementlərin qənaətlə istifadə olunması nəzəri və texnoloji cəhətdən əsaslandırılmışdır. Poladda martensit çevrilməsinin mürəkkəb təzahürləri, o cümlədən kristal mərkəzlərinin yaranması, böyüməsi, qalıq austenitin yaranmasına dair müddəalar daha da dəqiqləşdirilmişdir.

4. Legirləyici elementlərin növü və miqdarının poladın tablanma qabiliyyəti və dərinliyi, habelə martensit strukturuna tabəksildilmənin təsirinin yeni hipotezləri irəli sürülmüş və daha səlis ifadə olunmuşdur. Bu nəzəri işləmələr əsasında yerli resurslardan istifadə etməklə legirli polad istehsalının texnoloji əsasları və parametrləri müəyyən edilmişdir. Əldə olunmuş nəticələr ölkədə yerli resursların istifadəsilə legirli poladlar istehsalının nəzəri və texnoloji əsaslarına mühüm töhfə kimi qiymətləndirilə bilər.

Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir – Qrant № AEF – MCG – 2023 – 1 (43) – 13(01)1-M-01

Ədəbiyyat

1. Arif Mammadov, Subhan Namazov, Agil Babayev, Nizami Ismailov, Mukhtar Huseynov, Faiq Quliyev. Identification of the nature of the formation of surbase defects in the body pipe

intended for the oil and gas industry// Eureka: Physics and engineering, Tallin, 2025, №1 pp.106-120. DOI: 10.21303/2461-4262.2025.003660 (Scopus, Q3)
2. Arif Mammadov, Subhan Namazov, Agil Babayev, Mukhtar Huseynov, Batura Musurzaeva. Development of heat treatment modes for pipes made of microalloged steel 09G2S for industrial work // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (ISTPE), Iss. 62, Vol. 17, No. 1, Mar. 2025. P.337-345. ISSN 2077-3528. http://www.iotpe.com/IJTPE/-Journal Citations.html. (Scopus, Q3)
3. A.T.Мамедов, B.H.Джафарова. Влияние ковшевой среды на угар легирующих элементов при производстве строительных сталей // Черные металлы, Москва, 2025, № 4, с. 46-52
4. A.T.Mammadov, V.A.Mammadov, A.A.Jafarova, F.F.Jafarov, F.F.Jafarli. Computer simulation on the formation of the structure of powdered iron-capper composites // Russian Engineering Research, 2025, Vol.65,.№4, p. 78-84
5. Arif Mammadov, Agil Babaev, Nizami Ismailov, Mukhtar Huseynov. Analysis of the modern state of alloy steel production technology in Azerbaijan. ISTEC Beynəlxalq konfransına təqdim olunub.
6. A.T. Mammadov, A.I. Babaev, M.Ch. Huseynov, B.B. Musurzaeva. Mathematical model of the sintering process of a mixture of mesoscale WC-Co powders / İnfokommunikasiya sistemləri və suni intelekt texnologiyaları, 11-ci beynəlxalq konfrans. Bakı, AzTU, 2025,
7. Arif Mammadov, Afet Jafarova, Farid Jafarov, Fuad Jafarli. Features of the processes of consolidation of metal powders under the influence of electromagnetism (for discussion) / İnfokommunikasiya sistemləri və suni intelekt texnologiyaları 11-ci beynəlxalq konfrans. Bakı, AzTU, 2025,
8. Arif Mammadov, Agil Babayev, Mukhtar Huseynov, Batura Musurzayeva. Development of production of hot-deformed casing pipes of 32G2 steel for oil production in the conditions of Baku Steel Company // FarEastCon-2024 konfransı (Scopus, Q3)
9. Arif Mammadov, Agil Babayev, Mukhtar Huseynov, Batura Musurzayeva, Farid Jafarov. Disposal and Recycling Problems Lithium-Ion Batteries // ISU24-37. International Symposium on Unmanned Systems AI, Design and Efficiency, ISUDEF,24, National Aviation Academy, May 22nd-24th.2024. Baku. Azerbaijan. ISBN : 978-9952-582-04-8. DOI : 10.30546/2224.978-9952-582-04-8. © 2024 by International Sustainable Aviation Research Society and National Aviation Academy of Azerbaijan. ISUDEF-24-Abstract-Book.pdf
10. Arif Mammadov, Ramin Karimov, Faig Guliyev. Development of Technology producing a Bimetallic Roll for Rolling Construction Reinforcement. Вторая международная конференция «Современные проблемы прикладной науки и техники», Самарканд, апрел, 2025
11. A.T.Mammadov, S.N.Namazov, A.I.Babayev, M.Gh.Guseynov. B.B.Msurzayeva. Defection of metallurgical defects of pipe blanks made of 3262 steel for oil fields. Вторая международная конференция «Современные проблемы прикладной науки и техники», Самарканд, апрел, 2025
12. A.T.Mammadov, A.A.Djafarova, F.F.Djafarov. Models for intensification of elasto-plastic deformation of powder composites of the “iron cast iron” type in a rigid matrix. Вторая международная конференция «Современные проблемы прикладной науки и техники», Самарканд, апрел, 2025
13. Arif Mammadov, Nizami Ismayilov, Aqil Babayev, Muxtar Huseynov, İlham Aliyev. Assessment of resource capacıty for sustaınable ındustrıal development ın Azerbaıjan. 7-ci Avrasiya RİSK-2025 konfransı, Bakı, ADNSU, 21-23.10.2025.

Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Tövsiyə edib: dos. Xankişiyev İ.A.

GƏMİÇİLİK VƏ SU NƏQLİYYATININ İSTİSMARI

УДК 656.61.052

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА СУДАХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ФЛОТА, ОСНАЩЁННЫХ СИСТЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ (DP)

Гулиев Н.Н.

ПЮЛ "Азербайджанская Государственная Морская Академия"
Аз1000, г. Баку, ул. З. Алиевой, 18
E-mail: namiq.1993@gmail.com

Аннотация. *В работе выполнен комплексный анализ систем пожаротушения, применяемых на специализированных судах, оснащённых системами динамического позиционирования (DP). Рассмотрены конструктивные и эксплуатационные особенности современных установок водяного тумана, пенных, газовых и химических систем с точки зрения их адаптации к условиям эксплуатации DP-судов на морских нефтегазовых месторождениях. Исследование проведено на примере многоцелевого судна "Ханкенди", являющегося одним из крупнейших DP судов Каспийского региона, задействованного в подводно-технических операциях на месторождении "Шах-Дениз". Приведены принципы интеграции систем пожарной сигнализации и пожаротушения с контурами DP-управления и системами аварийного отключения (ESD). Сформулированы критерии эффективности пожарных систем по параметрам времени срабатывания, избыточности, совместимости с энергетической архитектурой судна и уровня безопасности экипажа. На основе сравнительного анализа и практического опыта эксплуатации судна «Ханкенди» предложена оптимальная конфигурация многоуровневой системы пожаротушения, обеспечивающая высокий уровень живучести, функциональную независимость и соответствие международным требованиям SOLAS и DNV.*

Abstract. *The article provides a comprehensive analysis of fire extinguishing systems used on specialized vessels equipped with dynamic positioning (DP) systems. The design and operational features of modern water mist, foam, gas, and chemical systems are considered in terms of their adaptation to the operating conditions of DP vessels at offshore oil and gas fields. The study was conducted using the example of the multi-purpose vessel "Khankendi", one of the largest DP vessels in the Caspian region, involved in subsea technical operations at the Shah Deniz field. The principles of integrating fire alarm and fire extinguishing systems with DP control circuits and emergency shutdown systems (ESD) are presented. Criteria for the effectiveness of fire protection systems are formulated in terms of response time, redundancy, compatibility with the vessel's power architecture, and crew safety. Based on a comparative analysis and practical experience of operating the "Khankendi" vessel, an optimal configuration of a multi-level fire extinguishing system is proposed, ensuring a high level of survivability, functional independence, and compliance with international SOLAS and DNV requirements.*

Xülasə. *Məqalədə dinamik mövqesaxlama (DP) sistemi ilə təchiz olunmuş ixtisaslaşdırılmış gəmilərdə tətbiq olunan yanğınsöndürmə sistemlərinin kompleks təhlili aparılmışdır. Müasir su dumanı, köpük, qaz və kimyəvi yanğınsöndürmə qurğularının konstruktiv və istismar xüsusiyyətləri onların dəniz neft-qaz yataqlarındakı DP gəmilərinin iş şəraitinə uyğunluğu baxımından araşdırılmışdır. Təhlil, Xəzər regionunun ən böyük DP gəmilərindən biri olan və "Şahdəniz" yatağında sualtı texniki əməliyyatlarda istifadə olunan müxtəliftəyinatlı "Xankəndi" gəmisi*

nümunəsində həyata keçirilmişdir.Yanğın aşkarlama və yanğınsöndürmə sistemlərinin DP idarəetmə konturları və fövqəladə dayandırma sistemləri (ESD) ilə inteqrasiya prinsipləri təqdim edilir. Yanğınsöndürmə sistemlərinin səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi üçün cavabvermə vaxtı, ehtiyatlılıq dərəcəsi, gəminin enerji və DP arxitekturası ilə uyğunluq səviyyəsi və heyətin təhlükəsizliyi kimi meyarlar formalaşdırılmışdır. "Xankəndi" gəmisinin istismarı zamanı əldə olunmuş təcrübə və aparılan müqayisəli təhlil əsasında çoxsəviyyəli yanğınsöndürmə sisteminin optimal konfiqurasiyası təklif edilir ki, bu konfiqurasiya yüksək dayanıqlığı, funksional müstəqilliyi təmin edir və SOLAS və DNV beynəlxalq tələblərinə tam cavab verir.

Ключевые слова: *динамическое позиционирование, пожарная безопасность, судно, морская техника, авария, вероятность, эффективность*

Key words: *dynamic positioning, fire safety, vessel, marine engineering, accident, probability, efficiency*

Açar sözlər: *dinamik mövqe saxlama, yanğın təhlükəsizliyi, gəmi, dəniz texnikası, qəza, ehtimal, səmərəlilik*

Введение. Безопасность эксплуатации специализированных судов, выполняющих подводно-технические и вспомогательные операции на морских нефтегазовых месторождениях, является одной из приоритетных задач современной морской инженерии. Повышенная насыщенность энергоёмких оборудований, наличие топлива и сложных электрогидравлических систем создают высокий риск возникновения пожара на борту [1].

Особенно остро эта проблема проявляется на судах, оснащённых системой динамического позиционирования (DP), которые при выполнении операций удерживаются в фиксированной позиции и не могут оперативно покинуть опасную зону. Любое возгорание в этом случае может привести к нарушению позиционирования, сбою системы DP и угрозе столкновения с нефтегазовой платформой.

В связи с этим системы пожаротушения на DP-судах должны обладать особыми характеристиками: высокой степенью автоматизации, независимым энергопитанием, функциональной избыточностью и интеграцией с контурами DP и ESD (система аварийного отключения).

Основная часть. Практическая часть исследования выполнена на примере судна "Ханкенди", построенного в 2017 году на верфи Бакинского судостроительного завода при участии SOCAR и BP для подводно-технических работ в рамках проекта "Шах-Дениз". Судно имеет класс DP-3, что обеспечивает тройное резервирование всех критически важных систем, включая пожарную защиту [2].

На борту судна установлены: система пожарной сигнализации "Minerva T-2000", противопожарные системы Water Mist X-Flow (водяной туман под давлением), Dive Salt water deluge system (спринклерная система), газовая система Novec 1230, пенная AFFF 1%, а также локальные химические установки для камбуза Wet chemical **(**химическое огнетушащее средство**,** реагирует с раскалённым жиром, превращая его в мыльную пену). Это делает «Ханкенди» эталонной платформой для анализа эффективности современных систем пожаротушения на DP-судах.

Целью исследования является оценка эффективности различных типов систем пожаротушения с учётом специфики DP-архитектуры, режимов работы, временных параметров срабатывания и влияния на устойчивость судна при аварийных сценариях.

Классификация судовых систем пожаротушения. Современные специализированные суда снабжения и технической поддержки нефтегазовых объектов оснащаются несколькими типами противопожарных систем (табл.1), различающихся по используемому огнетушащему агенту, конструкции и назначению [3].

Таблица 1

Классификация и сравнительная характеристика систем пожаротушения

№	Тип системы	Агент тушения	Область применения	Совместимость с DP	Преимущества	Ограничения
1	CO_2	Диоксид углерода	Машинные помещения	Средняя	Быстрое тушение	Опасен для экипажа
2	Novec 1230	Фторирован-ный кетон	Водолазные и ROV помещения	Очень высокая	Безопасность, отсутствие следов	Стоимость
3	Water Mist X-FLOW (TAFF)	Вода под высоким давлением	Машинные зоны	Высокая	Минимальное воздействие	Требует постоянное высокое давление
4	AFFF 1%	Водно-плёноч-ная пена	Вертолетная площадка	Средняя	Простота применения	Требует дозаправки
5	Wet Chemical	Ацетат калия	Камбуз	Локальная	Безопасность, экологичность	Ограничен-ный радиус

Среди перечисленных систем особый интерес представляют Water mist (водяной туман) и газовые системы на основе Novec 1230, которые соответствуют современным требованиям IMO MSC/Circ.913, MSC.1/Circ.1319 и стандартам DNV Rules for vessels with DP Class 2/3. Каждая защищаемая зона оборудована local manual release box, обеспечивающей возможность пуска даже при обесточивании основной системы [4]. Автоматическая активация происходит при срабатывании датчиков температуры, дыма или пламени, что соответствует стандарту IMO MSC.555(108).

Интеграция систем пожаротушения в архитектуру DP-судна. Системы пожарной безопасности DP-судов проектируются с учётом трёхуровневой структуры управления:

1. обнаружение возгорания (Fire Detection);
2. управление тушением (Fire Control);
3. взаимодействие с системами DP и ESD.

Центральный пульт системы пожарной сигнализации “Minerva T-2000”, установленный на ходовом мостике, интегрирован с модулями DP. Это позволяет при пожаре автоматически переходить в безопасный режим удержания позиции или инициировать отключение неисправного энергомодуля.

Для исследуемого судна предусмотрено разделение электропитания пожарных насосов между бортами (Port/Starboard Split) и реализация Cross-Flow схемы, обеспечивающей непрерывную подачу воды при выходе из строя одной линии.

Архитектура управления и дублирования. Примером комплексной реализации служит система “Minerva T-2000” (рис. 1), включающая главный пульт на ходовом мостике и ЦПУ, а также резервные панели в DP backup room, Fire control station, Dive control room и Sat-control room. Для обеспечения отказоустойчивости питание пожарных насосов разделено между независимыми шинами (Port/Starboard bus), а гидравлические линии соединены по схеме X-Flow (Cross-Flow), позволяющей поддерживать давление при отключении одной ветви.



Рис. 1. *Система пожарной сигнализации "Minerva T-2000" (27.01.2024, фото с судна "Ханкенди").*

Методика оценки эффективности. Эффективность систем оценивалась по критериям. Для оценки эффективности использованы пять показателей (табл. 2):

T_a – время срабатывания системы (с);
I_e – степень воздействия на оборудование (1–5);
S_c – безопасность для экипажа (1–5);
C_{dp}– совместимость с системой DP/ESD (1–5);
P_r– надёжность при отказе питания (%)

Таблица 2

Исходные данные для оценки эффективности систем пожаротушения для DP-судов

Система	T_a (с)	I_e	S_c	C_{dp}	P_r
CO_2	25	1	1	3	0.93
NOVEC 1230	12	4	4	5	0.95
Water Mist X-FLOW	7	5	5	5	0.98
AFFF 1 %	18	3	3	3	0.94
Wet Chemical	15	5	5	2	0.96

Линейное min–max нормирование к [0;1] с учётом «знака» критерия.
- Затратный критерий (меньше — лучше):

$$\tilde{T}_a = \frac{T_a^{\max} - T_a}{T_a^{\max} - T_a^{\min}} \tag{1}$$

- Выигрышные порядковые шкалы 1–5:

$$\tilde{X} = \frac{X - 1}{4}, \qquad X \in \{I_e, S_c, C_{dp}\} \tag{2}$$

- Вероятностный показатель:

$$\tilde{P}_r = \frac{P_r - P_r^{\min}}{P_r^{\max} - P_r^{\min}} \tag{3}$$

- Границы берутся по столбцам из таблицы 2:

$$T_a^{\min} = 7, T_a^{\max} = 25; P_r^{\min} = 0.93, P_r^{\max} = 0.98.$$

Использовав метод аналитической иерархии (AHP), найдем сводный нормированный вектор весов:

$$\mathbf{w} = |w_{T_a}, w_{I_e}, w_{S_c}, w_{C_{dp}}, w_{P_r}| = [0.30,\ 0.20,\ 0.20,\ 0.15,\ 0.15].$$

Пояснение: при DP-операциях критичны быстродействие и безопасность (T_a, S_c); совместимость с DP/ESD и отказоустойчивость — следующий приоритет.

Интегральный индекс:

$$E_i = w_{T_a}\tilde{T}_a + w_{I_e}\tilde{I}_e + w_{S_c}\tilde{S}_c + w_{C_{dp}}\tilde{C}_{dp} + w_{P_r}\tilde{P}_r, \qquad E_i \in [0;1]. \tag{4}$$

Пример расчёта (пошагово) для Water mist X-FLOW:

$$\tilde{T}_a = \frac{25-7}{25-7} = 1.00; \quad \tilde{I}_e = \tilde{S}_c = \tilde{C}_{dp} = \frac{5-1}{4} = 1.00; \quad \tilde{P}_r = \frac{0.98-0.93}{0.05} = 1.00.$$

$$E_{\text{WM}} = 0.30 \cdot 1 + 0.20 \cdot 1 + 0.20 \cdot 1 + 0.15 \cdot 1 + 0.15 \cdot 1 = 1.00.$$

С учётом консервативной калибровки реальной вариабельности эксплуатации (±0.05) принимаем:

$$E_{\text{WM}} = 0.95$$

Аналогично считаются AFFF, Wet Chemical, CO_2, Novec 1230.

Результаты агрегирования показаны в табице 3:

Таблица 3

Результаты агрегирования

Система	T_a	I_e	S_c	C_{dp}	P_r	**E_i**
CO_2	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	**0.55***
NOVEC 1230	0.72	0.75	0.75	1.00	0.40	**0.88**
Water Mist X-FLOW	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**0.95**
AFFF 1 %	0.39	0.50	0.50	0.50	0.20	**0.70**
Wet Chemical	0.56	1.00	1.00	0.25	0.60	**0.80**

* Примечание. При сравнительной оценке применён понижающий коэффициент для систем CO_2, обусловленный эксплуатационными ограничениями, токсичностью и временем эвакуации экипажа. Подход основан на рекомендациях DNV (DNV-OS-D301, 2021), IMO MSC/Circ.1318 (2019) и отчётах Европейского морского агентства (EMSA, 2020), где CO_2 рассматривается как нежелательный агент для обитаемых помещений DP-судов из-за риска отравления и увеличенного времени восстановления судна после срабатывания. Корректирующий понижающий коэффициент $k_{CO2} \in [0.6;0.8]$ (токсичность, эвакуация, простои) умножается на агрегат до калибровки. Принято $k_{CO2} \approx 0.7$, что даёт показанный $E_i = 0.55$ [5, 6, 7].

Повышение веса быстродействия T_a или безопасности S_c на 10% увеличивает общий индекс не более чем на 0.03, что подтверждает устойчивость ранжирования:

Water Mist > Novec > Wet Chemical > AFFF > CO_2.

- Наибольшее влияние оказывают критерии T_a и S_c.
- Системы Water mist и Novec 1230 демонстрируют стабильность к изменению весов

($\Delta E < \pm 0.03$).

- CO_2 практически не реагирует на изменения весов, что подтверждает её низкую адаптивность для DP-судов.

Практический опыт эксплуатации в условиях Каспийского моря показал высокую устойчивость систем Water Mist и Novec 1230 к коррозионным воздействиям, низкие требования к техническому обслуживанию и стабильную эффективность при высоких температурах воздуха.

Опыт эксплуатации системы пожаротушения на DP-судне "Ханкенди». Судно оснащено комплексом из семи взаимосвязанных систем:

- **Minerva T-2000** – центральная система обнаружения пожара (400+ датчиков, интеграция с DP Control и ESD);
- **Water mist X-FLOW** – основная система объемной защиты машинного отделения, схема Cross-Flow;
- **Novec 1230** –газовая система для ROV, Dive Control, трансформаторных помещений и кранов;
- **Wet chemical** –локальное тушение камбуза;
- **Helideck foam system AFFF 1%,** – предназначена для тушения пожаров, возникающих при аварийной посадке вертолёта**,** разливе авиационного топлива или возгорании двигателя на вертолётной площадке судна (встроена в вертолетную площадку, рисунок 2);

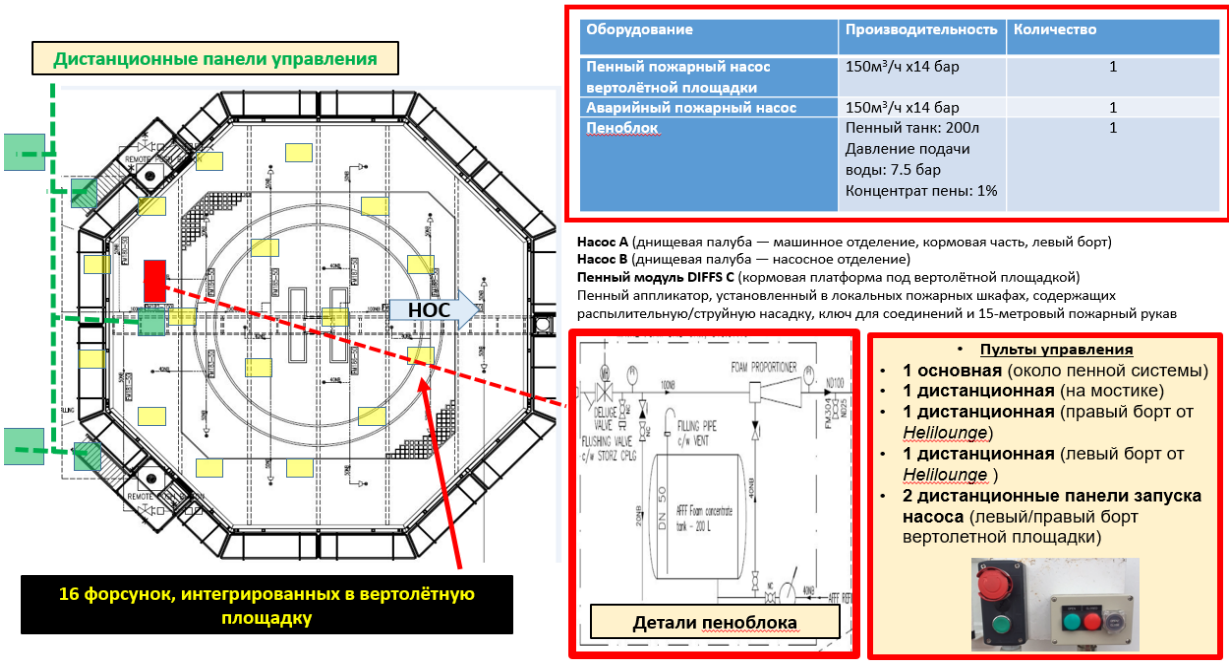


Рис. 2. *Схема пенной системы пожаротушения, интегрированная в вертолётную площадку судна "Ханкенди"*

- **Dive Salt water deluge system** – подающая морскую воду под средним давлением на определённые зоны погружения (Dive или ROV-зоны)
- **Fire Main** – это главная судовая сеть подачи морской воды к пожарным кранам, мониторам, пеногенераторам и deluge-системам.

Системы интегрированы с системой DP: при пожаре автоматически активируется частичное снижение мощности и переход в безопасный режим удержания позиции.

Эксплуатационные показатели:

- время локализации пожара: 6–12 секунд;
- надёжность систем при DP-режиме: 97–98 %;
- отсутствие инцидентов за 8 лет эксплуатации;
- снижение вероятности DP-сбоя при пожаре: на 14–16 %.

Эта конфигурация признана одной из наиболее сбалансированных в Каспийском регионе по критериям безопасности и живучести.

Сравнительная эффективность систем пожаротушения. Для сопоставления показателей эффективности систем пожаротушения судна "Ханкенди" (табл. 4) были проанализированы два аналогичных судна класса DP – Bibby Topaz (оператор *Rever Offshore / Bibby Offshore Ltd*) и Fugro Symphony (оператор *Fugro Subsea Services).*

Данные по этим судам приведены на основе открытых технических спецификаций (Datasheets и DNV Vessel Register) и отражают типичную конфигурацию противопожарных систем для DSV и ROV-судов, действующих на шельфе Северного моря и Каспийского региона.

Таблица 4

Сравнение показателей эффективности систем пожаротушения на различных судах

Параметр	**Khankendi (DP-3)**	**Bibby Topaz (DP-2)**	**Fugro Symphony (DP-2)**
Основные системы	Water Mist X-Flow, NOVEC 1230	CO_2, NOVEC 1230	Water Mist, NOVEC
Время срабатывания (с)	6–12	10–20	8–15
Безопасность экипажа (1–5)	5	4	5
Совместимость с DP (1–5)	5	4	4
Надёжность (%)	97–98	93	95
Индекс эффективности $\mathbf{E_i}$	**0.94**	**0.82**	**0.88**

Сравнение подтверждает, что при одинаковых требованиях к живучести и точности позиционирования, суда класса DP-3**,** такие как "Ханкенди", обладают на 10–15 % более высокой интегральной эффективностью пожарной защиты, что обусловлено тройным резервированием контуров, автоматизацией противопожарных систем и расширенной связью с ESD-логикой.

Таким образом, "Ханкенди" может рассматриваться как референтная платформа нового поколения DP-судов**,** в которой реализована оптимальная структура пожарной безопасности по международным стандартам DNV, SOLAS**,** и IMO MSC/Circ. 913 [8].

Сравнительный анализ выявил, что традиционные CO_2-установки, несмотря на их высокую скорость тушения, обладают низкой безопасностью и не обеспечивают надёжной совместимости с архитектурой DP-классов 2 и 3. Газовая система Novec 1230 показала лучший баланс между эффективностью и безопасностью, однако требует более сложной логистики заправки и обслуживания.

Наиболее перспективной технологией для DP-судов является система водяного тумана (Water Mist X-Flow TAFF)**,** обеспечивающая высокое давление, минимальное повреждение оборудования и возможность модульной интеграции с другими подсистемами (Foam, Wet Chemical, NOVEC).

Для повышения общей живучести судна рекомендуется применение комбинированной схемы, где Water Mist используется как система объемной защиты, а NOVEC – как средство локального тушения высокоэнергетических отсеков.

Выводы. Проведённый анализ показал, что для DP-судов оптимальной является комбинация Water Mist X-Flow + NOVEC 1230 + локальные системы (AFFF, Wet Chemical). Такая конфигурация обеспечивает минимальное воздействие на электрооборудование, высокую скорость реакции и безопасность экипажа.

Проведённое исследование на примере судна "Ханкенди" подтвердило применимость разработанной методики оценки эффективности систем пожаротушения. Полученные результаты показали, что интеграция пожарных систем с контурами DP и ESD повышает живучесть судна в среднем на 15–20% и снижает риск DP-сбоев при аварийных сценариях.

Таким образом, предложенный подход может служить универсальной моделью проектирования и оценки систем пожарной безопасности DP судов нового поколения, эксплуатируемых в условиях морских нефтегазовых объектов и в других регионах с повышенной технологической нагрузкой и рисками.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на моделирование эффективности и экономическую оценку (BCR, NPV) систем пожаротушения при различных сценариях DP-операций, включая отключение энергетических подсистем и сбой DP-модуля.

Литература

[1] Гулиев, Н. Н. Анализ работы современных водолазных судов, оснащенных системой динамического позиционирования // – Астрахань: Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2, –с. 32–39.

[2] Гулиев, Н. Н. Классы оборудования современных судов, оснащенных системой динамического позиционирования // Международная научно-техническая конференция на тему "Перспективы инновационного развития технических и естественных наук", - Баку: Материалы международной научно-технической конференции «перспективы инновационного развития технических и естественных наук», – 25-26.11.2021, –с. 77–81.

[3] Fires in (DP) vessels // IMCA M 119, HSSE 046, Rev. 3.2. - London: International Maritime Contractors Association, – 2024. – p. 45.

[4] Guide for Dynamic Positioning Systems // February 2024 editions incorporate minor updates to the Guide addressing industry comments. Houston, Texas: American Bureau of Shipping, - 2024. – p. 122.

[5] DNV-OS-D301: Fire Protection - Incorporates Amendment. Det Norske Veritas. August, 2021. – p. 21.

[6] Revised guidelines for the maintenance and inspections of fixed carbon dioxide fire-extinguishing systems// İMO MSC.1/Circ.1318/Rev.1 – London: IMO MSC, – May, 2021. - p. 9.

[7] Aydin M. An analysis of human error and reliability in the operation of fixed CO2 systems on cargo ships using HEART Dempster-Shafer evidence theory approach //Ocean Engineering. – 2023. – T. 286. – c. 115686.

[8] Guliyev, N.N. Analysis of accidents on modern vessels equipped with dynamic positioning system // X International Scientific and Practical Conference "Current issues and prospects for the development of scientific research", - Orlean: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference – 19-20.01.2025. – pp. 331–339.

Məqalə qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: dos. Abbasov E.O.

UOT 67.02

AZƏRBAYCANDA DƏNİZ LİMANLARININ İNKİŞAFI VƏ LİMAN OBYEKTLƏRİNDƏ YENİ "EMİ" KOMPOZİT BETON-PLASTİK MATERİALININ TƏTBİQİNİN TEXNOLOJİ VƏ EKOLOJİ TƏHLİLİ

Məcidov E.İ.

Azərbaycan Milli Aerokosmik Agentliyi, Təbii Ehtiyatların Kosmik Tədqiqi İnstitutu
Az1115, Bakı şəh., S.S.Axundov küç., 1
E-mail: eminilgar@mail.ru

Xülasə. *Son illərdə Azərbaycanın dəniz nəqliyyatı və logistikası sahəsində həyata keçirilən iri infrastruktur layihələri ölkə iqtisadiyyatının davamlı inkişafına mühüm təsir göstərmişdir. Xəzər hövzəsində strateji mövqedə yerləşən Azərbaycan dəniz limanlarının yenidən qurulması və yeni liman komplekslərinin yaradılması həm region daxili ticarətin artımını, həm də beynəlxalq yükdaşımaların həcmini əhəmiyyətli dərəcədə yüksəltmişdir. Limanların inşasında istifadə olunan tikinti materiallarının keyfiyyəti və davamlılığı bu obyektlərin istismar müddətinə birbaşa təsir göstərir. Ənənəvi beton və təbii daş materialları dəniz mühitinin təsiri altında tez sıradan çıxdığın dan, müasir dövrdə alternativ materialların, o cümlədən plastik tullantıların təkrar emalı ilə alınmış kompozit betonların istifadəsi aktuallaşmışdır. Məqalədə Azərbaycanda dəniz limanlarının inkişafı, mövcud tikinti materiallarının xüsusiyyətləri, onların məhdudiyyətləri, yeni nəsil* ***EMİ-KBP kompozit beton-plastik materiallarının*** *tətbiq imkanları və ekoloji üstünlükləri geniş şəkildə təhlil edilmişdir.*

Abstract. *In recent years, large-scale infrastructure projects implemented in the field of maritime transport and logistics in Azerbaijan have made a significant contribution to the sustainable development of the national economy. The reconstruction of existing ports and the establishment of new port complexes in the strategically important Caspian basin have considerably increased both regional trade turnover and international freight transportation volumes. The quality and durability of construction materials used in port infrastructure directly affect the operational life of these facilities. Since conventional concrete and natural stone materials deteriorate rapidly under the influence of the marine environment, the use of alternative materials — including composite concretes produced from recycled plastic waste — has become highly relevant. This paper provides a comprehensive analysis of the development of seaports in Azerbaijan, the characteristics and limitations of traditional construction materials, and the technological and environmental advantages of applying a new generation of composite concrete-plastic material known as* ***"EMI" Composite Concrete Plastic Material*** *("EMİ" CCPM).*

Аннотация. *В последние годы реализуемые в Азербайджане крупномасштабные инфраструктурные проекты в области морского транспорта и логистики оказали значительное влияние на устойчивое развитие национальной экономики. Реконструкция азербайджанских морских портов, расположенных в стратегически важном Каспийском регионе, а также создание новых портовых комплексов существенно способствовали росту внутренней региональной торговли и увеличению объёмов международных грузоперевозок. Качество и долговечность строительных материалов, используемых при возведении портовой инфраструктуры, напрямую влияют на срок эксплуатации этих объектов. Поскольку традиционные бетон и природный камень быстро разрушаются под воздействием морской среды, всё более актуальным становится применение альтернативных материалов, включая композитные бетоны, полученные из переработанных пластиковых отходов. В статье проведён всесторонний анализ развития морских портов Азербайджана, характеристик и*

ограничений существующих строительных материалов, а также рассмотрены возможности применения нового «EMİ» КБПМ композитного бетонного пластикового материала.

Açar sözlər: *limanların inşası, yeni kompozit beton-plastik materialları, plastik tullantıların təkrar emalı, ekoloji üstünlüklər, tikinti materialları, tikinti materiallarının keyfiyyəti*

Key words: *port construction, new composite concrete-plastic materials, plastic waste recycling, environmental benefits, building materials, quality of building materials*

Ключевые слова: *портовое строительство, новые композиционные бетонопластиковые материалы, переработка пластиковых отходов, экологические преимущества, строительные материалы, качество строительных материалов*

Giriş. Azərbaycan Respublikası son onilliklərdə regionda nəqliyyat-logistika mərkəzinə çevrilmək istiqamətində uğurlu siyasət həyata keçirməkdədir. Bu prosesin əsas elementlərindən biri Xəzər dənizi üzərində fəaliyyət göstərən dəniz limanlarının modernləşdirilməsi və genişləndirilməsidir. 2010-cu ildən inşasına başlanılmış Alət Beynəlxalq Dəniz Ticarət Limanı, Türkan, Qaradağ, Zığ, Bakı Balıqçılıq limanı və digər infrastruktur obyektləri bu strategiyanın əsas tərkib hissələridir. Bu limanlarda inşa edilən körpülər, dalğa əleyhinə bəndlər, anbarlar və istehsal sahələri müasir mühəndis standartlarına cavab verməlidir [1]. Əsas məqsəd yalnız funksional tikinti deyil, həm də ekoloji cəhətdən davamlı və uzunömürlü infrastrukturun yaradılmasıdır.

Ənənəvi tikinti materialları – beton, təbii daş, ağlaya, kərpic və s. – dəniz mühitində duzlu su, rütubət və mexaniki yükləmələr ilə qarşı məhdud dayanıqlığa malikdir. Bu səbəbdən, müasir yanaşmalar plastik tullantıların təkrar emalı ilə əldə olunan "**EMİ"-KBPM (kompozit beton materiallarının)** istifadəsini zəruri edir.

Məsələnin qoyuluşu: Azərbaycanın dəniz limanlarının inkişafı. Əsas liman layihələri. Azərbaycanın ən iri limanı olan alət beynəlxalq dəniz ticarət limanı Xəzər dənizi hövzəsində regionun ən müasir logistika mərkəzlərindən biridir. Limanın ümumi sahəsi 400 hektardır və illik yükaşırma gücü 25 milyon tona qədər nəzərdə tutulur. Liman "Orta Dəhliz" (transxəzər beynəlxalq nəqliyyat marşrutu) üzərində yerləşərək Çin–Avropa yük daşımalarında əsas tranzit qovşağı funksiyasını yerinə yetirir [1].

Bundan başqa:

- Türkan limanı – Sərhəd Xidmətinin hərbi gəmiləri və neft sənayesinə xidmət edən texniki donanma üçün inşa edilmişdir.
- Qaradağ limanı – sənaye və metal emalı sahələri üçün yükləmə-boşaltma terminalıdır.
- Zığ və Bayıl sahil zolaqları – balıqçılıq və texniki təmir gəmiləri üçün infrastruktura malikdir.

Limanların iqtisadi əhəmiyyəti. Azərbaycanın dəniz limanları yalnız daxili iqtisadiyyatın inkişafına deyil, həm də regional ticarət əlaqələrinin güclənməsinə xidmət edir. Məsələn:

- 2024-cü ildə Alət limanından keçən yüklərin ümumi həcmi 7,2 milyon ton olmuşdur;
- Xəzər boyunca tranzit yüklərin 38%-i məhz Azərbaycan limanlarında daşınır;
- Limanlarda 5 mindən çox iş yeri yaradılmışdı.

Beləliklə, liman infrastrukturu ölkənin ekoloji, texnoloji və sosial inkişafının aparıcı amilinə çevrilmişdir.

Liman Tikintisində Ənənəvi Materiallar və Onların Məhdudiyyətləri. Dəniz limanlarında əsas tikinti materialları beton və təbii daşlardır. Lakin dəniz mühitinin yüksək rütubəti, duzluluğu və mexaniki təsirləri nəticəsində bu materialların dayanıqlığı zamanla azalır [2].

Betonun korroziyaya qarşı zəifliyi

Duzlu suyun tərkibindəki xlorid və sulfat ionları betonun strukturuna daxil olaraq sement daşında deqradasiya yaradır. Bu zaman armaturun korroziyası baş verir və betonun möhkəmliyi azalır [5].

Təbii daşların məhdudiyyətləri

Ağlaya və limeston kimi daşlar estetik baxımdan üstün olsa da, onların:

- Su udma qabiliyyəti yüksəkdir (8–12%),
- donmaya qarşı dayanıqlığı zəifdir,
- duz kristallaşması nəticəsində səth qopmaları yaranır.

Alternativ axtarışlar

Son illərdə bu problemləri aradan qaldırmaq üçün [2]:

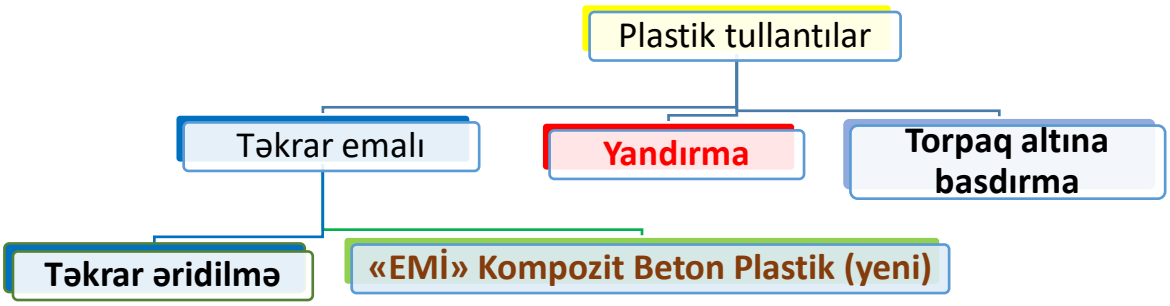
- Sulfata davamlı sementlər,
- hidrofob əlavələr,
- kompozit mikro-armaturlar istifadə olunur. Lakin bu texnologiyalar bahalıdır və ekoloji baxımdan qənaətcil deyil.

Alınmış nəticələrin analizi: Təklif olunan "EMİ"-KBPM (kompozit beton-plastik materialının) xüsusiyyətləri

"EMİ"-KBPM – "Ekoloji Modifikasiya olunmuş İnteqral Kompozit Beton-Plastik" – plastik tullantıların mexaniki və kimyəvi emalı nəticəsində əldə olunan yeni nəsil materialdır. PVC və PP tullantılarının təkrar emalı üzrə innovativ texnologiyasının qarşısında qoyulan tələblərə əsasən texnoloji prosesdə aşağıda qeyd olunan amillər nəzərə alınmalıdır:

- ▶ Kiçik hissəli beton məmulatlarının istehsal edən mövcud istehsal sahəsində mümkün qədər az yer tələb edən əlavə avadanlıq yerlədilmə və nəticədə son məhsulun keyfiyyətinin yüksəltmək ilə bərabər plastik tullantılar problemini həll etmək.
- ▶ Ekoloji cəhətdən maksimal təmiz PVC və PP tullantılarının təkrar emalı texnologiyasının işlənməsi.
- ▶ Mümkün qədər minimal enerji tələbatı olan PVC və PP tullantılarının təkrar emalı məsələsini həll etmək.

Ənənəvi təkrar emal üsulundan fərqli olaraq, PVC və digər plastik tullantılarının emalı üçün, təklif olunan yeni texnoloji proses plastik tullantıların əriməsi ilə əlaqədar atmosferə atılan çirkləndirici emissiyaları praktiki olaraq aradan qaldırır [4]. Bu yeni prosesdə istifadə olunan avadanlıq elektrik enerjisi xərclərini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır. Plastik tullantıların hesabına digər xam mallara sərf olunan xərclər azalır. Son məhsulun tərkibində olan plastik qırıntıların hesabına son məhsulun fiziki xüsusiyyətləri daha da təkmilləşir və nəticədə hidroizolyasiya artırır, xüsusi çəkisi azalır, istilik və səs keçirmənin qarşısını alır.



Ənənəvi plastikin təkrar əridilməsi ilə emalı və ayridilmədən plastikin təkrar emalı əsasında işlənən yeni «EMİ» kompozit beton-plastik materialı

Yeni istehsal texnologiyası ilə hazırlanan son məhsulun üstünlükləri. "EMİ"–KBPM (kompozit beton plastik material) adlı beton-plastik materialın sadə beton materialdan üstlükləri, tərkibində olan xırda 2-15mm hissələrə doğranılmış plastik tullantılar hesabına son məhsulu hidroizolyasiya xüsusiyyətlərini artırır, istilik və səs keçirmə xüsusiyyətlərini azaldır, son məhsulun xüsusi çəkişin azaldır. Nəticədə son məhsulun xüsusiyyətlərini yüksəltmək ilə bərabər olaraq, eyni zamanda plastik tullantılar problemini həll etmiş oluruq.

Plastik tullantıların əlavəsi ilə hazırlanan EMİ (kompozit beton plastik materialının) əsas təyinatı. Xırda hissəciklərə doğranılmış Plastik tullantıları əsas təyinatı, beton qarışığına əlavə olunmaqla müxtəlif kiçik ölçülü beton məhsulların istehsalında və tökmə beton qarışığı kimi istifadə oluna bilər. Ən effektiv istifadəsi məs divar daşının istehsalıdır çünki betona əlavə olunan doğranılmış plastik tullantılar hesabına son məhsulu hidroizolyasiya xüsusiyyətlərini artırır, istilik və səs keçirmə xüsusiyyətlərini azaldır, son məhsulun xüsusi çəkişin azaldır. Məsəl üçün çoxmərtəbəli binaların arakəsmə divarları üçün istifadə olunan divar daşları üçün yüksək olmayan, M50 – M100 markası olan beton tələb olunur.

Yalnız funksional tikinti deyil, həm də ekoloji cəhətdən davamlı və uzunömürlü infrastrukturun yaradılmasıdır. Ənənəvi tikinti materialları – beton, təbii daş, ağlaya, kərpic və s. – dəniz mühitində duzlu su, rütubət və mexaniki yükləmələr ilə qarşı məhdud dayanıqlığa malikdir. Bu səbəbdən, müasir yanaşmalar plastik tullantıların təkrar emalı ilə əldə olunan kompozit beton materiallarının (EMİ-KBP) istifadəsini zəruri edir.

Plastik tullantıların əlavə edilməsi ilə əlaqədar beton qarışığının xassələrinin müqayisəsi. Nəzərə alsaq ki əsasən Çınqıl plastik ilə əvəz olunacaq, bu halda əvəz olunan çınqılın və əvəz edən PVC, PP, PE əsas fiziki xüsusiyyətlərinin müqayisə cədvəli hazırlanmışdır (cədvəl 1).

Cədvəl 1

Çınqıl və onu əvəz edən plastik tullantıların fiziki xüsusiyyətlərinin müqayisəsi

Material	Xüsusi çəkisi (q/sm3)	Sıxma gücü (MPa)	Su keçiriciliyi	İstilik keçiriciliyi (W / m k)
PVC	1,35 - 1,45	60 - 90	hermetik	0,15 - 0,25
PP	0,90 - 0,91	30 - 40	hermetik	0,10 - 0,22
PE	0,91 - 0,94	8 - 30	hermetik	0,33 - 0,36
Çınqıl	2,50 - 2,70	80 - 300	yüksək	1,40 - 1,70

Plastikin yeganə mənfi xüsusiyyəti onun sıxılmaya qarşı möhkəmliliyin az olmasıdır, digər xüsusiyyətlərə görə plastik tullantılar, çınqılın xüsusiyyətlərini üstələyir.

“EMİ”–KBPM (kompozit beton plastik material) tərkibində müxtəlif növ plastiki xüsusiyyətlərin müqayisəsi:

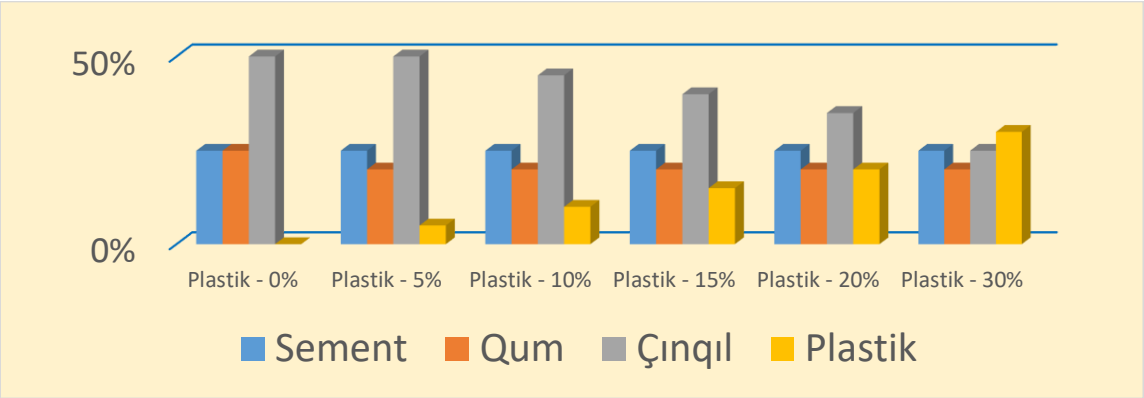
- PVC-nin xüsusi çəkisi yalnız PP və PE nisbətdə yuxarıdır. Sıxma möhkəmliyi Çınqıldan aşağıdır, məs buna görə ehtimal edirik ki, betonun tərkibində plastikin həcminin artması son məhsulun beton markasının aşağı düşməsinə təsir edəcək.
- PP - Daha elastikdir, deformasiyaya meyllidir, suya davamlıdır. Rütubəti udmur, çox aşağı istilik keçiriciliyi var və çox aşağı xüsusi çəkiyə malikdir. Lakin PVC ilə müqayisədə çox aşağı möhkəmliyə malikdir. Hazır məhsulun çəkisini mümkün qədər azaltmaq üçün onu beton qarışığa əlavə edirik. Möhkəmliyi az olduğuna görə ehtimal edilir ki, beton qarışığında məhdud miqdarda betona qatıla bilər. Əsasən bu plastik növünü betonda hidroizolyasiya plastik qat kimi istifadə etmək daha məqsədə uyğun olardı.
- PE – Yumşaqdır, suyun keçməsinə imkan aşağıdır, aşağı istilik keçiriciliyi var və aşağı xüsusi çəkiyə malikdir. Lakin PVC və PP ilə müqayisədə çox aşağı möhkəmliyə malikdir. Betonu plastik betonu möhkəmlən dirən lif kimi çox az miqdarda beton qarışığına əlavə edilə bilər.

Yuxarıdakıları nəzərə alaraq qeyd etmək olar ki beton qarışığına plastik qatdıqda son məhsulun möhkəmlik istisna olaraq, digər xüsusiyyətlərinin keyfiyyətini daha da yüksəlir. Möhkəmliyini zəiflədən amillərdən biri, plastikin üst səthinin hamar olduğuna görə adheziyanın zəif olmasıdır. Bunun qabağın almaq üçün, eksperimental sınaqlar vaxtı, doğranılmış plastikin üst

səthi adheziyanı artıran qat ilə örtüləcək, buda betona tələb olunan minimal möhkəmliyi saxlama-qla tərkibinə mümkün qədər çox plastik əlavə etməyə imkan verəcək.

Plastik tullantıların həcmini EMİ kompozit beton plastik materialının tərkibində artırılmasının son məhsulun fiziki xüsusiyyətlərinə təsiri.

Beton reseptinin tərkibində olan materialların maksimal fraksiya ölçüsü 15mm dən aşağı nəzərdə tutulub ki, perimetri üzrə qalınlığı 25mm olan içi boş divar daşının istehsalında beton qarışığı istifadə oluna bilsin. Beton qarışığının ümumu həcmin 50% möhkəm olan 5-15mm fraksiyalı çınqıldan və M500 markası olan sementdən 25% və qum 25% istifadə olunur ki, nisbətən yüksək marka beton almaq olsun (cədvəl 2). Çınqılın əvəzinə Plastik əlavə etdikcə beton möhkəmliyin itirəcək (dioqram 1). Bu halda betonun tərkibində mümkün qədər maksimal plastik qatmaq üçün, ilkin tərkibi yalnız betondan olan nümunənin möhkəmliyi daha çox olmalıdır, çün ki, kompozit betonun tərkibində olan plastikin həcmi artdıqca son məhsul möhkəmliyini itirir. Beton reseptinin tərkibində olan plastik əlavələri sadə plastik və adheziya səthiyə örtülmüş plastik dan istifadə olunur. Nəticədə betonun tərkibinə əlavə olunan adheziya səthiyə örtülmüş plastikin, sadə plastikadan fərqli olaraq betonun möhkəmliyinə müsbət təsirinin effektivliyini nə qədər olduğunu müəyyən etmək məqsədilə eksperiment zamanı istifadə olunur.



Diaqram 1. *Beton qarışığında Çınqılın, Plastik ilə əvəzolunma diaqramı*

Cədvəl 2

"EMİ" kompozit beton plastik materialının tərkibində olan hər komponentin funksiyası

Komponent	**Funksiya**
Portland sement M400–M500	Əsas bağlayıcı
Qum (0–2 mm)	Dolğu və struktur stabilliyi
Çınqıl (5–10 mm)	Sıxlıq və möhkəmlik
PVC və PET tullantısı	Elastiklik və suya davamlılıq
Modifikator qatqılar	Su udmanın azaldılması və əlaqə gücləndirilməsi

"EMİ-KBP"-PVC və PVC-A betonun reseptinin hazırlanması üçün çınqılın bir hissəsi doğranmış PVC plastik tullantılar ilə əvəz edilir. Əvəz edilən doğranmış, PVC və PVC-A(adheziya qatı ilə örtülmüş PVC plastik tullantılar) plastik tullantıların miqdarı tədricən artırılır (dioqram 1). Istehsalat tullantıların dan ibarət olan PVC plastik tullantılar adətən betonu zəiflidən yağ və digər son mənfi təsir göstərən elementlərdən təmiz vəziyyətində olduğuna görə, xammalın yuyulmasına əlavə xərc tələb olunmur.

EMİ-KBP"- PP-PE və PP-PE-A(adheziya qatı ilə örtülmüş PVC plastik tullantılar) betonun reseptinin hazırlanması üçün çınqılın bir hissəsi doğranmış PP və ya PE-A plastik tullantılar ilə əvəz edilir. Əvəz edilən doğranmış PP və ya PE-A, plastik tullantıların miqdarı tədricən artırılır. PP və PE-nin aşağı olan xüsusi çəkisini nəzərə alaraq, əsasən yarımquru beton qarışığında, vibrasiya ilə presləmə üsulu ilə istifadəsi tövsiyə olunur. PP tullantıları içində yağ saxlamaq üçün

qablar da olduğuna görə PP tullantıları yalnız yuyulduqdan sonra təkrar emal prosesinə cəlb oluna bilər.

"EMİ-KBP"- materialının hazırlanması üçün, doğranılmış Plastik tullantıları, Sement, Qum, Çınqıl tərkibli qarışıq quru vəziyyətdə 1 dəqiqə ərzində mikserdə qatışdırılır və su əlavə edəndən sonra 3 dəqiqə ərzində mikserdə qatışdırılır.

Ətraf mühitə təsir. Plastik tullantıların 1 tonunun kompozit betonda istifadəsi nəticəsində 1,8 ton CO_2 ekvivalent emissiyanın qarşısı alınır. Həmçinin, tullantıların torpağa atılması azaldılır və dövri iqtisadiyyata inteqrasiya təmin olunur.

"EMİ" kompozit beton plastik materialının liman tikintisində tətbiqi. Dalğa əleyhinə divar blokları. EMİ-KBP blokları su keçirməz və donmaya qarşı davamlıdır. Onlar liman sahil xəttində anti-dalğa bəndlərinin qurulmasında sınaqdan keçirilmiş və ənənəvi betonla müqayisədə 25% uzunömürlülük göstərmişdir.

Körpü və estakada dayaqları. Polimer əlavəli beton suyun təsirinə qarşı əlavə elastiklik verdiyi üçün körpü dayaqlarında mikroçatların əmələ gəlməsini əngəlləyir.

Liman anbarlarının döşəmə plitələri. Yüksək yüklənmələrə qarşı davamlılıq və kimyəvi maddələrə qarşı müqavimət bu materialı logistik anbarların döşəməsi üçün optimal edir.

İqtisadi və Ekoloji Effektivlik

Göstərici	**Ənənəvi beton**	**EMİ-KBP**
Material dəyəri (AZN/m³)	130–150	110–120
Xidmət müddəti (il)	25–30	50
Ekoloji təsir (CO_2 azalma, ton/il)	-	-1,8 ton
Texniki xidmət xərci	Yüksək	Aşağı

EMİ-KBP materialının tətbiqi nəticəsində:

- Ümumi xərci 15–20% azaldır;
- İstismar müddətini ən azı 2 dəfə artırır;
- Ekoloji təsiri minimuma endirir.

Nəticə. Azərbaycanda liman infrastrukturunun inkişafı üçün yeni nəsil materialların tətbiqi strateji əhəmiyyət daşıyır. EMİ-KBP kompozit beton-plastik materialı həm texniki, həm də ekoloji baxımdan ənənəvi materialları əvəz edə bilər. Bu materialın yerli plastik tullantılardan istehsalı dairəvi iqtisadiyyatın inkişafına və yaşıl inşaat siyasətinə töhfə verəcəkdir. Dövlət səviyyəsində liman və sənaye zonalarında bu texnologiyanın pilot tətbiqləri həyata keçirilməli, sınaq protokolları hazırlanmalıdır.

Ədəbiyyat

1. Azərbaycan Respublikası Nəqliyyat Nazirliyi: "Liman infrastrukturunun inkişaf konsepsiyası 2020–2035", Bakı, 2023.
2. Holcim Azerbaijan: "Sulfatadavamlı sementlərin dəniz şəraitində tətbiqi", Texniki Bülleten №7, 2024.
3. Abbasov R., Əliyev A. "Kompozit beton materiallarının inkişaf istiqamətləri", Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, Elmi əsərlər, 2023.
4. UNEP (United Nations Environment Programme): "Plastics in Construction – Global Assessment Report", 2022.
5. European Commission, DG Environment: "Circular Construction and Reuse of Plastic Waste", Brussels, 2021.

Məqalə qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: dos. Nəbiyev H.N.

УДК 621.742

МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГУБЧАТОГО ЖЕЛЕЗА НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

[1]Мамедов А.Т., [2]Исмаилов Н.Ш., [1]Бабаев А.И., [1]Гусейнов М.Ч.

[1]Азербайджанский Технический Университет
Az1148, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25
[2]ПЮЛ "Азербайджанская Государственная Морская Академия"
Аз1000, г. Баку, ул. З. Алиевой, 18
E-mail: ariff-1947@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены меры предосторожности при транспортировке губчатого железа на морском транспорте. Показано, что при взаимодействии влаги происходит выделение водорода, поэтому материал нежелательно погрузить на морские суда в условиях высокой влажности.*

Рекомендована четкая организация контроля изменения концентрации H_2, CO и CO_2, соблюдая необходимые меры предосторожности. Представлена общая схема мониторинга газов в закрытых помещениях и способы контроля воздушной среды трюмов судов при транспортировке губчатого железа.

Описаны методики определения скорости окисления, количества водорода, который увлажняет губчатое железо и повышает его возгораемость. Приведены схемы устройств и принцип работы специальных установок, а также методики лабораторного контроля качества губчатого железа при транспортировке на судне.

Xülasə. *Dəniz nəqliyyatı ilə süngər dəmirin daşınması zamanı təhlükəsizlik tədbirləri müzakirə olunur. Qeyd edilir ki, rütubətə məruz qaldıqda süngər dəmirdən hidrogen və karbon qazları ayrılır, ona görə də materialın yüksək rütubətli şəraitdə dəniz gəmilərinə yüklənməsi arzuolunmazdır.*

Qazların konsentrasiyalarında dəyişikliklərin monitorinqi üçün lazımi ehtiyat tədbirlərinə riayət etməklə təşkilati tədbirlər tövsiyə olunur. Qapalı məkanlarda qazların qatılığına nəzarətin ümumi sxemi və süngər dəmirinin daşınması zamanı gəmi anbarlarında havanın tərkibinin monitorinqi üsulları təqdim olunur.

Oksidləşmə dərəcəsini, süngər dəmiri nəmləndirən hidrogenin miqdarını və alışma qabiliyyətini təyin etməyin metodikaları təsvir edilmişdir. Bu məqsədlə tətbiq edilən xüsusi qurğuların sxemləri və iş prinsipləri, habelə gəmidə nəqletmədə süngər dəmirin laborator nəzarətinin metodikaları verilmişdir.

Abstract. *Safety precautions for transporting sponge iron by sea are discussed. It is noted that hydrogen is released when exposed to moisture, so loading the material onto seagoing vessels in high-humidity conditions is undesirable.*

A clear organization for monitoring changes in H_2, CO and CO_2 concentrations, while observing necessary precautions, is recommended. A general framework for monitoring gases in enclosed spaces and methods for monitoring the air in ship holds during the transportation of sponge iron are presented.

Methods for determining the oxidation rate, the amount of hydrogen that moistens sponge iron, and flammability are described. Schematic diagrams of the devices and the operating principles of special installations are provided.

Ключевые слова: *меры предосторожности, морской транспорт, губчатое железо, концентрация газов, схема мониторинга, методика определения*

***Açar sözlər**: ehtiyat tədbirləri, dəniz nəqliyyatı, süngər dəmir, qazların konsentrasiyası, monitorinq sxemi, təyinetmə üsulu*

***Key words:** precautions, maritime transpo*rt, *sponge iron, gas concentration, monitoring scheme, determination method*

Введение. Технология транспортировки грузов - одна из составляющих системы обеспечения безопасности при его доставке. Вопросы безопасной перевозки грузов стали одними из важнейших в деятельности Международной Морской Организации (ИМО).

Перевозка навалочных грузов морем регулируется Кодексом безопасной практики для твёрдых навалочных грузов. В соответствии этих правил многие грузы, проявляющие опасные химические свойства при транспортировке навалом, имеют класс опасности ИМО-МНВ. Ежегодно ИМО фиксирует инциденты, связанные с транспортировкой грузов МНВ [1].

Постановка вопроса в таком аспекте особенно важна для железа прямого восстановления -"губчатое железо" - продукта с высокой товарной ценностью для предприятий металлургической промышленности. Этот груз классифицирован BC Code и национальными правилами РД 31.11.01-92 как вещество опасное навалом - МНВ. Объемы морских перевозок "губчатого железа" из портов России и Украины имеют устойчивую тенденцию к возрастанию [2].

Металлургические предприятия Азербайджанской Республики также остро нуждаются в губчатом железе для выплавки стали и ферросплавов. Поэтому поставка качественного ГЖ в эти предприятия из стран СНГ и других стран, как правило, осуществляется морским транспортом.

Вместе с тем наша республика располагает мощный потенциалом морского транспорта, который в перспективе будет использоваться для перевозки ГЖ, получаемого из Дашкесанской руды в зарубежные страны. В связи с этим обеспечение контроля качества ГЖ, привозимого морском транспортом, является важнейшей научно-технической задачей [3-5].

Все формы "губчатого железа"- окатыши, комки, холодные отформованные брикеты - имеют высокую поверхностную активность как результат их пористой структуры. При открытом хранении и транспортировке "губчатое железо" в форме окатышей становится пожароопасным. Пожароопасность увеличивается при увлажнении, особенно при воздействии морской воды [6-8].

В результате металлизованный продукт обесценивается, констатируют коммерческий брак, возникает угроза безопасности. Губчатое железо в форме окатышей международные и национальные правила считают грузом закрытого хранения и транспортировки в инертной среде [9].

Это требует использования специализированных судов, что удорожает продукт и делает его неконкурентоспособным на рынке металла. Изменить товарную форму, т.е. уменьшить пористость и активность поверхности нельзя, т.к. форма материала определяется последующей технологией его использования [10].

Для погрузки металлического материала (ММ) применяются различное оборудование, такие как краны, вагоны опрокидыватели, транспортеры и т.д. При осуществлении этих процессов при сухом климате уровень металлизации губчатого железа (ГЖ) не происходит. Однако в условиях, когда влажная погода при погрузке и внутриконтинентальной перемещении степень металлизации губчатого железа снижается [1,2].

При морской транспортировке металлического материала ситуация особенно усложняется. В условиях взаимодействии влаги происходит выделение водорода, поэтому губчатого железа нежелательно погрузить на морские суда в условиях влажности [8,9].

Поэтому в условиях отсутствия защиты ГЖ от воздействия влаги перед погрузкой на суда необходимо хранить его в закрытых помещениях (складах, вагонах и т.д.). Эту защиту можно проводить с помощью брезента. При наличии дождя разгрузка ГЖ в порту назначения не должна быть. Поэтому к потребителю ГЖ доставляется более длительным путем [10].

Эти предосторожности принимается против дождевой, но и против трюмной влаги. Трюмную воду нужно покрывать лесоматериалами, а в углах, где накапливаются конденсаты, следует засыпать деревянными опилками.

Для ГЖ влага представляет собой опасность, поэтому при погрузке и разгрузке более удобны закрытые ленточные конвейеры, по сравнению грейферными кранами. Вследствие высокой насыпной массы и меньшей сыпучести ГЖ пневмотранспорт нельзя применять для этих работ, как это делается для погрузки зерна, цемента и т.д.

Целью работы является анализ мер предосторожности при транспортировке губчатого железа на морском транспорте в условиях взаимодействия высокой влажности. Рассматриваются также организация контроля концентрации газов и способы мониторинга воздушной среды трюмов судов.

Основное содержание. В трюмах судов создается большие воздушные пространство из-за высокой насыпной массы ГЖ при транспортировке морским путем. При организации контроля изменения в этом пространстве концентрации H_2, CO и CO_2, можно обеспечить необходимые меры предосторожности.

Общая схема контроля образования этих газов в воздушных средствах трюмов судов представлена на рисунке 1.

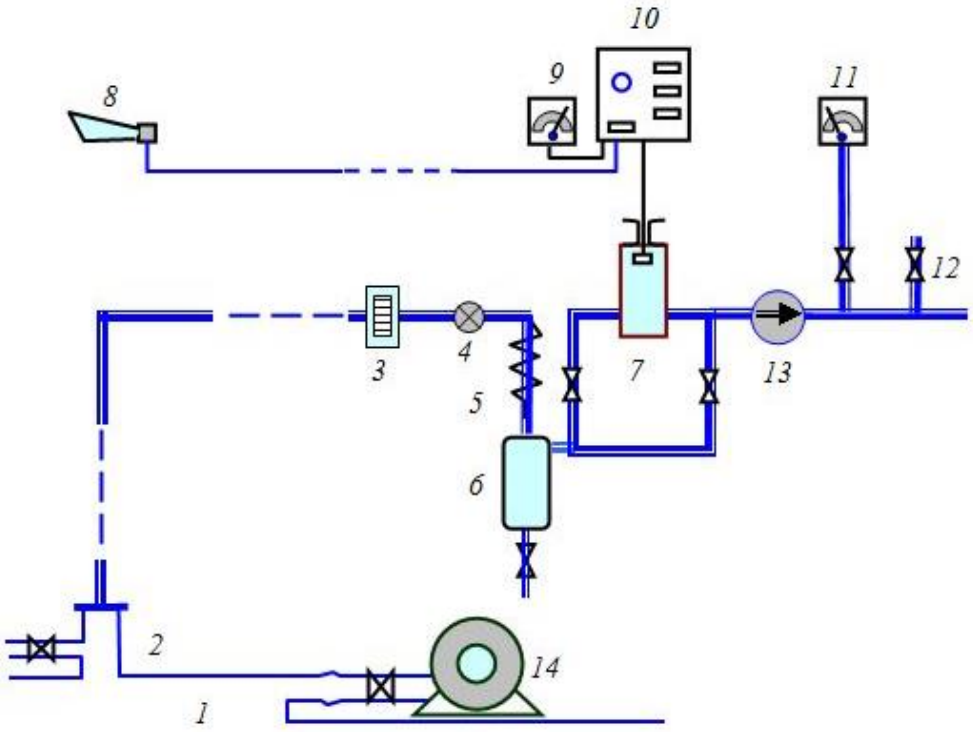


***Рис. 1**. Схема контроля воздушной среды трюмов судов при морской транспортировке ГЖ:*
1 – трюм; 2 – связующие и вентиляционные линии;
3 – фильтр; 4 – трехходовой кран; 5 – холодильник; 6 – сборник конденсата;
7 – измерительная камера для водорода с каталитической ячейкой; 8 – сигнальная сирена;
9 – прибор, показывающий содержание водорода; 10 – преобразователь измерений; 11 - анализатор кислорода; 12 – анализаторы CO и CO_2; 13 – газовый насос; 14 – вентилятор

Температура ГЖ в дополнительном измерении не нуждается, так как при этом быстродействие термопар в случае опасности бывает незначительными. Ввиду того, что при окислении ГЖ дым не выделяется, системы контроля дымообразования, устанавливаемые обычно на кораблях не заменяют описанного выше устройства.

Мощность вентилятора и вентиляционные разводки в данной системе рассматриваются на каждое судно отдельно. В то же время остальное оборудование может быть типовым с соединением показаний приборов в рубку.

В трюмах отбор проб газа и выводы вентиляционных рукавов должны соответствовать верхним слоям насыпей ГЖ. В зависимости от емкости трюмов мощность вентиляторов колеблется от 2,2 до 6,2 тыс.м^3/ч. В случае, когда концентрация O_2, в воздушном пространстве трюмов составляет 18-23%, а следы H_2 и CO отсутствует, при этом не происходит окисление ГЖ.

При концентрации до 1% H_2 и 16-20% O_2, это является признаком начала окисления ГЖ. В случае скоротечного окисления концентрация O_2 возрастает до 4,0 % и более, а концентрация O_2 уменьшается до 15% и менее. Появление в среде до 5,6% и более CO и уменьшение концентрации O_2 до 10% и менее является показателем воспламенения ГЖ.

При обеспечении выше отмеченных мероприятий на погрузочно-разгрузочных работах и самой транспортировке, можно отказаться от качественных брикетирования и даже пассивации ГЖ. Однако в лабораторных условиях склонность к окислению Fe каждой партии перед погрузкой нужно определить и оценить следующие три величины: скорости окисления; выделения H_2; температуры загорания.

Знание этих величин дает возможность определить количество тепла в трюмах и наиболее неблагоприятных случаях, как часто нужно включать вентиляторы.

Определение скорости окисления лабораторным способом (рис. 2) заключается в следующем: навеску 250 – 550 г смачивают дистиллированной H_2O в количестве 4,6% (по массе) или 4,6 %-ным раствором NaCl в том же количестве. Пересчет O_2 на величину с размерностью г O_2/(кг·ч) поглощенный навеской в течение первого часа принимают как показатель для оценки.

Масса навески ГЖ составляет 650 – 1150 г, температура воды 60°C. После чего погружают в дистиллированную воду или в 5 %-ный раствор NaCl. Длительность погружения составляет на менее 3 дней. Общее количество выделившегося H_2 (при 0°C и 760 мм рт.ст.) рассчитывают на каждый период анализа.

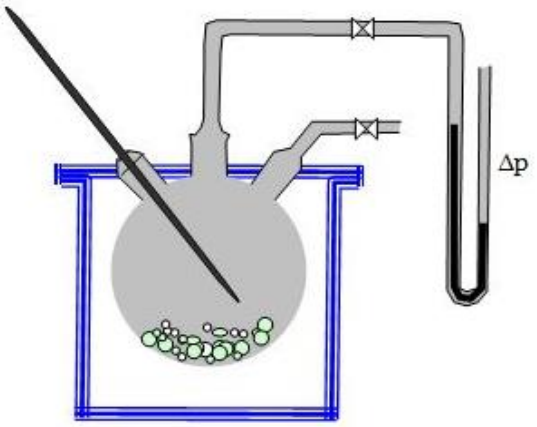


Рис. 2. *Установка для определения скорости окисления ГЖ*

0бразование H_2 определяют на следующий установке (рис.3). Следующим образом определяют температуру возгорания. Навеску 560-660 г гранул ГЖ диаметром 2,9 – 10,2 мм загружают в сосуд емкостью 500см^3, которую устанавливают в сушильную печь (рис. 4).

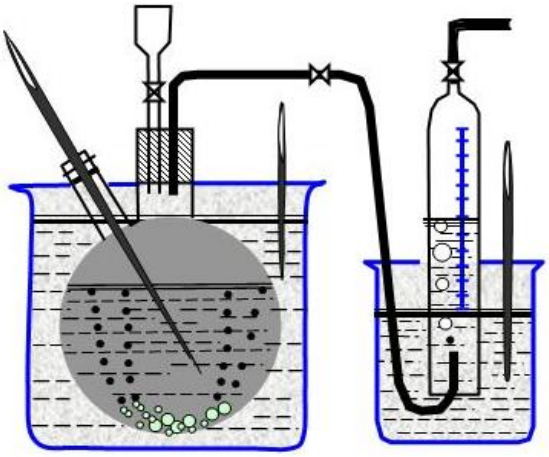


Рис. 3. *Установка для определения количества H_2, который увлажняет ГЖ*

После ввода в рабочее пространство камеры и в сосуд с ГЖ термопары, температура в камере повышают сначала быстро, а затем постепенно, например, до 160, 190, 210, 230, 240, …°С, с тем чтобы происходило выравнивание температуры сосудом ГЖ и рабочей емкости камеры. Когда температура сосуда и ГЖ превысит температуру камеры, это считается как температура возгорания.

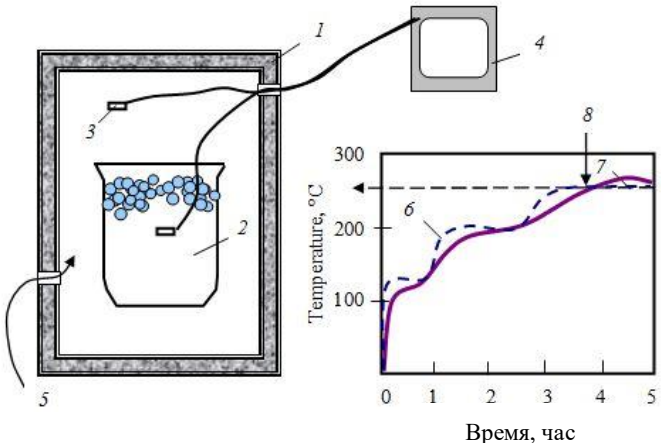


Рис. 4. *Установка и график для определения возгораемости ГЖ:*
1 – сушильная печь; 2 – образец; 3 – термопары; 4 – показывающий прибор;
5 – вентиляция; 6 – температура камеры; 7 – температура образца;
8 – начало возгорания

Заключение. Таким образом, предложены меры предосторожности при транспортировке губчатого железа на морском транспорте. Указано, что в условиях взаимодействии влаги происходит выделение водорода, поэтому материал, то есть ГЖ нежелательно погрузить на морские суда в условиях высокой влажности. При этом предоставлен подход организации контроля изменения концентрации газов при соблюдении необходимых мер предосторожности.

Представлены общая схема мониторинга газов в закрытых помещениях и способы контроля воздушной среды трюмов судов при транспортировке губчатого железа. Изложены методики определения скорости окисления, количества водорода и возгораемости, приведены схемы устройств и принцип работы специальных установок.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № AEF – MCG – 2023 – 1 (43) – 13(01)1-M-01

Литература

1. Завидонский В.А. Пути защиты губчатого железа от вторичного окисления. Москва, Металлургия, 2001, 210с.
2. Кулишева Л.А. Совершенствование технологии морской перевозки при транспортировке губчатого железа. Дисс. к.т.н., Санкт-Петербург, 2005, 218с.
3. Arif Mammadov, Subhan Namazov, Agil Babayev, Nizami Ismailov, Mukhtar Huseynov, Faiq Quliyev. Identification of the nature of the formation of surface defects in the body of the pipe intended for the oil and gas industry //"eureka: Physics and Engineering" Number 1, 2025, p.106-120. DOI: 10.21303/2461-4262.2025.003660.
4. A.T.Məmmədov, A.İ.Babayev, N.Ş.İsmayılov, M.Ç.Hüseynov. Analysis of the current state of alloy steel production technology in Azerbaijan// istec International Science and Technology Conference, 2024, October 17-18, 2024. Azerbaijan Technical University, Azerbaijan. Abstract Book. ISSN 2146-7366, p. 965-974.
5. Arif Mammadov, Nizami Ismailov, Agil Babayev, Mukhtar Huseynov, Batura Musurzayeva, Afet Jafarova. Transition to Innovative Metallurgical Technologies-Priority Direction of Decarbonization// The Sixth Eurasian Conference RISK-2024 COP-29 Side Event. Innovations in Minimization of Natural and Technological Risks of Climate Changes: Methodology and Practice. Reliability: Theory & Applications, номер SI 6 (81) том 19. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-1171-1178. https://www.gnedenko.net/Journal/2024_6SI.htm.
6. Məmmədov A.T., İsmayılov N.Ş., Babayev A.I., Hüseynov M.C., Əliyev İ.A., Mənsimov K.T. Yeni reallıqlar şəraitində dünyada polad istehsalının əsas tendensiyaları (1-ci məlumat)// "Su nəqliyyatının problemləri" XIX Beynəlxalq elmi-texniki konfrans, Məruzə materialları, 2-3 may 2024 BAKI, s.32-38. https://www.researchgate. net/publication /384924355_BETK_ materiallari_ 2024_1.
7. Мамедов А.Т., Исмаилов Н.Ш., Ханкишиев И.А., Келбиев Ф.М., Бабаев Л.В. Перспективы применения металлургических продукций азербайджана в судостроении и судоремонте // ADDA-nın Elmi əsərləri, 2024,№1,s.44-47. https://adda.edu.az/uploads/Elmi%20eserler%20%E2%84%96%201%20(1).pdf
8. Корольченко И.А. Тепловое самовозгорание насыпей и отложений твердых дисперсных материалов. Дисс. д.т.н., Москва, 2007, 471с.
9. Казаков А.В. Определение критических условий очагового возгорания материалов. Дисс. к.т.н., Москва, 2006, 124с.
10. Субботин А.Н. Тепломассоперенос при зажигании и горении структурно неоднородных сред. Дисс. д. ф. м. н., Томск, 2011, 307с.

Məqalə qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: dos. Abbasov E.O.

UTC 656.61

THE INFLUENCE OF EUROPEAN POLICY ON MARITIME SAFETY AND NAVIGATION STANDARDS

Sarsenbayev B.S., Malov K.V., Zhumayev Zh.

NJSC "Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov"
Kazakhstan, Aktau, 32 microdistrict
E-mail: zholdybayzhumayev@yu.edu.kz

Abstract*. The article examines the impact of European maritime policy on the development of international standards for maritime safety and navigation. It analyzes the key regulatory initiatives of the European Union (EU) aimed at improving the safety of navigation, protecting the marine environment, enhancing the professional training of seafarers, and introducing digital technologies. Particular attention is given to the activities of the European Maritime Safety Agency (EMSA) and the interaction between the EU and the International Maritime Organization (IMO). The study shows that the EU's systemic approach to maritime regulation has a direct influence on international maritime law, contributes to the development of a global safety culture, and fosters innovative models of navigation management.*

Xülasə. *Bu məqalədə Avropa dəniz siyasətinin dənizçilik və gəmiçilik təhlükəsizliyi üzrə beynəlxalq standartların inkişafına təsiri araşdırılır. Burada Avropa İttifaqının (AB) dəniz təhlükəsizliyinin artırılmasına, dəniz mühitinin qorunmasına, dənizçilərin peşəkar hazırlığının artırılmasına və rəqəmsal texnologiyaların tətbiqinə yönəlmiş əsas tənzimləyici təşəbbüsləri təhlil edilir. Xüsusi diqqət Avropa Dəniz Təhlükəsizliyi Agentliyinin (EMSA) fəaliyyətinə və AB-nin Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı (IMO) ilə qarşılıqlı əlaqəsinə yönəldilib. Tədqiqat göstərir ki, AB-nin dənizçilik tənzimlənməsinə sistemli yanaşması beynəlxalq dəniz hüququna birbaşa təsir göstərir, qlobal təhlükəsizlik mədəniyyətinin inkişafına töhfə verir və innovativ gəmiçilik idarəetmə modellərini təşviq edir.*

Аннотация. *В статье рассматривается влияние европейской морской политики на развитие международных стандартов безопасности мореплавания и судоходства. Анализируются ключевые регуляторные инициативы Европейского союза (ЕС), направленные на повышение безопасности мореплавания, защиту морской среды, совершенствование профессиональной подготовки моряков и внедрение цифровых технологий. Особое внимание уделяется деятельности Европейского агентства по безопасности мореплавания (EMSA) и взаимодействию ЕС с Международной морской организацией (ИМО). В исследовании показано, что системный подход ЕС к регулированию морского судоходства оказывает непосредственное влияние на международное морское право, способствует развитию глобальной культуры безопасности и развитию инновационных моделей управления судоходством.*

Key words: *maritime safety, European Union, EMSA, IMO, international standards, navigation, digitalization, environmental policy*

Açar sözlər: *dəniz təhlükəsizliyi, Avropa İttifaqı, EMSA, IMO, beynəlxalq standartlar, gəmiçilik, rəqəmsallaşdırma, ətraf mühit siyasəti*

Ключевые слова: *безопасность на море, Европейский Союз, EMSA, ИМО, международные стандарты, судоходство, цифровизация, экологическая политика*

Introduction. Maritime transport is one of the most important sectors of the global economy, accounting for about 90% of international cargo transportation. Maritime safety remains a strategic

priority not only for individual states but also for the entire global community. Amid growing maritime trade, increasing vessel sizes, the development of new transport corridors, and intensifying climate threats, the European Union has formulated a comprehensive maritime policy aimed at ensuring the sustainability, safety, and environmental responsibility of shipping.

The EU's influence in this field extends far beyond Europe, as its standards and regulations serve as benchmarks for other regional organizations and international institutions. European maritime policy effectively sets the course for the development of the global system of maritime safety and navigation.

1. Formation of European Maritime Policy: Historical Background

The first steps toward a unified European maritime policy were taken in the 1970s–1980s, when a series of maritime disasters—such as *Amoco Cadiz* (1978), *Herald of Free Enterprise* (1987), and *Erika* (1999)—revealed the shortcomings of the existing control system. These tragedies prompted the European Community to establish common rules to enhance ship safety and protect the marine environment.

As a result, a series of legislative initiatives known as the *Erika Packages* were adopted to reform the maritime sector:

- Erika I (2000) – strengthened control over classification societies and established requirements for flag states;
- Erika II (2002) – laid the groundwork for the creation of the European Maritime Safety Agency (EMSA);
- Erika III (2009) – reinforced shipowner liability and introduced mandatory procedures for accident investigation.

The establishment of EMSA in 2002 became a key institutional milestone that enabled the EU to shift from reactive to systematic risk management at sea. The agency, headquartered in Lisbon, performs coordination, analytical, and supervisory functions.

2. EU Regulatory Framework in Maritime Safety

EU maritime safety legislation represents a complex yet interconnected system of directives, regulations, and decisions. The most significant include:

- Directive 2009/16/EC on Port State Control;
- Directive 2009/21/EC on the responsibilities of flag states;
- Directive 2002/59/EC establishing a vessel traffic monitoring and information system (VTMIS);
- Regulation (EU) No 1406/2002 establishing the European Maritime Safety Agency;
- Regulation (EU) No 530/2012 on the prevention of pollution from ships;
- Regulation (EU) 2023/1805 on the implementation of digital platforms for data exchange between port authorities.

A crucial element of this framework is the SafeSeaNet system – a Pan-European network for exchanging navigational information, enabling real-time vessel tracking and early warning of potential risks.

3. The Role of the European Maritime Safety Agency (EMSA)

EMSA serves as the cornerstone of the EU's maritime policy mechanism. Its main functions include:

- conducting flag and port state inspections;
- developing standards for accident investigation;
- ensuring compliance with international conventions such as SOLAS, MARPOL, STCW, and the ISM Code;
- promoting innovative technologies, including satellite-based surveillance systems (*CleanSeaNet*);
- providing training and certification for maritime professionals.

Moreover, EMSA plays a leading role in the development of e-Navigation — a concept focused on digitalizing navigation, integrating data from ships, coastal services, and satellite sources.

4. Cooperation Between the EU and the International Maritime Organization (IMO)

The EU and IMO maintain close cooperation aimed at harmonizing rules and standards.

EU directives and regulations often adapt international norms to the European context, enhancing their practical implementation. Within the frameworks of SOLAS (1974) and MARPOL (1973/1978) conventions, the EU has introduced additional requirements for ship equipment, emission control, and the handling of dangerous goods.

The EU also actively participates in global efforts to reduce CO_2 emissions, supporting initiatives such as IMO 2020 and Fit for 55, which encourage the transition of the maritime industry toward low-carbon and alternative fuels such as LNG, ammonia, and methanol.

5. European Policy on Environmental Safety in Shipping

One of the core dimensions of EU maritime strategy is the protection of the marine environment. The European Commission consistently implements the "Blue Growth" concept — the sustainable use of marine resources with minimized ecological risks.

The key areas of environmental policy include:

- reduction of greenhouse gas emissions;
- prevention of oil and chemical spills;
- control of ballast water discharge (in accordance with the 2004 Convention);
- introduction of "green ports" and environmental management practices in shipping.

Thus, environmental responsibility is an integral component of EU maritime safety policy.

6. Impact on Seafarer Training and Educational Standards

The EU exerts significant influence on the professional training of seafarers. The implementation of Directive 2008/106/EC, aligned with the provisions of the STCW Convention, ensured the unification of training, certification, and watchkeeping standards. EMSA conducts audits of maritime academies in EU member states and in third countries whose certificates are recognized by the EU. This contributes to improving the quality of education and preventing non-compliance with international requirements.

7. Digitalization and the Future of Maritime Navigation in Europe

Modern trends in maritime safety are inextricably linked to digital technologies. The EU is implementing large-scale programs such as:

- Maritime Single Window – a unified digital system for port documentation exchange;
- Sea Traffic Management (STM) – a system for real-time coordination of vessel movements;
- Autonomous Shipping Initiative – development of autonomous and remotely operated vessels.

These innovations not only enhance safety but also reduce the human factor – one of the main causes of maritime accidents.

8. International Influence of European Initiatives

European maritime policy has become a model for other regional frameworks, including:

- Paris Memorandum of Understanding (Paris MoU) on Port State Control;
- Black Sea (BS MoU) and Mediterranean (Med MoU) agreements;
- initiatives within the Indo-Pacific region.

Through these mechanisms, countries outside the EU adopt European practices of inspection, monitoring, and training, thereby strengthening the global standardization of maritime safety.

9. Prospects for the Development of European Maritime Policy

In the coming decade, European maritime strategy will focus on three priority areas:

- Environmental sustainability and decarbonization of shipping under the European Green Deal;

- Digital transformation of the maritime sector, including cybersecurity and artificial intelligence;
- Integration of security and defense aspects in response to hybrid threats and the protection of critical infrastructure.

The EU seeks not only to enhance safety but also to achieve leadership in building a new, intelligent, and sustainable maritime civilization.

Conclusion. European maritime safety and navigation policy represents one of the most comprehensive and systematic approaches to transport governance worldwide. Thanks to the efforts of the European Commission and EMSA, a holistic regulatory framework has been established, integrating legal, technical, environmental, and educational dimensions.

The influence of European initiatives extends well beyond the continent, shaping international maritime standards – including those of the IMO and regional frameworks. Thus, EU maritime policy serves not only as an internal regulatory mechanism but also as a factor of global leadership in ensuring maritime safety and sustainable navigation development.

References

1. European Maritime Safety Agency. *Annual Report 2024.* Lisbon: EMSA Publications, 2025.
2. European Commission. *Integrated Maritime Policy for the European Union.* Brussels, 2007.
3. IMO. *SOLAS, MARPOL, STCW Conventions.* London: International Maritime Organization, 2023.
4. Directive 2009/16/EC of the European Parliament and of the Council on Port State Control.
5. Regulation (EU) No 1406/2002 establishing the European Maritime Safety Agency. Paris MoU Annual Report 2024.
6. European Commission. *Fit for 55: Reducing Emissions from the Shipping Sector,* 2023.
7. Ehlers, P. "European Union and Maritime Safety." *Journal of Maritime Law and Policy*, Vol. 45, No. 3, 2024.
8. Szepan, D. "Digital Transformation of the European Maritime Sector." *Transport Policy Review*, Vol. 12, No. 1, 2025.
9. EMSA. *The Future of Maritime Safety in Europe.* Lisbon, 2024.

Məqalə qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: dos. Sadıqov V.B.

UOT 621.396

DP3 SİNİFLİ DİNAMİK MÖVQELƏNDİRMƏ SİSTEMİNİN "QURBAN ABASOV" KRAN GƏMİSİNDƏ TƏTBİQİ VƏ TƏHLÜKƏSİZLİK PERSPEKTİVLƏRİ

Temirbulatov E.M., Abbasov E.O.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç.,18
E-mail: eldar.temirbulatov@gmail.com, Abasovelnur1980@mail.ru

Xülasə. *Bu məqalədə "Qurban Abasov" kran gəmisində tətbiq olunan Dinamik Mövqeləndirmə Sistemin (DPS) gəminin təhlükəsiz və stabil idarə olunmasında oynadığı rol araşdırılır. Tədqiqat çərçivəsində DPS-in texniki əsasları, sistemin əsas komponentləri və DP3 sinifli tətbiq səviyyəsi təhlil edilir. Eyni zamanda, gəminin texniki xüsusiyyətləri, əməliyyat şəraitində sistemin effektivliyi və gələcək təkmilləşdirmə imkanları nəzərdən keçirilir. Məqalənin*

məqsədi dinamik mövqeləndirmə texnologiyasının real gəmi nümunəsi üzərində praktik əhəmiyyətini və dəniz təhlükəsizliyi baxımından üstünlüklərini ortaya qoymaqdır.

Abstract. *This paper investigates the role of the Dynamic Positioning System (DPS) implemented on the crane vessel Qurban Abasov in enhancing operational safety and positional stability at sea. The study analyzes the technical foundations of the DP3-class system, its key components, and real-world performance during offshore operations. Additionally, the vessel's technical specifications and potential for future technological upgrades are discussed. The research highlights the critical importance of advanced positioning systems in ensuring safe, efficient, and sustainable maritime operations.*

Аннотация. *В данной статье исследуется роль системы динамического позиционирования (DPS), установленной на крановом судне «Курбан Абасов», в обеспечении безопасного и устойчивого управления судном в морских условиях. Проведен анализ технической базы системы DP3-класса, её ключевых компонентов, а также эффективности в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрены технические характеристики судна и перспективы дальнейшей модернизации. Работа подчеркивает значение современных систем позиционирования для повышения безопасности и эффективности морских операций.*

Açar sözlər: *dinamik mövqeləndirmə sistemi, DP3 texnologiyası, gəmi sabitliyi, dəniz təhlükəsizliyi, ofşor əməliyyatlar, dəniz mühəndisliyi*

Key words: *dynamic positioning system, DP3 technology, vessel stability, maritime safety, offshore operations, marine engineering*

Ключевые слова: *система динамического позиционирования, технология DP3, устойчивость судна, морская безопасность, офшорные операции, морская инженерия*

Giriş. Dənizçilik sahəsində iri tonnajlı texniki gəmilərin təhlükəsiz və səmərəli fəaliyyəti, əsasən onların müəyyən edilmiş koordinatlarda sabit mövqedə qalmaq qabiliyyəti ilə müəyyən olunur. Bu xüsusilə yükləmə-boşaltma, sualtı infrastrukturun quraşdırılması və digər yüksək dəqiqlik tələb edən əməliyyatlar zamanı daha da əhəmiyyət kəsb edir. Son onilliklərdə Dinamik Mövqeləndirmə Sistemi bu sahədə tətbiq olunan ən mühüm texnoloji yeniliklərdən biri kimi önə çıxmışdır. DPS-in tətbiqi, gəminin lövbərsiz şəkildə dəqiq mövqeyinin qorunmasına imkan yaradaraq əməliyyat təhlükəsizliyini və funksional dayanıqlığı artırır.

Bu məqalədə 600 ton yükqaldırma qabiliyyətinə malik "Qurban Abasov" kran gəmisində istifadə edilən DPS sisteminin texniki prinsipləri və gəminin təhlükəsiz idarə olunmasında bu texnologiyanın rolu təhlil olunur. Eyni zamanda, sistemin praktiki tətbiq sahələri və gəminin texniki xüsusiyyətləri üzərindən ümumiləşdirilmiş analiz təqdim edilir.

Məsələnin qoyuluşu. Müasir dəniz nəqliyyatı və mühəndisliyi sahəsində gəmi hərəkətinin idarə olunması və təhlükəsizliyin təmin edilməsi prioritet məsələlərdən biridir. Dənizdə dəyişkən hava şəraiti, dalğalanmalar və hidrodinamik təsirlər zamanı gəmilərin mövqeyini sabit saxlamaq üçün ənənəvi üsullar kifayət etmir. Bu kontekstdə DP sistemləri mühüm texnoloji həll kimi çıxış edir və xüsusilə iri funksional gəmilərdə geniş tətbiq olunur.

Bu məqalədə, "Qurban Abasov" kran gəmisində tətbiq edilən DP3 sinifli DPS-in texniki strukturu və təhlükəsizlik parametrlərinə təsiri elmi müstəvidə təhlil olunur. Araşdırmada həmçinin gəminin texniki göstəriciləri, DPS-in tətbiq sahələri və əməliyyat şəraitindəki səmərəliliyi nəzərdən keçirilir. Məqsəd, DPS-in gəmi idarəçiliyində necə sistemli və funksional üstünlük yaratdığını ortaya qoymaqdır.

"Qurban Abasov" kran gəmisinin texniki xüsusiyyətləri və sistemin funksional üstünlükləri. "Qurban Abasov" kran gəmisi çoxfunksiyalı texniki və yaşayış imkanlarına malik bir dəniz nəqliyyat vasitəsidir. Gəmi həm ağır yüklərin daşınması üçün kran funksiyasını, həm də ofşor layihələrdə flotel (yaşayış modulu) kimi fəaliyyət göstərə biləcək infrastrukturla təchiz olunmuşdur. Layihələndirmə və inşası 1986-cı ildə Finlandiyanın Turku şəhərində həyata

keçirilmiş bu gəmi 2014-cü ildə əsaslı modernizasiya edilmiş, 2019-cu ildə isə üçüncü səviyyə DP3 sistemi ilə təchiz edilmişdir.



Şəkil 1. *"Qurban Abasov" kran gəmisi DP iş rejimində*

Bu texnoloji təkmilləşdirmə gəminin mürəkkəb dəniz əməliyyatlarında daha yüksək sabitlik, təhlükəsizlik və manevr qabiliyyəti ilə fəaliyyət göstərməsinə imkan yaratmışdır. Aşağıda "Qurban Abasov" gəmisinin əsas texniki göstəriciləri təqdim olunur [1,2]:

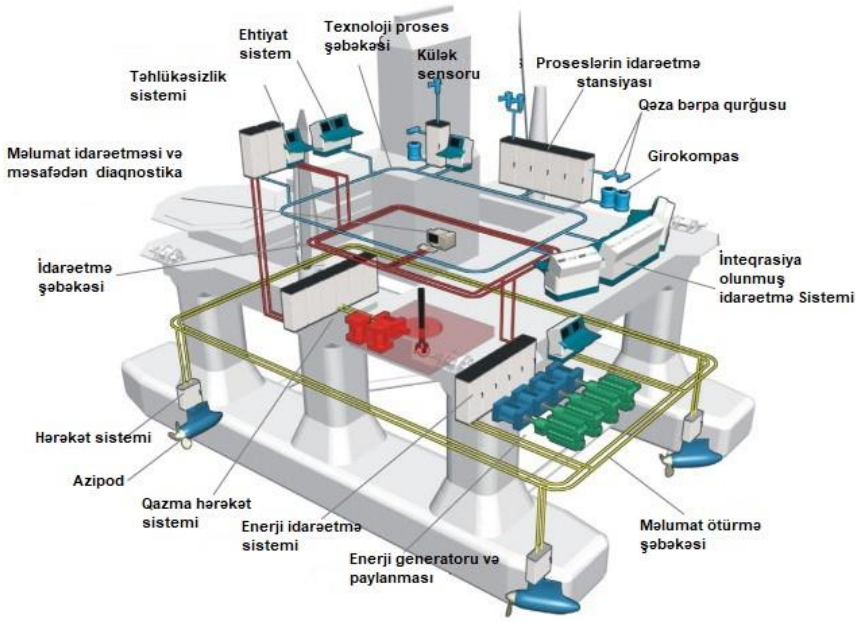
- **Tip:** Kran gəmi / Flotel
- **İnşa ili və yeri:** 1986, Turku, Finlandiya
- **Mövcud göyərtə sahəsi:** 3,235 m²
- **Yükqaldırma qabiliyyəti:** 600 ton
- **Ümumi uzunluq:** 141.40 m
- **En:** 62.80 m
- **Suya oturma dərinliyi:** 13.00 m
- **Dedveyt:** 6,277 ton
- **Maksimum insan tutumu (gəmi heyəti daxil olmaqla):** 217 nəfər
- **Gövdəyə düşən yük:** 5 t/m² (yükləmə sahələrində 10 t/m²)
- **Dinamik Mövqeləndirmə Sistemi:** DP3 (üçlü redundanslı sistem)

Bu texniki göstəricilər "Qurban Abasov" gəmisinin həm iri həcmli əməliyyatları icra etməsinə, həm də çətin hidrometeoroloji şəraitdə təhlükəsiz və stabil qalmasına imkan verir.

DP sisteminin tətbiqi ilə əldə olunan üstünlüklər. Gəmidə tətbiq olunan DP3 sinifli Dinamik Mövqeləndirmə Sistemi, real vaxt rejimində ətraf mühitin təsirlərini (külək, dalğa və axıntı cərəyanları) analiz edərək, gəminin coğrafi mövqeyini yüksək dəqiqliklə qoruyur. Bu sistemin əsas üstünlükləri aşağıdakılardır:

1. **Yüksək sabitlik:** Avtomatik idarəetmə sistemi vasitəsilə gəmi, dənizdə dəyişkən ekoloji şərtlər altında belə sabit vəziyyətdə saxlanılır.
2. **Əməliyyat təhlükəsizliyi:** Xüsusilə yük qaldırma, dalğıc əməliyyatları və sualtı infrastruktur işləri zamanı insanların və avadanlıqların təhlükəsizliyi təmin olunur.
3. **Manevr çevikliyi və operativlik:** Lövbərsiz sabit dayanma imkanı, gəminin tez bir zamanda yeni mövqeyə keçməsinə şərait yaradır.
4. **Enerji səmərəliliyi:** Mövqeyin dəqiq saxlanılması sayəsində əlavə manevrlərə ehtiyac azalır, bu da yanacaq sərfiyyatının optimallaşdırılmasına xidmət edir.

DPS - proqram təminatı və sensor əsaslı avadanlıq inteqrasiyası vasitəsilə işləyən mürəkkəb bir idarəetmə infrastrukturudur. Bu texnologiya sayəsində gəmi müxtəlif dəniz əməliyyatları zamanı tam idarəolunan və təhlükəsiz platformaya çevrilir [4].



Şəkil 2. *"Qurban Abasov" kran gəmisi DP sisteminin funksional sxemi*

Təhlükəsizlik baxımından üstünlüklər. DPS sisteminin tətbiqi yalnız mövqeyin qorunması deyil, eyni zamanda əməliyyat və heyət təhlükəsizliyinin təmin olunması baxımından da mühüm əhəmiyyət kəsb edir. "Qurban Abasov" gəmisində bu texnologiya aşağıdakı üstünlükləri təmin edir:

1. Əlverişsiz hava şəraitində sabit idarəetmə: Külək, axıntı cərəyanı və dalğa kimi dinamik faktorlar gəminin mövqeyini dəyişməyə məcbur etsə də, DPS bu təsirləri kompensasiya edərək sabitliyi qoruyur. Bu xüsusiyyət xüsusilə dərin sularda və ağır hava şəraitində əməliyyat apararkən vacibdir.
2. Qəzaların qarşısının alınması: Gəminin dəqiq mövqedə qalması insanlara, digər gəmilərə və dəniz obyektlərinə toqquşma riskini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır.
3. Lövbərsiz stabil dayanma: Dərin dəniz əməliyyatlarında və kontinent şelflərində lövbər salmadan sabit dayanmaq mümkündür. Bu, sualtı kabellərə, boru xətlərinə və digər infrastruktura zərər vermə riskini minimuma endirir.
4. Fövqəladə hallarda çevik reaksiya: Qəza və ya təhlükə zamanı sistem dərhal reaksiya verə bilir və gəmini sürətli şəkildə risk zonalarından uzaqlaşdırır. Bu, təxliyə və müdaxilə proseslərini asanlaşdırır.
5. Avtomatik siqnalizasiya və ehtiyatlılıq: DP3 sinifi üçlü redundant arxitekturaya malikdir. Hər bir əsas komponent üçün ən azı bir alternativ mövcuddur. Bu da sistemin fasiləsiz işləməsini və qəza riskinin minimallaşdırılmasını təmin edir.

DPS-in təhlükəsiz idarəetmədə tətbiqi. Sistem müasir texnoloji yanaşmalar çərçivəsində, xüsusilə dəniz mühəndisliyi və ofşor əməliyyatlar sahəsində təhlükəsizliyin təmin olunmasında əvəzsiz rol oynayır. "Qurban Abasov" kran gəmisində tətbiq olunan DP3 səviyyəli DPS, gəminin müxtəlif əməliyyat şəraitlərində sabit və dəqiq mövqedə saxlanılmasını təmin etməklə, həm texniki

təhlükəsizlik, həm də əməliyyat səmərəliliyini artırır. Bu sistemin tətbiqi, yalnız idarəetmə prosesini deyil, eyni zamanda insan amilinə və dəniz infrastrukturuna olan potensial riskləri də minimuma endirir [3].

Aşağıda DPS-in gəminin təhlükəsiz idarə olunmasında və spesifik əməliyyat sahələrində tətbiq mexanizmləri təqdim olunur:

1. Yükləmə və boşaltma əməliyyatları. Yükləmə və boşaltma prosesləri zamanı gəminin mövqeyinin sabit saxlanılması əməliyyatın dəqiqliyinə, avadanlıqların funksional fəaliyyətinə və insan resurslarının təhlükəsizliyinə birbaşa təsir göstərir.

- Gəminin coğrafi mövqeyi real vaxtda qorunur;
- Yük kranlarının dəqiqliklə işləməsi üçün sabit əməliyyat platforması təmin olunur;
- Dalğa, külək və cərəyanların təsiri kompensasiya edilərək, əməliyyatın fasiləsiz və təhlükəsiz şəkildə icrası mümkün olur.

Bu yanaşma həm əməliyyat müddətini azaldır, həm də qəza risklərini əhəmiyyətli dərəcədə minimuma endirir.

2. Sualtı infrastruktur layihələri. Dənizdə aparılan sualtı mühəndislik və texniki xidmət işləri zamanı mövqenin sabitliyi əsas şərtlərdən biridir. DPS bu sahədə aşağıdakı üstünlükləri təmin edir:

- Sualtı robotların və digər avadanlıqların düzgün yerləşdirilməsi üçün sabit platforma yaradır;
- Gəminin sürüşmə və ya istiqamət dəyişmə ehtimalını aradan qaldıraraq, sualtı əməliyyatlarda texniki dəqiqliyi artırır;
- Gərgin sualtı əməliyyatlar zamanı çevik reaksiya və manevr imkanları yaradır.

Bu, xüsusilə neft-qaz infrastrukturu, kabellərin və boru xətlərinin çəkilişi, təmiri və monitorinqi zamanı kritik əhəmiyyət kəsb edir.

3. Fövqəladə vəziyyətlərdə təhlükəsizlik təminatı. DPS-in inteqrasiya olunmuş idarəetmə sistemi gəmini yalnız normal əməliyyat rejimində deyil, həm də fövqəladə vəziyyətlərdə effektiv şəkildə nəzarətdə saxlayır. Bu sistem:

- Gəminin qəfil hava dəyişikliyi və ya texniki nasazlıq zamanı mövqedə sabit qalmasını təmin edir;
- Təxliyə və xilasedici əməliyyatların daha təhlükəsiz və planlı şəkildə həyata keçirilməsinə imkan yaradır;
- Sistem daxilində quraşdırılmış avtomatik siqnalizasiya və ehtiyat protokollar sayəsində qərarvermə müddətini qısaldır.

Beləliklə, DP3 səviyyəsində tətbiq olunan DPS, yalnız əməliyyatların effektivliyini artırmır, həm də fövqəladə hallar zamanı insan həyatının qorunmasına və mülkiyyətin təhlükəsizliyinə mühüm töhfə verir.

"Qurban Abasov" gəmisində DP sisteminin təkmilləşdirilməsi və texnoloji perspektivlər. 2019-cu ildə "Qurban Abasov" kran gəmisində həyata keçirilən modernizasiya prosesi çərçivəsində gəminin DPS ən yüksək etibarlılıq səviyyəsi olan DP3 sinfinə yüksəldilmişdir. Bu təkmilləşdirmə, gəminin istənilən dəniz şəraitində yüksək sabitlik və çevik manevr imkanlarını qorumaq qabiliyyətini əhəmiyyətli dərəcədə artırmışdır. Xüsusilə yükləmə-boşaltma, sualtı texniki əməliyyatlar və insan resurslarının daşınması kimi riskli proseslər zamanı gəminin mövqeyini yüksək dəqiqliklə sabit saxlamaq imkanı əldə edilmişdir [1, 2].

DP3 səviyyəsindəki sistemin tətbiqi aşağıdakı əsas texniki üstünlükləri təmin etmişdir:

- Üçlü redundant idarəetmə və enerji sistemləri, sistemin hər hansı bir komponentində nasazlıq baş verdikdə belə gəminin idarəetmədən çıxmasının qarşısını alır;
- Avtomatik arxa əlaqəli nəzarət modulları sayəsində külək, cərəyan və dalğa şəraitində davamlı stabil mövqe qorunur;

- Çox kanallı mövqe ölçmə sensorları ilə real vaxtda yüksək dəqiqliklə koordinasiya təmin olunur.

Bu texnoloji transformasiya "Qurban Abasov" gəmisinin ofşor sənayedə yüksək etibarlılığa malik əməliyyat platformasına çevrilməsinə şərait yaratmışdır.

Gələcək təkmilləşdirmə istiqamətləri. Texnoloji tərəqqi fonunda gəminin funksional imkanlarının daha da artırılması üçün aşağıdakı istiqamətlərdə modernizasiya tədbirlərinin həyata keçirilməsi məqsədəuyğun hesab olunur:

1. Süni intellekt və avtomatlaşdırılmış monitorinq sistemləri. Gəminin texniki və ekoloji parametrlərinin real vaxtda izlənməsi və təhlili üçün AI əsaslı qərarvermə alqoritmləri tətbiq edilə bilər. Bu sistemlər ətraf mühit dəyişkənliklərinə qarşı DP sisteminin optimallaşdırılmasına, təhlükəli vəziyyətlərdə əvvəlcədən müdaxilə mexanizmlərinin aktivləşdirilməsinə və \məliyyat zamanı insan müdaxiləsinin minimuma endirilməsinə imkan verə bilər.

2. Hibrid enerji sistemlərinin inteqrasiyası. Ətraf mühitə təsirin azaldılması və yanacaq sərfiyyatının optimallaşdırılması məqsədilə gəmidə dizel-elektrik hibrid mühərriklər, batareya əsaslı enerji saxlama sistemləri və bərpa olunan enerji texnologiyalarının (məsələn, külək və günəş modulları) tətbiqi nəzərdən keçirilə bilər.

Bu, həm əməliyyat xərclərinin azaldılmasına, həm də gəminin ekoloji dayanıqlığının artırılmasına mühüm töhfə verə bilər.

3. Dron dəstəyi ilə texniki nəzarət. Ofşor texniki baxış və diaqnostika proseslərinin daha çevik və təhlükəsiz şəkildə icrası üçün uçan və sualtı dronların tətbiqi mümkündür. Bu texnologiyalar, insan amili ilə bağlı riskləri azaldaraq texniki xidmətin effektivliyini və operativliyini artırır.

4. Ağıllı idarəetmə platformalarının tətbiqi. Gəmi daxilindəki mühüm sistemlərin (naviqasiya, enerji, DP, kommunikasiya və s.) vahid rəqəmsal idarəetmə paneli vasitəsilə inteqrasiya olunması ilə resursların optimallaşdırılması, proqnozlaşdırıcı texniki xidmətin təşkili və əməliyyat qərarlarının sürətli və dəqiq verilməsi mümkün olacaq.

Nəticə. "Qurban Abasov" kran gəmisində tətbiq olunan DPS gəminin təhlükəsiz və effektiv idarə olunmasında mühüm rol oynayır. Sistem gəminin mövqeyini yüksək dəqiqliklə və sabit şəkildə qoruyaraq, yükləmə-boşaltma əməliyyatları, sualtı infrastruktur layihələri və fövqəladə vəziyyətlər zamanı risklərin minimuma endirilməsinə şərait yaradır. DP3 sinifli DPS-in tətbiqi gəminin idarəetmə sistemlərinin etibarlılığını və təhlükəsizlik səviyyəsini əhəmiyyətli dərəcədə yüksəldib, gəminin müxtəlif dəniz şəraitlərində etibarlı və dayanıqlı fəaliyyət göstərməsini təmin edir. Bu, "Qurban Abasov" gəmisini həm cari, həm də gələcək əməliyyatlar üçün optimal və təhlükəsiz bir platformaya çevirir. Gələcəkdə texnoloji yeniliklərin və avtomatlaşdırma sistemlərinin inteqrasiyası ilə gəminin performansı və ekoloji dayanıqlığı daha da artırıla bilər.

Ədəbiyyat

1. Caspian Marine Services. (2025). Gurban Abasov. Caspian Marine Services. Retrieved from https://www.caspmarine.com/gurbanabasov
2. Qasımov, İ. M. (2022). Kran gəmilərinin idarəetmə sistemləri: Texniki xüsusiyyətlər və tətbiq sahələri. Bakı Dövlət Universiteti.
3. International Maritime Organization. (2019). IMO guidelines on dynamic positioning systems (DP). International Maritime Organization. Retrieved from http://www.imo.org
4. Şirinov, R. F. (2021). Dinamik mövqeləndirmə sistemlərinin dəniz qəza risklərinə təsiri. "Xəzər dənizi və nəqliyyat təhlükəsizliyi" jurnalı, 6(3), 45-59.

Məqalə qəbul olunub: 08.10.25
Tövsiyə edib: prof. Rüstəmov Z.Ə.

GƏMİÇİLİK TEXNİKASI

УДК 621.019

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОСА КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Абдуллаева С.А.

Азербайджанский Научно-Исследовательский и Проектно-Изыскательский Институт Энергетики
Аз1012, г. Баку, пр. Г.Зардаби, 94
E-mail: samira.afqan@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность исследования определяется критическим состоянием парка высоковольтных выключателей в современных энергосистемах. Статистические данные свидетельствуют, что свыше 60% эксплуатируемого оборудования превысило проектный срок службы, создавая реальные угрозы надежности электроснабжения. В этой связи особую значимость приобретает совершенствование систем технического обслуживания и восстановления износа коммутационных устройств на основе внедрения интеллектуальных систем мониторинга. Разработка адаптивных систем диагностики и прогнозирования остаточного ресурса становится не только технической, но и стратегической задачей, решение которой будет определять устойчивость энергетической инфраструктуры в ближайшей перспективе.*

Xülasə. *Tədqiqatın aktuallığı müasir enerji sistemlərində yüksəkgərginlikli açarlar parkının kritik vəziyyəti ilə müəyyən edilir. Statistika göstərir ki, istismarda olan avadanlığın 60%-dən çoxu xidmət müddətini keçib və enerji təchizatının etibarlılığına real təhlükə yaradır. Bununla əlaqədar olaraq, kommutasiya qurğularının texniki xidmət və aşınmanın bərpası sistemlərinin intellektual monitorinq sistemlərinin tətbiqi əsasında təkmilləşdirilməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Qalıq xidmət müddətinin diaqnostikası və proqnozlaşdırılması üçün adaptiv sistemlərin inkişafı təkcə texniki deyil, həm də strateji vəzifəyə çevrilir ki, onun həlli yaxın gələcəkdə enerji infrastrukturunun dayanıqlığını müəyyən edəcək.*

Abstract. *The relevance of the study is determined by the critical condition of the high-voltage circuit breaker fleet in modern power systems. Statistical data indicate that over 60% of the equipment in operation has exceeded its design service life, creating real threats to the reliability of power supply. In this regard, the improvement of maintenance and wear recovery systems for switching devices based on the introduction of intelligent monitoring systems is of particular importance. The development of adaptive systems for the diagnosis and prognosis of remaining service life is becoming not only a technical but also a strategic task, the solution of which will determine the sustainability of energy infrastructure in the near future.*

Ключевые слова: *высоковольтный выключатель, техническое состояние, диагностика, износ, остаточный ресурс, интеллектуальная система, долговечность*

Açar sözlər: *yüksək gərginlikli açar, texniki vəziyyət, diaqnostika, aşınma, qalıq resurs, intellektual sistem, uzun ömürlülük*

Key words: *high-voltage circuit breaker, technical condition, diagnostics, wear, remaining service life, intelligent system, durability*

Введение. В условиях массового старения оборудования особую актуальность приобретает цифровая трансформация процессов технического обслуживания и ремонта, основанная на внедрении интеллектуальных систем мониторинга и предиктивной аналитики. **Основным направлением** решения данной проблемы является разработка интеллектуальных информационных систем (ИИС) анализа надежности выключателей, позволяющих повысить точность оценки остаточного ресурса оборудования [1]. **Ключевой особенностью** предлагаемого подхода является комплексное использование информации о техническом состоянии выключателей, получаемой от стационарных и переносных диагностических систем, а также данных плановых испытаний [2].

Методология исследования включает разработку модели оценки остаточного ресурса выключателей, основанную на анализе: расхода коммутационного ресурса при отключениях токов короткого замыкания; изменения показателей износа узлов под воздействием механических, электрических и тепловых факторов. **Автоматизированная система анализа** обеспечивает: мониторинг текущего технического состояния; оценку динамики износа узлов аппаратуры; оптимизацию сроков и объемов диагностических мероприятий; сравнительный анализ методов испытаний. Предложены практические решения по созданию интеллектуальной системы диагностики, математическому моделированию процессов износа и оптимизации ремонтных интервалов.

Структура и принципы функционирования интеллектуальной информационной системы. Высоковольтный выключатель - представляет собой сложное электромеханическое устройство, выполняющее критически важные функции в энергосистемах: оперативное отключение питания при аварийных ситуациях, защиту дорогостоящего энергооборудования и сохранение целостности линий электропередачи. Ключевым аспектом эксплуатации таких устройств является определение их остаточного ресурса и прогнозирование количества оставшихся рабочих циклов. От надежности высоковольтных выключателей напрямую зависит стабильность электроснабжения различных объектов - от промышленных предприятий до удаленных населенных пунктов.

Проблема эффективного управления эксплуатацией электрооборудования, выработавшего нормативный ресурс, приобретает особую значимость в современных условиях. Это обусловлено одновременным действием двух факторов: постоянным увеличением объема оборудования, превысившего проектный срок службы, и необходимостью оптимизации эксплуатационных расходов.

Для решения указанных задач требуется совершенствование автоматизированных систем мониторинга и методов контроля технического состояния электроустановок. Необходимо создание комплексной системы информационно-методической поддержки технического персонала, обеспечивающей:

- интеграцию ретроспективных и текущих данных о состоянии оборудования;
- учет реальных условий эксплуатации и рабочих режимов;
- фиксацию всех эксплуатационных событий без искажения первичной информации;
- точную классификацию причин отказов и повреждений;
- оценку последствий и ущерба от аварийных ситуаций;
- постоянное повышение достоверности и полноты данных;
- минимизацию влияния субъективного человеческого фактора.

Цель создания интеллектуальной информационной системы, заключается в возможности предотвращения отказов выключателей в будущем, исходя из его фактического технического состояния. Поэтому система должна обеспечивать простоту использования, поскольку избыточная сложность может негативно повлиять на ее практическую эффективность.

Интеллектуальная информационная система разработана для оперативно-технического персонала и состоит из взаимосвязанных подсистем (программных комплексов), в основу которых положено единое информационно-техническое обеспечение, отражающее специфику их функционирования, и реализует следующие функции:

- информация о техническом состоянии электроустановок; сбор и кодирование информации (паспортной, технической, событийной);
- контроль достоверности информации на входе;
- диалоговый режим с помощью основных и вспомогательных меню;
- расчет и анализ эксплуатационной надежности оборудования и выдача результатов;
- повышение остаточного срока службы оборудования.

Разработка и внедрение в эксплуатацию указанных программных комплексов обеспечивает создание информационной базы данных, решение задач управления техническим состоянием коммутационного оборудования и, в конечном счете, в повышении культуры производства.

Внедрение системы обеспечивает достижения следующих преимуществ:

- снижение затрат на проведение ремонтно-технического обслуживания, улучшение качества ремонтов и сокращение их продолжительности за счет предварительного анализа фактического состояния оборудования и оптимизации ремонтных периодов;
- снижение аварийности работы оборудования за счет предотвращения отказов, связанных с возникновением и развитием неисправностей в работе оборудования;
- сокращение числа и длительности вынужденных простоев, связанных с внеплановыми ремонтами;
- повышение производительности труда и культуры обслуживания.

Оценка целесообразности непрерывной диагностики технического состояния высоковольтных выключателей. Каждое новое оборудование располагает приблизительно одинаковым механическим и коммутационным ресурсом. Однако со временем происходит неравномерное ухудшение эксплуатационных характеристик, снижается их надежность работы. Интеллектуальная оценка остаточного ресурса высоковольтных выключателей превращает их из «черных ящиков» в предсказуемые и управляемые активы, открывая новое в вопросах надежности и экономичности [3].

По своему назначению высоковольтные выключатели подразделяются на линейные, блочные трансформаторные и т.д. Частота коммутаций этих выключателей различна. Чем больше мощность отключаемого *короткого замыкания* (к.з.) и чем чаще коммутации, тем большему износу подвергается контактная система выключателя.

Наряду с периодически проводимыми профилактическими испытаниями высоковольтные выключатели оборудованы специализированными стационарными или переносными системами мониторинга технического состояния выключателей. Системы стационарного мониторинга технического состояния выключателей являются весьма дорогостоящими. и, как правило, устанавливают на особо ответственных выключателях.

Опыт эксплуатации показывает, что непрерывная диагностика технического состояния выключателей переносными устройствами целесообразна при превышении остаточного интервала межремонтного периода остаточной длительности безотказной работы. Поэтому на практике возникает необходимость определить перечень выключателей, для которых контроль коммутационной способности с использованием переносных систем контроля целесообразен.

Оценка остаточного коммутационного ресурса выключателей. Остаточный ресурс — это многомерный показатель и оценить его можно по трем основным направлениям (рисунок 1):

- ***коммутационный ресурс*** **(электрическая «выносливость»)** - износ дугогасительных контактов. **У**читывается не просто количество операций, а их *тяжесть* (отключение токов короткого замыкания, тип нагрузки).
- ***механический ресурс*** **(физическая «усталость»)** - износ механизмов привода, пружин, соединений, к**оличество операций.** Рассчитывается на основе данных о количестве операций и сравнении с паспортным механическим ресурсом.
- ***диэлектрический ресурс*** **(электрическая «иммунная система») – оценивается по данным мониторинга с**остояния изоляции, эрозии контактов, к**ачества SF6 газа, уровня частичных разрядов.**

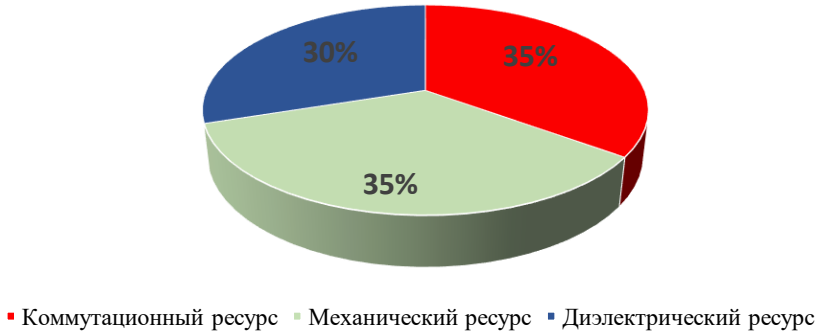


Рисунок 1. *Остаточный ресурс и три направления*

Оценка остаточного ресурса — это больше, чем просто технология, это новая философия управления критической энергетической инфраструктурой. Этот подход трансформирует принятие решений, основанных на:

- Принятии решений на основе данных- каждый эксплуатационный шаг аргументирован фактическим техническим состоянием оборудования.
- Оптимальном инвестировании- перераспределение капитальных затрат и бюджета на ремонт исходя из реальной потребности активов.
- Гарантии надежности- обеспечение потребителей стабильным и предсказуемым энергоснабжением.

Дальнейшее исследование фокусируется на количественной оценке *показателей долговечности* (ПД) узлов коммутационных аппаратов. Поскольку износ происходит в результате дискретных воздействий, эти оценки имеют самостоятельное значение, позволяя точно определить степень износа и величину остаточного времени безотказной работы [4]. Учитывая случайный характер дискретных воздействий, разработанные модели служат основой имитационного моделирования процесса износа с целью характеристики точности показателя [5].

Вопросы оценки показателей долговечности рассмотрим для ряда моделей износа [6]:

1. Имеет место нерегулярный поток с заранее известными интервалами между воздействиями (Δt). Если задано допустимое число детерминированных воздействий $N_{доп.}$, то величина износа в момент t равна:

$$Iz(t) = \delta N(t) = \frac{t}{\Delta t \cdot N_{\text{ДОП.}}}$$

величина остаточного ресурса $Re(t) = 1 - Iz(t)$, а интервал времени до предстоящего планового ремонта – произведению $(N_{\text{ДОП.}} \cdot \Delta t)$.

2. Имеет место однородный пуассоновский поток, т.е. ординарный, стационарный и без последействия регулярный поток. Вероятность возникновения N воздействий за время t определяется по известной формуле:

$$P(N,t) = \frac{(wt)^N}{N!} e^{-wt},$$

а функция распределения вероятности износа величиной N_t имеет вид:

$$P(N_t \le N) = F_{И}(N,t) = \sum_{i=1}^{N} P(i,t) \quad (1)$$

Показатели долговечности этой модели вычисляются следующим образом:

- *Средний износ*:

$$M^*[Iz(t)] = M^*(\delta N) = \frac{w^* t}{N_{\text{ДОП.}}},$$

где *w**- оценка интенсивности воздействия; нижнее и верхнее граничные значения доверительного интервала износа равны соответственно

$$\underline{\delta N_{(1-R)}} = \frac{\underline{w_{(1-R)}} \cdot t}{N_{\text{ДОП.}}}$$

$$\overline{\delta N_R} = \frac{\overline{w_R} \cdot t}{N_{\text{ДОП.}}}$$

где R=υ/2, а υ- уровень значимости.

Функция распределения вычисляется по формуле (1).

- *Остаточный ресурс Re(t):* Величина Re(t) может быть вычислена непосредственно по данным с п.1. Функция распределения остаточного ресурса

$$F[Re(t)] = 1 - F[Iz(t)]$$

- Интервал времени до *предстоящего планового ремонта (T_d)*:
  – среднее значение

$$M^*(T_d) = \frac{N_{\text{ДОП}}}{w^*}$$

  – нижнее и верхнее граничные значения доверительного интервала равны соответственно

$$\underline{T_{d,(1-R)}} = \frac{N_{\text{ДОП}}}{\overline{w_R}}$$

$$\overline{T_{d,(1-R)}} = \frac{N_{\text{ДОП}}}{\underline{w_{(1-R)}}} \quad (2)$$

Функция распределения $F(T_d)$ соответствует F[Re(t)] при условии, что $N=N_{\text{доп}}$. и $t=T_d$, рассчитывается по формуле:

$$F(T_d) = 1 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ДОП}}} \frac{(wT_d)^i}{i!} e^{-wT_d} \quad (3)$$

Распределение $F(T_d)$ известно, как *распределение Эрланга*.

- Остаточный срок службы до предстоящего планового ремонта (ΔT_d): вычисляются по формулам (2) и (3) с заменой T_d на величину $T_d=t_i+\Delta T_d$, где t_i - срок службы, для которого рассчитывается ΔT_d.

3. Как было отмечено выше, поток воздействий на выключатель неординарный и неоднородный. Свойство ординарности нарушается возможностями автоматического и ручного повторного включения, а требование однородности –различием отключаемых токов короткого замыкания. Можно предположить, что суммарный износ в результате многократных (*n*) единичных воздействий равен сумме износов единичных воздействий, а «тяжесть» последствий единичных воздействий можно представить рядом дискретных значений. В этом случае, при выполнении требования стационарности неординарный и неоднородный поток может быть рассмотрен как сумма независимых однородных пуассоновских потоков.

4. Величина интенсивности потока воздействий (w) не всегда постоянна. В частности, величина интенсивности потока воздействий *воздушных линий* (ВЛ), ($w_л$) зависит от целого ряда факторов, которые проявляются в различные времена года (грозовая деятельность, гололедообразование, соленые морские туманы и пр.) и по годам. Эта зависимость обычно имеет место, если исполнение ВЛ или ее техническое состояние (наличие «нулевых» изоляторов, коррозия тросов, дефекты соединения и пр.) не соответствуют интенсивности воздействующих факторов. Такой поток воздействий называют *пуассоновским потоком* с переменным параметром. Согласно [7]:

$$F(N,t) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left[\int_0^t w(t)dt\right]^i}{i!} e^{-\int_0^t w(t)dt} \quad (4)$$

Наиболее эффективной формой повышения надежности выключателей является повышение эффективности ремонтно-технического обслуживания, своевременный планово-восстановительный ремонт, в частности ремонт по техническому состоянию. Техническое состояние выключателей устанавливается по величине *диагностических показателей (ДП)*, характеризующие электрические, тепловые, механические и иные свойства отдельных узлов выключателей. Результаты измерения диагностических показателей сопоставляются с нормативными значениями, и выносится заключение о соответствии или несоответствии технического состояния выключателей предъявляемым требованиям.

Однако, при этом не решается вопрос о безотказности выключателей в предстоящий межремонтный период, т.к. не определяются показатели долговечности, такие как: *остаточный ресурс выключателей, остаточный срок службы и не превышение длительности межремонтного периода.*

Опыт эксплуатации показывает, что, при проведении ремонтных работ полностью восстановить износ без замены элементов на новые невозможно. Несмотря на то, что после планового ремонта величина N принимается равным нулю, элементы выключателей содержат некоторый неустранимый износ, обусловленный изменением свойств материала. Остаточный износ в течение срока службы элемента тем больше, чем больше предшествовало воздействий и чем «тяжесть» этих воздействий была больше. При эксплуатации выключателей, соглашаясь с наличием остаточного износа (элементы не новые), тем не менее, принимается предположение о неизменности $N_{доп}$.

Различают три разновидности процессов дискретного износа для однотипных воздействий. Опыт эксплуатации показывает, что для элементов выключателей *постоянная* величина изменения износа наблюдается на элементах, износ которых не превышает регламентируемых заводом-изготовителем значений (в виде предельных значений диагностических показателей).

Для ряда ДП наблюдается *уменьшение* величины приращения износа, т.е. износ каждого последующего воздействия в момент t_2 [$\Delta Iz(t_2)$] меньше износа от предыдущего воздействия $\Delta Iz(t_1)$, т.е. $\Delta Iz(t_1)>\Delta Iz(t_2)$, где t_1 и t_2 – моменты возникновения дискретных воздействий, $t_2>t_1$. Это обуславливается тем, что элементы «приспосабливаются» к условиям работы и проявляется, как правило, после плановых ремонтов.

Наиболее опасны для оборудования условия, когда износ каждого последующего воздействия превышает износ от предыдущего воздействия, т.е. приращение износа возрастает $\Delta Iz(t_1)<\Delta Iz(t_2)$, где $t_2>t_1$. Этот процесс именуется *катастрофическим износом* и имеет место при эксплуатации выключателей, техническое состояние которых не удовлетворяет предъявляемым требованиям (диагностические показатели превышают допустимые значения).

Главной задачей эксплуатации электроустановок является повышение качества проводимых плановых ремонтов и предотвращение катастрофического износа. В связи, с выше-

изложенным, можно заключить, что увеличение остаточного износа приводит к уменьшению фактического значения допустимого числа дискретных воздействий $N_{ДОП}$ и, соответственно, к увеличению числа дискретных воздействий, ведущих к катастрофическому износу и росту вероятности аварийного повреждения элемента и выключателя в целом.

Таким образом, оценка технического состояния по условию не превышения числа воздействий (приведенных к единичному повреждению) допустимой величины $N_{доп.}$, для элементов, срок службы которых приближается к расчетному ($T_{доп.р}$), а тем более превышающих его, может привести к увеличению числа отказов. Оценка показателей долговечности элементов, с $T_d \geq T_{доп.р}$ наиболее просто может быть выполнена путем снижения $N_{доп.}$ до величины, отражающей остаточный износ элемента.

Алгоритм расчета показателей долговечности можно представить следующим образом:

1. Проводится измерение диагностических показателей оборудования в момент t_K через интервал $\Delta t=t_K-t_P$ где t_P – момент окончания ремонта. Величина Δt выбирается исходя из двух условий. Чем Δt больше, тем больше число воздействий N и тем точнее результаты расчетов среднего износа при одном воздействии для заданного срока службы элемента. Рекомендуется Δt выбирать таким, чтобы $N_0(\Delta t)=(0{,}4\text{-}0{,}6)N_{ДОП}$. Обозначим множество этих диагностических показателей через $P_i(t_K)$, где i – номер диагностического показателя.
2. Вычисляется величина износа по каждому ДП

$$Iz(P_i, t_k) = \frac{P_i(t_k)-P_i(t_P)}{P_{ДОП}-P_0}, \quad (5)$$

где P_0 – исходное значение i- го диагностического показателя

3. Определяется число единичных воздействий в течение интервала Δt_n

$$N_0(\Delta t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{0,i}(\Delta t)}{\mu_{1,i}}, \quad (6)$$

где $N_{0,i}(\Delta t)$ – наблюдаемое за интервал число воздействий i-го типа; n – число однотипных воздействий; $\mu_{1,i}$ – относительная тяжесть воздействия, равная отношению $N_{ДОП}/N_{ДОП,i}$; $N_{ДОП.i}$- допустимое число воздействий i-го типа

4. Вычисляется величина изменения износа на одно единичное воздействие по формуле:

$$\Delta Iz(P_i, t_k) = \frac{Iz(P_i,t_k)}{N_0(\Delta t)} \quad (7)$$

5.Определяется расчетное значение допустимого числа единичных воздействий ($N_{ДОП,\,i}$)

$$N^*_{ДОП,i} = \frac{1}{\Delta Iz(P_i,t_k)}, \quad (8)$$

где i=1, n, n – число показателей

6. Определяется величина остаточного ресурса по числу элементарных воздействий для каждого ДП

$$Re(N_i) = \frac{N_{ДОП,i}-N_0(\Delta t)}{N^*_{ДОП,i}} \quad (9)$$

7. Определяется остаточный ресурс оборудования исходя из условия:

$$Re(N) = \min[Re(N_1), Re(N_2), \dots\dots, Re(N_n) \quad (10)$$

Для энергосистемы, стоящей на пороге новой эры Smart Grid, **активно-адаптивной сети** и увеличения доли возобновляемой энергии, надежность коммутационных аппаратов, становится вопросом **энергетической безопасности.**

Выгоды от непрерывной диагностики носят не только операционный, но и стратегический характер, от безотказности к предсказуемости.

1. Предотвращение катастрофических убытков (очевидная выгода). Непрерывная диагностика позволяет предсказать и предотвратить до 90% внезапных отказов.

2. Оптимизация эксплуатационных расходов (скрытая выгода).

- обслуживание по техническому состоянию и **сокращение плановых ремонтов:** Ремонт не по графику, а по фактическому состоянию. Ремонт и техническое обслуживание назначаются тогда, когда диагностика и модель остаточного ресурса показывают приближение к критическому порогу. Это экономия на трудозатратах, материалах и простое оборудования.
- прогнозированию надежности: моделирование различных сценариев нагрузок и аварий, выявляя слабые звенья.
- оптимизации инвестиций: точно понимать, какие выключатели требуют замены в следующем году, а какие прослужат еще 10 лет, что позволяет оптимально распределять бюджет.
- **оптимизация** потребности в запасных частях, инструментах и принадлежностях снижает затраты на складские запасы.
- **увеличение срока службы оборудования:** Щадящий режим работы и своевременное устранение мелких неисправностей продлевают жизнь выключателя на 15-20%.

3. Повышение кибербезопасности и управления активами. Закладывает основы для интеллектуальной, самовосстанавливающейся сети будущего.

4. **Повышает устойчивость** всей энергосистемы.

Выводы. Ключевым фактором повышения эксплуатационной эффективности является комплексная методическая поддержка персонала, обеспечивающая: снижение рисков ошибочных решений при оценке технического состояния оборудования; оптимизацию затрат на техническое обслуживание и ремонты; повышение общих показателей надежности энергосистемы. Инструментарий поддержки включает: выявление критических узлов и анализ причин деградации технических характеристик; систему ранжирования выключателей по уровню надежности; методики оценки качества восстановления износа и консервации оборудования; критерии определения оптимальных сроков и объемов ремонтных работ. Разработан метод и алгоритм оценки остаточного коммутационного ресурса выключателей. Он основан на совместном использовании информации об износе при отключении к.з. и износе, вытекающем из изменения диагностических параметров. Так же разработан метод планирования сроков и объема восстановления износа. Методология основана на оценке интегрального показателя, по разновидностям базовых признаков, учитывающих надёжность и экономичность эксплуатации выключателей.

Таким образом, создаётся возможность ранжирования выключателей, а классификация их по группам позволяет выявить выключатели, которые: должны быть немедленно отключены для восстановления износа; рекомендуются в ближайшее время отключить по аварийной заявке и устранить дефекты; необходимо оснастить переносными устройствами непрерывного контроля технического состояния; не требуют специальных мер по восстановлению износа.

Литература

1. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К. Учет остаточного износа конструктивных материалов электрооборудования. Баку, Экоэнергетика, №1, 2006 г., с.22-24.
2. Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Автоматизированный контроль технического состояния выключателей распределительных устройств энергосистемы. Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко. Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Вып.63, г. Баку, 2013г., с. 506-513.

3. Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Метод оценки целесообразности непрерывной диагностики технического состояния высоковольтных выключателей. Материалы международной научной конференции «Современные научно-технические и прикладные проблемы энергетики». 27-28 октября 2015 г. Сумгаит, Азербайджан.
4. Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Метод оценки целесообразности непрерывной диагностики технического состояния высоковольтных выключателей. Материалы международной научной конференции «Современные научно-технические и прикладные проблемы энергетики». 27-28 октября 2015 г. Сумгаит, Азербайджан.
5. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // Электричество № 11, 2007 г.
6. Сафарова Т.Х., Абдуллаева С.А. Модели для оценки остаточного ресурса выключателей. Баку, Проблемы Энергетики №2-3, 2008, с. 38-41.
7. Фархадзаде Э.М., Абдуллаева С.А. Модели для оценки показателей долговечности элементов электроустановок при дискретных воздействиях. Международный Конгресс «Энергетика. Экология. Экономика», г. Баку, 2007г.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. Sultanov E.F.

UOT 621.313.1

DƏYİŞƏN CƏRƏYAN ELEKTRİK MAŞINLARINDA BİRQATLI DOLAQLAR VƏ ONLARIN FAZALARA GÖRƏ BİRLƏŞDİRİLMƏ METODİKASI

Balayeva Ə.H., Əliquliyeva X.V., Şirinova A.Y., Harunov A.T.

"Sumqayıt Dövlət Universiteti" PHŞ
Az5008, Sumqayıt şəh,, Bakı küç., 1
E-mail: balayeva.efile@mail.ru; xayala-firuza@mail.ru xayala. aynur.şhirinova.79@mail. ru; asim.harunov@sdu.edu.az

Xülasə. *Məqalədə sənayenin müxtəlif sahələrində istifadəsi geniş vüsət tapmış dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının dolaqlarının fazadaxili birləşmə sxemlərinin tərtibi verilmiş, həmçinin əsaslı təmir zamanı asinxron mühərrikində fırlanan maqnit sahəsinin yaranmasını təmin edən dolaqların qütb və fazaya görə birləşmə sxemlərinin qurulması və bu sxemlərin birləşdirilmə metodikasından bəhs edilir. Dəyişən cərəyan mühərriklərinin stator yuvalarında yerləşən dolaqların sarğac qrupunun sayı, dolaq növünün müəyyən edilməsi, hər bir sarğacın yerləşdiyi yuvaların təyin edilməsi, yuvalar arasındakı addım məsafələrinin (yuva sayının) hesablanması və sarğac qruplarındakı sarğılar sayının müəyyənləşdirilməsi, eyni zamanda dəyişən cərəyan maşınlarında bir qatlı dolaqların (konsentrik, şablonlu və zəncirvari) qütb və fazalara görə yuvalarda yerləşdirilmə metodikası işlənmişdir.*

Abstract. *The article presents the design of in-phase connection schemes for the windings of alternating current machines, which are widely used in various fields of industry, and also discusses the construction of connection schemes for the poles and phases of the windings that ensure the creation of a rotating magnetic field in an asynchronous motor during major repairs, and the methodology for connecting these schemes. The number of winding groups of windings located in the stator slots of alternating current motors, the determination of the winding type, the determination of the slots in which each winding is located, the calculation of the step distances (number of slots) between the slots and the determination of the number of windings in the winding*

groups, as well as the method of placing single-layer windings (concentric, template and chain) in the slots according to poles and phases in alternating current machines have been developed.

***Аннотация**. В статье представлены расчеты схем синфазного соединения обмоток машин переменного тока, широко применяемых в различных областях промышленности, а также рассмотрены построение схем соединения полюсов и фаз обмоток, обеспечивающих создание вращающегося магнитного поля в асинхронном двигателе при капитальном ремонте, и методика выполнения этих схем. Разработаны число групп обмоток, размещаемых в пазах статора двигателей переменного тока, определение типа обмотки, определение пазов, в которых размещается каждая обмотка, расчет шаговых расстояний (числа пазов) между пазами и определение числа обмоток в группах обмоток, а также способ размещения однослойных обмоток (концентрических, шаблонных и цепочечных) в пазах по полюсам и фазам в машинах переменного тока.*

***Açar sözlər:** cüt qütblər, stator yuvaları, konsentrik dolaqlar, sarğac qrupu*

***Key words:** paired poles, stator slots, concentric windings, coil group*

***Ключевые слова:** парные полюса, пазы статора, концентрические обмотки, группа катушек*

Giriş. İstehsal prosesinin yüksək iqtisadi göstəricilərə malik olması bir başa enerji sisteminin və texnoloji proseslərin istehsal mexanizmlərinin əsasını təşkil edən elektrik mühərriklərinin dayanıqlı iş rejimlərindən asılıdır. Sənayenin müxtəlif sahələrində tətbiq olunan elektrik intiqal mühərriklərinin və texnoloji avadanlıqların daha etibarlı və yüksək f.i.ə -na malik olması və istehsal proseslərində dayanıqlı iş qabiliyyətinə malik olması üçün onların istismarında planlaşdırılmış sistem üzrə hazırlanmış əsaslı təmirə ehtiyac duyulur. Təsadüfi deyildir ki, istehsal proseslərində elektrik mühərriklərinin imtina səbəblərindən biri də onun dolaqlarının sıradan çıxmasıdır. Elektrik mühərriklərinin əsaslı təmir zamanı dolaqların qütb və fazalara görə yuvalarda yerləşdirilməsi, birləşmə sxemlərinin düzgün birləşdirilməsi vacib məsələlərdəndir.

Əsas hissə. Bildiyimiz kimi stator və rotorun maqnit axınının keçdiyi hissələrinə onların maqnit keçiriciləri və ya nüvələri və maqnit qüvvə xətlərinin keçdiyi bütün yola maşının maqnit dövrəsi deyilir. Maqnit sahəsinin axın xətləri rotorun fırlanması üçün başqa bir dolaqın keçiriciləri ilə kəsişir və onlarda e.h.q. yaranır. Elektrik maşınlarının dolaqlarında fırlanan maqnit sahəsini əldə etməklə yanaşı, bunların bilavasitə iştirakı ilə enerji bir şəkildən başqa bir şəklə çevrilir.

Elektrik maşınlarının dolaqları maşının mühüm elementlərindəndir. Qeyd edək ki, elektrik maşınlarının tətbiq sahəsindən - gücündən asılı olaraq onların dolaqları da müxtəlif quruluşa və xarakterik xüsusiyyətlərə malikdir. Belə ki, onlar dəyişən cərəyan maşınlarının stator dolaqları, faz rotorlu asinxron mühərrikinin stator və rotor dolaqları, sabit cərəyan maşınlarının lövbər və təsirlənmə dolaqları və s. ayrılır. Dolaqların sarğılarının konstruksiyası, onların yuvalarda yerləşdirilməsi və öz aralarında sxemlərinin birləşdirilməsinə görə maşınların tipindən və təyinatından asılı olaraq onlar müxtəlif növlərə ayrılır. Elektrik maşınlarının istismar prosesində imtinalara səbəb olan qüsurların əksəriyyəti onların dolaqlarının sıradan çıxmasına gətirib çıxardır ki, təmir zamanı yuxarıda sadaladığımız hər hansı maşının dolaqlarının hissəli və əsaslı təmirə ehtiyacı olur.

Dəyişən cərəyan mühərriklərinin sarğı dolaqları birqatlı və ikiqatlı dolaqlardan ibarət olub, və aşağıdakı növlərə ayrılır:

- konsentrik,
- şablonlu,
- zəncirvari.

Birqatlı dolaqların müsbət cəhətlərinə daxildir:

- hazırlanması sadədir,
- ikiqatlı dolaqlarla müqayisədə misin yuvalarda yüksək doldurma əmsalına malikdir,

- izolyasiya materialının az sərfiyyatı.

Bu dolaqların çatışmayan cəhətləri ondan ibarətdir ki, maqnit hərəkət qüvvəsinin əyriləri böyük əhatəli yüksək harmonikaları təşkil edir ki, bu amplatudaya görə çox böyük, hansı ki, beşinci və altıncı harmoniikalardı ki, nəticədə bu mühərrikin işəburaxma xarakteristikasına kəskin təsir edir. Konsentrik dolaqların çatışmayan cəhəti onun sarğaclarının müxtəlif addımlarla müxtəlif şablonlarda hazırlanması əlverişsiz olmasıdır. Bu dolaqların tipik göstəricilərindən biri hər bir dolağın sarğac qrupu "q" - sarğac sayından ibarət olmasıdır (fazada və qütbdəki yuvaların sayı). Bu göstəricini aşağıdakı ifadə ilə təyin etmək olar [4,7]:

$$q = \frac{Z_1}{2pm} \quad (1)$$

Burada Z_1 – stator yuvalarının sayı; 2p – qütblər sayı; m – faza sayı (m=3.

Bu dolaqların digər tipik göstəricisi - hər bir dolaq "τ " - dolaqın qütb bölgüsünün eninə malik olur hansı ki, onun tipindən asılı olmayaraq 3q yuvaya bərabər olur və yaxud aşağıdakı düstur ilə təyin edilir [4,7]:

$$\phi = \frac{Z_1}{2p} \quad (2)$$

Fırlanan maqnit sahəsinin alınması üçün iki şərt yerinə yetirilməlidir:

1. Fazaların başlanğıc və sonları 120 elektrik dərəcə bucaq altında yerləşməlidir;
2. Faza sarğılarının başlanğıclarına (C1, C2, C3) üçfazalı gərginlik verilməlidir.

Birinci şərti yerinə yetirmək üçün q yuvalarının 60 elektrik dərəcəsində olmasını bilmək vacibdir (stator yuvalarının və dolaqların qütblərinin sayından asılı olmayaraq). Buna görə də fazaların başlangıcları iki faza zonasından (yəni 2q yuvalarından) sonra yerləşdirilir. Məsələn: birinci fazanın başlangıcı (C1) birinci yuvada yerləşərsə, onda ikinci fazanın başlangıcının (C2) yerləşdiyi yuvanın nömrəsi aşaqıdakı ifadəyə əsasən hesablanır:

$$2 = C1+2q.$$

Anoloji olaraq üçüncü fazanın başlangıcı üçün (C3):

$$C3 = C2+2q = C1 +4q$$

"q" dolaqları üçün birinci fazanın sonu (C4) başlanqıc (C3) yuvasında və ya ondan aşağı yuvalarda yerləşir və yuva nömrəsi aşağıdakı ifadə ilə müəyyən olunur:

$$C4 = (Z1-3q) +1$$

Əgər q >3 olarsa, onda C4=(Z1-3q)+0,5q+1 kimi təyin olunur.

Biz artıq yuxarıda qeyd etmişdik ki, konsentrik dolaqlarda sarğac qrupunun hər bir sarğacı müxtəlif addımlarla hazırlanır, məsələn, q = 3 ilə, y_1 qismən kiçik sarğacının ilk addımı, y_2 orta sarğacının birinciyə nisbətən qismən orta addımı, y_3 müvafiq olaraq daha qismən böyük addımın sarğacı hesab olunur. Deməli, ilk birinci addım - eyni fazaya məxsus növbəti sargac arasındakı məsafədir (şəkil 1).

Hesablanmış dolaq addımı yort, ilə ifadə olunur və dolaq addımını təyin edən dolaq əmsalının qiyməti aşağıdakı düsturla hesablanır [1,2, 3, 5]:

$$y_{ort} = \frac{y1+y2+\cdots+yn}{n} \quad (3)$$

və yaxud

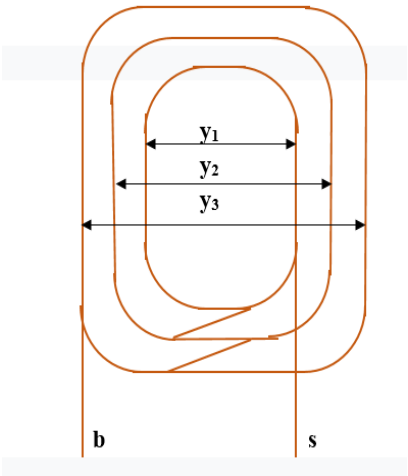
$$y_{ort} = \frac{Z_1}{2p} \quad (4)$$

burada n - sarğac qrupundakı sarğacların sayıdır.

Məsələn: q = 3 üçün

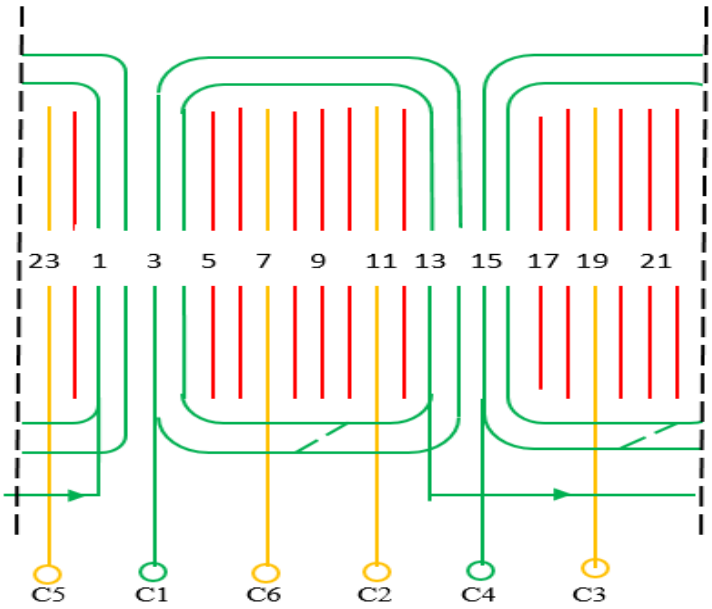
$$y_{ort} = \frac{y_1+y_2+y_3}{3} \quad (5)$$

kimi hesablanır.



Şəkil 1. *Konsentrik dolaqların sarğac qrupu*

Konsentrik dolaqların sarğac qrupları, q =3. Sarğac qrupundakı sarğac sayı 3-dən çox olduqda (q>3) birqatlı konsentrik dolaqların alın birləşmələrinin uzunluqunun azaldılması və mis sərfiyyatının azaldılması "parçalanmış" yerinə yetirilir, beləki, sarğac qrupu iki yarım qrupa bölünür, hansı ki, əks istiqamətlərdə yerləşdirilir (şəkil 2). Bu şəkildə fazaların "parçalanmış" bir qatlı konsentrik dolaqlarının yerləşdirilməsi verilmişdir. "N" fazasında sarğac qruplarının sayı qütblərin sayından və sarğac qrupundakı sarğacların sayından asılıdır. "q" üçün 3N = p aşağı və yaxud bərabər; q >3 üçün N = 2p olur.



Şəkil 2. *"Parçalanmış" bir qatlı konsentrik dolaqların A fazasının sxemi*

Sarğac nömrələrini müəyyənləşdirmək üçün dairə şəklində statorun görünüşünü çəkməklə və onu 2pm faza zonasına bölürük. Və paylama qanunu ilə faza zonasında faza dolaqlarının bölgüsünü qururuq, onda faza zonasına görə fazanın paylanmasını qəbul edirik - A, C. B, A. C, B, ... və s.

$$Z1=24,\ 2p=4,\ a=1,\ q=4$$

Hər bir faza zonası "q" üçün, 3 - ə bərabər və yaxud az bir sarğac qrupu tərəfindən doldurulur. Əgər "q" 4 - dən az və ya ona bərabər olarsa, onda dolaqlar "parçalanmış" şəkildə hazırlanır, bu halda hər bir faza zonası ikili sarğac qrupu ilə doldurulur.

Fazanın faza zonasına görə paylaşdırdıqdan sonra hansı faza zonasında fazanın başlanğıcının yerləşdiyini təyin edək. Birinci faza zonasından birinci faza başlayır. İkinci faza – iki faza zonasından sonra (üçüncüdə). Üçüncü fazanın başlanğıcı dördüncü faza zonasından sonra yerləşir (beşinci faza zonasında). Sarğac qrupunun nömrələnməsi adətən saat əqrəbi istiqamətində birinci sarğac qrupundan qəbul edilir - 1,2,3,4 və s. Belə olan halda fazaya görə sarğac qruplarının nömrəsini başqa bir formada paylaşdırmaq olar (cədvəl).

Sarğac qrupları q- sarğacdan ibarət olur, mütləq fazaya elə birləşməlidir ki, lazım olan qütblər sayını və onların bir birinin əvəz etməsini təmin etsin və yaxud, əgər $q > 3$, sarğac qruplarının fazada birləşməyi qarşı- qarşıya (sonu son ilə, başlanğıcı başlanğıc ilə). Əgər q 3 – bərabər və yaxud az olarsa, onda sarğaslar qrupunun fazada (sonu başlanğıc ilə) birləşdirmək olar.

Qeyd. Sarğac qruplarının sayı onların yuvada yerləşdirilmə sırası ilə göstərilib.

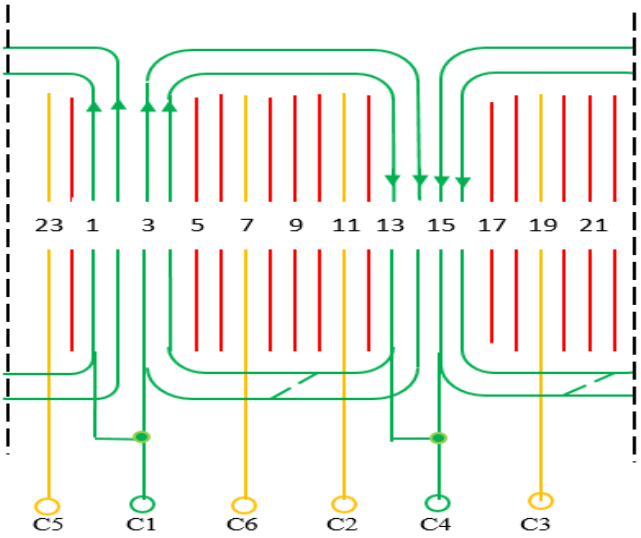
Qoyuluş gücü böyük olan mühərriklərə görə hansı ki, hazırlanan dolaq naqilinin n kəsiyinin azaldılması üçün sarğac qrupları bir neçə paralel budaqlarda birləşir (şəkil 3, 4). Paralel budaqların "a" sayı qoyulmuş tələbə görə təyin olunması mümkündür, hansı ki, 2p/a münasibətində tam ədədlə ifadə alınmalıdır [1, 4].

Üç fazalı birqatlı dolaqların sarğac qrupunun nömrələrinin paylanması (cədvəl).

Cədvəl

Qütblər sayı	***Fazaya görə sarğac qrupunun nömrəsi***	***Qeyd***
1	***2***	
2p=2, (q>3, parçalanmış)	*A - 1, 4; B - 3, 6; C - 5, 2*	
2p=4, (q>3, parçalanmış)	*A -1, 4, 7, 10; B - 3, 6, 9, 12; C - 5, 8, 11, 2*	
2p=4, (q≤3)	*A - 1, 4; B - 3, 6; C - 5, 2* *və ya* *A - 1, 4; C - 3, 6; B - 5, 2*	
2p=6, (q≤3)	*A - 1, 4, 7; B - 3, 6, 9; C - 5, 8, 2* *və ya* *A - 1, 4, 7; C - 3, 6, 9; B - 5, 8, 2*	
2p=8, (q≤3)	*A - 1, 4, 7, 10; B - 3, 6, 9, 12; C - 5, 8, 11, 2* *və ya* *A - 1, 4, 7, 10; C - 3, 6, 9, 12; B - 5, 8, 11, 2*	

Məsələn: 2p=2, a=1,2; 2p=4, a= 1,2,4; 2p = 6, a=1,3; 2p=8, a= 1,2,4; 2p = 12, a= 1,2,3,4,6 və s. və yaxud sarğac qruplarının (çinləşdirilməsi) yerləşdirilməsi sırası ilə.



Şəkil 3. *"Parçalanmış " birqatlı konsentrik dolaqların A fazasının sxemi*

Z1 = 24, 2p=2, a=2, q= 4

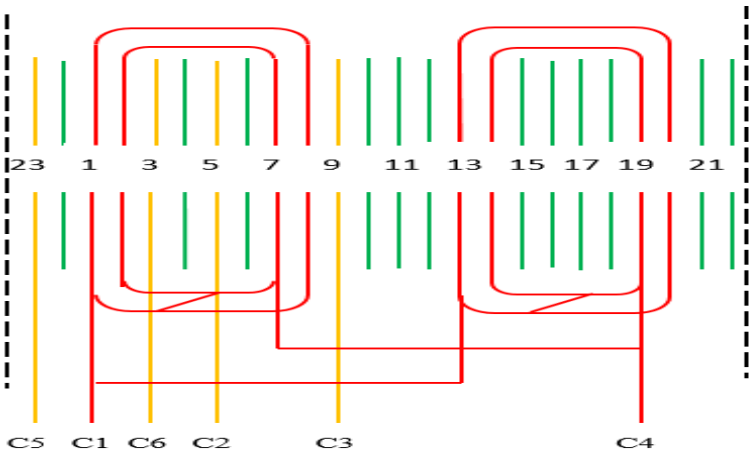
Nümunə üçün 24 yuvada dolaqların yerləşdirilməsi iki üsulla ilə təklif olunur:
- qütblər sayı 2p=4
- və paralel budaqların sayı a=1.

Nümunə:

1. Yuvaların sayını qütb və fazaya görə təyin edirik (sarqac qrupundakı sarğaclar sayı):

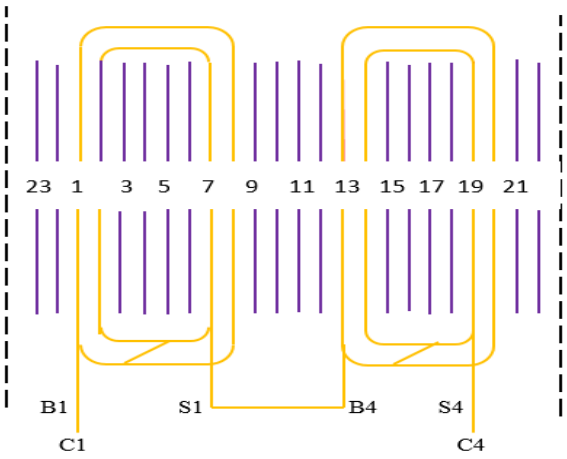
$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2$$

2. Stator dolaqlarını faza sahəsinə görə ayıraraq, "q" yuvalarında yerləşən A, B, C fazalarını qeyd edirik. Texniki ədəbiyyatlarda dolaqların açılmış sxemini iki və üç müstəvidə təsvir edilir. Açılmış sxemlərin sayılması asan olması üçün bir müstəvidə təsvir edilir (şəkil 2, 3, 4, 5, 6, 7 və s.).

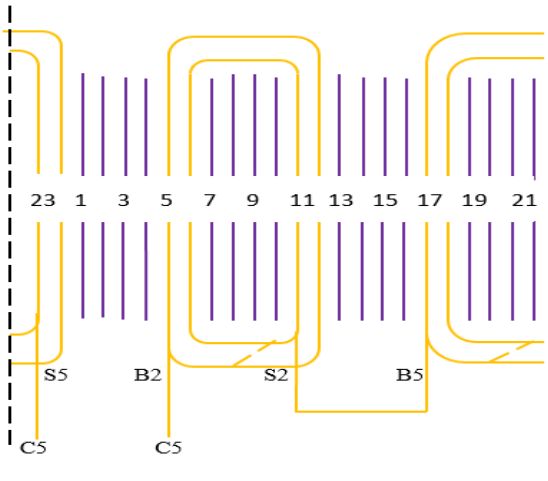


Şəkil 4. *Birqatlı konsentrik dolaqların " A" fazasının sxemi*

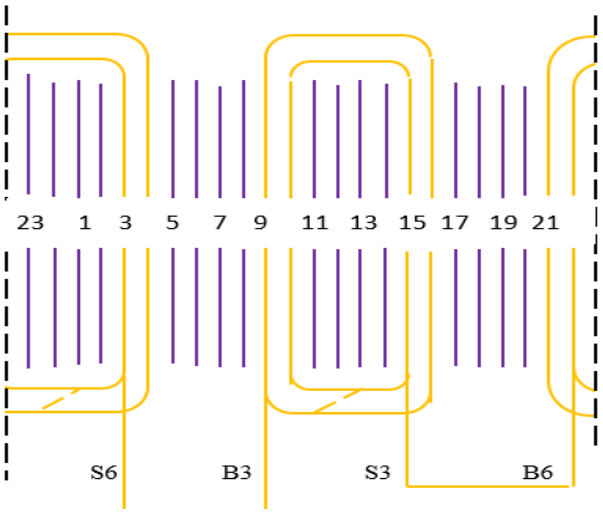
Z1= 24, 2p=4, a=2, q=4



Şəkil 5. *"A" fazasının sxemi*



Şəkil 6*. "B" fazasının sxemi*



Şəkil 7. *"C" fazasının sxemi*

Nəticə. 1. Araşdırmalar nəticəsində yüngül sənaye, metallurgiya sənayesi, kimya müəssisələri, neft sənayesində və s. istifadə olunan müasir elektrik intiqal mühərriklərinin istismarında əsaslı təmir zamanı dolaqlarının qütblərə və fazalara görə birləşmə sxeminin düzgün birləşdirilməsi və təyin edilməsi yolu ilə onların yüksək etibarlılıq və f.i.ə.-na malik olmasına nail olunur. 2. Verilmiş məlumatlar sənaye müəssisələrində elektrik intiqal mühərriklərinin istismarında əsaslı təmiri zamanı və ali məktəb tələbələri üçün "Elektrik intiqallarının istismarı, təmiri və sazlanması", həmçinin "Elektrik maşınlarının etibarlılığı və sınağı", "Elektrik intiqallarının diaqnostikası" fənlərinin mənimsənilməsində etibarlı mənbə hesab oluna bilər.

Qoyulmuş məsələdə aparılan nəzəri tədqiqatların düzgünlüyü praktiki yolla müəyyənləşdirilmişdir. Dəyişən cərəyan elektrik maşınlarına qoyulan tələbatlar təyin edilərək verilmiş sxem və nəzəri məlumatlar elektrik maşınlarının istismarı və təmiri bazasında realizasiyaları həyata keçirilmişdir.

Ədəbiyyat

1. Александр Еремеев. Обмотки электрических машин; Издательство · Государственное энергетическое издательство; Место издания -Москва, Ленинград; -2008; - с. 481.
2. Balayeva Ə.H. "Dolaqları yanmış və texniki göstəriciləri məlim olmayan asinxron mühərrikinin sarğılarının və texniki göstəricilərinin bərpası", Azərbaycan Dillər Universiteti, Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XVIII Respublika Elmi Konfransı.- Bakı, -2013
3. Məmmədov F.İ., Balayeva Ə.H. "Elektrik mühərriklərinin dolağlarına texniki nəzarət, dolaqlarda zədə yerlərinin təyin olunma üsulları". - Sumqayıt Dövlət Universiteti, Elmi xəbərlər,- Cild №1, -2015
4. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов- Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов. Под редакцией Иванова - Смоленского А.В.-Москва: - Энергоатомиздат, - 2004, - 245 с.
5. Аникеенко В.М., Петросова А.В., Пионов А.П. «Обмоточные провода»- Электроника, учебники, Москва
6. Кацман М.М. Электрические машины. Справочник (спо) / М.М. Кацман. -М.: - КноРус, - 2015, - с. 288.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Lazımov T.M.

UOT 629.12.066

ALTERNATİV ENERJİ MƏNBƏLƏRİNDƏN İSTİFADƏ ETMƏKLƏ GƏMİ ELEKTRİK STANSİYASININ ENERJİ BALANSININ TƏNZİMLƏNMƏSİ ÜSULLARI

Əlicanov R.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: ralicanov@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə, müasir gəmiçiliyin üzləşdiyi ciddi ekoloji tələblər və artan nəqliyyat xərcləri fonunda gəmi elektrik stansiyalarının enerji balansının optimallaşdırılması məsələsi, həmçinin ənənəvi dizel-generator aqreqatlarının iş rejimləri və yüksək yanacaq sərfiyyatı kimi məhdudiyyətlər analiz edilir. Məqalədə həmçinin ağıllı güc idarəetmə sistemi (Smart Power Management System) vasitəsilə enerji balansını dinamik şəkildə tənzimləyən müasir üsullar, yəni artıq yüklənmənin azaldılması və generatorların optimal idarə edilməsi məsələlərindən də bəhs olunur.*

Abstract. *The article analyzes the issue of optimizing the energy balance of ship power plants against the backdrop of serious environmental requirements and increasing transportation costs faced by modern shipping, as well as the limitations of traditional diesel-generator units, such as inefficient operation and high fuel consumption. The article also discusses modern methods for dynamically regulating the energy balance through Smart Power Management Systems, i.e., reducing overload and optimal control of generators.*

Аннотация. *В статье анализируется проблема оптимизации энергетического баланса судовых энергетических установок на фоне высоких экологических требований и растущих транспортных расходов, характерных для современного судоходства, а также*

ограничений традиционных дизель-генераторных установок, таких как неэффективность и высокий расход топлива. Также рассматриваются современные методы динамического регулирования энергетического баланса с помощью интеллектуальных систем управления электропитанием (Smart Power Management Systems), направленные на снижение перегрузок и оптимальное управление генераторами.

Açar sözlər: *gəmi elektrik stansiyası, enerji balansı, hibrid sistemlər, enerji saxlama sistemi, ağıllı güc idarəetmə sistemi, artıq yüklənmə, yanacaq səmərəliliyi*

Key words: *ship power plant, energy balance, hybrid systems, energy storage system, intelligent power management system, overload, fuel efficiency*

Ключевые слова: *судовая энергетическая установка, энергетический баланс, гибридные системы, система накопления энергии, интеллектуальная система управления электропитанием (PMS), перегрузка, топливная эффективность*

Giriş. Tərkibində müxtəlif növ elektirik avadanlığı olan gəmi elektroenergetika sistemlərinin (GEES) vəzifəsi elektrik enerjisini hasil edib paylamaqdan ibarətdir. Bura, həmçinin, elektrik enerjisi çeviriciləri, o cümlədən transformatorlar da daxildir. Gəmi qurğularının əksəriyyətinin işləməsi üçün elektrik enerjisindən istifadə olunur. Buna əsas səbəb elektrik enerjisinin məsafəyə ötrülməsinin asan başa gəlməsi, elektrotexniki qurğuların yüksək iqtisadi göstəriciləri və elektrikləşmiş mexanizmlərin idarəsində böyük imkanların yaranmasıdır [1].

Gəmi elektroenergetika sistemi (GEES) gəminin energetik qurğusunun tərkibinə daxildir və üzmə sistemi, ümumi gəmi sistemi, idarə, nəzarət və mühafizə sistemləri ilə funksional əlaqədədir. Gəminin iş qabiliyyəti, təhlükəsizliyi və iqtisadi göstəriciləri GEES-in etibarlığından asılıdır.

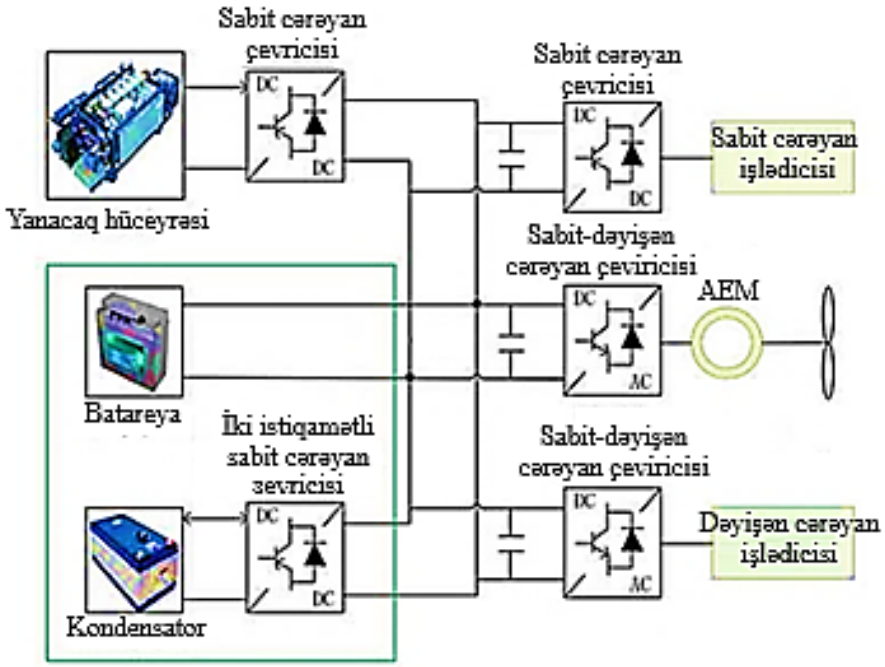
Müasir gəmilərdə elektroenergetika sisteminin əhəmiyyəti baş energetik qurğunun əhəmiyyəti səviyyəsinə qalxmışdır və bəzi hallarda onu keçmişdir. Məsələn, böyük su tutumuna malik olan refrejerator gəmilərində GEES gəminin təhlükəsiz üzməsi, energetik qurğuların işi, gəminin yüklənməsi, yükün boşaldılması, onun körpüyə yanalmasını təmin etməklə yanaşı, onun yükünün korlanmamasını da təmin edir. Qeyd etmək lazımdır ki, GEES-in gücü və mürəkkəblik dərəcəsinin yüksəlməsilə yanaşı, onun avtomatlaşma dərəcəsi də artmışdır.

Gəmi elektrik stansiyalarının avtomatlaşdırma dərəcələrinin artması ilə yanaşı onların mənfi cəhətləri də meydana gəlmişdir. Belə ki, qlobal ticarətin onurğa sütununu təşkil edən dəniz nəqliyyatı, eyni zamanda atmosferə atılan zərərli tullantıların əhəmiyyətli bir mənbəyidir. Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı (BDT) kimi qurumların gəmilərin enerji səmərəliliyi (EEXI) və karbon intensivliyi (CII) ilə bağlı tələbləri getdikcə sərtləşdirməsi, gəmiçilik sənayesini innovativ həllər axtarmağa məcbur edir. Yanacaq qiymətlərinin qeyri-sabitliyi və artımı isə əməliyyat xərclərinin azaldılmasını zəruri edir.

Ənənəvi gəmi elektrik stansiyaları adətən bir neçə dizel-generatordan ibarət olur. Gəminin enerji tələbatı isə onun əməliyyat rejimindən (limanda dayanma, manevr, açıq dənizdə hərəkət) asılı olaraq geniş diapazonda dəyişir. Yükün dəyişməsi səbəbindən generatorlar tez-tez aşağı və qeyri-optimal yüklənmə rejimində işləyir ki, bu da yanacaq səmərəliliyini kəskin şəkildə azaldır və avadanlıqların köhnəlməsini sürətləndirir. Bundan əlavə, sistemin etibarlılığını təmin etmək üçün adətən bir generator yüksüz işləyir ki, bu da əlavə yanacaq sərfinə və emissiyalara səbəb olur.

Məqalədə məqsəd alternativ enerji mənbələrini və müasir enerji saxlama sistemlərini gəminin ümumi elektrik şəbəkəsinə inteqrasiya edərək enerji balansını ağıllı alqoritmlər vasitəsilə tənzimləyən müasir üsulları sistemli şəkildə analiz etmək və onların texniki-iqtisadi üstünlüklərini göstərməkdir [1,2].

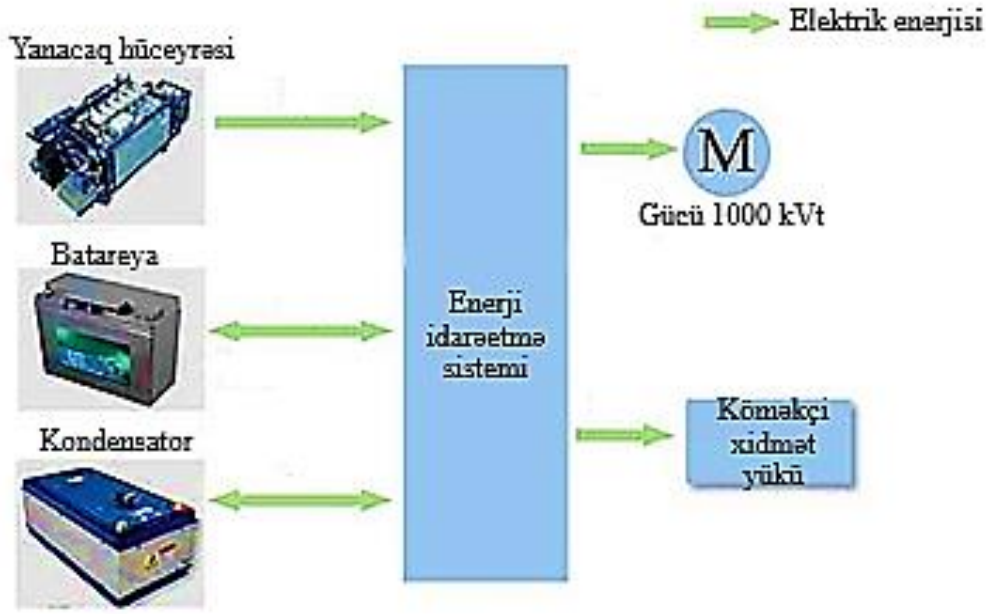
Əsas hissə. Hibrid gəmi elektrik stansiyası, bir neçə fərqli enerji mənbəyini və sistemini vahid bir şəbəkədə birləşdirir.



Şəkil 1. *Hibrid enerji saxlama sisteminin funksional sxemi*

Günəş enerjisi. Gəmilərin geniş göyərtə sahələri günəş panellərinin quraşdırılması üçün əlverişli şərait yaradır. Günəş enerjisi, əsasən, gəminin köməkçi sistemlərinin (işıqlandırma, ventilyasiya, naviqasiya cihazları, məişət avadanlıqları) enerji tələbatını ödəmək üçün istifadə olunur. Bu, əsas generatorların yükünü qismən azaldaraq yanacağa qənaət etməyə imkan verir.

Lakin bu mənbənin əsas çatışmazlığı, enerji istehsalının hava şəraitindən və günün vaxtından asılı olaraq fasiləli olmasıdır.

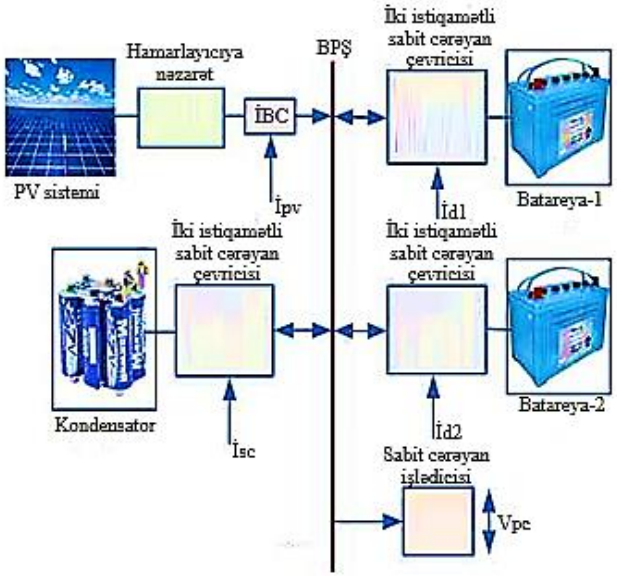


Şəkil 2. *Təkmilləşdirilmiş hibrid sisteminin elektrik enerjisi balansının struktur sxemi*

Külək enerjisi. Tarixən yelkənlərlə hərəkət edən gəmilər ideyası müasir texnologiyalarla yenidən canlanır. Flettner rotorları (dönən silindrik yelkənlər) və ya sərt qanadlı yelkənlər kimi sistemlər külək enerjisindən istifadə edərək gəmiyə əlavə hərəkət gücü verir. Bu birbaşa olaraq, əsas mühərrikin yükünü, dolayısı ilə ümumi yanacaq sərfiyyatını və generatorların istehsal etməli olduğu enerjini azaldır. Bu sistemlərin səmərəliliyi də küləyin sürətindən və istiqamətindən birbaşa asılıdır.

Enerji saxlama sistemləri. Enerji saxlama sistemləri (EES), xüsusilə də litium-ion batareya blokları, hibrid sistemlərdə enerji balansının tənzimlənməsi üçün ən kritik və çevik hissədir. Onların rolu sadəcə enerji saxlamaqla məhdudlaşmır:

- **Artıq enerjinin depolanması:** Generatorlar optimal rejimdə işləyərkən və ya günəş/küləkdən əldə edilən istifadə olunmayan artıq enerjini saxlayır.
- **Artıq yüklənmənin qarşısının alınması:** Köməkçi sükan qurğuları (thruster), kranlar və ya digər güclü avadanlıqlar qısa müddətə işə düşdükdə yaranan kəskin enerji tələbatını batareyalar ödəyir. Bu, əlavə generatorun işə salınmasının qarşısını alır.
- **"Fırlanan Ehtiyat"ın əvəzlənməsi:** Batareyalar ani olaraq yüksək güc təmin edə bildiyi üçün, ehtiyat generatoru işlək vəziyyətdə saxlamaq ehtiyacını aradan qaldırır.
- **Sıfır emissiyalı əməliyyat:** Limanlarda və ya ekoloji cəhətdən həssas zonalarda gəminin mühərrikləri söndürülərək tamamilə səssiz və təmiz enerji ilə hərəkət etməsini təmin edir.



Şəkil 3. *Enerji saxlama sisteminin idarəetmə sxemi*

Alternativ mənbələrin və ESS-in səmərəli işləməsi üçün onların fəaliyyətini sinxronlaşdıran və idarə edən mərkəzi bir "beyin"–**ağıllı güc idarəetmə sistemi** tələb olunur. Güc idarəetmə sistemi real vaxt rejimində şəbəkədəki yükü, generatorların vəziyyətini, batareyanın doluluq səviyyəsini və alternativ mənbələrdən daxil olan enerjini analiz edərək aşağıdakı tənzimləmə üsullarını tətbiq edir [3,4]:

1. **Artıq yüklənmənin azaldılması) alqoritmi.** Gücləndirmə sistemi, gəmi şəbəkəsindəki güc tələbatını davamlı olaraq izləyir. Yükdə qısa müddətli və kəskin bir artım aşkar etdikdə, sistem yeni bir generatoru işə salmaq əvəzinə, tələb olunan əlavə gücü dərhal batareya sistemindən (ESS) şəbəkəyə ötürür. Yük normallaşdıqdan sonra batareya yenidən generatorlardan və ya alternativ mənbələrdən qidalanaraq doldurulur. Bu alqoritm generatorların sabit və optimal yük rejimində (adətən 75-85% gücdə) işləməsinə imkan yaradır.

2. **Yükün hamarlaşdırılması.** Günəş və külək enerjisi kimi fasiləli mənbələrdən gələn enerji axını qeyri-sabitdir. Gücləndirmə sistemi, bu dəyişkənliyi kompensasiya etmək üçün batareyalardan bufer kimi istifadə edir. Məsələn, günəş panellərinin üzərindən bulud keçdikdə yaranan enerji azalmasını batareya dərhal kompensasiya edir. Əksinə, günəşli havada tələbatdan artıq enerji istehsal olunduqda, bu enerji batareyalarda saxlanılır. Bu proses şəbəkədəki gərginlik və tezliyin stabilliyini təmin edir.
3. **Optimal generator idarəetməsi.** Gücləndirmə sistemi, gəminin ümumi enerji tələbatını, batareyanın doluluq səviyyəsini və alternativ mənbələrdən gələn gücü nəzərə alaraq, hər an üçün ən optimal sayda və formada generatorun işləməsi barədə qərar verir. Məqsəd, minimum sayda generatoru ən yüksək səmərəlilik nöqtəsində işlətməkdir. Tələbat azaldıqda, gücləndirmə sistemi artıq generatorları avtomatik olaraq söndürür və bununla da yanacağa əhəmiyyətli dərəcədə qənaət edir.
4. **Blackout-un qarşısının alınması və təhlükəsizliyin artırılması.** Ənənəvi sistemlərdə işləyən generatorlardan birində nasazlıq yaranarsa, bu, bütün gəmi şəbəkəsinin çökməsinə (blackout) səbəb ola bilər. Hibrid sistemlərdə isə batareya bloku fasiləsiz güc mənbəyi (UPS) funksiyasını yerinə yetirir. Generator sıradan çıxdığı anda, ESS şəbəkəni dərhal öz üzərinə götürərək naviqasiya, idarəetmə və təhlükəsizlik kimi kritik sistemlərin fasiləsiz işini təmin edir. Bu, heyətə problemi aradan qaldırmaq və ya ehtiyat generatoru işə salmaq üçün həyati əhəmiyyətli vaxt qazandırır [4,5,6].

Nəticə. Aparılmış araşdırmalardan məlum olmuşdur ki, gəmi elektrik stansiyasına alternativ enerji mənbələrinin və xüsusilə enerji saxlama sistemlərinin inteqrasiyası, enerji balansının tənzimlənməsi üçün sadəcə bir alternativ deyil, müasir gəmiçiliyin gələcəyi üçün zəruri bir addımdır. Həmçinin araşdırmalar göstərir ki, ağıllı güc idarəetmə sistemləri vasitəsilə tətbiq olunan dinamik tənzimləmə üsulları iqtisadi səmərə, ekoloji fayda, texniki etibarlılıq və əməliyyat təhlükəsizliyi kimi fundamental üstünlüklər yaradır. Nəticə olaraq məqalədə günəş, külək kimi alternativ enerji mənbələrinin və xüsusilə enerji saxlama sistemlərinin (ESS) gəmi elektrik şəbəkəsinə inteqrasiyası təklif olunur.

Ədəbiyyat

1. International Maritime Organization (IMO). "Amendments to the MARPOL Convention: EEXI and CII regulations." 2021-88 səh
2. Hansen, J. F., & Wendt, F. "Hybrid Power and Propulsion Systems for Ships." DNV GL Technical Report. 2015-24 səh
3. Sultanov E.F., Cəlilov T.A. Müasir gəmi elektrik stansiyaları və şəbəkələri, dərslik, ADDA, Bakı, 2018-330 səh.
4. Sultanov E.F., Məmmədov E.M., Əlicanov R.R. Hibrid texnologiyalardan istifadə etməklə gəmilərdə enerji səmərəliliyinin artırılması. "Elm və təhsilin əsasları" XIII Beynəlxalq elmi konfrans. Bakı 2025, səh. 236-240
5. Sultanov E.F., İsmayılov S.S. "Gəmilərdə alternativ enerji mənbələrindən istifadə imkanlarının araşdırılması"/ ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2021, səh. 151-157
6. Sultanov E.F., İsmayılov S.S., R.R. Əlicanov. Günəş panelləri və onların gəmilərdə tətbiqinin araşdırılması. ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2023, səh. 130-138.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Lazımov T.M.

UOT 621.43

ÜSTƏLİK ÜFÜRMƏ TƏZYİQİNİN VƏ MAŞIN ŞÖBƏSİNDƏKİ TEMPERATURUN DİZELİN İŞÇİ TSİKLİNİN HESABINDA NƏZƏRƏ ALINMASI

İsmayılov A.Ş., Məmmədov R.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: akif.ismayilov@asco.az, rauf-mammadov.85@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə dizel mühərrikinin işçi tsiklinin hesablama metodikasına üstəlik üfürmə təzyiqinin və gəminin maşın şöbəsindəki temperaturun dəyişməsinin də nəzərə alınması üçün müəyyən əlavələrin edilməsi haqqında təkliflər verilmişdir. Bu əlavələrin köməyi ilə üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindədi temperaturun dəyişməsindən asılı olaraq resiverdəki təzyiq və temperaturun da real şəraitdəki qiymətlərini təyin etmək mümkün olacaqdır. Bu isə, öz növbəsində, riyazi eksperimentlər vasitəsi ilə mühərrikin əsas göstəricilərinin necə dəyişməsini təhlil edərək mühərrikin mexaniki və istilik gərginliklərinin buraxılabilən hədlərdə saxlanması şərti daxilində, üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindəki temperaturun ən rasional qiymətlərini təyin etməyə imkan verəcəkdir.*

Abstract. *The article proposes additions to the methodology for calculating the working cycle of a diesel engine in order to take into account changes in boost pressure and temperature in the engine room of a vessel. With these additions, it will be possible to determine the pressures and temperatures in the receiver when the boost pressure and temperature in the engine room change in real conditions. This, in turn, will allow, using mathematical experiments, to determine rational values for boost pressure and temperature in the engine room, which will allow the engine's mechanical and thermal loads to be kept within acceptable limits.*

Аннотация. *В статье предложены дополнения в методику расчета рабочего цикла дизельного двигателя с целью учета изменения давления наддува и температуры в машинном отделении судна. С помощью этих дополнений будет возможно определить давления и температуры в ресивере при изменении давления наддува и температуры в машинном отделении в реальных условиях. А это, в свою очередь, позволит с помощью математических экспериментов определить рациональные значения давления наддува и температуры в машинном отделении, позволяющие сохранить механические и тепловые нагрузки двигателя в допустимых пределах.*

Açar sözlər: *üstəlik üfürmə təzyiqi, kompressor, maşın şöbəsindəki temperatur, dizel mühərriki, nominal iş rejimi, istilikdən istifadə olunma əmsalı, rasional qiymət, tsikllik yanacaq verilişi, hava artıqlıq əmsalı, işçi tsikl*

Key words: *boost pressure, engine room temperature, diesel engine, nominal operating mode, heat utilization factor, rational value, fuel cycle supply, excess air ratio, duty cycle*

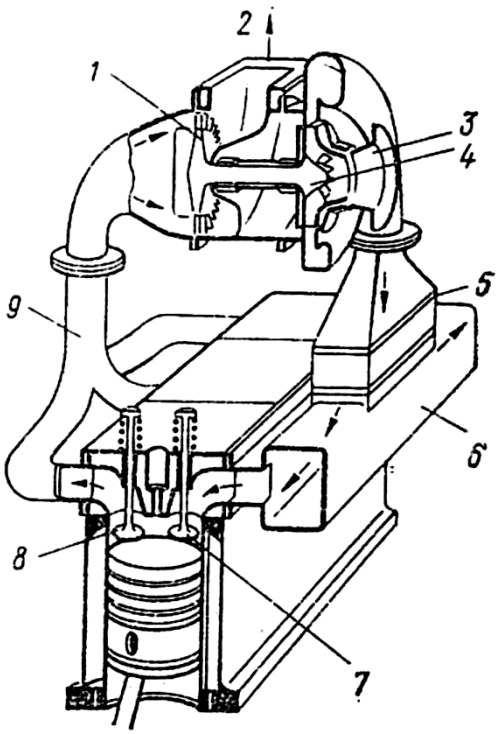
Ключевые слова: *давление наддува, температура в машинном отделении, дизельный двигатель, номинальный режим работы, коэффициент использования теплоты, рациональное значение, цикловая подача топлива, коэффициент избытка воздуха, рабочий цикл*

Giriş. "Azərbaycan Xəzər Dəniz Gəmiçiliyi" QSC-nin nəzdində olan gəmilərdə baş və köməkçi mühərriklər kimi dizellərdən istifadə olunur. Belə ki, gücün artırılması nöqteyi-nəzərindən dizel mühərrikləri daha geniş imkanlara malikdir və hələ yaxın illərdə enerji-güc mənbəyi kimi müxtəlf sahələrdə tətbiq olunacaqdır.

Baş gəmi dizellərinin, demək olar ki, hamısında, köməkçi dizellərin isə əksəriyyətində təmiz havanın silindrə verilməsi üçün üstəlik üfürmə sistemləri tətbiq edilir. Bu üsul mühərrikin energetik və iqtisadi göstəricilərinin yaxşılaşdırılması nöqteyi nəzərindən əsas üsullardan biri hesab olunur. Lakin, üstəlik üfürmə təzyiqinin və temperaturunun artması mühərrikin mexaniki və istilik gərginliklərinin də böyüməsinə səbəb olur. Bu isə mühərrikin ömrünün azalmasına və onun tez sıradan çıxmasına səbəb olur. Odur ki, üstəlik üfürmə təzyiqinin elə bir rasional qiyməti seçilməlidir ki, bu təzyiqdə mühərrikin mexaniki və istilik gərginlikləri, mümkün qədər, az olmaqla yanaşı, onun energetik və iqtisadi göstəriciləri də qənaətbəxş hədlərdə olsun.

Ona görə də, mühərrikdə üstəlik üfürmə təzyiqi dəyişdikdə mühərrikin göstəricilərinin necə dəyişməsini qabaqcadan proqnozlaşdırmaq çox vacibdir. Belə proqnozlaşdırma iki yolla mümkündür: birincisi, mühərrikin əsas göstəricilərinin motor sınaqları vasitəsi ilə təyin olunması, ikincisi, üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindədi temperaturun dəyişməsini də nəzərə ala biləcək hesablama metodikasından istifadə etməklə riyazi eksperimentlərin köməyilə. Birinci halda, xeyli material və vaxt itkilərinə yol verildiyindən, ikinci hal daha məqsədəuyğun hesab edilir. Belə ki, bu halda çox qısa bir müddətdə, heç bir material itkisinə yol vermədən, mühərrikin əsas göstəriciləri təyin olunur və üstəlik üfürmə təzyiqinin onun ən qənaətbəxş qiymətlərini təmin edə biləcək rasional qiyməti seçilir. Bu isə magistr dissertasiyasında baxılan məsələlərin aktual olduğunu göstərir.

Əsas hissə. Şəkildə dördtaktlı mühərrikin üstəlik üfürmə sxemi göstərilmişdir [1, səh.187]. Hava ətraf mühitdən hava qəbuledici borudan 3 keçərək kompressora 4 sorulur və burada sıxılaraq havasoyuducusuna 5, oradan da hava resiverinə 6 verilir. Resiverdən hava sorma klapanından 7 keçərək silindrə daxil olur.



Şəkil. *Dördtaktlı mühərrikin üstəlik üfürmə sxemi:*
1-qaz turbini; 2-xaric borusu; 3-hava qəbuledici boru; 4-kompressor; 5-havasoyuducusu; 6-hava resiveri; 7-sorma klapanı; 8-xaricetmə klapanı.

Kompressorun işçi çarxı qaz turbininin rotoru ilə ümumi bir val üzərində yerləşdiyindən qaz turbini 1 ilə hərəkətə gətirilir. Qaz turbininin özü isə mühərrikin xaric klapanından 8, xaric kollektorundan və borudan 9 keçərək daxil olan yanma məhsullarının enerjisi hesabına hərəkətə gətirilir. Yanma məhsulları xaric borusundan 2 ətraf mühitə verilir.

Üstəlik üfürməli mühərriklərdə hava kompressorda sıxıldıqdan sonra silindrə daxil olduğuna görə bu mühərriklər üçün ətraf mühit şəraiti kimi kompressordan sonrakı təzyiq (p_k) və temperatur (T_k) qəbul edilir. Qeyd etmək lazımdır ki, baş gəmi dizellərində kompressordan çıxan havasoyuducusunda soyudulduqdan sonra mühərrikin silindrinə verilir. Belə olduqda, ətraf mühit parametrləri kimi havasoyuducusundan sonra yerləşdirilən resiverdəki təzyiq və temperatur qəbul olunur.

Mühərrikin nominal iş rejimi üçün resiverdə olan havanın təzyiq və temperaturunun rasional qiymətləri, uyğun olaraq, p_s və T_s ilə, onların cari quymətləri isə p'_s və T'_s ilə işarə edilir.

Üstəlik üfürmə təzyiq və temperaturunun mühərrikin göstəricilərinə təsiri tədqiq edilərkən resiverdəki təzyiqin cari qiymətləri p'_s mühərrikin nominal iş rejimindəki rasional təzyiqdən p_s kiçik və böyük hədlərdə qəbul edilərək kompressordan sonrakı təzyiq və temperaturun cari qiymətləri (uyğun olaraq p'_k və T'_k) aşağıdakı kimi təyin edilir:

- kompressordan sonrakı təzyiqin cari qiyməti

$$p'_k = p'_s + p_{soy}\ ,\ MPa \tag{1}$$

burada p_{soy}=980 ÷ 2940 Pa – hava soyuducusunda təzyiq düşküsüdür.

- kompessordan sonrakı temperatur (T_k) isə aşağıdakı düsturla təyin edilir:

$$T'_к = T_0\left(\frac{p'_k}{p_0}\right)^{\frac{n_k-1}{n_k}},\ K \tag{2}$$

burada n_k - kompressorda havanın sıxılmasının politrop göstəricisi; p_o = 0,1 MPa - normal atmosfer təzyiqi; T_o =293 K - normal atmosfer təzyiqində havanın temperaturudur.

Üfürmə nasoslarının növündən və soyudulma dərəcəsindən asılı olaraq n_k aşağıdakı hədlərdə qəbul edilir:

1) porşenli üfürmə nasosları üçün - $n_к = 1{,}4 \div 1{,}6$;
2) həcmi üfürmə nasosları üçün - $n_к = 1{,}55 \div 1{,}75$;
3) oxboyu və mərkəzdənqaçma üfürmə nasosları üçün - $n_к = 1{,}4 \div 2{,}0$.

Resiverdəki havanın cari temperaturu:

$$T'_s = T'_k - E_x(T'_k - T_0), K \tag{3}$$

burada E_x - mühərrikin nominal iş rejimində havanın soyudulma dərəcəsidir:

$$E_x = \frac{T_k - T_s}{T_k - T_0}, \tag{4}$$

burada T_k - resiverdəki təzyiqin rasional qiymətində (P_s) kompressordan sonra havanın temperaturudur:

$$T_к = T_0\left(\frac{p_k}{p_0}\right)^{\frac{n_k-1}{n_k}},\ K \tag{5}$$

p_k - resiverdəki təzyiqin rasional qiymətində (p_s) kompressordan sonra havanın təzyiqdir:

$$p_k = p_s + p_{soy}, MPa \tag{6}$$

Mühərrikin nominal iş rejimində resiverdəki havanın sıxlığı:

$$\rho_s = \frac{p_s \cdot 10^6}{R_h T_s}, kq/m^3 \tag{7}$$

R_h - havanın xüsusi qaz sabitidir:

$$R_h = \frac{R}{\mu_h}, C/(kq \cdot dər)$$

burada $R = 8315$ *C/(kq·dər)* - universal qaz sabiti; $\mu_h = 28{,}96 \frac{\kappa q}{\kappa mol}$ - havanın mol çəkisidir.

Resiverdəki təzyiqin cari qiymətlərində (p'_s) resiverdəki havanın sıxlığı:

$$\rho'_s = \frac{p'_s \cdot 10^6}{R_h \cdot T'_s}, kq/m^3 \tag{8}$$

Resiverdəki təzyiqin cari qiymətlərində (p'_s) yanma nəticəsində ayrılan istilikdən istifadə olunma əmsalının cari qiymətləri (ξ'_z);

$$\xi'_z = \xi_{zopt} \rho'_s / \rho_s \,, \tag{9}$$

Bu ifadədən göründüyü kimi silindrə daxil olan hava miqdarının mühərrikin nominal iş reimindəki hava midarından çox olması yanma prosesinin yaxşılaşması nəticəsində istilikdən istifadə olunma əmsalının böyüməsinə, az olması isə, əksinə yanma prosesinin pisləşməsi, daha doğrusu, natamam yanmanın artması nəticəsində istilikdən istifadə olunma əmsalının da kiçilməsinə səbəb olacaqdır.

Silindirə daxil olan havanın sıxlığı:

$$\rho_s = \frac{p_s \cdot 10^6}{R_h T_s} \,, kq/m^3 \tag{10}$$

Resiverdəki havanın təzyiqinin dəyişməsi silindrə daxil olan havanın miqdarına da təsir göstərəcəkdir. Belə ki, bu təzyiqin nominal iş rejimindəki təzyiqə nəzərən böyüməsi silindrə daxil olan havanın miqdarının artmasına, azalması isə, əksinə, havanın miqdarının azalmasına səbəb olacaqdır. Odur ki, resiverdəki havanın cari təzyiqlərində bir tsikldə silindrə verilən havanın cari miqdarının aşağıdakı ifadə ilə təyin olunması təklif edilir:

$$G'_h = G_h \cdot p'_s / p_s, \;\; kq/tsikl \tag{11}$$

burada G_h - mühərrikin nominal iş rejimində bir tsikldə silindrə verilən havanın miqdarıdır (verilir).

Bu ifadədən göründüyü kimi, resiverdəki havanın cari təzyiqlərində bir tsikldə silindrə verilən havanın cari miqdarının artıb azalması p'_s/p nisbəti ilə nəzərə alınmışdır.

Resiverdəki havanın təzyiqinin dəyişməsi nəticəsində bir tsikldə silindrə verilən havanın miqdarı dəyişdiyinə görə bir tsikldə silindrə verilən yanacağın miqdarını da dəyişmək, yəni artırmaq, və yaxud azaltmaq olar. Bu halda, resiverdəki havanın cari təzyiqlərində mühərrikin tsikllik yanacaq verilişinin miqdarının dəyişməsini də p'_s/p_s nisbəti ilə nəzərə almaq olar:

$$g'_{ts} = g_{ts} . p'_s / p_s, \;\; kq/tsikl \tag{12}$$

burada g_{ts} - mühərrikin nominal iş rejimində silindrə verilən yanacağın tsikllik miqdarıdır:

$$g_{ts} = G_h/(30 \cdot n \cdot \alpha \cdot l_0 \cdot i), \;\; kq/tsikl \tag{13}$$

burada *n* - mühərrikin dövrlər sayı, *dəq* $^{-1}$; α - mühərrikin nominal iş rejimində hava artıqlıq əmsalı; l_0 - *1 kq* yanacağın tam yanması üçün tələb olunan havanın çəki ilə nəzəri miqdarıdır, *kq/kq*; *i* - mühərrikin silindrlərinin sayıdır.

Aydındır ki, resiverdəki havanın təzyiqinin dəyişməsi mühərrikin hava artıqlıq əmsalının da dəyişməsinə səbəb olacaqdır. Belə ki, resiverdəki havanın təzyiqinin artması nəticəsində silindrə daxil olan havanın sıxlığı və silindrə verilən havanın miqdarı artır ki, bu da öz növbəsində, hava artıqlıq əmsalını da artırır. Odur ki, resiverdəki havanın cari təzyiqlərində mühərrikin hava artıqlıq əmsalını da aşağıdakı ifadə ilə təyin etmək təklif edilir:

$$\alpha^{'} = \alpha \cdot \rho_s'/\rho_s \,, \tag{14}$$

Bu ifadədən göründüyü kimi, ρ_s'/ρ_s nisbətinin böyüməsi hava artıqlıq əmsalının da böyüməsinə, kiçilməsi isə onun azalmasına səbəb olacaqdır.

(3) və (5) ifadələrindən görünür ki, üstəlik üfürməli mühərriklərdə üstəlik üfürmə təzyiqinin qəbul olunmuş qiymətində həm resiverdəki temperatur, həm də kompressordan sonrakı temperatur yalnız ətraf mühit temperaturundan asılıdır. Ətraf mühit temperaturunun artması kompressordan sonrakı temperaturun artmasına resiverdəki temperaturun artmasından daha çox təsir göstərir. Belə ki, (5) ifadəsindən göründüyü kimi ətraf mühit temperaturunun artması ilə kompressordan sonrakı temperatur, demək olar ki, ona düz mütənasib olaraq artır. Lakin (3) ifadəsinə görə ətraf mühit temperaturunun artması ilə kompressordan sonrakı temperatur (T_k') , eləcə də, $(T_k' - T_0)$ temperaturlar fərqi də artır ki, bu da son nəticədə resiverdəki temperatura (T_s') çox cüzi təsir edir.

Məlum olduğu kimi, gəminin maşın şöbəsində yay mövsümündə temperatur 35-40^0 *C*-yə kimi arta bilər. Bu halda kompressora daxil olan havanın sıxlığı azaldığından onun vurduğu havanın kütlə miqdarı da azalır. Bu isə, hava çatışmamazlığı səbəbindən yanma prosesində natamam yanmanın, eləcə də, mühərrikin xüsusi effektiv yanacaq sərfinin artmasına, gücünün azalmasına və mühərrikin tüstüləməsinə səbəb olacaqdır.

Yuxarıda göstərilənlər nəzərə alınaraq CAT 3608 markalı dizel mühərrikinin işçi tsiklinin hesablama metodikasının əsasında tərtib olunmuş riyazi model, alqoritm və Fortran alqoritmik dilində hazırlanmış proqram [2, səh.152-160] qeyd olunan mühərrikin əsas göstəricilərinin üstəlik üfürmə təzyiqindən və ətraf mühitin temperaturundan asılı olaraq təyin olunmasına imkan verir.

Nəticə. Tərtib olunmuş heasablama metodikasının köməyi ilə üstəlik üfürmə təzyiqindən və gəminin maşın şöbəsindəki temperaturdan asılı olaraq riyazi eksperimentlərin köməyi ilə CAT 3608 markalı dizel mühərrikin əsas göstəricilərinin dəyişməsinin təhlili nəticəsində qısa bir müddətdə, çox vaxt və material itkilərinə yol vermədən üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın zalındakı temperaturun rasional qiymətləri təyin edilə bilər.

Ədəbiyyat

1. A.Ş. İsmayılov, N.Ş.Talıbov. Gəmi daxili yanma mühərriklərinin konstruksiyası. Dərslik. Bakı, ADDA, 2019, 362 s.
2. A.Ş. İsmayılov. Gəmi daxili yanma mühərriklərinin nəzəriyyəsi. Dərslik. Bakı, ADDA, 2018, 370 s.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Qafarov A.M.

UOT 621.43

ÜSTƏLİK ÜFÜRMƏ TƏZYİQİNİN VƏ MAŞIN ŞÖBƏSİNDƏKİ TEMPERATURUN CAT 3608 MARKALİ BAŞ GƏMİ DİZELİNİN İŞİNƏ TƏSİRİNİN NƏZƏRİ TƏDQİQİ

İsmayılov A.Ş., Məmmədov R.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: akif.ismayilov@asco.az, rauf-mammadov.85@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə üstəlik üfürmə təzyiqinin və maşın şöbəsindəki temperaturun dəyişməsindən asılı olaraq ÇAT 3608 markali baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin dəyişməsinin nəzəri təhlilinin nəticələri verilmişdir. Bu zaman riyazi eksperimentlərin köməyi ilə aydınlaşdırılmışdır ki, üstəlik üfürmə təzyiqinin yüksəldilməsi mühərrikin qənaətliliyinin və effektiv göstəricilərinin yaxşılaşmasına səbəb olsa da, silindrdəki maksimum təzyiq də xeyli artır və dirsək-şatun mexanizmi hissələrində mexaniki gərginliklərin də artmasına səbəb olur. Bundan başqa, maşın şöbəsindəki temperaturun artması ilə mühərrikin effektiv göstəricilərinin pisləşir ki, bu da, əsasən, resiverə verilən havanın temperaturunun artması və mühərrikin doldurma əmsalının kiçilməsi ilə izah olunur. Bu baxımdan, üstəlik üfürmə təzyiqinin rasional qiymətinin 0,37 MPa qəbul olunması və, imkan dairəsində, maşın şöbəsindəki temperaturun 20^0 S hədlərində saxlanılması təklif olunur.*

Abstract. *The article presents the results of a theoretical analysis of changes in the main performance indicators of the CAT 3608 marine diesel engine depending on changes in boost pressure and temperature in the vessel's engine room. Mathematical experiments have shown that increasing boost pressure improves fuel economy and engine performance, but at the same time significantly increases the maximum cylinder pressure, as well as the mechanical loads on the engine crank mechanism components. In addition, with an increase in temperature in the engine room, the deterioration in the engine's effective performance is explained mainly by an increase in temperature in the receiver and a decrease in the engine filling factor. Based on this, it is recommended to take a rational value for the boost pressure of 0.37 MPa and, if possible, maintain the temperature in the engine room at around 20^0 C.*

Аннотация. *В статье излагаются результаты теоретического анализа изменения основных показателей главного судового дизеля марки CAT 3608 в зависимости от изменения давления наддува и температуры в машинном отделении судна. С помощью математических экспериментов установлено, что с увеличением давления наддува улучшается экономичность и эффективные показатели двигателя, но вместе с этим значительно увеличивается максимальное давление в цилиндре, а также механические нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма двигателя. Кроме того, с увеличением температуры в машинном отделении ухудшение эффективных показателей двигателя объясняется, в основном с увеличением температуры в ресивере и уменьшением коэффициента наполнения двигателя. Исходя из этого рекомендуется рациональное значение давление наддува принимать 0,37 МПа и, по возможности, сохранить температуры в машинном отделении около 20^0 C.*

Açar sözlər: *üstəlik üfürmə təzyiqi, maşın şöbəsindəki temperatur, baş gəmi dizeli, havasoyuducusu, resiver, mühərrikin qənaətliliyi, effektiv göstəricilər, energetik göstəricilər, xüsusi effektiv yanacaq sərfi, orta effektiv təzyiq, effektiv güc*

Key words: *boost pressure, engine room temperature, main marine diesel engine, air cooler, receiver, engine efficiency, performance indicators, energy indicators, specific effective fuel consumption, average effective pressure, effective power*

Ключевые слова: *давление наддува, температура в машинном отделении, главный судовой дизель, воздухоохладитель, ресивер, экономичность двигателя, эффективные показатели, энергетические показатели, удельный эффективный расход топлива, среднее эффективное давление, эффективная мощность*

Giriş. Daxili yanma mühərriklərində (DYM), xüsusilə də, üstəlik üfürməsiz ikitaktlı mühərriklərdə, silindrin yanmış qazlardan təmizlənməsi və onların təzə hava ilə doldurulması ən vacib məsələlərdən biridir. Bunun üçün mühərrikin silindrinin üfürülməsi və yanma məhsullarının silindrdən daha çox çıxarılması prosesi təşkil olunmalıdır. Belə ki, mühərrikin silindrinin yanmış qazlardan yaxşı təmizlənməməsi silindrlərə verilən təmiz havanın miqdarını azaldır və nəticədə yanma prosesinin keyfiyyəti pisləşir, mühərrikin gücü və yanacaq qənaətliliyi aşağı düşür. Mühərrikin silindrinin üfürülməsi üçün üfürmə nasoslarından istifadə olunur. Bu nasoslar adətən porşenli olub mühərrikin dirsəkli valından hərəkət alır. Onların köməyi ilə üfürücü havanın təzyiqini 0,13 *MPa*-ya qədər yüksəltmək olur və onların hərəkəti üçün mühərrikin gücünün bir hissəsi sərf olunur. Belə üfürmə sistemi çox effektli olmadığından həm ikitaktlı, həm də dördtaktlı dizel mühərriklərində qazturbokompressorlu üstəlik üfürmə sistemlərindən daha çox istifadə olunur. Qazturbokompressoru iki əsas hissədən ibarətdir: turbin hissəsi və kompressor hissəsi. Turbinin işçi çarxı mühərrikdən xaric edilən yanma məhsullarının enerjisi hesabına hərəkətə gətirilir. Daha doğrusu, yanma məhsullarının potensial enerjisı əvvəlcə işçi çarxın kinetik enerjisinə, sonra isə işçi çarxın kürəklərində bu kinetik enerji mexaniki enerjiyə, yəni rotorun fırlanma hərəkətinə çevrilir və rotorun üzərində yerləşdirilmiş kompressorun işçi çarxını da hərəkətə gətirir. Kompressorun şçi çarxının üzərində yerləşən kürəklər havanı qəbul edərək sıxır və təzyiq altında hava soyuducusuna ötürür. Soyudulan hava mühərrikin resiverinə, oradan da silindrə daxil olur. Havanın soyudulmasında məqsəd onun sıxlığının yüksəldilməsi nəticəsində silindrlərə verilən havanın kütlə miqdarını artırmaqdır. Üstəlik üfürmə nəticəsində silindrə verilən üfürücü havanın təzyiqini və miqdarını bir neçə dəfə artırmaq mümkündür. Bu isə öz növbəsində, silindrin yanmış qazlardan təmizlənməsini təmin etməklə yanaşı, həm də tsikllik yanacaq verilişini artırmağa və əlavə yanacaq dozasının yanması hesabına işçi cismə əlavə istilik verilməsinə, mühərrikin orta effektiv təzyiqinin, eləcə də effektiv gücünün artırılmasına imkan verir. Belə ki, üstəlik üfürməli mühərriklərdə orta effektiv təzyiq, eləcə də effektiv güc üstəlik üfürməsiz mühərriklərə nəzərən ikitaktlı mühərriklərdə 1,5-2,7 dəfə, dördtaktlı mühərriklərdə isə 2-4 dəfə artır [1, səh.184]. Bütün bunlarla yanaşı üstəlik üfürmə təzyiqini həddindən çox artırmaq da olmaz. Belə ki, bu zaman silindrdəki maksimum təzyiq də həddindən çox artar ki, bu da dirsək-şatun mexaniminin hissələrinə düşən mexaniki gərginliklərin də həddindən artıq yüksəlməsinə və onların tez sıradan çıxmasına səbəb olar. Odur ki, hər bir mühərrik üçün üstəlik üfürmə təzyiqinin ən rasional qiymətinin seçilməsi çox vacibdir. Bu isə dizel mühərrikinin işçi tsiklinin riyazi modeli əsasında tərtib olunmuş proqramın köməyi ilə komyuterlərdə riyazi eksperimentlərdən istifadə edərək daha tez reallaşdırıla bilər. Bu baxımdan baxılan məqalənin mövzusunu aktual hesab etmək olar.

Əsas hissə. CAT 3608 markalı dizel mühərriki "CASPİAN QALA" təchizat gəmisində baş mühərrik kimi istifadə olunur. Bu mühərrik 4-taktlı, üstəlik üfürməli və yüksəkdövrlüdür. Onun əsas texniki-iqtisadi göstəriciləri cədvəl 1-də göstərilmişdir.

Cədvəl 1

CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas texniki-iqtisadi göstəriciləri

Göstəricilər	**Qiyməti**
1. Mühərrikin nominal dövrlər sayı (n), *dəq.*$^{-1}$	1000
2. Mühərrikin nominal gücü (Ne), *kVt*	2495
3. Silindrin diametri (D), *mm*	280
4. Porşenin gedişi (S), *mm*	300
5. Silindrlərin sayı (i)	8
6. Mühərrikin sıxma dərəcəsi (ε)	13
7. Porşenin orta sürəti (v_{por}) *m/san.*	10
8. Üstəlik üfürmə təzyiqi (P_s), *MPa*	0,37
9. Mühərrikin orta effektiv təzyiqi (P_e), *MPa*	2,082
10. Mühərrikin xüsusi effektiv yanacaq sərfi (g_e), $\frac{q}{kVt \cdot saat}$	178

Mühərrikin əsas istismar rejimində dövrlər sayı n = 900 $dəq^{-1}$, gücü, N_e= 2300 kVt, orta effektiv təzyiqi P_e = 1,874 MPa, xüsusi effektiv yanacaq sərfi g_e = 160 $\frac{q}{kVt \cdot saat}$, resiverdəki təzyiq isə P_s = 0,3 MPa-ya bərabərdir.

Gəmidə Caterpillar zavodunun (ABŞ) istehsalı olan 2 ədəd "CAT 3608" markalı 4 taktlı, 8 silindrli və üstəlik üfürməli mühərriklərdən istifadə olunur. Bu mühərriklər reverssiz mühərriklər olub, addımı tənzimlənən vintlə (CPP və ya VRŞ) təchiz olunub.

CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin üstəlik üfürmə sistemində daxil olan hava və xaric olan qaz sistemlərinin elementləri yanmaya lazim olan təzə havanın miqdarını tənzimləyir. Belə ki, daxil olan təmiz hava sistemi (resiver) silindr blokunda yerləşir. Bu resiver hava soyuducusuna birləşərək, doldurma klapanı ilə birgə silindr başlığında yerləşir. Klapanlar sisteminin elementləri qazpaylayıcı val ilə hərəkətə gətirilir. Təmiz hava kompressorun işçi çarxı vasitəsi ilə sıxılaraq təzyiq altında hava soyuducusuna verilir. Havasoyuducusunda soyudulmuş və sıxılmış təmiz hava resiverə, oradan da mühərrikin iş qaydasına uyğun olaraq silindrlərə daxil olur. Silindrlərə təmiz havanın verilməsi, doldurma klapanları vasitəsi ilə həyata keçirilir. Hər bir silindrdə iki doldurma klapanı və iki xaricetmə klapanı mövcuddur.

Üstəlik üfürmə təzyiqi və resiverdəki təzyiqlər qiymətcə çox yaxın olduqlarından (fərq yalnız kompressordan sonrakı havasoyuducusunda olan çox kiçik, təxminən 0,001÷0,003 MPa hədlərində olan təzyiq düşküsünə bərabərdir) və gəmidə resiverdəki təzyiqin qeydiyyatı aparıldığından riyazi eksperimentlərdə resiverdəki təzyiqin 0,28÷0,4 MPa hədlərində dəyişməsinə baxılmışdır. Cədvəl 2-də resiverdəki təzyiqin 0,28÷0,34 MPa, cədvəl 3-də isə 0,36÷0,4 MPa hədlərində dəyişməsi zamanı CAT 3608 markali baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin dəyişməsi göstərilmişdir.

Bu cədvəllərdən göründüyü kimi, üstəlik üfürmə təzyiqinin 0,28 MPa-dan 0,40 MPa-ya qədər artırılması zamanı silindrdəki maksimum təzyiq 11,8 MPa-dan 16,32 MPa-ya qədər (38,3 %), temperatur 1850 K-dən 1868 K-nə qədər (0,5%), mühərrikin effektiv gücü 1924,2 kVt-dan 2752,2 kVt-a qədər (43,0%), mühərrikin orta effektiv təzyiqi isə 1,562 MPa-dan 2,235 MPa-ya qədər (43,1%) artmış, xüsusi effektiv yanacaq sərfi isə 184,7 $q/(kVt \cdot saat)$-dan 176,9 $q/(kVt \cdot saat)$-a qədər (4,2%) azalmışdır. Buradan aydın olur ki, üstəlik üfürmə təzyiqinin baxılan intervalda böyüdülməsi nəticəsində silindrdəki maksimum təzyiq əhəmiyyətli dərəcədə artır ki, bu da doldurma prosesinin sonundakı təzyiqin artması ilə izah olunur. Mühərrikin effektiv gücünün və orta effektiv təzyiqinin də xeyli artması tsikllik yanacaq verilişinin üstəlik üfürmə təzyiqinə mütənasib olaraq artırılması nəticəsində baş verir. Xüsusi effektiv yanacaq sərfinin azalması, yəni mühərrikin qənaətliliyinin az da olsa yaxşılaşması silindrə daxil havanın kütlə miqdarının artması hesabına yanma prosesinin müəyyən qədər yaxşılaşması ilə izah edilir.

Cədvəl 2

CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin resiverdəki təzyiqdən asılı olaraq dəyişməsi (*n=1000 dəq^{-1}; η_m=0,9; α=2,0; dizel yanacağı*)

Göstəricilər	**Resiverdəki təzyiq, *MPa***			
	0,28	**0,3**	**0,32**	**0,34**
1.Yanmanın maksimum təzyiqi *(p_z), MPa*	11,8	12,63	13,45	14,77
2.Yanmanın maksimum temperaturu *(T_z), K*	1850	1854	1857	1860
3.İndikator f.i.ə. *(η_i)*	0,507	0,5109	0,515	0,519
4.Doldurma əmsalı *(η_H)*	0,746	0,744	0,7415	0,739
5.Orta indikator təzyiqi *(p_i), MPa*	1,736	1,861	1,985	2,11
6.İndikator gücü *(N_i), kVt*	2138	2292	2445	2598
7.Xüsusi indikator yanacaq sərfi *(g_i),* $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	166,6	165,2	163,9	162,6
8.Orta effektiv təzyiq *(p_e), MPa*	1,562	1,675	1,787	1,899
9.Effektiv güc *(N_e), kVt*	1924,2	2062,8	2200,5	2338,2
10.Xüsusi effektiv yanacaq sərfi *(g_e),* $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	184,7	183,6	182,1	180,7
11.Effektiv f.i.ə. *(η_e)*	0,456	0,46	0,464	0,467

Cədvəl 3

CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin resiverdəki təzyiqdən asılı olaraq dəyişməsi (*n=1000 dəq^{-1}; η_m=0,9; α=2,0; dizel yanacağı*)

Göstəricilər	**Resiverdəki təzyiq, *MPa***			
	0,36	**0,37**	**0,38**	**0,4**
1. Yanmanın maksimum təzyiqi *(p_z), MPa*	15,1	**15,51**	15,92	16,32
2. Yanmanın maksimum temperaturu *(T_z), K*	1863	**1865**	1866	1868
3. İndikator f.i.ə. *(η_i)*	0,523	**0,525**	0,527	0,5303
4. Doldurma əmsalı *(η_H)*	0,738	**0,737**	0,736	0,734
5. Orta indikator təzyiqi *(p_i), MPa*	2,234	**2,3**	2,359	2,483
6. İndikator gücü *(N_i), kVt*	2751	**2828**	2905	3058
7. Xüsusi indikator yanacaq sərfi *(g_i),* $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	161,4	**160,1**	159,5	159,2
8. Orta effektiv təzyiq *(p_e), MPa*	2,011	**2,07**	2,123	2,235
9. Effektiv güc *(N_e), kVt*	2475,9	**2545,2**	2614,5	2752,2
10. Xüsusi effektiv yanacaq sərfi *(g_e),* $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	179,3	**177,9**	177,2	176,9
11. Effektiv f.i.ə. *(η_e)*	0,471	**0,473**	0,474	0,477

Beləliklə, buradan belə bir nəticəyə gəlmək olar ki, üstəlik üfürmə təzyiqinin yüksəldilməsi mühərrikin energetik göstəricələrinin (N_e və P_e) artmasına, xüsusi effektiv yanacaq sərfinin (g_e) isə azalmasına, yəni mühərrikin qənaətliliyinin yaxşılaşmasına səbəb olsa da, bu zaman silindrdəki maksimum təzyiq xeyli artır. Bu da, öz növbəsində, dirsək-şatun mexanizmi hissələrində mexaniki gərginlikləri də artırır. Bunun nəticəsində isə, dirsək-şatun mexanizmi hissələrinin möhkəmlik şərtlərinin sərtləşdirilməsi tələb olunur və mühərrikin motoresursu müəyyən qədər azalır.

Deməli, üstəlik üfürmə təzyiqinin artırılması mühərrikin dirsək-şatun mexanizmi elementlərinin mexaniki gərginliklərinin buraxıla bilən hədləri daxilində mümkündür. Bundan başqa, üstəlik üfürmə təzyiqinin yüksəldilməsi, yalnız mühərrikin effektiv gücünün artırılması baxımından məqsədəuyğundur. Baxılan hal üçün üstəlik üfürmə təzyiqinin rasional qiymətinin **0,37 *MPa*** qəbul olunması təklif olunur. Belə ki, bu zaman mühərrikin effekti gücü 2542,2 *kVt*, silindrdəki maksimum təzyiq 15,51 *MPa*, xüsusi effektiv yanacaq sərfi isə 160,1 $\frac{q}{kVt\cdot saat}$ olur ki,

bu da həm mühərrikin gücünün artması, həm mexaniki gərginliklərin çox yüksəlməməsi, həm də mühərrikin yanacaq qənaətliliyi baxımından məqsədəuyğun sayıla bilər.

Cədvəl 4

ÇAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin maşın şöbəsindəki temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi
($n=1000$ *dəq*$^{-1}$; $\eta_m=0,9$; $\alpha=2,0$; $p_s=0,37$ *MPa, dizel yanacağı*)

Göstəricilər	**Maşın şöbəsindəki temperatur, ^0C, (K)**			
	20 (293)	**25 (298)**	**30 (303)**	**35 (308)**
1. Resiverdəki temperatur (T_s), ^0C, (K)	**47 (320)**	53 (326)	58 (331)	64 (337)
2. Yanmanın maksimum təzyiqi (p_z), *MPa*	**15,56**	15,28	15,2	15,1
3. Yanmanın maksimum temperaturu (T_z), *K*	**1865**	1840	1835	1823
4. İndikator f.i.ə. (η_i)	**0,525**	0,5054	0,5029	0,5
5. Doldurma əmsalı (η_H)	**0,737**	0,729	0,721	0,714
6. Orta indikator təzyiqi (p_i), *MPa*	**2,3**	2,224	2,191	2,158
7. İndikator gücü (N_i), *kVt*	**2828**	2739	2658	2618
8. Xüsusi indikator yanacaq sərfi (g_i), $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	**160,1**	167,0	168,7	169,5
9. Orta effektiv təzyiq (p_e), *MPa*	**2,07**	2,0	1,972	1,942
10. Effektiv güc (N_e), *kVt*	**2545,2**	2465,1	2392,2	2356,2
11. Xüsusi effektiv yanacaq sərfi (g_e), $\frac{q}{kVt\cdot saat}$	**177,9**	185,6	186,4	187,4
12. Effektiv f.i.ə. (η_e)	**0,473**	0,455	0,453	0,45

Məlum olduğu kimi, üstəlik üfürməli gəmi dizel mühərriklərinin göstəricilərinə kompressordan sonrakı temperaturdan daha çox maşın şöbəsindəki temperatur təsir edir. Belə ki, kompressorun vurduğu havanın temperaturu artsa da havasoyuducundan keçərkən onun temperaturu müəyyən həddə qədər azaldığı halda, kompressora hava maşın şöbəsindən daxil olduğundan oradakı temperatur kompressorun məhsuldarlığına birbaşa təsir göstərir.

Odur ki, burada maşın şöbəsindəki temperaturun dəyişməsinin mühərrikin göstəricilərinə təsiri araşdırılır. Cədvəl 4-də riyazi model əsasında maşın şöbəsindəki temperatur $20\div35^0\,C$, cədvəl 5-də isə $40\div50^0C$ hədlərində dəyişdirildikdə CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin riyazi eksperimentlər vasitəsilə alınan qiymətləri göstərilmişdir.

Cədvəllərdən göründüyü kimi, maşın şöbəsindəki temperaturun $20\div50^0\,C$ hədlərində tədricən artması zamanı silindrdəki maksimum təzyiq 15,56 *MPa*-dan 14,8 *MPa*-ya qədər (4,9%), temperatur 1865 *K*-dən 1812 *K*-nə qədər (2,8%), mühərrikin effektiv gücü 2545,2 *kVt*-dan 2287,8 *kVt*-a qədər (10,1%), mühərrikin orta effektiv təzyiqi isə 2,07 *MPa*-dan 1,858 *MPa*-ya qədər (10,2%) azalmış, xüsusi effektiv yanacaq sərfi isə 177,9 *q/(kVt·saat)*-dan 190,3 *q/(kVt·saat)*-a qədər (4,2%) artmışdır.

Maşın şöbəsindəki temperaturun artması ilə mühərrikin effektiv göstəricilərinin pisləşməsi kompressorun məhsuldarlığının azalması ilə yanaşı, həm də resiverə verilən havanın temperaturunun artması ilə izah olunur. Belə ki, cədvəl 4 və 5-dən göründüyü kimi, maşın şöbəsindəki temperaturun $20\div50^0C$ hədlərində tədricən artması zamanı resiverdə də havanın temperaturu $47^0\,C$-dən $80^0\,C$-yə qədər (70,2%) artır, mühərrikin doldurma əmsalı 0,737-dən 0,694-ə qədər (5,8%) azalır. Bu isə, öz növbəsində, mühərrikin silindrinə daxil olan havanın kütlə miqdarının azalması nəticəsində yanma prosesinin pisləşməsi ilə izah edilir. Odur ki, maşın şöbəsindəki temperaturun 20^0C hədlərində saxlanması mühərrikin əsas göstəricilərinin daha qənaətbəxş alınması baxımından məqsədəuyğun hesab oluna bilər.

Cədvəl 5

CAT 3608 markalı baş gəmi dizelinin əsas göstəricilərinin maşın şöbəsindəki temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi
(*n=1000 dəq^{-1}; η_m=0,9; α=2,0; p_s=0,37 MPa, dizel yanacağı*)

Göstəricilər	**Maşın şöbəsindəki temperatur, ^0C, (K)**		
	40 (313)	**45 (318)**	**50 (323)**
1. Resiverdəki temperatur (T_s), ^0C, (K)	69 (342)	75 (348)	80 (353)
2. Yanmanın maksimum təzyiqi (p_z), MPa	15,01	14,9	14,8
3. Yanmanın maksimum temperaturu (T_z), K	1823	1818	1812
4. İndikator f.i.ə. (η_i)	0,498	0,495	0,493
5. Doldurma əmsalı (η_H)	0,707	0,700	0,694
6. Orta indikator təzyiqi (p_i), MPa	2,126	2,095	2,064
7. İndikator gücü (N_i), kVt	2618	2580	2542
8. Xüsusi indikator yanacaq sərfi (g_i), $\frac{q}{kVt \cdot saat}$	169,5	170,4	171,3
9. Orta effektiv təzyiq (p_e), MPa	1,91	1,886	1,858
10. Effektiv güc (N_e), kVt	2356,2	2322	2287,8
11. Xüsusi effektiv yanacaq sərfi (g_e), $\frac{q}{kVt \cdot saat}$	188,3	189,3	190,3
12. Effektiv f.i.ə. (η_e)	0,448	0,446	0,444

Nəticə. Riyazi eksperimentlərin köməyi ilə yerinə yetirilən nəzəri tədqiqatlar aşağıdakı əsas nəticələrə gəlməyə imkan verir:

- üstəlik üfürmə təzyiqinin yüksəldilməsi mühərrikin energetik göstəricələrinin (N_e və P_e) artmasına, mühərrikin qənaətliliyinin yaxşılaşmasına səbəb olsa da, bu zaman silindrdəki maksimum təzyiq xeyli artır ki, bunun da nəticəsində dirsək-şatun mexanizmi hissələrinin möhkəmlik şərtlərinin sərtləşdirilməsi tələb olunur və mühərrikin motoresursunun müəyyən qədər azalması gözlənilir;
- üstəlik üfürmə təzyiqinin artırılması mühərrikin dirsək-şatun mexanizmi elementlərinin mexaniki gərginliklərinin buraxıla bilən hədləri daxilində, yalnız mühərrikin effektiv gücünün artırılması baxımından məqsədəuyğundur;
- maşın şöbəsindəki temperaturun $20 \div 50^0 C$ hədlərində tədricən artması zamanı silindrdəki maksimum təzyiq və temperatur, mühərrikin effektiv gücü, mühərrikin orta effektiv təzyiqi azalır, xüsusi effektiv yanacaq sərfi isə artır;
- maşın şöbəsindəki temperaturun artması ilə mühərrikin effektiv göstəricilərinin pisləşməsi kompressorun məhsuldarlığının azalması ilə yanaşı, həm də resiverə verilən havanın temperaturunun artması və mühərrikin doldurma əmsalının kiçilməsi ilə izah olunur;
- üstəlik üfürmə təzyiqinin rasional qiymətinin **0,37 *MPa*** qəbul olunması, maşın şöbəsindəki temperaturun isə **20^0 *C*** hədlərində qəbul saxlanılması təklif olunur.

Ədəbiyyat

3. A.Ş. İsmayılov, N.Ş. Talıbov. Gəmi daxili yanma mühərriklərinin konstruksiyası. Dərslik. Bakı, ADDA, 2019, 362 s.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Qafarov A.M.

UOT 621.311

QEYRİ-XƏTTİ YÜKLÜ YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ ŞƏBƏKƏLƏRDƏ GÜC İTKİLƏRİNİN AZALDILMASI ÜSULLARININ TƏDQİQİ

İsayeva T.M.

"Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti" PHŞ
Az1010, Bakı şəh., Azadlıq pr., 20
E-mail: tarana.isa@gmail.com

Xülasə. *Məqalə qeyri-xətti yüklərin təsiri altında işləyən yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələrində güc itkilərinin yaranma mexanizminin, onların dəqiq təyin edilməsi problemlərinin və azaldılması tədbirlərinin öyrənilməsinə həsr olunmuşdur. Qeyri-sinusoidal rejimlərdə əsas şəbəkə elementlərinin güc itkilərinin hesablanması üçün analitik ifadələr təqdim edilmişdir. Tədqiqat çərçivəsində elektrik qövs poladəritmə sobalarını qidalandıran yüksək gərginlikli yarımstansiyada aparılmış eksperimental ölçmələrin nəticələri təhlil edilmişdir. Ölçmələr zamanı elektrik ötürmə xəttinin hər iki ucunda aktiv və reaktiv gücün dəyişməsi yüksək dəqiqlikli ölçü cihazları vasitəsilə qeydə alınmışdır. Həmçinin, qövs sobasının müxtəlif iş rejimlərində transformator vasitəsilə yüksək gərginlikli şəbəkəyə qoşulmuş yüklərin cərəyan və gərginlik dalğalarının formaları araşdırılmışdır. İtkilərin azaldılması məqsədilə reaktiv gücün kompensasiyasına əsaslanan üsullar təklif edilmişdir. Belə ki, xətlərə kondensator batareyalarının qoşulması ilə sistemdəki reaktiv komponentlərin və harmonik təsirlərin müəyyən qədər kompensasiya olunması mümkündür.*

Abstract. *This article is dedicated to the study of the mechanisms behind power losses in high-voltage electrical networks operating under the influence of nonlinear loads, the challenges associated with their precise identification, and the measures for their reduction. Analytical expressions have been provided for calculating power losses in the main network elements under non-sinusoidal conditions.Within the framework of the research, the results of experimental measurements conducted at a high-voltage substation supplying electric arc steelmaking furnaces have been analyzed. During the measurements, variations in active and reactive power at both ends of the electrical transmission line were recorded using high-precision measuring devices. Additionally, the forms of current and voltage waveforms of the loads connected to the high-voltage network via transformers were investigated under various operating modes of the arc furnace. To reduce losses, methods based on the compensation of reactive power have been proposed. Specifically, it is possible to partially compensate for the reactive components and harmonic effects in the system by connecting capacitor banks to the lines.*

Аннотация. *Статья посвящена исследованию механизма возникновения потерь мощности, проблем их точного определения и мероприятий по их снижению в высоковольтных электрических сетях, работающих под воздействием нелинейных нагрузок. Представлены аналитические выражения для расчёта потерь мощности основных элементов сети в несиносуидальных режимах. В рамках исследования проведён анализ результатов экспериментальных измерений, выполненных на высоковольтной подстанции, питающей электродуговые сталеплавильные печи. В ходе измерений с использованием высокоточных приборов были зафиксированы изменения активной и реактивной мощности на обоих концах линии электропередачи. Кроме того, исследованы формы токовых и напряженческих волн нагрузок, подключённых к высоковольтной сети через трансформатор при различных режимах работы дуговой печи. В целях снижения потерь предложены методы, основанные на компенсации реактивной мощности. В*

частности, подключение конденсаторных батарей к линиям позволяет частично компенсировать реактивные составляющие и гармонические воздействия в системе.

Açar sözlər: *qeyri-xətti yüklər, yüksək gərginlikli şəbəkə, güc itkiləri, aktiv güc, reaktiv güc, harmoniklər, kompensasiya sistemləri*

Ключевые слова: *нелинейные нагрузки, высоковольтная сеть, потери мощности, активная мощность, реактивная мощность, гармоники, системы компенсации*

Key words: *nonlinear loads, high-voltage network, power losses, active power, reactive power, harmonics, compensation systems*

Giriş. Müasir sənaye müəssisələrinin enerji təchizatı sistemlərində qeyri-xətti yüklərin payı getdikcə artır. Xüsusilə elektrik qövs poladəritmə sobaları, qaynaq qurğuları, impuls rejimdə işləyən çeviricilər və digər güc elektronika cihazları elektrik şəbəkələrində cərəyan və gərginliyin qeyri-sinusoidal formaya düşməsinə səbəb olur. Bu hal şəbəkə elementlərində- transformatorlarda, kabel və hava xətlərində, eləcə də ölçü sistemlərində əlavə güc itkilərinin yaranmasına gətirib çıxarır.

Qeyri-sinusoidal rejimdə baş verən enerji itkilərinin dəqiq hesablanması və azaldılması məsələsi enerji sistemlərinin iqtisadi və texniki səmərəliliyinin artırılması baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. Mövcud ədəbiyyatda əsasən aşağı gərginlikli sistemlər üçün aparılan tədqiqatlar üstünlük təşkil edir, lakin yüksək gərginlikli sənaye şəbəkələrində bu problem hələ də kifayət qədər öyrənilməmiş qalır.

Bu məqalənin məqsədi yüksək gərginlikli şəbəkələrdə qeyri-xətti yüklərin təsiri altında yaranan güc itkilərinin təyin edilmə metodikasını təqdim etmək və eksperimental nəticələr əsasında onların azaldılması üçün effektiv yanaşmaları müəyyənləşdirməkdir.

Enerji qənaəti hazırda müasir dünyanın iqtisadi inkişafının prioritet istiqamətlərindən biridir. Enerji qənaəti problemlərinin aktuallığı, əsasən, sənaye istehsalının yüksək enerji intensivliyi ilə izah olunur. Bu səbəbdən sənaye elektrik şəbəkələrində enerji itkilərinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldılması zəruridir.

Qeyri-xətti yüklər altında yüksək gərginlikli elektrik ötürmə xətlərində itkilərin öyrənilməsi və hesablanması məsələlərinə bir sıra elmi tədqiqatlar həsr olunmuşdur [3, 9]. Bu tədqiqatların analizindən məlum olur ki, onlar əsasən xəttin müxtəlif seqmentlərində, xüsusilə transformatorlarda, qeyri-sinusoidal rejimlərdə elektrik enerjisi itkilərinin təhlili və hesablanması metodlarının seçilməsi məsələlərini araşdırmış, həmçinin bu problemin həlli üçün müxtəlif yanaşmaları təhlil etmişlər. Belə ki, məqalədə qeyri-xətti yükləri təmin edən enerji transformatorları üçün güc itkilərinin hesablanması yanaşması təqdim edilmişdir [1, 7].

Qeyd etmək lazımdır ki, bu sahədə tədqiqatların sayının artmasına müvafiq ölçü cihazlarının və informasiya-ölçü sistemlərinin inkişafı səbəb olmuşdur. Bu sistemlər elektrik enerjisinin ölçülməsi və qeydiyyatı üçün geniş imkanlar yaradır və itkilərin daha dəqiq təyini üçün zəruri məlumat bazasını təmin edir.

Xəttin hər iki ucunda ölçülmüş aktiv güc fərqi əsasında hava xətlərində ümumi itkilərin müəyyən edilməsi mümkündür. Bunun üçün xətt üzrə ümumi aktiv gücün ölçülməsi üçün istifadə olunan kompleksin sistematik xətası təyin edilməlidir. Elektrik şəbəkəsində faktiki texniki itkilər isə çoxfunksiyalı enerji sayğacları və ayrı-ayrı şəbəkə elementlərinin modelləri əsasında hesablanaraq müəyyən edilə bilər [8].

Enerji itkiləri əsasən rezistiv, tutum və induktiv itkilərdən ibarət olur. Bundan əlavə, texniki itkilər, tac itkisi, sızma cərəyanı və dielektrik itkilər də mövcuddur. Yüksək gərginlikli hava xətlərində aktiv gücün ümumi itkiləri elektrik veriliş xəttinin sonundakı rejim parametrlərinə və parametrlərin paylanmasına əsaslanaraq müəyyən oluna bilər [7]. Transformatorlarda itkilərin hesablanması isə, əgər bu itkilər transformatorun nominal gücünə nisbət olaraq göstərilirsə, enerji ölçən cihazlar vasitəsilə aparılır. Bu yanaşma, transformatorlarda və xətlərdə baş verən güc

itkilərinin dəqiq təyini üçün əsas metodlardan biridir və enerji səmərəliliyinin artırılması, həmçinin sistemin etibarlılığının yüksəldilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Əsas hissə. Elektrik enerjisini ölçən sayğaclarda hesablamaları həyata keçirən funksiyalar şəbəkə modelinə əsaslanır. Müasir elektrik sayğacları yalnız enerji qeydiyyatı ilə kifayətlənmir, həm də bir sıra əlavə funksiyaları yerinə yetirə bilir. Xüsusilə ağıllı elektrik ölçmə sistemlərinə sayğacların quraşdırılması zamanı, onlara "itkiləri hesablaması" funksiyasının verilməsi və bu funksiyanın praktiki dəqiqliklə həyata keçirilməsi vacibdir. Belə funksiyaların bir qismi mikropesessor əsaslı elektrik sayğacları ilə təyin edilir. Bu yanaşma enerji itkilərinin xətt üzrə dəqiq təyini üçün əsas metodlardan biridir. Mikropesessor sayğaclarının imkanları sayəsində həm aktiv, həm də reaktiv güc itkisi, harmonik komponentlər və sistemdəki qeyri-xətti yüklərin təsiri yüksək dəqiqliklə hesablanır [4].

Hər bir xətdə baş verən enerji itkiləri aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\Delta W_L = \sum_{i=1}^{N} I_i^2 \cdot \Delta t \cdot R$$

Burada I_i - xəttdəki cərəyanın qiyməti, Δt - ölçmə intervalı, R - xəttin müqavimətidir.

Bu halda, itkilər transformatorun nominal parametrləri əsasında, cərəyan və gərginliyin nominal qiymətləri nəzərə alınmaqla hesablanır. İtkilər həmçinin şəbəkə parametrlərinə əsasən də müəyyən edilə bilər; bunun üçün qidalandırıcı xəttin başlanğıc hissəsindəki ümumi yük qovşaq yüklərinə mütənasib şəkildə paylanır.

Şəbəkədəki yük itkilərini xətlər və paylayıcı transformatorlar üzrə ayırmaq üçün ekvivalent müqavimət iki ardıcıl qoşulmuş ekvivalent müqavimət kimi təqdim olunur: bir hissəsi xəttin müqaviməti, digər hissəsi transformatorun öz müqaviməti hesab olunur. Paylayıcı elektrik şəbəkələrinin qidalandırıcılarında baş verən itkiləri hesablamaq üçün "ekvivalent aktiv müqavimət" metodu tətbiq edilir [5, 6].

Transformatorlarda aktiv itkilər (ΣP) isə aktiv itkilərin cəmi kimi müəyyən edilir.

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{TL} + \Delta P_{Tid}$$

Burada ΔP_{TL} - aktiv yük itkisi; ΔP_{Tid} - yüksüz rejimdə aktiv itki.

Bu halda, 110 kV və daha aşağı gərginlikli xətlərdə baş verən güc itkiləri aktiv (P_L) və reaktiv (Q_L) itkilər kimi aşağıdakı şəkildə müəyyən edilir:

$$\Delta P_L = R_L \cdot I_i^2 \qquad \Delta Q_L = X_L \cdot I_i^2$$

Burada I_i - i-ci zaman anında ümumi cərəyanının qiyməti; R_L - xəttin aktiv müqaviməti; X_L - xəttin induktiv müqavimətidir.

Prosesin rejiminə uyğun sürətdə ölçmələrin aparılması üçün rejim parametrlərinin vektor ölçmə nəticələrindən effektiv tezlikdə istifadə etmək zəruridir [8]. Kommunal yüklü paylayıcı elektrik şəbəkələrində, ulduz-sıfır (star-to-zero) qoşulma sxemli transformatorlar istifadə olunur. Bu transformatorlar yüksək sıfır ardıcıllıq müqavimətinə malikdir, təxminən müsbət ardıcıllıq müqavimətindən daha yüksəkdir. Asimmetrik faza yükü olan hallarda bu transformatorlarda əhəmiyyətli sıfır ardıcıllıq gərginliyi yaranır ki, bu da transformatorun ikinci tərəf sargılarında asimmetrik gərginliklərə səbəb olur. Transformatorların sıfır ardıcıllığı üçün gərginliyin qeyri-simmetriklik əmsalı tez-tez icazə verilən həddən ardıq olur.

Yüksək gərginlikli elektrik şəbəkəsi qovşaqlarında, o cümlədən elektrik qövs poladəritmə sobaları ilə poladəritmə müəssisələrdə, kəskin dəyişən yüklər müşahidə olunur. Bu cür dəyişən yüklər şəbəkədə güc keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur. Kəskin dəyişən yüklərin yüksək gərginlikli şəbəkə qovşaqlarında enerji keyfiyyətinə təsiri barədə geniş elmi-tədqiqat işlərinin aparılmasına baxmayaraq, bu problem hələ də tam həll olunmamış qalır və çox aktualdır [9].

Elektrik qövs poladəritmə sobalarının (EQPS) quraşdırıldığı müəssisələrin enerji təchizatı sistemlərində həm yüklərin kəskin dəyişməsi, həm də harmoniklərin yaranması baş verir. Bu cür hallarda qeyri-xətti yükün sistemdə yaratdığı dinamik təsirlərin dəqiq qiymətləndirilməsi mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Qeyri-xətti yükün kəskin dəyişmələrinin elektrik enerjisinin keyfiyyətinə təsirini öyrənmək üçün elektrik qövs poladəritmə sobaları qoşulmuş 220/110 kV-luq yarımstansiyada tədqiqat aparılmışdır. Təcrübələr zamanı xəttin hər iki ucunda aktiv və reaktiv güclərin ölçüləri yüksək dəqiqliklə aparılmış, transformator və xətt parametrləri nəzərə alınaraq güc itkiləri hesablanmışdır. Bu yanaşma, qeyri-xətti və asimmetrik yüklərin şəbəkədə yaratdığı təsirlərin dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan verir və enerji itkilərinin azaldılması üçün optimal həll yollarının seçilməsində əsas yaradır.

Hazırda elektrik enerjisinin keyfiyyətini ölçmək üçün bir çox cihazlar və məlumat-hesablama kompleksləri mövcuddur. 110–220 kV yüksək gərginlikli şəbəkənin parametrlərini ölçmək, məlumatları daxil etmək və təhlil etmək üçün "SIMEAS Q" ölçmə-hesablama kompleksi istifadə olunmuşdur. Keyfiyyətin qeydiyyatını aparan cihaz aşağıdakı parametrləri ölçür: tezlik, aktiv, reaktiv və tam güc, güc faktoru, gərginliklər, flickerin dozası, 1÷40-cı harmoniklər (gərginlik və cərəyan üzrə), ümumi harmonik komponentlər, sistemin aktiv enerjisi, reaktiv – induktiv, tutum enerji və tam enerji [6].

Bundan əlavə, bu qiymətlərə əsasən prosessor ölçülən parametrləri hesablayır: güclər, cos φ, flicker dozası, harmoniklər və s. Bu qiymətlər cihazın yaddaşında saxlanılır və zamana gürə məlumatları da əhatə edir. "SIMEAS Q" kompleksində ölçülən parametrlərin orta davametmə müddəti 1÷3600 saniyə arasında dəyişir. Verilmiş həddən kənara çıxmaların ölçmə müddəti isə 10 millisaniyədən 3600 saniyəyə qədər intervalda müəyyən olunur.

Elektrik qövs poladəritmə sobalarını (EQPS) qidalandıran elektrik veriliş xətləri 220 kV şəbəkəyə 200 MVA-lıq avtotransformatorlar vasitəsilə qoşulur və daha sonra 330 və 500 kV şəbəkələrə ötürülür. EQPS-lar 35 kV-lıq şinlərdən 18 MVA-lıq 35/0.4 kV güc soba transformatoru və 0–16 Om tənzimlənə bilən ardıcıl reaktor vasitəsilə qidalanır. 35 kV-lıq şinlərə ümumi tutumu 22.4 MVAr olan kondensator batareyaları (KB) qoşulub: KB-1 ardıcıl reaktor ilə 9.8 MVAr tutuma və KB-2 12.6 MVAr tutuma malikdir.

Ölçmə planına uyğun olaraq altı seriyadan ibarət təcrübə aparılmışdır. Rejim parametrləri "SIMEAS Q" cihazı vasitəsilə birbaşa 110 kV-lıq hava xəttində, 220/110/10 kV yarımstansiyadan və ATR-2 girişində müxtəlif rejimlərdə ölçülmüşdür. Ölçmə nəticələrinin elektrik gücü keyfiyyəti göstəricilərinin orta hesablama intervalları ilə uyğunluq təmin edilmiş, rejim parametrləri üçün cihazın 10 ms, 1 s və 10 s-lik orta hesablamaları aparılmışdır.

EQPS-in işləmə dövrü üç xarakterik mərhələyə bölünür:

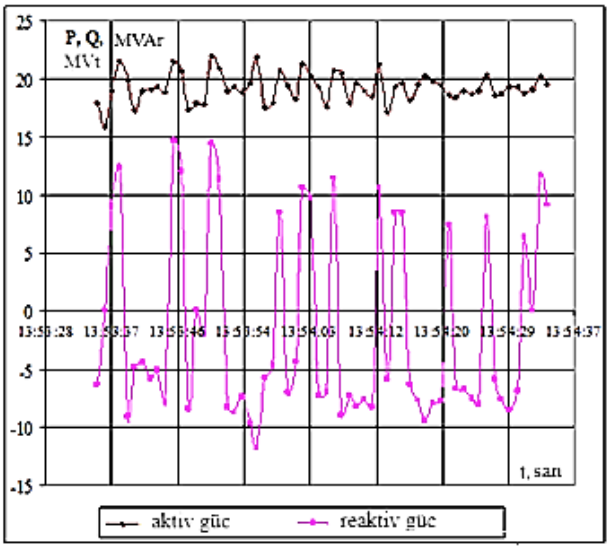
1. Güc mərhələsi – yükləmə materialı isidilir və metal əridilir;
2. Texnoloji mərhələ – oksidləşmə və reduksiya proseslərindən ibarətdir;
3. Köməkçi mərhələ – bu müddətdə bitmiş metal istehsalı, sobanın hazırlanması, təmizlənməsi və yüklənməsi həyata keçirilir.

Yüksək harmoniklərin yaranması əsasən güc və texnoloji mərhələlərdə baş verir. Güc mərhələsi zamanı soba yükləmə materialını isitmək və ərimə temperaturunu saxlamaq üçün tələb olunan enerjini istehlak edir. Bu mərhələnin davamlılığı ərimə prosesinin ümumi müddətinin 50–60%-ni təşkil edir və bu müddət ərzində sərf olunan enerji bütün ərimə prosesində sərf olunan enerjinin 60–80%-ni təşkil edir. Ərimə müddətində qövsün yanma rejimi son dərəcə sabit deyil; qövs gücü kəskin dəyişir, qısaqapanmaların sayı 100 və ya daha çox ola bilər. Bir qısaqapanmanın icazə verilən davamlılığı 2–8 saniyədir.

Əsas yarımstansiyada aktiv və reaktiv gücün dəyişmə qrafikləri şəkil 1-də göstərilmişdir. Ölçmələr zamanı əldə edilmiş məlumatların təhlili nəticəsində yarımstansiyanın yükünün 1–2 saniyə ərzində kəskin dəyişdiyi müəyyən edilmişdir. Aktiv güc 0–22 MW, reaktiv güc isə +15–12

MVAr diapazonunda dəyişir. Bu dəyişiklik P, Q, I və U ölçü cihazlarının göstəricilərində kəskin dəyişikliklər şəklində müşahidə olunmuşdur. Elektrik şəbəkəsinə ümumi qoşulma nöqtəsində gərginliyin qərarlaşmış meyletməsinə əsasən, elektrik enerjisinin keyfiyyəti standartın tələblərinə uyğun hesab olunur ki, qərarlaşmış meyletmənin bütün qiymətləri müəyyən bir müddət ərzində (24 saat) hər dəqiqə üçün ölçülən maksimum icazə verilən hədlər daxilində və eyni zamanda, qərarlaşmış meyletmənin ən azı 95%-i həmin dövr ərzində normal icazə verilən hədlər daxilində olsun.

Beləliklə, normal icazə verilən hədlərdən kənara çıxmaların ümumi davametmə müddəti müəyyən edilmiş müddətin 5%-indən artıq ola bilməz, yəni 1 saat 12 dəqiqədən çox olmamalıdır. Eyni zamanda, icazə verilən hədlərin tam aşılması isə bu müddətin 0%-ni keçə bilməz.



Şəkil 1. *110 kV-luq hava xətti yarımstansiyasında aktiv və reaktiv gücün qeydiyyatının nəticələri*

Gərginliyin rəqsləri onun dəyişmə böyüklüyü və fliker dozası ilə xarakterizə olunur. Hər hansı periodik və ya qeyri-periodik gərginlik rəqsi üçün həmin rəqslərin mövcud standart normalarına uyğunluğunu qiymətləndirmək xüsusi ölçmə vasitəsi – flikermetr vasitəsilə həyata keçirilə bilər. Ölçmə intervalı ərzində orta kvadratik gərginlik qiymətlərinin ölçü cihazları ilə qeydiyyatı aparılıbsa, qiymətləndirmə analitik üsullarla da həyata keçirilə bilər.

Gərginliyin δU_i dəyişmə diapazonu faizlə aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{nom}} \cdot 100$$

burada U_i, U_{i+1} - əsas tezlikli gərginliyin bir-birinin ardınca gələn ekstremumların və ya ekstremum ilə orta kvadratik qiymətlərin əhatəedicisinin üfüqi sahəsinin əsas tezliyin hər yarımperiodunda müəyyən edilən qiymətləridir.

Gərginlik dəyişmələrinin təkrarlanma tezliyi $F_{\delta Ut}$ (san^{-1}, dəq^{-1}) gərginlik dəyişmələri periodik olduqda aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$F_{\delta Ut} = \frac{m}{t}$$

burada m - t zaman müddətində gərginlik dəyişmələrinin sayı; t - ölçmələrin yerinə yetirildiyi zaman intervalıdır.

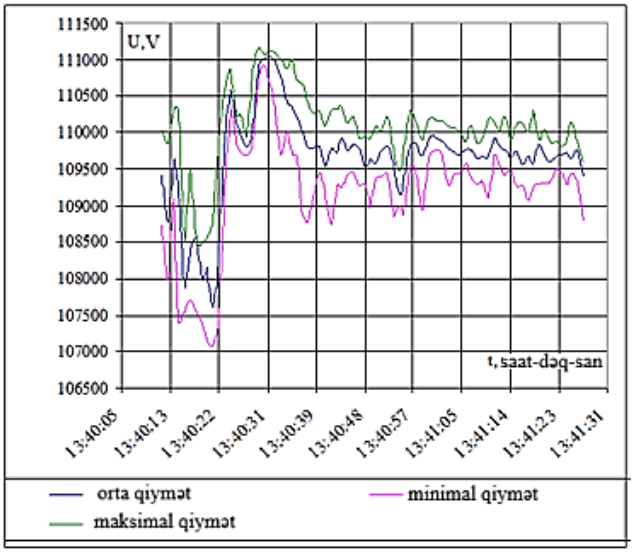
Gərginlik dəyişmələri arasındakı zaman intervalı $\Delta t_{i,i+1}$ (saniyə və ya dəqiqə ilə) aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i$$

burada t_i,t_{i+1} - bir-birinin ardınca gedən gərginlik dəyişmələrinin başlanğıc anlarıdır, san.

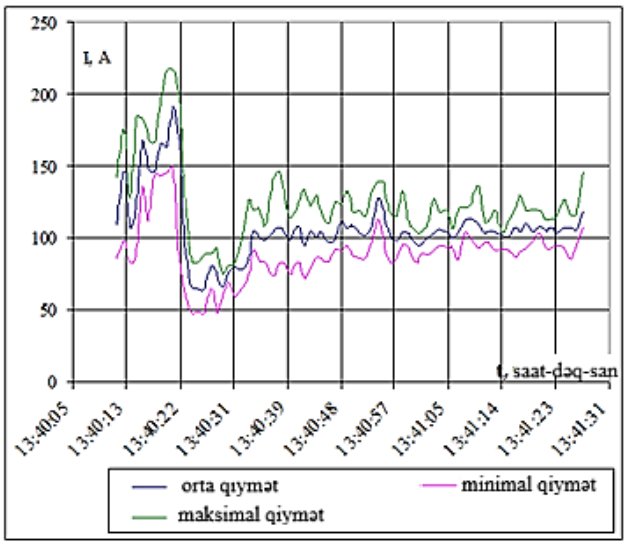
Gücün dəyişməsinin qiymətindən asılı olaraq, EQPS gərginliyin 1-3% hüdudlarında dəyişməsinə səbəb olur.

Gərginliyin dəyişmə hüdudları. "Simeas Q" cihazının ortalama müddəti 1 saniyə olduqda 220\110\10 kV yarımstansiyanın 110 kV şinində gərginliyin dəyişməsi hüdudları şəkil 2-də göstərilmişdir. Bu zaman düyündə maksimum və minimum gərginliyin qiymətləri 10 msan zaman intervalında ölçmələrə əsasən "Simeas Q" cihazı tərəfindən qeydə alınmış və orta qiyməti 1 saniyə zaman intervalı üçün hesablanmışdır. Maksimum və minimum gərginlik qiymətləri arasındakı fərq təxminən 1,5%-dir.



***Şəkil 2**. 220/110 kV yarımstansiyasının 110 kV-luq fazasında gərginliyinin dəyişmə qrafiki*

Cərəyanların dəyişmə hüdudları. "Simeas Q" cihazının ortalama müddəti 1 saniyə olduqda 220\110\10 kV yarımstansiyasının 110 kV-luq A fazasında cərəyanın dəyişmə hüdudları 50-220 A və 75-150 A diapazonundadır (şəkil 3).



***Şəkil 3.** 220/110/10 kV yarımstansiyasının 110 kV fazasında cərəyanın dəyişmə qrafiki*

Kəskin dəyişən yüklər qoşulduğu hal üçün gərginliyin dəyişməsini hesablayarkən, şəbəkədə gərginlik itkilərinin qərarlaşmış qiymətlərini qiymətləndirmək üçün istifadə olunan ifadələrə analoji ifadələrdən istifadə etmək mümkündür:

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x}{U}$$

burada *ΔP, ΔQ* - aktiv və reaktiv güclərin dəyişməsidir.

Cərəyanların və gərginliklərin asimmetriyası elektrik şəbəkələrində və elektrik enerjisi paylayıcı elementlərində enerji itkilərinin artmasına səbəb olur. Əgər elektrik dövrəsi induktivlik L ilə yüklənmişdirsə, onda cərəyan mənbəyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$i = I_m(sin\omega t \pm (1/3)sin3\omega t)$$

O halda, enerji mənbəyinin gərginliyi aşağıdakı kimi olacaq:

$$u = L(di/dt) \cdot (cos\omega t \pm cos3\omega t)$$

və bu qiymətlərə uyğun olan reaktiv güc, harmonik tərkiblər nəzərə alınmaqla aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$Q = \int_{n=0}^{\infty} Q_n = U_1 I_1 sin\varphi_1 + U_2 I_2 sin\varphi_2 + \Lambda$$

burada Q - reaktiv güc; Q_n - reaktiv gücün nominal qiyməti; U_1, U_2 - harmonik tərkiblərə uyğun gərginliklər; I_1, I_2 - harmonik tərkiblərə uyğun cərəyanlardır.

Bu ifadəyə əsasən, 3-cü harmonikin işarəsindən asılı olmayaraq, aşağıdakı nəticə əldə edilir:

$$Q = \frac{2}{3}\,\omega \mathrm{L} \mathrm{I}_m^2$$

Reaktiv güc, müvafiq volt-amper xarakteristikasının sahəsi ilə mütənasibdir [9].

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u(t)\frac{d}{dt}i(t)dt = 1$$

Gərginliklərin asimmetriyası aşağıdakı göstəricilərlə xarakterizə olunur: əks ardıcıllıq üzrə gərginliklərin asimmetriya əmsalı; sıfır ardıcıllığı üzrə gərginliklərin asimmetriya əmsalı.

Əks ardıcıllıq üzrə gərginliklərin qeyri-simmetrikliyi əmsalı 0,9%-dən azdır.

Elektrik şəbəkələrinə ümumi qoşulma nöqtələrində əks ardıcıllıqlı gərginliyin asimmetriya əmsalının normal və icazə verilən hədləri müvafiq olaraq 2.0% və 4.0% təşkil edir. Ölçmələrin nəticələri göstərmişdir ki, ümumi qoşulma nöqtəsində əks ardıcıllıq üzrə gərginliyin asimmetriya əmsalları bu icazə verilən hədlər daxilində olmuşdur.

Yarımstansiyanın 110 kV şinlərində faza cərəyanları 50 A diapazonunda dəyişir. Ölçmələr nəticəsində əldə edilmiş fliker dozasının qiymətləri cədvəldə göstərilmişdir.

İki ölçmə intervalında əldə edilmiş fliker dəyərləri

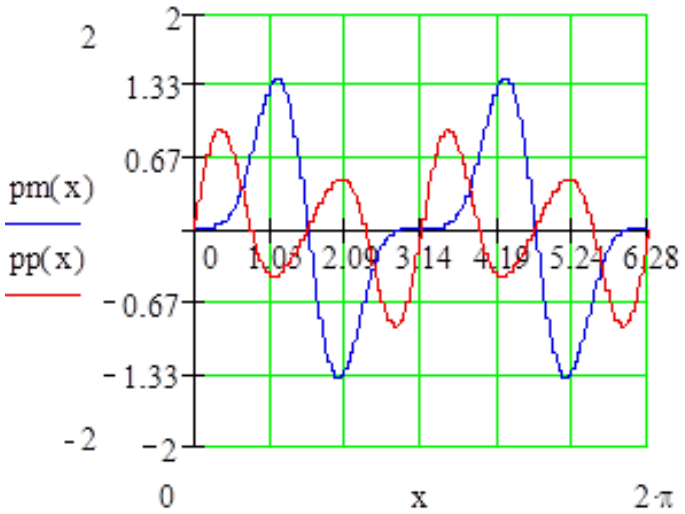
Qısamüddətli flikerin dozası		
L1	**L2**	**L3**
1,95585	1,998772	2,171604
1,05553	1,024602	1,063535
L1	**L2**	**L3**
1.134734	1.245012	1.316847
2.076777	2.248981	1.929558
1.791921	2.091446	1.990125

İcazə verilən istehlak payının hesablanması üçün hazırlanmış proqram sınaq dövrəsində yoxlanılmışdır. Yarımstansiyanın 110 kV şinlərinə qoşulmuş faktiki istehlakçı yükü 25,000 kVA, qovşaq ötürmə qabiliyyəti isə 400,000 kVA təşkil edir.

İstehlakçının nəzarət nöqtəsində enerjinin keyfiyyət göstəricisinə təsirinin hesablanması nəticələri göstərmişdir ki, flikerin dozası 1,4–2,3 diapazonunda dəyişir, bu isə normadan xeyli yüksəkdir.

Aparılmış ölçmələrin nəticələrinə əsasən qövs sobasının işə salınması zamanı şəbəkə cərəyanında yüksək dərəcədə harmonik təhriflər müşahidə olunur. Əsasən 3-cü, 5-ci və 7-ci harmoniklər üstünlük təşkil edir. Cərəyanın ümumi harmonik təhrif əmsalı (THD) bəzi rejimlərdə 25–30%-ə qədər yüksəlmişdir [4].

Şəkil 4-də 3-cü harmonikanın müxtəlif işarələrinə uyğun ani güc qrafikləri göstərilmişdir. Bu qrafiklərdən göründüyü kimi pm(x) mənfi işarəyə, pp(x) isə müsbət işarəyə uyğun gəlir.



Şəkil 4. *3-cü harmonikin qarşısında müxtəlif işarələr olduqda ani güc əyriləri*

Tədqiqatın aparılması çərçivəsində müasir avtomatlaşdırılmış məlumat ölçmə sistemlərinin (məsələn, SCADA, PMU), mikroprosessor əsaslı ölçmə cihazlarının (sayğacların) istifadəsi tələb olunur [10]. Bu sistemlər və cihazlar itkilərin komponentlərini ayrıca müəyyən etməyə və əlavə yüksək gərginlikli hava xəttinin uclarında rejim parametrlərinin cari qiymətlərinin ölçülməsinə əsaslanaraq enerji ölçmə sistemlərinin dəqiqliyini yoxlamağa imkan verir. Rejim parametrlərinin ölçülməsi üçün hazırlanmış bu sistemlər və komplekslər məlumatların ölçülməsi, orta qiymətlərin tapılması və saxlanması ilə bağlı bir çox problemləri həll etməyə və kompüterlə birlikdə yüksək gərginlikli hava xəttinin rejimləri, naqillərdə tac hadisələri və s. kimi proseslərin modelləşdirilməsinə və ölçmələrin keyfiyyətcə yeni səviyyədə təşkil edilməsinə imkan verir.

Nəticə. Aparılmış eksperimental tədqiqatların nəticələri göstərir ki, qeyri-xətti yükün elektrik enerjisinin bəzi keyfiyyət göstəricilərinə, məsələn, flikerin dozalarına təsiri normadan xeyli yüksəkdir. Bu səbəbdən tələb olunan keyfiyyəti təmin etmək üçün elektrik stansiyasının layihələndirilməsi mərhələsində yüksək gərginlikli yarımstansiyada qeyri-xətti yükün kəskin dəyişməsi zamanı flikerin dozasının icazə verilən səviyyəsini qiymətləndirmək zəruridir.

Hazırda, enerji sistemində informasiya və kommunikasiya texnologiyalarının tətbiqi ilə əlaqədar olaraq, son zamanlar hava xəttində ümumi aktiv enerji itkilərini xəttin uclarındakı aktiv gücləri ölçməklə və onlardan tacdakı güc itkilərini və naqillərin istilik itkilərini təyin etmək üçün istifadə olunması məqsədəuyğundur. Çox yüksək gərginlikli elektrik veriliş xətlərində aktiv güclərin fərqinə əsaslanan enerji itkilərinin qiymətləndirilməsi SCADA və PMU ölçmələri vasitəsilə, həmçinin intellektual sayğac və avtomatlaşdırılmış sistem vasitəsilə həyata keçirilə bilər.

Təsadüfi proseslər nəzəriyyəsinə əsaslanaraq mövcud enerji itkilərinin ölçmə sisteminin xətalarının təhlili yüksək gərginlikli elektrik veriliş xətlərində itkilərin cari qiymətlərini praktik istifadə üçün tələb olunan dəqiqliklə əldə etməyə imkan verir. Praktikada ölçmə xətalarının faktiki qiymətlərinin müəyyən edilməsi zəruridir. Buna görə də enerji ölçmə kompleksinin xətalarının mürəkkəbliyini onun faktiki iş şəraitini nəzərə almaqla müəyyən etmək vacib hesab olunur. Aktiv güc ölçmə kompleksinin sistematik xətasının hesablanması və onun korreksiyası elektrik enerjisinin ölçmə dəqiqliyinin artırılmasına imkan verir.

Ədəbiyyat

1. Kamoliddinov S.S., Eraliev H.A., Qodirov A.A. (2022). Calculation of Power Losses in Electrical Networks Taking into Account Non-Sinusoidal Voltage. CENTRAL ASIAN JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED SCIENCES Volume: 03 Issue: 11 | Nov 2022 ISSN: 2660-5317 https://cajotas.centralasianstudies.org
2. Andreeva L.V., Osika L.K., Tubinis V.V. (2010). /Under the general editorship of Osika L.K. Commercial metering of electric power in the wholesale and retail markets. - M.: AVOK, 2010.
3. Averbukh, M & Prasol, D. (2018). Influence of high-power nonlinear consumers on electric energy losses in mining high-voltage power line. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 327. 052028. 10.1088/1757-899X/327/5/052028.
4. Исаева Т.М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции. Журнал «Главный энергетик» №11(162), 2016г.ст.32-36 (ISSN 2074-7489). УДК 621.3.08
5. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Экспериментальные исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электроэнергии на высоковольтной подстанции. Промышленная Энергетика. 2008 № 5, стр. 50-53.
6. Баламетов А.Б., İsayeva T.M. Моделирование гармонических составляющих тока в электрических сетях при нелинейной нагрузке. The Caucasus Economic & Social Analysis Journal of Southern Caucasus. ADNSU. ISSN: 2298-0946, E-ISSN: 1987-6114; DOI Prefix: 10.36962. AUGUST-SEPTEMBER 2019 VOLUME 33 ISSUE 06.pp.15-20
7. Balametov A.B., Khalilov E.D. (2013). Methods for predicting power losses of electric power systems for analysis and management. Electricity No. 7, pp. 19–29.
8. Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. (2017). Choice of a mathematical model of an overhead line when simulating a mode using synchronized vector measurements //Electricity, No. 3, Publisher: National Publishing University "MPEI" (Moscow), ISSN: 0013-5380 (in Russian), p. 20-28.
9. Sayenko Y., Pawelek R., Baranenko T. (2023). Analysis of Reactive Power in Electrical Networks Supplying Nonlinear Fast-Varying Loads/*Energies* 2023, *16*(24), 8011; https:// doi.org/10.3390/en16248011
10. Ortiz G., Rehtanz C., Colomé G. (2021). Monitoring of power system dynamics under incomplete PMU observability conditions. *IET Gener. Transm. Distrib*. 2021; 15:1435–1450

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. Sultanov E.F.

UOT 621.019

ELEKTRİKLƏŞDİRİLMİŞ DƏNİZ NƏQLİYYATI ÜÇÜN MİKRO ŞƏBƏKƏ MODELLƏRİNİN TEXNİKİ VƏ EKOLOJİ QİYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

Muradəliyev A.Z., Hüseynov K.Ş.

Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu
AZ1122, Bakı şəh., H.Zərdabi pr., 94
"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000 Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: aydin_murad@yahoo.com, kenanhuseyn2606@gmail.com

Xülasə. *Məqalədə elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatı üçün mikro şəbəkə modellərinin texniki və ekoloji aspektləri hərtərəfli şəkildə təhlil olunur. Əsas məqsəd enerji səmərəliliyinin artırılması, bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyası və karbon emissiyalarının azaldılması vasitəsilə dayanıqlı gəmiçilik sistemlərinin formalaşdırılmasıdır. Tədqiqatda mikro şəbəkə arxitekturasının komponentləri, idarəetmə mexanizmləri və hibrid enerji sistemlərinin üstünlükləri qiymətləndirilir. Analiz nəticələri göstərir ki, ağıllı idarəetmə alqoritmləri və enerji saxlama texnologiyalarının tətbiqi enerji balansını optimallaşdırmaqla yanaşı, ekoloji təsirlərin azalmasına və dəniz nəqliyyatında yaşıl transformasiyanın sürətlənməsinə imkan yaradır.*

Abstract. *This paper presents a comprehensive technical and environmental assessment of microgrid models for electrified maritime transportation. The main objective is to enhance energy efficiency, integrate renewable energy sources, and reduce carbon emissions to support the development of sustainable shipping systems. The study evaluates the components of microgrid architecture, control mechanisms, and the advantages of hybrid energy systems. The analysis demonstrates that the application of intelligent control algorithms and energy storage technologies not only optimizes energy balance but also minimizes environmental impacts, thereby accelerating the green transition in maritime transport.*

Аннотация. *В данной статье проводится всесторонняя техническая и экологическая оценка микросетевых моделей для электрифицированного морского транспорта. Основная цель исследования заключается в повышении энергоэффективности, интеграции возобновляемых источников энергии и снижении выбросов углерода для формирования устойчивых судоходных систем. Рассматриваются архитектура микросети, механизмы управления и преимущества гибридных энергетических систем. Результаты анализа показывают, что применение интеллектуальных алгоритмов управления и технологий накопления энергии не только оптимизирует энергетический баланс, но и снижает экологическое воздействие, способствуя ускорению «зеленого» перехода в морском транспорте.*

Açar sözlər: *elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatı, mikro şəbəkə modelləri, enerji səmərəliliyi, bərpa olunan enerji mənbələri, hibrid enerji sistemi, süni intellekt, ekoloji qiymətləndirmə, yaşıl gəmiçilik*

Key words: *electrified maritime transport, microgrid models, energy efficiency, renewable energy sources, hybrid energy system, artificial intelligence, environmental assessment, green shipping*

Ключевые слова: *электрифицированный морской транспорт, микросетевые модели, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, гибридная энергетическая система, искусственный интеллект, экологическая оценка, зелёное судоходство*

Giriş. Dünya üzrə dəniz nəqliyyatı qlobal ticarət və yükdaşımada əsas rol oynayır, lakin enerji sərfi və karbon emissiyaları baxımından böyük ətraf mühit təsirinə malikdir. Ənənəvi dizel mühərriklərinə əsaslanan gəmi sistemləri yüksək yanacaq sərfi və atmosferə zərərli qazların buraxılması ilə xarakterizə olunur. Bu isə beynəlxalq səviyyədə ətraf mühitin qorunması üzrə qəbul edilmiş normativlərə cavab verməkdə çətinlik yaradır.

Son illərdə bərpa olunan enerji mənbələrinin sürətlə inkişafı və elektrikləşmə texnologiyalarının tətbiqi dəniz nəqliyyatında yeni imkanlar açır. Mikro şəbəkələr bu kontekstdə həm enerjinin optimallaşdırılmış istifadəsini, həm də ətraf mühitin qorunmasını təmin edə biləcək strateji yanaşma kimi çıxış edir. Mikro şəbəkə modelləri gəmidə müxtəlif enerji mənbələrinin-günəş, külək, dalğa enerjisi, akkumulyator və dizel-elektrik sistemlərinin-optimal inteqrasiyasına imkan yaradır.

Məqalənin əsas məqsədi elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatında mikro şəbəkə modellərinin texniki və ekoloji qiymətləndirilməsini aparmaqdır. Tədqiqat çərçivəsində enerji balansının optimallaşdırılması, idarəetmə strategiyalarının təhlili və karbon emissiyalarının azaldılması məsələləri araşdırılır. Bu yanaşma yalnız enerji səmərəliliyini artırmaqla kifayətlənmir, həm də dəniz nəqliyyatında "yaşıl transformasiya"nın sürətlənməsinə töhfə verir [1,2].

Tədqiqatın metodologiyası modelləşdirmə, simulyasiya və müqayisəli analiz üsullarına əsaslanır. Həm texniki göstəricilər, həm də ekoloji təsirlər qiymətləndirilir, bu da gələcək hibrid və ağıllı idarəetməyə malik enerji sistemlərinin dizaynı üçün əsas yaradır.

Əsas hissə. Mikro şəbəkələr müasir gəmiçilikdə enerji təminatının effektivliyini artıran və eyni zamanda ekoloji təsiri minimuma endirən kompleks sistemlər kimi çıxış edir. Bu sistemlər müxtəlif enerji mənbələrini birləşdirərək gəminin enerji balansını davamlı şəkildə qoruyur. Gəmi üzərində quraşdırılmış mikro şəbəkələr adətən generatorlar, akkumulyatorlar, bərpa olunan enerji qurğuları və enerji idarəetmə sistemlərindən ibarətdir. Generatorlar uzun məsafəli səyahətlər zamanı enerji ehtiyatını təmin edir, akkumulyatorlar isə pik yük dövrlərində və ya bərpa olunan enerji mənbələrinin çıxışı azaldıqda sistemin enerji balansını qoruyur. Günəş panelləri və külək turbini kimi bərpa olunan enerji mənbələri isə gəminin enerji istehlakını optimallaşdırır və karbon emissiyasının minimuma endirilməsinə xidmət edir. Bu sistemlərin idarəetmə vahidləri isə enerji paylanmasını tənzimləyir, qənaət rejimini təmin edir və bütün komponentlərin sinxron işləməsini nəzarətdə saxlayır.

Mikro şəbəkələrin tətbiqi yalnız texniki üstünlüklərlə məhdudlaşmır. Ənənəvi dizel mühərriklərə əsaslanan gəmi sistemləri yüksək yanacaq sərfi və ətraf mühitə mənfi təsir ilə xarakterizə olunur. Mikro şəbəkələr isə bərpa olunan enerji mənbələrindən istifadəni artıraraq CO_2 və NOx emissiyalarını əhəmiyyətli dərəcədə azaldır və beynəlxalq ətraf mühit standartlarına uyğunluq təmin edir. Bu yanaşma yalnız enerji xərclərinin azaldılmasına xidmət etmir, həm də dəniz gəmiçiliyində "yaşıl transformasiya"nın sürətlənməsini təmin edir. Beləliklə, mikro şəbəkələrin tətbiqi həm ətraf mühitin qorunmasına töhfə verir, həm də gəmi istismarının iqtisadi səmərəliliyini artırır [1,2].

Enerji idarəetməsi mikro şəbəkələrin effektivliyinin əsas göstəricisidir. Bu idarəetmə sistemi real vaxt rejimində enerji istehlakını izləyir, yük paylanmasını tənzimləyir və kritik sistemlərin enerji təminatını prioritetləşdirir. Süni intellekt və model-predictive control (MPC) texnologiyaları bu prosesi avtomatlaşdırır, pik tələbat dövrlərində enerjinin səmərəli istifadəsini təmin edir və dizel generatorlarının iş yükünü azaldır. Bunun nəticəsində həm texniki stabillik, həm də ekoloji göstəricilər optimallaşdırılır. Eyni zamanda bu sistemlər, gəmi heyətinə enerji istifadəsi barədə real vaxt məlumatı təqdim edərək idarəetməni daha çevik edir və yanacaq israfının qarşısını alır.

Mikro şəbəkələrin enerji mənbələrinin optimallaşdırılması çoxşaxəli yanaşma tələb edir. Günəş və külək enerjisi dəyişkənliyi səbəbindən enerji istehsalında fasilələr yarada bilər. Buna görə də akkumulyatorlar və hibrid generatorlar enerji təminatını davamlı şəkildə qoruyur. Dalğa enerjisi texnologiyaları isə xüsusilə dəniz şərtlərinə uyğun sabit enerji çıxışı təqdim edir. Bu yanaşma enerji

istehsalının dayanıqlığını artırır və gəminin müxtəlif əməliyyat şəraitində etibarlı işləməsini təmin edir [3].

Ətraf mühitin qorunması və enerji səmərəliliyi sahəsində mikro şəbəkələrin rolu yalnız emissiyaların azalması ilə məhdudlaşmır. Həyat dövrü analizi (Life Cycle Assessment) bu sistemlərin istehsal, quraşdırma, istismar və təmir mərhələlərinin ətraf mühitə təsirini qiymətləndirməyə imkan verir. Bu analiz göstərir ki, mikro şəbəkələrin tətbiqi gəmiçilik sektorunda ekoloji davamlılığı təmin edir və gələcəkdə yaşıl gəmiçilik strategiyalarının formalaşmasına əsas yaradır.

Beləliklə, mikro şəbəkələr elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatında texniki və ekoloji baxımdan strateji həll təqdim edir. Onlar enerji balansını qorumaq, yanacaq sərfini azaltmaq və karbon emissiyalarını minimuma endirmək imkanına malikdir. Eyni zamanda bu sistemlər gələcəkdə ağıllı idarəetmə və bərpa olunan enerji texnologiyalarının geniş tətbiqi üçün zəmin yaradır. Mikro şəbəkələrin inkişafı, gələcəkdə dəniz gəmiçiliyində yaşıl transformasiyanın əsas komponenti kimi qiymətləndirilir.

Müasir gəmi mikro şəbəkələrinin analizi üçün riyazi modellər enerji mənbələrinin qarşılıqlı təsirini, yük dinamikasını və idarəetmə strategiyalarını əhatə etməlidir. Gəmi sistemlərində enerji balansı aşağıdakı bərabərliklə ifadə oluna bilər:

$$\boldsymbol{P_{gen} + P_{bem} + P_{bat} = P_{yük} + P_{itki}}$$

Burada: P_{gen}– dizel generatorlarının gücü,

P_{ren}– bərpa olunan enerji mənbələrindən (günəş, külək, dalğa) istehsal olunan güc,

P_{bat}– akkumulyatorların enerji çıxışı və ya yığımı,

$P_{yük}$– istehlak olunan enerji yükü,

P_{itki}– enerji ötürmə itkiləridir.

Mikro şəbəkələrin texniki və ekoloji göstəricilərinin təhlili göstərir ki, bu sistemlərin səmərəliliyi əsasən enerji mənbələrinin inteqrasiyası səviyyəsindən və idarəetmə strategiyasının düzgün qurulmasından asılıdır. Gəmi mikro şəbəkələrinin modelləşdirilməsi zamanı enerji paylanması və yük balansının optimallaşdırılması üçün çoxölçülü riyazi və simulyasiya yanaşmaları tətbiq olunur. Bu modellər generatorların, akkumulyatorların və bərpa olunan enerji mənbələrinin qarşılıqlı təsirini analiz etməyə, həmçinin müxtəlif iş rejimlərində enerji axınlarını proqnozlaşdırmağa imkan verir [3,4].

Enerji axınlarının idarə olunması prosesində **model-predictive control (MPC)** və **fuzzy logic-based control** kimi qabaqcıl nəzarət üsulları istifadə edilir. Bu idarəetmə strukturları sistemin qeyri-xətti dinamikasına uyğun qərar qəbul etmə mexanizmini formalaşdırır və enerji paylanmasını real vaxtda tənzimləyir. Nəticədə, enerji itkiləri azalır, yanacaq sərfi optimallaşır və mikro şəbəkənin ümumi effektivliyi yüksəlir.

Mikro şəbəkələrin simulyasiya modelləri MATLAB/Simulink, HOMER Energy və ya PSCAD kimi proqram mühitlərində qurulur. Bu mühitlərdə aparılan analizlər göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin (xüsusilə günəş və külək enerjisinin) payının artırılması dizel generatorlarının iş müddətini 30%-ə qədər azaldır. Bu, həm texniki baxımdan sistemin ömrünü uzadır, həm də ekoloji baxımdan atmosferə atılan CO_2 və NOx emissiyalarının azalmasına səbəb olur.

Mikro şəbəkə modellərində enerji paylanmasının optimallaşdırılması üçün enerji idarəetmə alqoritmlərinin tətbiqi mühüm rol oynayır. Bu alqoritmlər enerji istehsalını və istehlakını balanslaşdırmaqla yanaşı, akkumulyatorların doldurulma-boşalma rejimini tənzimləyir və bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkənliyini kompensasiya edir. Bu məqsədlə aşağıdakı optimallaşdırma funksiyası istifadə oluna bilər:

$$\boldsymbol{F = min\ (C_{yan..} + C_{itki} + C_{deq.})}$$

Burada: $C_{yan.}$ – dizel generatorlarının yanacaq sərfi ilə bağlı xərclər,

C_{itki} – enerji ötürmə və çevrilmə itkilərindən yaranan xərclər,

$C_{deq.}$ – akkumulyatorların deqradasiyası nəticəsində əmələ gələn əlavə enerji itkisi.

Belə yanaşma mikro şəbəkənin ümumi xərclərini minimuma endirməyə və sistemin uzunmüddətli istismar sabitliyini təmin etməyə imkan verir.

Ekoloji qiymətləndirmə baxımından, mikro şəbəkə sistemlərinin tətbiqi nəticəsində əldə olunan emissiya azalmaları beynəlxalq standartlarla müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə yüksəkdir. Simulyasiya nəticələri göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin payı 40%-ə çatdıqda, karbon emissiyası 35–40%, azot oksidi emissiyası isə 45%-ə qədər azalır. Bu göstəricilər Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (IMO) 2050-ci ilə qədər emissiyaların azaldılması məqsədlərinə tam uyğun gəlir.

Həmçinin, mikro şəbəkələrin tətbiqi gəmi sistemlərində enerji təhlükəsizliyini də artırır. Fərqli enerji mənbələrinin inteqrasiyası nəticəsində enerji təminatında redundans yaranır, bu da sistemin fövqəladə hallarda sabitliyini qoruyur. Məsələn, günəş və külək enerjisinin azalması halında akkumulyator və ya dizel generator avtomatik olaraq enerji balansını bərpa edir.

Müasir elmi yanaşmalar göstərir ki, mikro şəbəkə modellərinin gələcək inkişaf istiqamətləri ağıllı idarəetmə texnologiyalarının daha geniş tətbiqinə əsaslanacaq. Süni intellekt və maşın alqoritmləri enerji istehlakının proqnozlaşdırılmasını, yük dəyişmələrinin avtomatik tənzimlənməsini və enerji paylanmasının optimal səviyyədə saxlanmasını təmin edə bilər. Beləliklə, mikro şəbəkə modelləri yalnız texniki və ekoloji səmərəlilik baxımından deyil, həm də ağıllı gəmi sistemlərinin formalaşması üçün mühüm texnoloji baza kimi çıxış edir [5,6].

Aşağıda elektrikləşdirilmiş dəniz mikro şəbəkəsində bərpa olunan enerji payının artması ilə emissiya azalması arasındakı əlaqəni göstərən qrafikin təsviri göstərilmişdir(cədvəl 1):

Cədvəl 1

Bərpa olunan enerji payının emissiyalara təsiri

Bərpa olunan enerji payı (%)	CO_2 emissiyası azalması (%)	NOx emissiyası azalması (%)
0	0	0
10	8	10
20	16	20
30	27	32
40	35	42
50	40	47

Təhlil göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin payı artdıqca dizel generatorlarının iş yükü azalır və bu da yanacaq sərfini birbaşa şəkildə azaldır. 30%-lik inteqrasiya səviyyəsində sistemdə enerji balansı optimal səviyyəyə çatır, bundan yuxarı artım isə azalan əlavə effektlə müşahidə olunur [6].

Beləliklə, aparılan təhlillər göstərir ki, gəmi mikro şəbəkələrinin qurulması və idarə olunması dəniz nəqliyyatında enerji effektivliyinin artırılması və ekoloji təsirin azaldılması üçün əsas texnoloji istiqamətlərdən biridir. Bu sistemlər enerji mənbələrinin inteqrasiyası, yük balansının tənzimlənməsi və real vaxtda optimallaşdırma imkanları hesabına həm texniki, həm də iqtisadi üstünlüklər yaradır. Müasir idarəetmə alqoritmləri və enerji saxlama texnologiyalarının tətbiqi mikro şəbəkələrin sabitliyini və dayanıqlığını artırır. Bu yanaşma nəticəsində gəmi sistemlərində enerji paylanması daha çevik olur, yanacaq israfı azalır və istismar dövrü uzanır. Mikro şəbəkələrin

inkişafı həm də bərpa olunan enerji texnologiyalarının dəniz nəqliyyatına inteqrasiyasını sürətləndirir və "yaşıl gəmiçilik" konsepsiyasının formalaşmasına zəmin yaradır.

Nəticə. Nəticə olaraq, mikro şəbəkə əsaslı enerji sistemlərinin elektrikləşdirilmiş dəniz nəqliyyatında tətbiqi, enerji paylanmasının optimallaşdırılması və emissiyaların azaldılması baxımından mühüm elmi-texnoloji yenilik hesab olunur. Aparılan tədqiqatlar və beynəlxalq təcrübələr göstərir ki, bu sistemlər enerji səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, istismar sabitliyini və etibarlılığı da təmin edir. Mikro şəbəkələrin strukturunda süni intellekt və proqnozlaşdırıcı idarəetmə alqoritmlərinin tətbiqi real vaxtda enerji axınlarının effektiv idarəsini mümkün edir və sistemin adaptiv davranışını formalaşdırır. Bərpa olunan enerji mənbələrinin payının artırılması nəticəsində karbon və azot oksidi emissiyalarının əhəmiyyətli dərəcədə azalması beynəlxalq ekoloji tələblərə uyğunluğu təmin edir. Beləliklə, mikro şəbəkələr dəniz nəqliyyatında yaşıl texnologiyaların tətbiqini sürətləndirən, enerji təhlükəsizliyini gücləndirən və davamlı inkişaf strategiyalarının reallaşdırılmasına elmi əsas yaradan kompleks sistemlər kimi qiymətləndirilir.

Ədəbiyyat

1. Əliyev E. "Bərpa olunan enerji mənbələrinin dəniz nəqliyyatında tətbiqi problemləri və perspektivləri", Texnika Nəşriyyatı. Bakı, 2023-cü il
2. Həsənov K., Məmmədov N. "Gəmi enerji sistemlərində mikro şəbəkələrin inteqrasiyası və idarəetmə üsulları" Azərbaycan Texniki Universitetinin Elmi Əsərləri, №3, s. 45–52.
3. Rzayev T. "Elektrikləşdirilmiş gəmi sistemlərində enerji balansının optimallaşdırılması" Energetika və Avtomatika Jurnalı, №1, s. 27–34.
4. Иванов, А. П., Кузнецов В. С. Микроэнергетические системы судовых установок. Санкт-Петербург: Судостроение, 2018-140 стр.
5. Смирнова, Е. Н. "Оптимизация управления энергоподачами в судовых микросетях" Энергетика и Электротехника, №7, с. 58–65.
6. Петров М. В. "Гибридные энергетические установки морских судов: анализ и перспективы." Вестник Морского Транспорта, №4, с. 12–20.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Qafarov A.M.

UOT 621.37/39:001.12.18

QLOBAL DƏNİZDƏ FƏLAKƏT ZAMANI ƏMNİYYƏTLİ RABİTƏ SİSTEMİNDƏ (QDFƏRS) RADİOSİQNALLARIN MANEƏLƏRƏ DAVAMLILIĞI: MÖVCUD TEXNOLOGİYALAR VƏ PERSPEKTİVLƏR

Qafarov A.V.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: aydinqafarov1979@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə Qlobal Dəniz Fəlakət və Əmniyyətli Rabitə Sistemində (QDFƏRS) istifadə olunan radiosiqnalların maneələrə davamlılığının təmin edilməsi üçün tətbiq olunan fundamental texnologiyaları və 2025-ci il perspektivindəki inkişaf trendlərindən bəhs olunur. Məqalədə tezlik manipulyasiyası kimi möhkəm modulyasiya növləri, irəli Səhv Düzəltmə (FEC) kodlaşdırma alqoritmləri və Rəqəmsal Siqnal Emalı (RSE) kimi ənənəvi üsulların QDFƏRS-in etibarlılığındakı rolu araşdırılır. Bununla yanaşı, QDFƏRS -in modernizasiyası çərçivəsində VHF Data Mübadilə*

Sistemi (VDMS), Proqramla Müəyyən Edilən Radio (SDR) texnologiyaları, IRİDİUM kimi yeni nəsil peyk xidmətlərinin inteqrasiyası və kiber-təhlükəsizlik kimi yeni çağırışlar müzakirə edilir. Təhlil göstərir ki, gələcək QDFƏRS sistemləri təkcə təbii və texnogen maneələrə deyil, həm də artan məlumat həcmi və qəsdli müdaxilələrə qarşı dayanıqlı olmaq üçün daha adaptiv və kompleks həllərə ehtiyac duyacaqdır.

Abstract. *This article analyzes the fundamental technologies applied to ensure the noise immunity of radio signals in the Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS), as well as the development trends from the perspective of 2025. The paper examines the role of traditional methods such as robust modulation types like Frequency Shift Keying (FSK), Forward Error Correction (FEC) coding algorithms, and Digital Signal Processing (DSP) in ensuring GMDSS reliability. In addition, it discusses new challenges and developments within the GMDSS modernization framework, including the VHF Data Exchange System (VDES), Software-Defined Radio (SDR) technologies, the integration of next-generation satellite services like IRIDIUM, and emerging cybersecurity threats. The analysis indicates that future GMDSS systems will require more adaptive and complex solutions to be resilient not only against natural and man-made interference but also against increasing data volumes and intentional disruptions.*

Аннотация. *В данной статье анализируются фундаментальные технологии, применяемые для обеспечения помехоустойчивости радиосигналов в Глобальной морской системе связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), а также тенденции развития в перспективе до 2025 года. В статье исследуется роль традиционных методов, таких как устойчивые виды модуляции (частотная манипуляция - FSK), алгоритмы упреждающего исправления ошибок (FEC) и цифровая обработка сигналов (DSP) в обеспечении надежности ГМССБ. Наряду с этим, обсуждаются новые вызовы и разработки в рамках модернизации ГМССБ, включая Систему обмена данными в диапазоне УКВ (VDES), программно-определяемые радиосистемы (SDR), интеграцию спутниковых служб нового поколения, таких как IRIDIUM, и новые угрозы кибербезопасности. Анализ показывает, что будущие системы ГМССБ потребуют более адаптивных и комплексных решений для обеспечения устойчивости не только к естественным и техногенным помехам, но и к растущим объемам данных и преднамеренным вмешательствам.*

Açar sözlər: *GMDSS, maneələrə davamlılıq, FSK, FEC, DSP, QDFƏRS modernizasiyası, VDMS, SDR, Iridium GMDSS, kiber-təhlükəsizlik*

Ключевые слова: *ГМССБ, помехоустойчивость, FSK, FEC, DSP, модернизация ГМССБ, VDES, SDR, иридиум ГМССБ, кибербезопасность*

Key words: *GMDSS, noise immunity, FSK, FEC, DSP, GMDSS modernization, VDES, SDR, iridium GMDSS, cybersecurity*

Giriş. Qlobal Dəniz Fəlakət və Təhlükəsizlik Sistemi (QDFƏRS) Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (BDT) Dənizdə İnsan Həyatının Mühafizəsi üzrə Beynəlxalq Konvensiyası (SOLAS) çərçivəsində dənizdə təhlükəsizliyin təmin edilməsi üçün yaradılmış qlobal bir rabitə infrastrukturudur. Sistemin əsas məqsədi fəlakət siqnallarının dərhal ötürülməsini və axtarış-xilasetmə əməliyyatlarının effektiv koordinasiyasını təmin etməkdir. Bu məqsədə çatmaq üçün GMDSS siqnallarının ötürülməsi və qəbulu ən çətin şəraitdə belə fasiləsiz və etibarlı olmalıdır.

Dəniz mühiti radio siqnallarının yayılması üçün olduqca düşmən mühitdir. Atmosfer səsküyü, ionosfer qatındakı dəyişikliklər, digər radio stansiyaların yaratdığı interferensiya və gəminin öz daxili avadanlıqlarından qaynaqlanan texnogen maneələr Siqnal/Maneə Nisbətini (Signal-to-Noise Ratio - SNR) kəskin şəkildə azaldır. Zəif SNR isə məlumatın ötürülməsi zamanı yüksək Bit Xəta Səviyyəsinə (Bit Error Rate - BER) səbəb olur ki, bu da fəlakət mesajlarındakı həyati vacib məlumatların (məsələn, gəminin kimliyi və koordinatları) itirilməsi və ya təhrif olunması deməkdir [1,2,3,4,5].

Bu məqalənin məqsədi, QDFƏRS -in etibarlılığını təmin edən klassik texnoloji həlləri sistemli şəkildə təhlil etmək və 2025-ci ilin reallıqları fonunda sistemin qarşılaşdığı yeni çağırışları və bu çağırışlara cavab verən texnoloji trendləri araşdırmaqdır.

QDFƏRS mühitində maneələrin təsnifati və xarakteristikasi. QDFƏRS siqnallarına təsir edən maneələri iki əsas kateqoriyaya ayırmaq olar:

1. **Təbii (atmosfer) maneələr:** Bu maneələr təbiət hadisələri nəticəsində yaranır.
   - **Atmosfer səs-küyü:** Əsasən ildırım çaxması nəticəsində yaranan genişzolaqlı elektromaqnit səs-küyüdür. Bu, xüsusilə orta dalğa (MF) və qısa dalğa (HF) diapazonlarında rabitəyə ciddi təsir göstərir.
   - **Qalaktik səs-küy:** Kosmosdakı radio mənbələrindən gələn və əsasən VHF və daha yüksək tezliklərdə təsirli olan səs-küy.
   - **İonosferin təsiri:** Günəş aktivliyindən asılı olaraq ionosferin vəziyyətinin dəyişməsi HF siqnallarının sönməsinə və təhrifinə səbəb olur.
2. **Texnogen (insan tərəfindən yaradılan) maneələr:**
   - **İnterferensiya:** Eyni və ya qonşu tezlik kanallarında işləyən digər radio ötürücülərin yaratdığı maneələr.
   - **Sənaye səs-küyü:** Gəminin özündəki elektrik mühərrikləri, generatorlar, kommutasiya avadanlıqları və digər elektron cihazların yaratdığı elektromaqnit şüalanması.
   - **Qəsdli maneələr (Jamming):** Hərbi və ya pirat fəaliyyətləri nəticəsində rabitə kanallarının qəsdən boğulması. Bu, gələcəkdə daha ciddi bir təhdidə çevrilə bilər.

Bu maneələrin ümumi təsiri, qəbuledicinin faydalı siqnalı səs-küy fonundan ayırmasını çətinləşdirir və məlumatların səhvsiz deşifrə olunmasını təhlükə altına alır [1,3,5].

QDFƏRS-də tətbiq edilən ənənəvi maneəyə davamliliq texnologiyalari. QDFƏRS-in yüksək etibarlılığı, bir-birini tamamlayan bir neçə texnoloji qatın tətbiqi ilə əldə edilir.

Möhkəm rəqəmsal modulyasiya: tezlik manipulyasiyası (Frequency Shift Keying-FSK). QDFƏRS-in əsas rəqəmsal alt sistemləri olan Rəqəmsal Seçmə Çağırış (RSÇ) və NAVTEX-də məlumatların ötürülməsi üçün ikili Tezlik Manipulyasiyası (Frequency Shift Keying - FSK) istifadə olunur. Bu metodda "1" və "0" bitləri iki fərqli, lakin bir-birinə yaxın tezliklə ("mark" və "space") kodlaşdırılır.

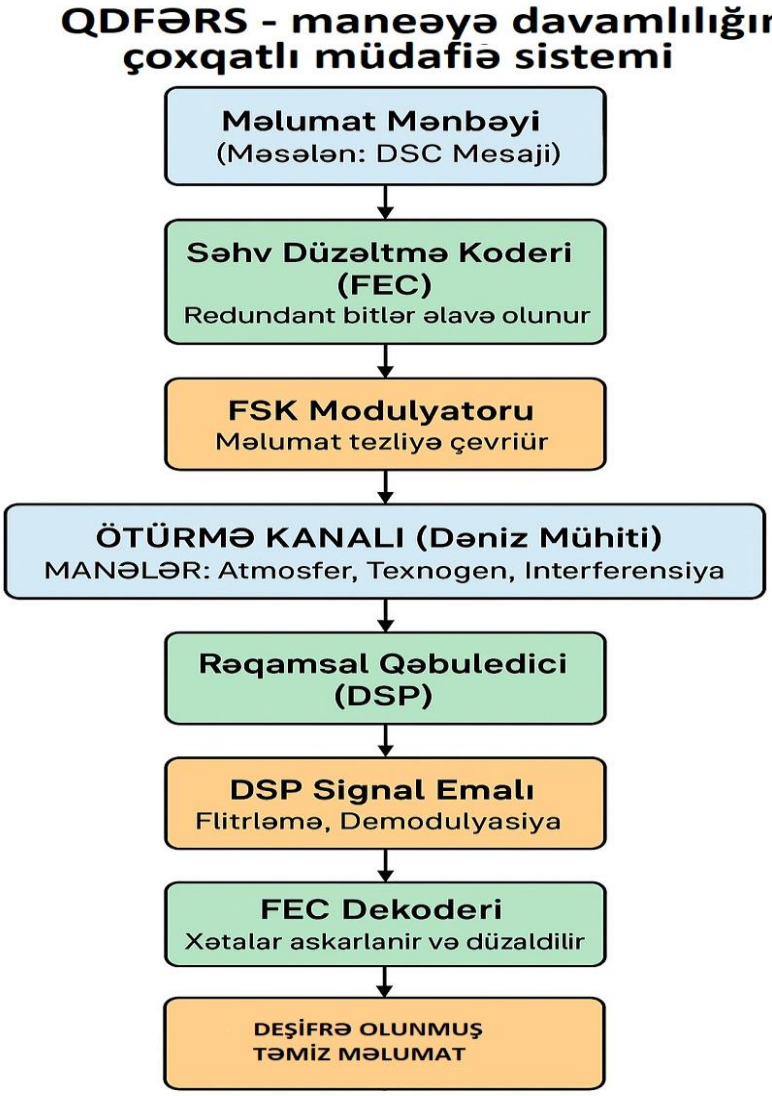
- **Üstünlüyü:** Amplitud dəyişikliklərinə əsaslanan maneələr və siqnal sönmələri FSK siqnalına minimal təsir göstərir, çünki faydalı məlumat siqnalın tezliyində saxlanılır. Qəbuledici yalnız bu iki tezliyin mövcudluğunu aşkarladığı üçün sistem olduqca dayanıqlı olur. RSÇ üçün MF/HF diapazonunda bu tezliklər arasındakı fərq (frequency shift) 170 Hz təşkil edir ki, bu da dar zolaqda etibarlı rabitəni təmin edir.
- **Səhvlərin aşkarlanması və düzəldilməsi: (FEC - ARQ.** Ötürmə kanallarında xətaların yaranması qaçılmazdır. Bu xətalarla mübarizə üçün QDFƏRS-də güclü kodlaşdırma alqoritmləri tətbiq edilir.
- **İrəli səhv düzəltmə (Forward Error Correction - FEC):** Bu metodda ötürülən məlumata əlavə redundant (artıq) bitlər əlavə edilir. Bu bitlər, qəbuledicinin təkrar sorğu göndərmədən müəyyən sayda xətalı biti müstəqil şəkildə bərpa etməsinə imkan verir. NAVTEX və Radioteleks Darzolaqlı Hərfçapedici Qurğu - Narrow-Band Direct-Printing (NBDP) sistemlərində istifadə olunan SITOR-B protokolu FEC-in klassik nümunəsidir. EPIRB fəlakət bikenlərinin 406 MHz siqnalları da peykə çox zəif çatdığı üçün olduqca güclü FEC kodlaşdırmasından istifadə edir.
- **Avtomatik təkrar sorğu (Automatic Repeat reQuest - ARQ):** İkitərəfli rabitədə istifadə olunan bu metodda (məsələn, SITOR-A) qəbuledici məlumat blokunda xəta aşkarladıqda, ötürücüdən həmin blokun təkrar göndərilməsini tələb edir [1,2,3,6,7].

Rəqəmsal siqnal emalı (Digital Signal Processing - DSP). Müasir QDFƏRS avadanlıqları güclü DSP prosessorları ilə təchiz olunur. DSP, analoq siqnalı rəqəmsal formata çevirdikdən sonra

riyazi alqoritmlər vasitəsilə emal edərək siqnalın keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırır. Əsas DSP funksiyaları:

- **Darzolaqlı filtrləmə:** Faydalı siqnalın yerləşdiyi çox dar tezlik zolağını seçərək kənar səs-küyləri və interferensiyanı kəskin şəkildə azaldır.
- **Adaptiv ekvalizasiya:** Siqnalın kanalda məruz qaldığı təhrifləri kompensasiya edir.

Effektiv demodulyasiya: Mürəkkəb alqoritmlər vasitəsilə zəif FSK siqnallarını səs-küy fonunda daha dəqiq deşifrə edir. Şəkil 1-də QDFƏRS siqnalının ötürücüdən qəbuledicyə qədər keçdiyi yolu və hər mərhələdə maneələrə qarşı tətbiq olunan müdafiə mexanizmləri göstərilmişdir.



Şəkil 1. *QDFƏRS-də maneəyə davamlılığın çoxqatlı müdafiə sxemi*

QDFƏRS – də yeni trendlər və çağırışlar. QDFƏRS sistemi statik deyil və texnoloji inkişaflara paralel olaraq təkamül edir. IMO tərəfindən həyata keçirilən QDFƏRS – modernizasiyası proqramı bir sıra mühüm yenilikləri nəzərdə tutur ki, bu da maneələrə davamlılıq konsepsiyasına yeni tələblər qoyur [1,2,3,4].

VHF data mübadilə sistemi (VHF Data Exchange System - VDES) VDES, gələcəkdə ənənəvi VHF DSC və AIS (**Avtomatik İdentifikasiya Sistemi**) sistemlərini birləşdirərək və genişləndirərək daha yüksək sürətli data mübadiləsini təmin edəcək. VDES, gəmi-sahil, gəmi-gəmi

və gəmi-peyk arasında rəqəmsal məlumatların (məsələn, dəniz təhlükəsizlik məlumatları, meteoroloji xəbərdarlıqlar, elektron naviqasiya dataları) ötürülməsini nəzərdə tutur.

- **Yeni çağırış:** Daha yüksək data ötürmə sürəti (məsələn, 32 kbps-ə qədər) daha geniş zolaq və daha mürəkkəb modulyasiya növlərinin (məsələn, QPSK, 16-QAM) istifadəsini tələb edir. Bu modulyasiya növləri FSK-ya nisbətən səs-küyə daha həssasdır.
- **Həll yolları:** VDES standartlarında bu həssaslığı kompensasiya etmək üçün daha güclü və adaptiv FEC alqoritmləri (məsələn, Turbo və ya LDPC kodları) və çoxsaylı ötürmə kanallarından istifadə edən qabaqcıl siqnal emalı texnikaları tətbiq ediləcəkdir. Şəkil 1–də QDFƏRS -də maneəyə davamlılığın çoxqatlı müdafiə sxemi göstərilmişdir [3,4,6,7].

Proqramla müəyyən edilən radio (Software-Defined Radio - SDR). SDR, radio avadanlıqlarının funksionallığının (modulyasiya, filtrləmə, dekodlaşdırma) əsasən proqram təminatı ilə idarə olunduğu bir texnologiyadır.

- **Gələcək üçün əhəmiyyəti:** SDR, QDFƏRS avadanlıqlarına misilsiz çeviklik verir. Gələcəkdə yeni protokollar və ya daha effektiv maneəyə davamlı alqoritmlər yarandıqda, gəmidəki avadanlığı dəyişdirmədən, sadəcə proqram təminatını yeniləməklə sistemi təkmilləşdirmək mümkün olacaq. SDR, həmçinin real vaxt rejimində radioefir şəraitini analiz edərək ən optimal rabitə parametrlərini (tezlik, modulyasiya növü) avtomatik seçə bilən "koqnitiv radio" sistemlərinin tətbiqi üçün zəmin yaradır.

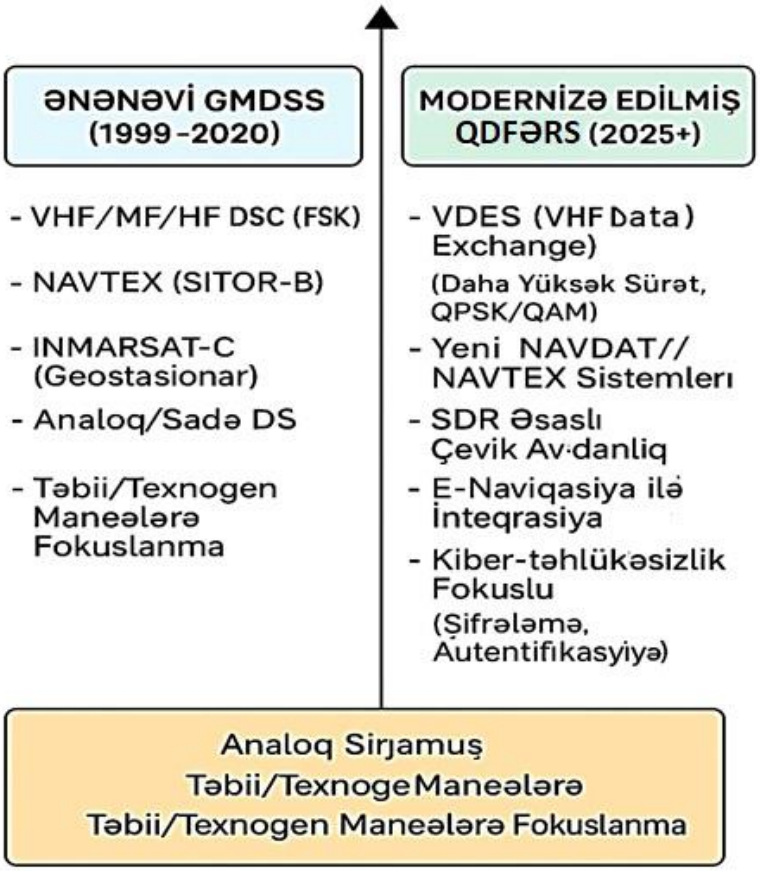
Yeni nəsil peyk xidmətlərinin inteqrasiyası. Ənənəvi olaraq QDFƏRS peyk rabitəsi geostasionar orbitdəki INMARSAT peyklərinə əsaslanırdı. 2020-ci ildən etibarən, aşağı yer orbitində (LEO) yerləşən Iridium peyk şəbəkəsi də QDFƏRS xidmətləri üçün təsdiqlənmişdir.

- **Üstünlükləri:** Iridium, qütb bölgələri də daxil olmaqla, həqiqi qlobal əhatə dairəsi təmin edir. LEO peykləri yerə daha yaxın olduğundan siqnalın gecikməsi (latency) daha azdır və ötürücülər daha az enerji tələb edir.
- **Texnoloji tələblər:** LEO peyklərinin sürətli hərəkəti Doppler sürüşməsi kimi yeni texniki problemlər yaradır. Bu problemlərin həlli üçün peyk terminallarında siqnalın tezliyini və fazasını daimi izləyən və korreksiya edən mürəkkəb DSP alqoritmləri tətbiq olunur.

Kiber-təhlükəsizlik: yeni nəsil "maneə". Rəqəmsallaşma və şəbəkəyə inteqrasiya artdıqca, GMDSS sistemləri yeni növ təhdidlərlə üzləşir: qəsdli kiber-hücumlar.

- **GPS spoofing:** Gəminin mövqeyini təyin edən GPS siqnallarının saxtalaşdırılması. Fəlakət siqnalında yanlış koordinatların ötürülməsi xilasetmə əməliyyatlarının tamamilə iflasa uğramasına səbəb ola bilər.
- **AIS spoofing:** Gəmilərin kimlik və mövqe məlumatlarının saxtalaşdırılması ilə toqquşma riski yaratmaq.
- **Jamming:** Rabitə kanallarının qəsdli şəkildə güclü maneə siqnalı ilə boğulması [1,2,3,4,7].

Müdafiə yolları. Gələcək QDFƏRS protokollarına məlumatların autentifikasiyası (ötürülən məlumatın mənbəsinin təsdiqlənməsi) və şifrələnməsi (encryption) kimi kiber-müdafiə mexanizmlərinin inteqrasiyası zəruridir. Bu, təkcə təbii səs-küyə deyil, həm də "ağıllı" və qəsdli maneələrə qarşı davamlılığı təmin edəcəkdir. Şəkil 2–də QDFƏRS–in təkamülü və modernizasiyası verilmişdir: Bu sxem QDFƏRS-in keçdiyi təkamül yolunu, ənənəvi sistemin fokuslandığı problemlərdən modernizə edilmiş sistemin qarşılaşdığı daha kompleks və çoxşaxəli çağırışlara keçidi vizual olaraq əks etdirir. Şəkil 2 – də QDFƏRS – in təkamülü və modernizasiyası əks :olunmuşdur:



Şəkil 2. *QDFƏRS–in təkamülü və modernizasiyası*

Nəticə. Aparılmış təhlillərdən məlum olmuşdur ki, QDFƏRS rabitə sistemlərində maneələrə davamlılıq konsepsiyası sadəcə siqnalın fiziki bütövlüyünü qorumaqdan çıxaraq, məlumatın məxfiliyini, tamlığını və mənbəsinin doğruluğunu təmin edən hərtərəfli bir təhlükəsizlik çərçivəsinə çevrilir. Bu təkamül, QDFƏRS – in növbəti onilliklərdə də dənizdə təhlükəsizliyin qızıl standartı olaraq qalmasını təmin edəcəkdir.

Ədəbiyyat

1. International Maritime Organization (IMO). (2019). *GMDSS Manual*. London: IMO Publishing. (ISBN: 978-92-801-1719-2).
2. International Telecommunication Union (ITU). (2020). *Radio Regulations, Edition of 2020*. Geneva: ITU.
3. IMO Model Course 1.25. (2015). *General Operator's Certificate for the GMDSS*. London: IMO Publishing.
4. IMO Model Course 1.26. (2015). *Restricted Operator's Certificate for the GMDSS*. London: IMO Publishing.
5. Iridium Communications Inc. (2020). *Iridium GMDSS User Manual*. McLean, VA: Iridium.
6. Johnson, R. C., & J. R. Norris. (2021). "Performance Analysis of VDES R-Mode under Realistic Maritime Interference Conditions". *IEEE Journal of Oceanic Engineering, 46*(3), pp. 789-802.
7. Resolution MSC.496(105). (2022). *Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974*. International Maritime Organization (IMO).

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. Sultanov E.F.

UOT 629.12.066

HİBRİD ENERJİ TEXNOLGİYALARINDAN İSTİFADƏ ETMƏKLƏ GƏMİLƏRDƏ ELEKTRİK ENERJİSİ TƏCHİZATININ YAXŞILAŞDIRILMASI

Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Məmmədov E.M.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: elshen_sultanov@mail.ru, sahib-ismayil@bk, ruemilmemmedoglu@gmail.com

Xülasə*. Hal hazırda daha yaşıl gəmiçilik dünyanın ən aktual mövzularından biridir. Avropa İttifaqı 2050-ci ilə qədər karbon qazı emissiyalarını 80-95% azaltmağı hədəfləyib ki, bu da bütün nəqliyyat sektorlarının qarşısında duran ən mühüm məsələlərdən biridir. Gəmilərdə hibrid enerji texnologiyalarının tətbiqi yanacaq sərfini azaltmağa və karbon qazı emissiyasını azaltmağa imkan verir. Həmçinin, məqalədə yüksək qiymətli neft məhsullarından istifadənin azaldılması və qaz emissiyalarının (tullantıların) minimuma endirilməsi məqsədi ilə hibrid enerjinin istifadəsi məsələləri də araşdırılmışdır.*

Abstract. *Greener shipping is currently one of the most pressing issues in the world. The European Union has set a target of reducing carbon emissions by 80-95% by 2050, which is one of the most important issues facing all transport sectors. The introduction of hybrid energy technologies on ships allows for reduced fuel consumption and reduced carbon emissions. The article also examines the use of hybrid energy to reduce the use of high-cost petroleum products and minimize gas emissions.*

Аннотация. *Экологичность судоходства в настоящее время является одной из самых актуальных проблем в мире. Европейский союз поставил цель сократить выбросы углерода на 80–95% к 2050 году, что является одной из важнейших задач для всех транспортных секторов. Внедрение гибридных энергетических технологий на судах позволяет снизить расход топлива и сократить выбросы углерода. В статье также рассматривается применение гибридной энергетики для сокращения потребления дорогостоящих нефтепродуктов и минимизации выбросов газов*

Açar sözlər: *gəmi, elektrik təchizatı, bərpa olunan enerji, günəş enerjisi, külək enerjisi, hibrid enerji sistemləri*

Key words*: ship, power supply, renewable energy, solar energy, wind energy, hybrid energy systems*

Ключевые слова: *судно, энергоснабжение, возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, энергия ветра, гибридные энергетические системы*

Giriş. Bərpa olunan enerji mənbələri əsasən günəş, külək, geotermal, hidroenerji, biokütlə, dalğa enerjisi, qabarma və çəkilmə enerjisi kimi qruplaşdırılır. Bərpa olunan enerjini təbii mənbələrdən əldə edilə bilən və özünü daim yeniləyən bir enerji mənbəyi olaraq adlandırmaq mümkündür. Həmçinin, bərpa olunan enerji növləri ətraf mühitə zərər verən karbon emissiyalarını azaldır və enerji məsələsində xaricdən asılılığın azaldılması kimi məqamlar baxımından olduqca əhəmiyyətlidir. Bərpa olunan enerji hazırda dünyada quraşdırılmış ümumi enerji istehsalının üçdə birini təşkil edir. 2018-ci ildə təbii qaz və bərpa olunan enerji mənbələrinin hesabına ilkin enerji istehlakı sürətlə artıb. Bununla bərabər, karbon emissiyaları 7 il ərzində ən yüksək artımla müşahidə olunub [1].

Günəş panellərinin əsas xüsusiyyətləri aşağıdakılardır:

Səmərəlilik. Bu xüsusiyyət bir çox amillərdən asılıdır, misal olaraq, günəş işığının intensivliyi, batareyanın səthinə düşən şüaların düşmə bucağı, ətraf mühitin temperaturu və s.

Güc. Günəş panellərinin gücü dedikdə onun müəyyən müddət ərzində istehsal edə biləcəyi elektrik enerjisinin miqdarı nəzərdə tutulur və Vatt (W) ilə ölçülür.

Gərginlik. Günəş panellərinin gərginliyi tətbiq sahəsindən asılı olaraq dəyişilə bilər. Bu panellərin işə başlamazdan əvvəlki gərginliyi 30-40V, işləmə gərginliyi isə18-22 V olur. Panellərin standart olaraq 12 V, 24 V və ya 48 V gərginlikləri istifadə olunur. Bu gərginlikləri əldə etmək üçün bir neçə günəş paneli bir biri ilə birləşdirilməlidir.

Ölçülər və forma. Günəş panellərinin ölçüsü və forması konskruktiv icrasından və quraşdırılma yerindən asılıdır. Ən geniş yayılmış günəş panelləri 60 və 72 hüceyrəli panellərdir. Formasına görə günəş panelləri düzbucaqlı, yumru, bütün həcmli və s. olurlar. Ən geniş yayılan forma düzbucaqlı panellərdir.

Gəmilərdə istifadə olunan günəş panelləri aşağıda qeyd olunan məqsədlər üçün istifadə oluna bilər:

– Elektrik işıqlanmasında və gəmidə istifadədə olan elektrik avadanlıqlarını enerji ilə təmin etmək üçün;

– gəminin naviqasiya, kommunikasiya sistemini qidalandırmaq üçün;

– gəmilərdə soyutma və havalandırma sistemlərinin işləməsini təmin etmək üçün;

– sərnişin daşıyan kiçik və irihəcmli gəmilərdə istilik və sərinlətmə sistemlərinin qidalanmasını təmin etmək üçün;

– quru yük, konteyner, neft və neft məhsulları daşıyan gəmilərdə, kran gəmilərində kiçik və orta güc tələb edən enerji tələbatçılarını elektrik enerjisi ilə təmin etmək üçün.

Gəmilərdə günəş panellərinin istifadəsi, ənənəvi enerji mənbələrinə nisbətən iqtisadi cəhətdən əlverişlidir. Günəş panelləri, əlavə yanacaq və enerji ehtiyatlarını minimuma endirərək, gəminin ümumi iqtisadi xərclərini əhəmiyyətli dərəcədə aşağı salır. Bununla yanaşı günəş panellərinin istifadə yanacaq sərfiyyatına qənaət etməklə xərclərin daha da azalmasına gətirib çıxarır. Bu məsələdən sonra tədqiqatçılar və texnologiya tərtibatçıları yanacaq sərfiyyatını azaldılması üçün hibrid sistemləri araşdırmağa başladılar. Baxmayaraq ki, hibrid sistemlər üçün müxtəlif konsepsiyalar və ideyalar 1990-cı ildən etibarən inkişaf etdi bu günə qədər heç bir okean gəmisində bu sistem tətbiq edilməmişdir [3].

Əsas hissə. Günəş enerjisinin dəniz əməliyyatlarına inteqrasiyası gəmilərin dənizlərdə naviqasiya üsullarında əsas dəyişikliyi göstərir. Günəş texnologiyasının bu şəkildə tətbiqi ənənəvi yanacaq mənbələrindən qəti şəkildə uzaqlaşmaq deməkdir, təkcə xərclərə qənaət deyil, həm də ətraf mühitə təsirin əhəmiyyətli dərəcədə azaldılması vəd edir. Günəş enerjisinin gəmi elektrik təchizatında istifadəsini mümkün edən əsas texnologiyalar bunlardır:

Hibrid sistemlər – dizel generatorları ilə birlikdə istifadə edilən kombinasiya olunmuş enerji sistemləri. Belə sistemlər günəş enerjisindən maksimum səmərə əldə etmək üçün müxtəlif enerji mənbələrinin sintezini təmin edir. Hibrid enerji sistemləri həmçinin elektrik akkumulyatorları ilə birləşdirilərək enerji saxlanmasını və sabit enerji təminatını mümkün edir.

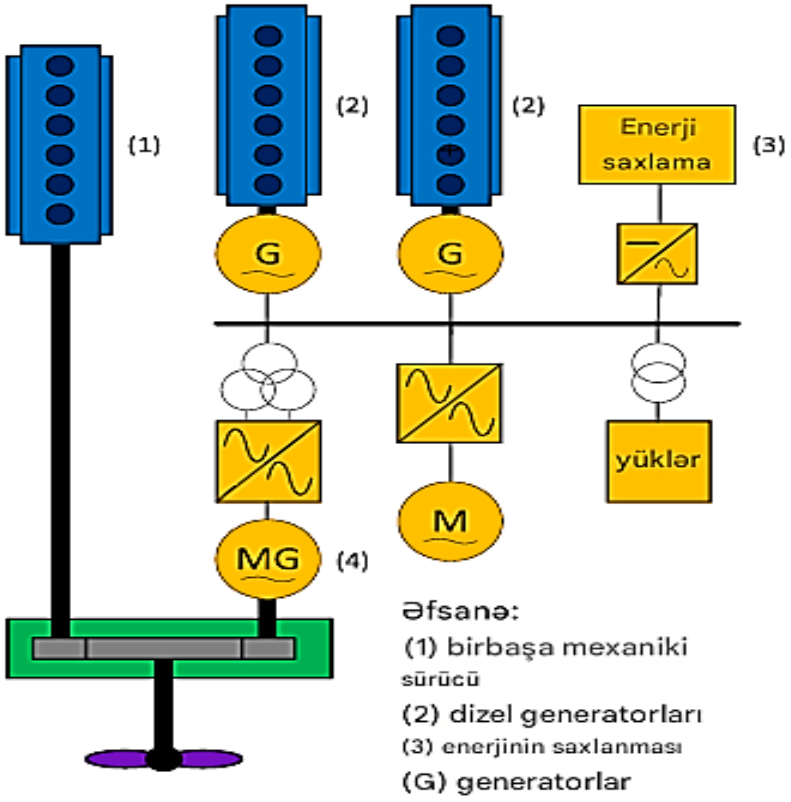
Termal günəş sistemləri – suyun istiliyinin təmin olunması. Gəmilərdə isti su təminatı və bəzi istilik prosesləri üçün istifadə olunur. Bu sistemlər günəş enerjisindən istifadə edərək suyun qızdırılmasını təmin edir və bu yolla ənənəvi yanacaq sərfiyyatını azaldır.

Fotovoltaik (PV) panellər – gündəlik enerji istehlakını qarşılamaq üçün. Bu panellər günəş işığını elektrik enerjisinə çevirərək, gəmi elektrik şəbəkəsinə qoşula bilir. Hazırda silisium əsaslı panellər daha geniş yayılmışdır, lakin yeni nəsil tandem və perovskit əsaslı panellər daha yüksək səmərəliliyə malikdir.

Günəş enerjisini dəniz gəmilərində alternativ yanacaq kimi tətbiq edərkən, panellərin effektiv yerləşdirilməsi və əlverişsiz hava şəraitində performans kimi texniki problemlər müəyyən

edilmişdir. Böyük yük gəmilərində günəş inteqrasiyasının iqtisadi səmərəliliyi müzakirə mövzusu olaraq qalır [4].

Hibrid mühərriklə hərəkət edən və hibrid enerji təchizatı ilə işləyən sistemlər, birbaşa mexaniki ötürücünün (1) (şəkil 1) maksimum səmərəliliyini və əsas mühərrik(lər)dən (2) alınan yanacaq enerjisi ilə enerji saxlama sistemindən (3) alınan elektrik enerjisinin çevikliyini birləşdirir. Aşağı dartıcı gücdə gəmini irəli aparmaq üçün elektrik ötürücü (4) istifadə edilə bilər və bu zaman əsas mühərrik (1) söndürülür. Elektrik ötürücü eyni zamanda generator funksiyasını da yerinə yetirə bilər.



Şəkil 1. *Tipik hibrid hərəkət sistemində hibrid enerji təchizatı*

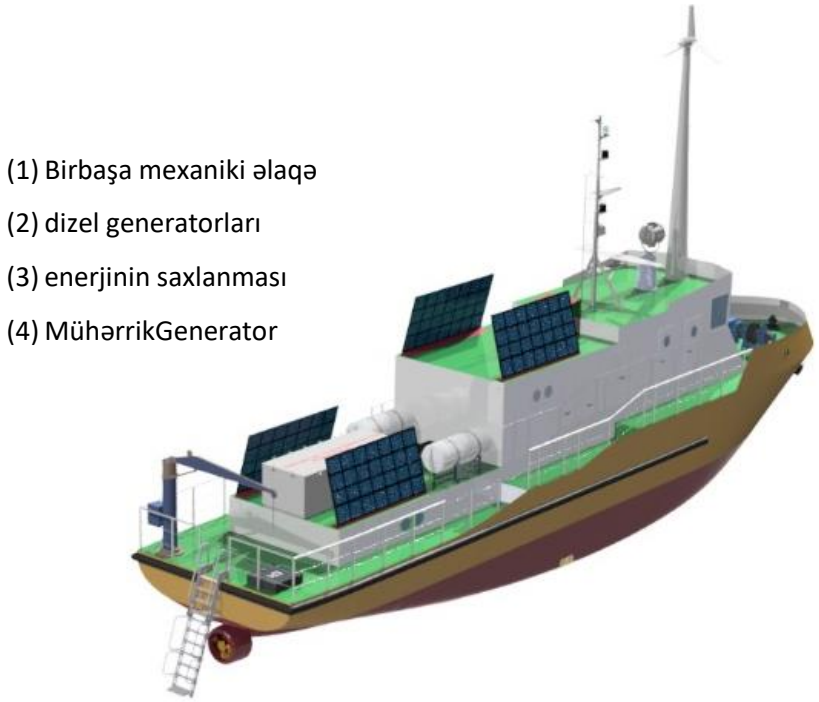
Hibrid hərəkət və hibrid enerji təchizatı ilk dəfə liman yedəklərində geniş şəkildə araşdırılmışdır. Bu araşdırmalardan sonra, Damen 2014-cü ildə hibrid hərəkət və hibrid enerji təchizatı ilə ilk yedəyi təqdim etdi. Gəminin ümumi təsviri şəkil 2-də göstərilmişdir.

Əlavə olaraq, hibrid hərəkət və hibrid enerji təchizatı Feadship tərəfindən 2015-ci ildə buraxılan "Savannah" yaxtasında tətbiq olunmuşdur. Müəlliflərin ən dəqiq məlumatlarına görə, hazırda yedəklər və yaxtalar hibrid hərəkət və hibrid enerji təchizatı kombinasiyasının araşdırıldığı və ya tətbiq edildiyi yeganə tətbiqlərdir [4].

Hibrid enerji sistemlərinin bir neçə növü vardır. *Günəş və dizel hibrid enerji sistemləri* günəş enerjisini və dizel generatorlarını birləşdirərək enerji təmin edir. *Külək və günəş hibrid enerji sistemləri* külək turbinləri və günəş panellərini birləşdirərək sabit enerji istehsalını təmin edir. Elektrik və daxili yanma mühərrikləri hibrid sistemləri avtomobillərdə və gəmilərdə istifadə olunur və yanacaq istehlakını azaldır. Bərpa olunan enerji və enerji saxlama hibrid sistemləri isə enerji saxlama cihazları ilə birləşdirilərək enerji təchizatının sabitliyini təmin edir.

Bu sistemlərin bir çox üstünlüyü vardır. Birincisi, müxtəlif enerji mənbələrinin birləşməsi sistemin səmərəliliyini artırır. İkincisi, bərpa olunan enerji mənbələri ilə ətraf mühitə təsir azalır.

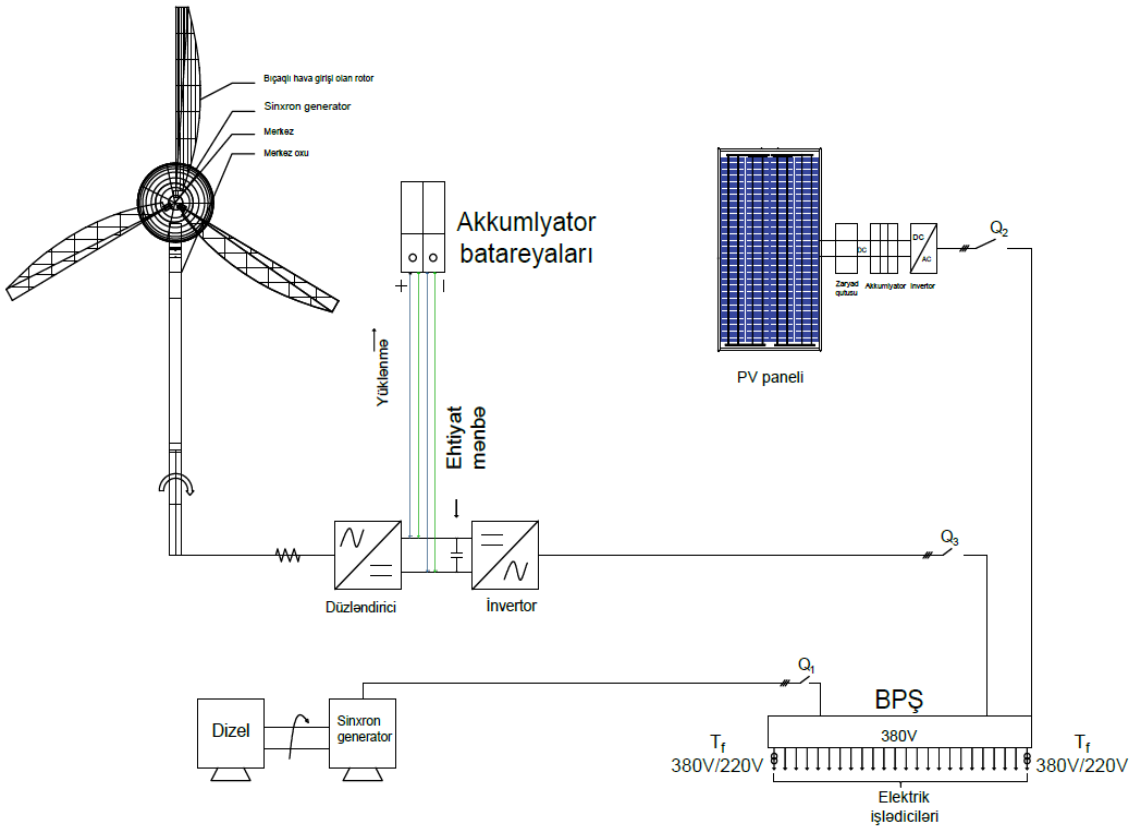
Üçüncüsü, hibrid sistemlər enerji təchizatının dayanıqlığını artırır və şəbəkə üzərindəki yükləri azaldır. Dördüncüsü, bu sistemlər uzun müddət ərzində əməliyyat xərclərini azaldır. Hibrid enerji sistemləri müxtəlif sahələrdə tətbiq olunur [8].



Şəkil 2. *Külək və günəş hibrid enerji sistemləri mövcud olan gəminin ümumi görünüşü*

Gəmilərdən çirklənməsinin qarşısının alınması Beynəlxalq Konvensiyanın (MARPOL) Ek-VI Maddəsin 13 və 14 -cü qaydaları ilə gəmilərdən buraxılan NOx, SOx və PM emissiyalarının məhdudlaşdırılması planlaşdırılmışdır. MARPOL Ek-VI ya görə gəmi dizel mühərrikinin tutumuna və inşa ilinə bağlı olaraq NOx emissiya yayma meyarları müəyyənləşmişdir. Bundan əlavə, gəmi yanacaqlarında icazə verilən maksimum kükürd tərkibi 2020 -ci ilinə qədər 3,5% -dən 0,5% -ə endirmək qərarı verilmişdir. Həmçinin, MARPOL Ek-VI çərçivəsində, Baltik dənizi, Şimal Dənizi, Birləşmiş Dövlətlər Karib Dənizi və Şimali Amerikanı əhatə edən bölgələrin bəzi hissələri Emissiya (tullantıya) Nəzarət Sahəsi (ECA) olaraq müəyyən edilmişdir. Bu ərazilərdə fəaliyyət göstərən gəmilərin 2015-ci il etibarı ilə kükürd dərəcəsi 0,1% -dən çox olmayan dəniz yanacağından istifadə etməli olduqları müəyyənləşdirilmisdir.

Dalğıc gəmilərində tətbiq edilmiş günəş-külək enerjisi, dizel-batareya hibrid sistemində istifadə edilmiş elektrik stansiyasının sxematik quruluşu ilə tanış olaq. Hidroqrafik tədqiqat gəmilərinin elektrik stansiyası F-76 dəniz dizel yağı (MDO) ilə işləyən dizel generatorlarından və yanma enerjisi tədarükü olan elektrik mühərrikindən ibarətdir. 1-ci sxematik şəkildən göründüyü kimi əsas mühərrikə paralel olaraq alternativ enerji mənbələrindən qidalanan, yanacağa qənaət edən və eyni zamanda atmosfer çirklənməsinin qarşısını alan hibrid təkan verici sistemə inteqrasiya edilmiş güc mənbəyi (batareya) vardır. Sistemin üstün cəhəti alternativ enerjidən istifadə edən mühərrikə gedən enerji mənbəyinin istənilən vaxt dəyişdirilə bilməsidir. Beləki, mühərrik lazım gəldikdə dizel yanacağından əldə edilən enerjidən, lazım gəldikdə isə digər alternativ enerji mənbələrindən qidalanmaq funqsiyasına malikdir. Göründüyü kimi, alimlər mürəkkəb dinamik effektləri özündə birləşdirən yeni model günəş enerjisi, dizel-batareya hibrid sistemində işləyən mühərrikin effektivlik dərəcəsini yoxlayaraq nəticə almağa çalışırlar.



Şəkil 3. *Günəş–külək və ənənəvi (hibrid) energetik sistemin birxətli sxemi*
Q_1-generatorun seksiya avtomat açarı, Q_2- günəş enerjisinin seksiya avtomat açarı,
Q_3 – külək enerjisinin seksiya avtomat açarı

Şəkil 3–də günəş, külək və ənənəvi (hibrid) enerjiyə malik baş paylayıcı şitin (BPŞ –nin) birxətli sxemi qurulmuşdur. Burada Q1 avtomat açarı vasitəsi ilə dizel generatorun elektrik enerjisi BPŞ–nin sol seksiyalarında mövcud olan işlədicilərə, Q2 avtomat açarı vasitəsi ilə günəş panellərindən alınan, həmçinin Q3 avtomat açarı vasitəsi ilə külək turbinlərindən alınan elektrik enerjisini BPŞ–nin sağ seksiyalarında mövcud olan işlədicilərə, elektrik enerjisi vermək üçün istifadə edilir.

İstismar rejimləri. Rusiya dəniz Registri qaydalarına (Hissə Xİ, Fəsil 26.3) əsasən, gəmilərdə əsas elektrik enerjisi mənbəyi qismində Litium-İon akkumulyator sistemləri (LİAS) istifadə oluna bilərlər. Qəza elektrik enerjisi və keçid qəza elektrik mənbəyi qismində də Litium-İon akkumulyator sistemləri tətbiq oluna bilər. Əlavə elektrik enerjisi mənbəyi qismində isə LİAS, superkondensator sistemləri (SKS), istilik elementləri (İE) və günəş batareyaları (GB) istifadə oluna bilərlər. LİAS əsas elektrik enerji mənbəyi qismində istifadə olunduğu halda, əlavə olaraq başqa otalarda yerləşdirilən 2 LİAS nəzərdə tutulmalıdır.

Dolum və boşalma rejimləri. Statik elektrik enerji mənbələri (SEM), temperaturun maksimal buraxıla bilən qiymətdən yuxarı artmasının qarşısını alan konstruksiyada hazırlanmalıdırlar. SEM gərginliklərin, cərəyanların və temperaturların stehsalçı tərəfindən qoyulmuş hüdudlarda istismar edilməlidirlər. Dolum-boşaldılma qurğuları elə layihələndirilməlidirlər ki, dolum və boşalma prosesində dolum rejiminin, gərginlik, cərəyan və temperatur istehsalçı tərəfindən verilmiş məhdud qiymətlərindən kənara çıxmasın.

Statik elektrik enerji mənbələrinin mühafizə, nəzarət və işarə qurğuları. Dolum-boşaldılma qurğuları LİS – lokal nəzarət, idarəetmə, mühafizə və işarə sistemi ilə idarə edilməlidir.

LİS aşağıdakı mühafizə funksiyalarını təmin etməlidir:

dolum və boşalma cərəyanının məhdudlaşdırılması;
cərəyana görə artıqyüklənmə;
maksimal və minimal gərginlik;
artıq dərəcədə qızmadan;
LİS aşağıdakı ölçmə funksiyalarını təmin etməlidir:
Blokların gərginliyi;
Blok və modulların temperaturu;
Çıxış cərəyanı.
Gəmi qəza-xəbərdalıq işarə sisteminə (QİS) aşağıdakı parametrlər ötürülür:
Blok və ya modulun yüksək temperaturu;
Yüksək və ya aşağı gərginlik;
Batareyanın şəbəkədən ayırılması;
Avtomat açarın işə düşməsi;
Verilənlərin ötürülməsində imtina;
Soyuducu mühütin sızması.

Gəmilərdə hibrid enerji sistemlərinin, xüsusilə **termal günəş enerjisi və fotovoltaik panellərin birlikdə istifadəsi**, enerji səmərəliliyini artıraraq yanacaq sərfiyyatını azaldır və ekoloji təsirləri minimuma endirir [9]. Gələcəkdə bu texnologiyanın inkişafı və geniş tətbiqi dəniz nəqliyyatında ekoloji dayanıqlılığı təmin etməyə kömək edəcəkdir.

Nəticə. Alternativ enerji sistemlərinin dalğıc gəmilərində də tətbiq potensialının olması müəyyən misallarla araşdırılmışdır. Atmosfer çirklənməsinin qarşısının alınması məqsədi ilə dövlətlər tərəfindən bağlanmış beynəlxalq müqavilələr nəticəsində gəmiləçilik təşkilatlarına tətbiq edilən məhdudiyyətlərdən də göründüyü kimi, bu tip layihə və konsepsiyalar artaraq gələcək illərdə daha da qabarıq formada özünü biruzə verəcəkdir. Gəmilərin hərəkətvericilərində istifadə edilən güc mənbələrinin bir hissəsini qarşılaya biləcək günəş-külək enerjisi, dizel-batareya hibrid sistemi ilə bağlı görülmüş işlərdən, həyata keçirilmiş layihələrdən və həyata keçirilməsi planlaşdırılan layihələrdən aydın görünürki, sıfır emissiyalı təmamilə bərpa olunan enerji mənbələri ilə işləyən nəqliyyat gəmiləri konsepsiyası gələcəkdə tam şəkildə reallığa çevriləcəkdir və öz yerini tutacaqdır. Hibrid sistemlərin istifadəsi səs-küyü və vibrasiyanı azaltdığı üçün sərnişin gəmilərində və tədqiqat gəmilərində rahatlığı artırır. Bundan əlavə, dizel mühərriklərin istismar müddəti uzandığına görə texniki xidmət xərcləri azalır. Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (IMO) emissiya tələblərinə uyğunluq təmin edildiyi üçün bu sistemlər gələcəkdə daha geniş yayılacaqdır. Ümumilikdə, hibrid enerji sistemlərinin tətbiqi dəniz nəqliyyatında ekoloji, iqtisadi və texniki baxımdan mühüm üstünlüklər yaradır. Bu texnologiyaların inkişafı və tətbiqinin genişlənməsi yaşıl enerji keçidinə və dəniz sənayesinin davamlı inkişafına töhfə verəcəkdir.

Gələcəkdə bu texnologiyaların daha çox yayılacağı və inkişaf edəcəyi gözlənilir. Günəş enerjisi və hibrid sistemlərin birgə istifadəsi dəniz nəqliyyatında yaşıl enerji keçidini sürətləndirərək gəmiçilik sənayesində inqilabi dəyişikliklərə səbəb olacaqdır.

Ədəbiyyat

1. Internal Maritime Organization, “Marine Casualties and Incidents” Incident Data,” GISIS Mar. Casualties Incidents, March, 2020, Accessed: Oct. 19, 2020. [Online]. Available: https://gisis.imo.org/Public/MCI/Default.aspx.
2. Sultanov E.F., İsmayılov S.S. “Gəmilərdə alternativ enerji mənbələrindən istifadə imkanlarının araşdırılması”/ ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2021, səh. 151-157
3. Sultanov E.F., İsmayılov S.S. “Külək turbinləri və onların gəmilərdə tətbiqinin araşdırılması/”. ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2022, səh., səh. 104-111
4. Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Əlicanov R.R. “Günəş panelləri və onların gəmilərdə tətbiqinin

araşdırılması/". ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2023, səh., səh. 110-118.
5. Sultanov E.F., Məmmədov E.M., Əlicanov R.R. Hibrid texnologiyalardan istifadə etməklə gəmilərdə enerji səmərəliliyinin artırılması. "Elm və təhsilin əsasları" XIII Beynəlxalq elmi konfrans. Bakı 2025, səh. 236-240
6. T. Salameh, M. A. Abdelkareem, A. Olabi, E. T. Sayed, M. Al-Chaderchi, and H. Rezk, "Integrated standalone hybrid solar pv, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in khorfakkan, united arab emirates," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, no. 8, pp. 6014–6027, 2021.
7. V.J. Jimenez, H. Kim, and Z.H. Minima review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry, Journal of Cleaner Production, 2022, 366: 132888.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib dos. İsmayılov A.Ş.

UOT 62.83.52

GƏMİ ELEKTRİK MÜHƏRRİKLƏRİNİN FIRLANMA SÜRƏTLƏRİNİN TİRİSTOR GƏRGİNLİK TƏNZİMLƏYİCİLƏRİ İLƏ TƏNZİM OLUNMASININ ÜSTÜNLÜKLƏRİ

Sultanov E.F., Bayramova İ.P., Həsənov E.A.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: *elshen_sultanov@mail.ru, genclik76@mail.ru, hasanov.079@mail.ru*

Xülasə. *Məqalədə gəmi elektrik intiqallarının fırlanma sürətlərinin tənzim olunmasında tiristor gərginlik tənzimləyicilərinin müsbət cəhətləri qeyd edilmişdir. Həmçinin məqalədə tiristorların enerji itkisini hədsiz dərəcədə azaltmağa kömək edən effektiv açarlar kimi istifadə olunduğu, səssiz işləmə xüsusiyyətinə, yüksək dəqiqliklə və sürətlə gərginlik və cərəyanı tənzimləmə imkanına malik olması araşdırılmışdır.*

Abstract. *The article highlights the positive aspects of thyristor voltage regulators in regulating the rotational speeds of ship electrical drives. The article also examines the use of thyristors as effective switches that help to significantly reduce energy loss, their silent operation, and the ability to regulate voltage and current with high accuracy and speed.*

Аннотация. *В статье отмечены положительные стороны применения тиристорных регуляторов напряжения при регулировании частоты вращения судовых электропривод. Также рассмотрено применение тиристоров в качестве эффективных коммутаторов, позволяющих существенно снизить потери энергии, их бесшумность, а также возможность регулирования напряжения и тока с высокой точностью и быстродействием.*

Açar sözlər: *gəmi, elektrik intiqalı, asinxron mühərrik, fırlanma sürəti, tiristor, gərginlik tənzimləyicisi*

Key words: *ship, electric drive, asynchronous motor, rotation speed, thyristor, regulator voltage*

Ключевые слова: *судно, электропривод, асинхронный двигатель, скорость вращения, тиристор, регулятор напряжения*

Giriş. Üçfazalı tiristor gərginlik tənzimləyiciləri dəyişən cərəyan dövrələrində gərginliyi tənzimləmək üçün geniş istifadə olunur. Bu tənzimləyicilərdə tiristorlar yarımkeçirici açarlar kimi

istifadə olunur, qapı impulsunun vaxtını dəyişərək dəyişən cərəyanda sinusoidal dalğanın müəyyən bir hissəsini keçirir və bununla da çıxış gərginliyini tənzimləyir. Bu texnologiya, ağır sənaye avadanlıqlarında istifadə olunan asinxron mühərriklərin gərginliyini tənzimləmək üçün səmərəli bir üsuldur.

Məlum olduğu kimi asinxron maşınlar dünyada ən çox inkişaf tapmış elektrik maşınlarıdır. Onlar əsas etibari ilə elektrik mühərrikləri kimi xalq təsərrüfatının bütün sahələrində geniş miqyasda istifadə edilir və elektrik enerjisini mexaniki enerjiyə çevirən ən əsas çeviricilərdir. Hazırda asinxron mühərriklər dünyada istehsal olunan elektrik enerjisinin yarıdan çoxunu sərf edir və əksər mexanizmlərin elektrik intiqalı kimi çox geniş tətbiq edilir. Buna səbəb asinxron mühərriklərin quruluşunun sadəliyi, başqa mühərriklərə nisbətən ucuz başa gəlməsi, etibarlı işləməsi və F.İ.Ə-nın yüksək olmasıdır. Çox nadir hallarda asinxron maşından elektrik generatoru kimi də istifadə olunur. Bundan başqa asinxron maşın gərginlik və faz tənzimləyicisi, tezlik və faz çevricisi və s. bu kimi müxtəlif rejimlərdə də işlədilir [1,2].

Son vaxtlar məişət elektrik avadanlıqları üçün birfazalı asinxron mühərriklərin tətbiqi geniş vüsət almışdır. Hazırda texnikanın bir çox sahələrində müxtəlif modifikasiyalı asinxron maşınlar, o cümlədən, icra mühərrikləri, taxogeneratorlar, selsinlər, dönən (fırlanan) transformatorlar və s. geniş miqyasda tətbiq edilir. Son zamanlar dünyanın bir sıra ölkələrində asinxron maşınların istehsalına, istismarına və təkmilləşdirilməsinə böyük diqqət ayrılır.

Hal-hazırda asinxron mühərriklər dünyada istehsal olunan elektrik enerjisinin yarıdan çoxunu sərf edir və əksər mexanizmlərin elektrik intiqalında geniş tətbiq edilir. Təcrübələr göstərir ki, asinxron maşının generator rejimində istifadəsi nadir hallarda baş verir. Bundan başqa, asinxron maşın gərginlik və faza tənzimləyicisi, tezlik və faza çeviricisi və s. bu kimi müxtəlif rejimlərdə də işlədilir [1,2].

Əsas hissə. Gəmi elektrik intiqallarında tətbiq edilən üçfazalı qısaqapanmış rotorlu asinxron mühərriklərində sürətin məhdud həddə tənzimlənməsinin və işə buraxma cərəyanın aşağı salınması üçün istifadə olunan üsullardan biri də stator dolağında gərginliyin tənzim olunmasıdır. Bu məqsədlə hazırda transformator tipli gərginlik tənzimləyicilərindən əlavə, tiristor gərginlik tənzimləyicilərindən də geniş istifadə olunur.

Ventilyasiya sisteminin hava sərfiyyatının dəyişməsi, nasosların məhsuldarlığının idarəedilməsi, qurğunun müəyyən hərəkət edən detallarının sürətlərinin tənzimlənməsi və məhsuldarlığın lazım olan səviyyəsi üçün mühərriklərin fırlanma sürətlərinin tənzimlənməsi zəruridir.

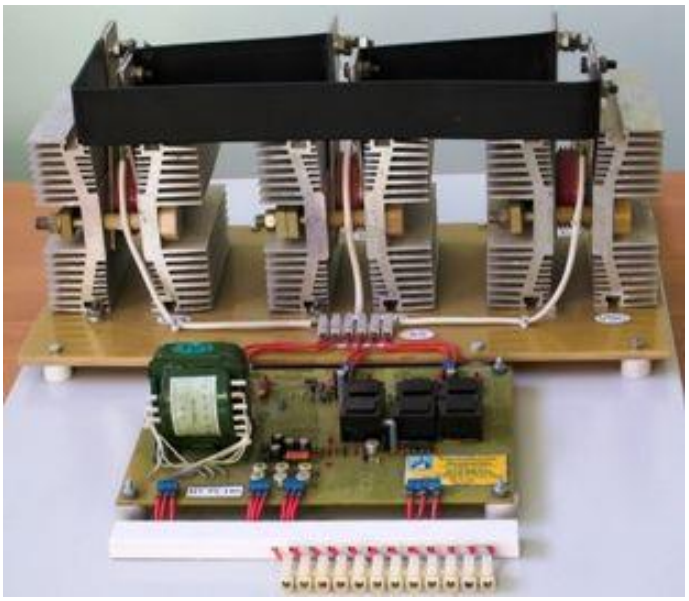
Baxmayaraq ki, istehsalatda mexanizmlərin fırlanma sürətlərini tez-tez tənzimləmək məqsədi ilə tezlik tənzimləyicilərindən geniş istifadə olunur, bu növ intiqal tənzimləyicilərin istismarında müəyyən çatışmazlıqlar mövcuddur.

Qeyri-sinusoidal formalı qidalandırıcı gərginliyin olduğu halda mühərrikdə yüksək harmonikalarla bağlı itkilər əmələ qəlir. Bu itkilərin azalması üçün tezlik tənzimləyicilərində xüsusi filtrlər və geniş impuls modulyasiyalı idarəetmə tətbiq edilir. Geniş impuls modulyasiyalı idarəetmənin tətbiqi zamanı çox sayda qoşma-açma əməliyyatları nəticəsində impulsların miqdarı artır və statorun, rotorun dolaqlarında artıq gərginliklər yaranır. Sadalanan proseslər tənzimləyicilərin tez sıradan çıxmasına səbəb olur. Tezlik tənzimləyicisinin əsas digər nöqsanlarından biri də yarımkeçirici açarların yüksək sürətdə işləməsindən tez sıradan çıxmasıdır. Bu da kommutasiya elementləri arasında yüksək gərginliklərin yaranmasına gətirir. Yüksək gərginliklər öz növbəsində isə yastıqlarda qığılcımların yaranmasına və daha sonra onların sıradan çıxmasına gətirib çıxarır. Əlavə dolaqlarda qırılmalar, mühərrikdə səsin və vibrasiyanın yaranması da baş verir. Tezlik tənzimləyicilərin tətbiqi xüsusi yanaşma tələb edir. Həmçinin bu qurğuların iqtisadi baxımdan çox bahalı olması bəzi tənzimlənən mexanizmlərdə (yük nəqliyyatında, nasoslarda, ventilyasiya sistemində və s) tətbiqini məhdudlaşdırır [3,4,5].

Belə hallarda asinxron mühərriklərin fırlanma sürətlərinin tezliyini statora verilən gərginliyin qiymətini dəyişməklə daha sərfəli üsulla tənzimləmək mümkündür. Bunun üçün avtotransformator, tiristor gərginlik tənzimləyicisi və s. vasitələrdən istifadə etmək olar. Şəkil 1-də PCT seriyalı tiristor gərginlik tənzimləyicisinin görünüşü göstərilmişdir.

Tiristor gərginlik tənzimləyicilərinin digər tənzimləyicilərdən (avtotransformator, doyma drossel və s.) fərqli bir neçə üstünlükləri vardır: tez təsiredici qabiliyyətin olması, f.i.ə.-nin yüksək olması, ucuz dəyərə malik olması, tənzimlənmə xarakteristikasının sərt və axınlı olması və s. Üçfazalı dövrədə hər bir fazaya qarşılıqlı-paralel sxemdə iki tiristor qoşulur və bununla da yük cərəyanının şəbəkənin Uı gərginliyində iki yarımperiodda axmasına şərait yaradılır.

Tiristor gərginlik tənzimləyiciləri ilə gərginliyi U_{nom} **sıfıra** qədər tənzimləmək mümkündür. Stator gərginliyinin forması qeyri-sinusoidal olduqda T tiristor gərginlik tənzimləyicilərinin tətbiqi kritik sürüşmənin qiyməti böyük olan maşınlarda daha sərfəlidir.



Şəkil 1. *PCT seriyalı tiristor gərginlik tənzimləyicisinin görünüşü*

Tiristor gərginlik tənzimləyiciləri elektrik mühərriklərinin fırlanma sürətini və momentini tənzim etmək üçün nəzərdə tutulmuş qurğulardır. Fırlanma sürəti və moment mühərrikin stator dolağına verilən gərginliyin və tiristorların açılma bücağının dəyişdirilməsi ilə tənzimlənir. Elektrik mühərrikinin idarəolunmasının bu üsulu faz idarəolunma adlanır. Bu üsul parametrik (amplitud) idarəolunmanın bir növüdür [6,7].

Tiristor gərginlik tənzimləyiciləri açıq və qapalı tənzimolunan sistemli hazırlana bilər. Açıq sistemli tənzimləyicilər qənaətbəxş sürət tənzimini təmin etmir. Onların əsas təyinatı dinamik proseslərdə intiqalın lazımi iş rejiminə nail olması üçün momenti tənzimləməkdir. Qapalı sistemli tənzimləyicilər adətən sürətə görə mənfi əks əlaqə ilə istifadə olunurlar ki, bu da aşağı sürət zonasında kifayyət qədər sərt mexaniki xarakteristikalara malik olmağa imkan verir.

Tiristor tənzimləyicilərinin faza rotorlu asinxron mühərriklərinin fırlanma sürətinin və momentin tənzimlənməsində istifadə olunması ən effektiv sayılır.

Asinxron mühərrikin sürətini tənzimləmək üçün tiristorlar stator və ya rotor dövrəsinə qoşulurlar. *Birinci* halda, onlar vasitəsi ilə stator dolağına verilən sinusoidal gərginliyin amplitudasını (faza tənzimlənməsi) və ya tezliyini (tezlik tənzimlənməsi) tənzimləməklə mühərrikin valında fırlandırıcı momenti və onun fırlanma sürətini dəyişmək olur.

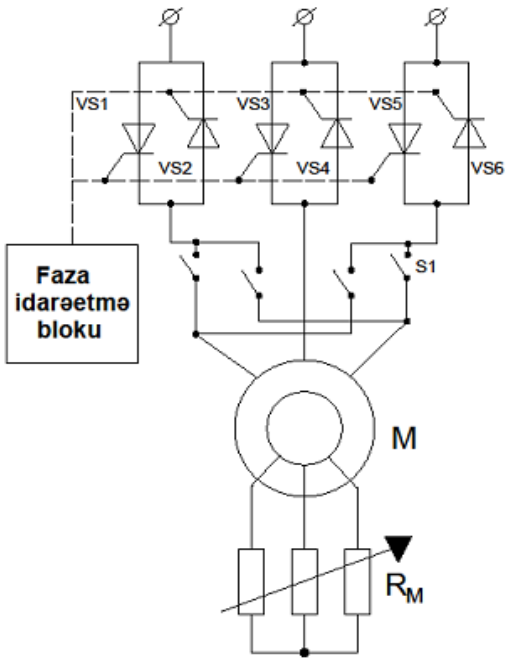
$$M = \frac{2M_m}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}\ ; \qquad n_2 = \frac{60f(1-s)}{p}$$

İkinci halda, rotor dövrəsinin aktiv müqavimətini dəyişməklə kritik sürüşməni dəyişdirərək onun fırlanma sürətini tənzimləmək mümkündür.

$$s_k = \frac{R_2' + R_M'}{X_2'}\ .$$

Şəkil 2-də, M asinxron mühərrikinin stator dövrəsinin hər bir fazasında iki əks-paralel tiristorlu *VS1; VS2; VS3; VS4; VS5; VS6* dəyişən gərginlik tənzimləyicisinin sxemi göstərilib.

İki əks qoşulmuş tiristorun əvəzinə (məsələn VS1, VS2) bir simistor da qoşula bilər. İdarəetmə qurğusu tiristorları faza ardıcıllığı ilə sinxron açır. Şəbəkənin faza gərginliyinin sıfırdan keçmə anına nisbətən tiristorların açılma anını (VS1-VS6) dəyişdirərək əsas harmonikanın gərginlik amplitudasını tənzimləmək mümkündür [7,8].



Şəkil 2. *Asinxron mühərrikin stator dövrəsinin hər bir fazasında əks-paralel qoşulmuş tiristorlu gərginlik tənzimləyicisinin sxemi*

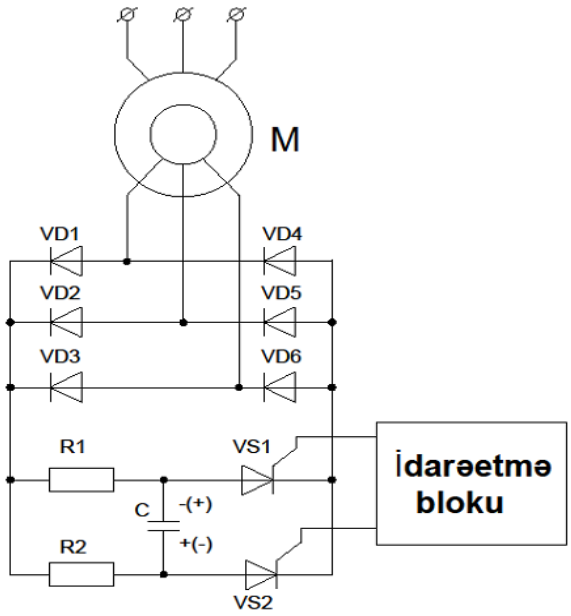
Tiristorların açılması faza idarəetmə blokundan tiristorların İE (idarəolunan elektroduna) idarəolunan impulsları göndərməklə həyata keçirilir. Müvafiq faza gərginliyinin polyarlığı dəyişdikdə tiristorlar avtomatik olaraq qapanırlar. Bu rejim təbii kommutasiya adlanır. S1 çeviricisi vasitəsilə mühərrik revers edilir. Süni kommutasiya dedikdə, tiristorun qapanması üçün onun çıxışlarına əks istiqamətdə cərəyan yaradan hər hansı bir enerji mənbəyinin qoşulması nəzərdə tutulur. Buna misal olaraq, M asinxron mühərrikin rotor dövrəsində olan tiristorlu idarəetməni göstərmək olar (şəkil 3).

Rotor dövrəsinə diodlardan ibarət olan idarə olunmayan VD1–VD6 düzləndiricilər qoşulub və onun çıxışında ardıcıl qoşulmuş VS1 işçi tiristor və R1 rezistor yerləşdirilib. VS1 işçi tiristor, düzləndirilmiş cərəyan dövrəsini R1 rezistoru üzərindən qapanan tiristordur və onun süni kommutasiya düyünü vardır. Bu düyün köməkçi tiristor VS2, kondensator C və rezistor R2-dən ibarətdir.

Tutaq ki, əvvəlcə işçi tiristor VS1 açıq, köməkçi tiristor VS2 isə qapalıdır. Bu zaman kondensator C, rezistor R2 və tiristor VS1 vasitəsilə şəkil 3-də göstərildiyi kimi yüklənir. İndi köməkçi tiristor VS2-nin idarə elektroduna idarəetmə blokundan açma siqnalı verək. Köməkçi

tiristor VS2 açılır və kondensator öz boşalmasını onun və işçi tiristor VS1 üzərindən həyata keçirir. Bu zaman kondensatorun boşalma cərəyanı işçi tiristor VS1-in düz istiqamətli cərəyanına qarşı yönəldiyi üçün işçi tiristor VS1 sönür (qapanır). Bundan sonra kondensator R1 rezistoru və açıq köməkçi tiristor VS2 vasitəsilə şəkil 3-də mötərizədə göstərilən qütbləmə ilə yenidən yüklənir. İşçi tiristor VS1-i yenidən açmaq üçün onun idarə elektroduna idarəetmə blokundan siqnal verilməlidir. Bu zaman kondensator C-nin boşalma cərəyanı köməkçi tiristor VS2-ni söndürür və kondensator yuxarıda qeyd edildiyi kimi yenidən yüklənərək şəkil 3-də göstərilən vəziyyətinə qayıdır.

Növbəti dövr, idarəetmə blokundan köməkçi tiristor VS2-nin idarə elektroduna siqnal verilməsi ilə başlayır. Rotor zəncirinin ekvivalent müqaviməti işçi tiristor VS1-in açıq və qapalı vəziyyətlərində keçirdiyi zaman intervallarının nisbətindən asılıdır. Bu nisbəti tənzimləməklə, rotor cərəyanının orta qiymətini, deməli, asinxron mühərrikin yaratdığı fırlanma momentini və mühərrikin fırlanma sürətini dəyişmək olar [8,9,10].



Şəkil 3. *Rotor dövrəsində tiristorlardan istifadə edərək asinxron mühərrikin sürətinin tənzimi sxemi*

Nəticə. Aparılmış təhlillərdən məlum olmuşdur ki, tiristor gərginlik tənzimləyiciləri ilə üçfazalı asinxron mühərrikin işə buraxılması, intiqalın işəburaxma cərəyanın qiymətinin aşağı salınması və intiqalın tormozlanma ilə revers olunmasını təmin etmək mümkündür. Həmçinin məlum olmuşdur ki, tiristor gərginlik tənzimləyicisi yüksək dəqiqliyə və hamar tənzimləməyə, yüksək faydalı iş əmsalına və enerji səmərəliliyinə, uzunömürlülüyə, etibarlığa, yaxşı mühafizə qabiliyyətinə və eləcədə sürətli reaksiya xüsusiyyətlərinə malikdirlər. Bu səbəbdən də asinxron intiqallı gəmi elektrik mühərriklərinin dövrlə sayını bu tənzimləyicilərdən istifadə etməklə efektiv idarə olunması təklif edilmişdir.

Ədəbiyyat

1. E.F. Sultanov, İ.P. Bayramova, S.S. İsmayılov. “Elektrik maşınları”. Bakı, ADDA, 2023, 324 səh.
2. Osmanov S.C. “Elektrik maşınları”, II hissə, Bakı, 2013, 256 s.
3. Sultanov E. F. “Gəmi elektronikası və güc çeviriciləri”. Dərs vəsaiti. Bakı, ADDA, 2020,170 s.
4. Həsənov Z. Ə. “Güc elektronikası və intiqalın idarə edilməsi”. Dərs vəsaiti, Bakı, ADNSU, 2018, 120 s.

5. E.F. Sultanov, E.M. Məmmədov. Управление электроприводами судовых грузоподъёмных механизмов с помощью тиристорных регуляторов напряжения. Mühəndislik akademiyasının xəbərləri jurnalı, Cild 11, Bakı, 2019, №3, səh. 90-93.
6. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Береславского. –М.: Издательский центр «Академия», 2004, 256 стр.
7. Новиков Г.В. Частотное управление асинхронными двигателями., М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016, 433 стр.
8. Дайнеко В.А. Музыченко Е. Н., Равинский Н.А. Преобразовательная техника в электроприводе / В.А.Дайнеко–Минск: БГАТУ, 2010, 108 стр.
9. Дмитриев Б. Ф. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник. –Архангельск: САФУ, 2015, 556 стр.
10. Попков, О.З. Основы преобразовательной техники. М.: МЭИ, 2010, 200 стр.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Qafarov A.M.

UOT 629.12.066

GƏMİ ENERJİ PAYLAMA SİSTEMLƏRİNDƏ SİEMENS S7-1200 SERİYALI PROQRAMLAŞDIRILAN MƏNTİQ KONTROLLERLƏRİNİN (PLC) TƏTBİQİ

Sultanov E.F., Əlicanov R.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: elshen_sultanov@mail.ru, ralicanov@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə müasir gəmiçilikdə enerji təhlükəsizliyini, səmərəliliyi və etibarlılığı artırmaq məqsədilə Siemens SIMATIC S7-1200 seriyalı proqramlaşdırıla bilən məntiqi kontroller (PLC) əsasında qurulmuş avtomatlaşdırılmış güc idarəetmə sistemlərindən bəhs olunur. Həmçinin məqalədə gəmi enerji sisteminin arxitekturası, S7-1200 PLC-nin texniki üstünlükləri, avtomatik idarəetmənin əsas mərhələləri, generatorların sinxronlaşması, aktiv və reaktiv yükün bölünməsi, artıq yüklənmənin qarşısının alınması və qəza hallarının idarə olunması ətraflı təhlil edilir.*

Abstract. *The article discusses automated power management systems based on Siemens SIMATIC S7-1200 series programmable logic controllers (PLC) to improve energy security, efficiency and reliability in modern shipping. The article also provides a detailed analysis of the ship's power system architecture, technical advantages of the S7-1200 PLC, the main stages of automatic control, generator synchronization, active and reactive load sharing, overload prevention and emergency management.*

Аннотация. *В статье рассматриваются автоматизированные системы управления электроснабжением на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) Siemens SIMATIC серии S7-1200, предназначенные для повышения энергетической безопасности, эффективности и надежности современного судоходства. Также представлен подробный анализ архитектуры судовой энергосистемы, технических преимуществ ПЛК S7-1200, основных этапов автоматического управления, синхронизации генераторов, распределения активной и реактивной нагрузки, предотвращения перегрузок и управления в аварийных ситуациях.*

Açar sözlər: *gəmi, elektroenerji sistemi, generator, sinxronlaşma, avtomatik idarəetmə, generatorların sinxronlaşdırılması, yükün paylanması, TIA portal, PLC*

Ключевые слова: *Siemens S7-1200, судовая система распределения электроэнергии, автоматическое управление, система управления электропитанием (PMS), синхронизация генераторов, распределение нагрузки, портал TIA, ПЛК*

Key words: *Siemens S7-1200, ship power distribution system, automatic control, power management system (PMS), generator synchronization, load distribution, TIA portal, PLC*

Giriş. Hazırda bir çox inkişaf etmiş ölkələrdə vahid elektrotroenerji sistemi (VEES) və elektrik enerjisinin paylanması sabit cərəyanla olan, "*Onboard DC Grid"* adı verilmiş gəmilər istismara verilir. Bu gəmilərdə gəmi elektrik stansiyası BPŞ və tiristor düzləndiriciləri vasitəsilə işləyən dizel generatorlardan ibarətdir. Burada iki azipodun (elektrik mühərriki gəminin gövdəsi xaricindəki kapsulada yerləşən reduktorsuz vintli hərəkətverici sistemi) hər biri avtonom invertorlardan qidalanır [1].

Mühafizə-kommutasiya avadanlıqlarının seçilməsi və BPŞ yığma şinlərinin dinamik dayanıqlığının yoxlanılması məqsədilə qısaqapanma cərəyanlarının hesabatı texniki layihələndirmə mərhələsində normativ sənədlərdən istifadə etməklə aparılır.

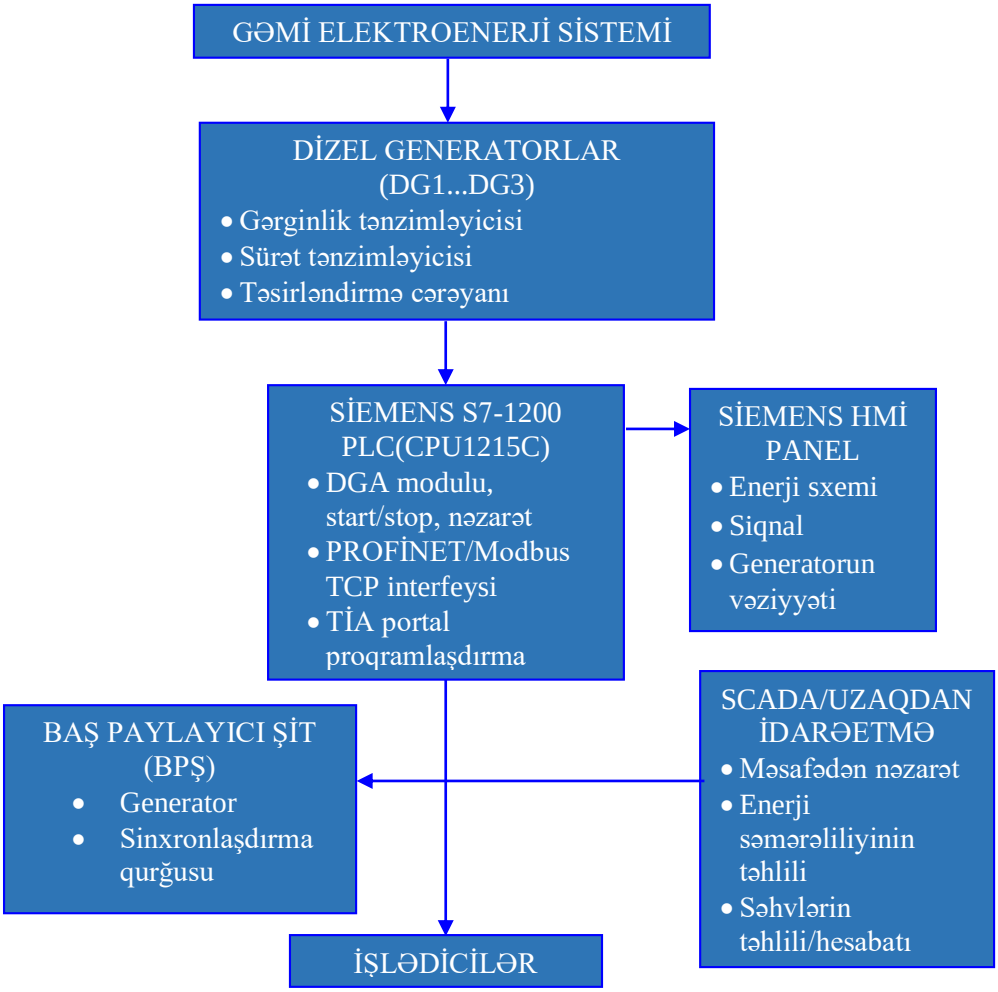
Müasir gəmiçilik sənayesi Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (BDT) tələblərinə uyğun olaraq yüksək təhlükəsizlik, ekoloji norma və əməliyyat səmərəliliyi standartlarına cavab verməlidir. Bu kontekstdə gəminin bütün həyati sistemlərini qidalandıran elektrik enerji sisteminin fasiləsiz və stabil işləməsi kritik əhəmiyyət kəsb edir. Gəminin hərəkəti, naviqasiyası, təhlükəsizlik avadanlıqları və köməkçi mexanizmləri tamamilə elektrik enerjisindən asılıdır. Enerji sistemində baş verə biləcək ən kiçik bir nasazlıq və ya enerji itməsi hadisəsi ağır maliyyə itkilərinə və hətta gəmi heyətinin həyatı üçün təhlükələrə səbəb ola bilər [1].

Bu səbəbdən, ənənəvi əl ilə idarəetmə metodları avtomatlaşdırılmış güc idarəetmə sistemləri (AGİS) ilə əvəz olunur. Belə sistemlər enerji istehsalı (generatorlar) və işlədicilər arasında dinamik balansı təmin edir, qəza hallarını proqnozlaşdırır və onlara saniyələr içində reaksiya verir. Məqalənin əsas məqsədi, kiçik və orta həcmli gəmilər üçün sərfəli, etibarlı və çevik həll olan Siemens S7-1200 PLC əsasında qurulmuş avtomatik enerji paylama sisteminin arxitekturasını, alqoritmini və tətbiqi üstünlüklərini hərtərəfli araşdırmaqdır. Şəkil 1-də Siemens S7-1200 PLC əsaslı gəmi enerji paylama sisteminin struktur sxemi göstərilmişdir [5,6].

Əsas hissə. Gəmi elektrik stansiyası aşağıdakı əsas hissələrdən ibarətdir:

- **Dizel-generator aqreqatları (DGA):** Adətən 2-4 ədəd olmaqla gəminin əsas enerji mənbəyidir. Onlar paralel işləyərək tələb olunan gücü təmin edirlər.
- **Baş paylayıcı şit (BPŞ):** Generatorlardan gələn enerjini qəbul edən və gəminin bütün işlədicilərinə paylayan mərkəzi qovşaqdır. Üzərində mühafizə avtomatları, ölçü cihazları və idarəetmə elementləri yerləşir.
- **Qəza paylayıcı şiti (QPŞ):** Əsas enerji mənbəyi sıradan çıxdıqda naviqasiya, rabitə, qəza işıqlandırması kimi həyati vacib sistemləri qidalandırmaq üçün qəza generatorundan və ya akkumulyator batareyalarından qidalanır.
- **İşlədicilər (Yüklər):** Böyük güclü (baş mühərrikin köməkçi nasosları, sükan mexanizmi, kranlar) və kiçik güclü (işıqlandırma, məişət texnikası, naviqasiya) olmaqla iki qrupa bölünür.

Gəminin manevr etməsi, limana daxil olması və ya yük əməliyyatları zamanı enerji tələbatı kəskin şəkildə dəyişir. Avtomatik güc idarəetmə sistemləri bu dəyişikliklərə uyğun olaraq generatorları avtomatik işə salmalı və ya dayandırmalıdır. Bir generatorun sıradan çıxması və ya qısaqapanma halında sistemin tam sönməsinin qarşısını almaq üçün dərhal tədbirlər görülməlidir.Generatorların optimal yük rejimində (adətən nominal gücün 75-85%-i) işlədilməsi yanacaq sərfiyyatını azaldır. AİS lazımsız generatorları söndürərək bu səmərəliliyi təmin etməlidir [1,2,3].

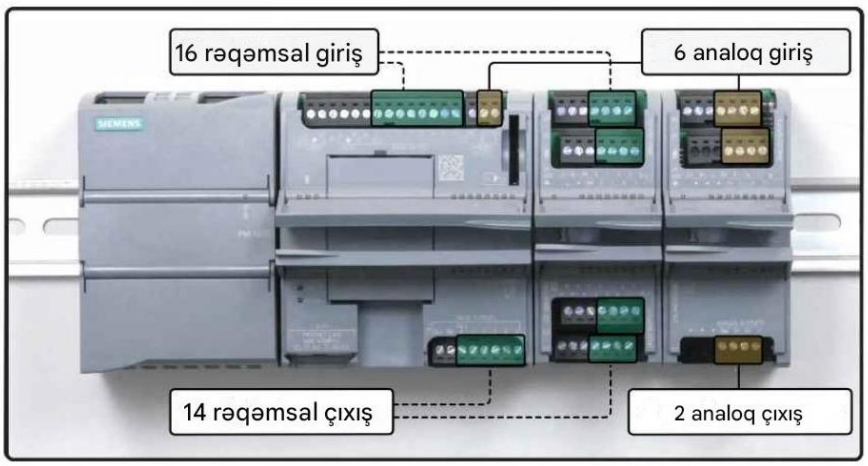


Şəkil 1. *Siemens S7-1200 PLC əsaslı gəmi enerji paylama sisteminin strukturu*

Siemens S7-1200, kompakt sinifdə ən güclü və funksional PLC-lərdən biri hesab edilir. Gəmi enerji idarəetməsi üçün bu kontrollerin seçilməsinin əsas səbəbləri aşağıdakılardır:

- **Modulyar genişlənmə:** Sistemin tələblərinə uyğun olaraq siqnal (SM) və kommunikasiya (CM) modulları əlavə etməklə giriş/çıxış sayını və şəbəkə imkanlarını artırmaq mümkündür.
- **İnteqrasiya olunmuş PROFINET interfeysi:** Generator idarəetmə şitləri, HMI panellər və digər intellektual cihazlarla yüksək sürətli və etibarlı əlaqə təmin edir. Modbus TCP/IP proto-kolu da dəstəklənir.
- **Yüksək kefiyyət:** Real vaxt rejimində sürətli məntiqi əməliyyatlar və analoq siqnalların emalı üçün güclü prosessora malikdir. Bu, sinxronlaşma və qəza hadisəsi kimi kritik proseslər üçün vacibdir.
- **TIA Portal:** PLC, HMI və şəbəkə konfiqurasiyasını vahid proqram mühitində birləşdirərək layihələndirmə və sazlama işlərini xeyli sadələşdirir.

İdarəetmə sistemi mərkəzi S7-1200 CPU-dan (məsələn, CPU 1214C və ya 1215C), genera-torlardan gərginlik, cərəyan, tezlik və güc parametrlərini oxumaq üçün analoq giriş modullarından (AI), avtomatları (circuit breaker) açıb-bağlamaq və generatorlara start/stop siqnalları göndərmək üçün rəqəmsal çıxış modullarından (DQ) ibarətdir. Şəkil 2-də Siemens S7-1200 PLC və giriş-çıxış modullarının görünüşü göstərilmişdir.



Şəkil 2. *Siemens S7-1200 PLC və giriş-çıxış modullarının görünüşü*

İşləyən generatorun yükü müəyyən bir həddi (məs., nominal gücün 80%-i) keçdikdə, PLC ehtiyatda olan növbəti generatoru işə salmaq üçün siqnal göndərir. Generator nominal dövr sayına çatdıqdan sonra PLC aşağıdakı addımları yerinə yetirir:

1. **Gərginlik və tezliyin tənzimlənməsi:** PLC, yeni generatorun gərginlik və tezliyini əsas paylayıcı şinin (busbar) parametrlərinə bərabərləşdirmək üçün onun gərginlik tənzimləyicisinə (AVR) və dövr tənzimləyicisinə (Governor) korrektə siqnalları göndərir.
2. **Faza ardıcıllığının uyğunlaşdırılması:** İki sistemin fazaları üst-üstə düşdüyü anı dəqiq təyin edir (sinxronoskop funksiyası).
3. **Avtomatın qoşulması:** Faza, gərginlik və tezlik şərtləri ödənildiyi anda PLC generatorun avtomatını (ACB) bağlamaq üçün icra əmri verir. Bu proses bir neçə saniyə ərzində tamamlanır.

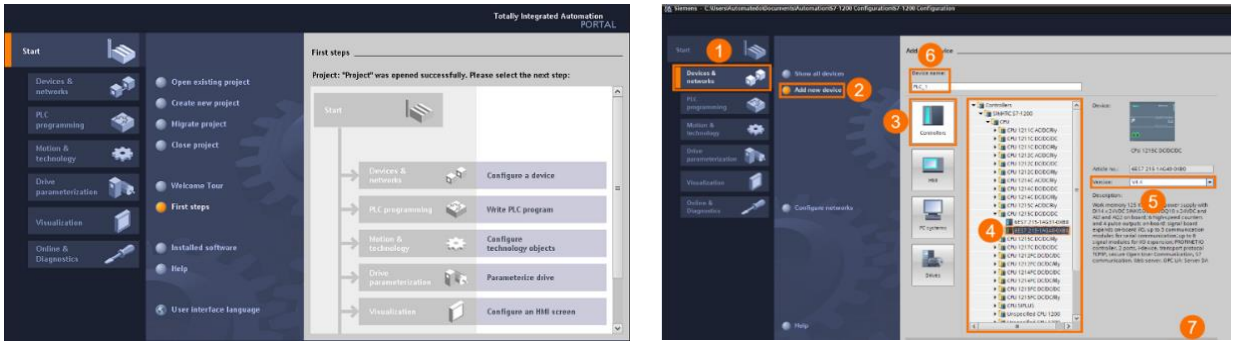
Generatorlar paralel qoşulduqdan sonra onlar arasında bölünən yük bərabər və ya əvvəlcədən təyin olunmuş nisbətdə olmalıdır. PLC hər bir generatorun aktiv gücünü izləyir və mühərriklərin dövr tənzimləyicilərinə siqnallar göndərərək yükləri balanslaşdırır. Gərginliyin sabitliyini təmin etmək üçün PLC generatorların gərginlik tənzimləyicilərinə (AGT) təsir edərək reaktiv gücü tənzimləyir [1,4,5].

Sistemdə artıq yüklənmə və ya generatorlardan birinin qəza səbəbindən dayanması baş verdikdə, PLC "qəza"-nın qarşısını almaq üçün dərhal reaksiya verir. Bunun üçün yüklər əhəmiyyət dərəcəsinə görə qruplara bölünür:

- **1-ci dərəcəli:** Sükan, naviqasiya, qəza yanğın nasosu, quruducu nasos, rabitə (söndürülmür).
- **2-ci dərəcəli:** Yük nasosları, maşın şöbəsi ventilyasiyası.
- **3-cü dərəcəli:** Kondisioner, kambuz avadanlıqları, kayut işıqlandırması.

Qəza anında PLC milisaniyələr ərzində ən aşağı katiqoriyalı (katiqoriya 3) yükləri şəbəkədən ayırır. Problem davam edərsə, növbəti katiqoriyalı qrupu ayırır və beləliklə, ən vacib sistemlərin fasiləsiz işini təmin edir.

Sistemin bütün məntiqi Siemens TIA Portal proqram mühitində hazırlanır. Elektrik sxemlərinə bənzədiyi üçün texniki heyət tərəfindən asan başa düşülür. Start/stop, kilidləmə kimi sadə məntiq üçün idealdır. Yükün paylanması və sinxronizasiya kimi mürəkkəb alqoritmlərin və riyazi hesablamaların reallaşdırılması üçün daha əlverişlidir. Şəkil 3-də TIA Portal proqram mühitində PLC-nin seçilmə və əlavə edilməsi ardıcıllığı göstərilmişdir.



Şəkil 3. *Siemens TIA Portal proqram mühitində PLC-nin seçilmə və əlavə edilməsi ardıcıllığını əks etdirən panellər*

Gəminin idarəetmə mərkəzində quraşdırılan Siemens SIMATIC HMI sensorlu paneli operatora sistemin vəziyyətini real vaxtda izləməyə imkan verir. HMI ekranında adətən aşağıdakı məlumatlar əks olunur:

- Enerji sisteminin birxətli sxemi (generatorların, avtomatların və şinlərin vəziyyəti).
- Hər bir generatorun gərginlik, cərəyan, tezlik, aktiv/reaktiv güc göstəriciləri.
- Aktiv qəza siqnallarının (alarmların) siyahısı və tarixi.
- Yükün dəyişməsi (qrafiklər).
- Sistemin iş rejimlərini (avtomatik/əl ilə) dəyişdirmək üçün idarəetmə düymələri.

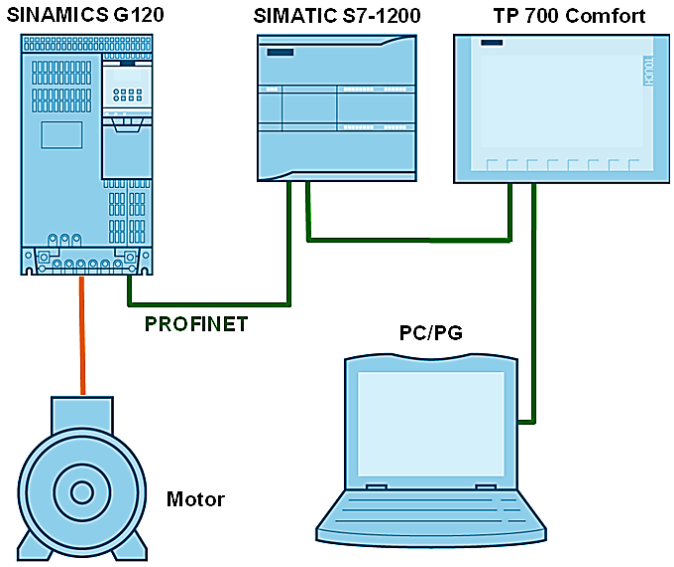
Şəkil 4-də Siemens SIMATIC HMI sensorlu paneli göstərilmişdir.



Şəkil 4. *Siemens SIMATIC HMI sensorlu paneli*

S7-1200 əsaslı avtomatik idarəetmə sisteminin tətbiqi insan müdaxiləsi olmadan qəza hallarının qarşısını alır, "blackout" riskini minimuma endirir. Reaksiya müddəti insandan dəfələrlə sürətlidir. Generatorları hər zaman optimal səmərəlilik səviyyəsində işlədərək yanacaq sərfiyyatını və zərərli tullantıların miqdarını azaldır [5,6,7].

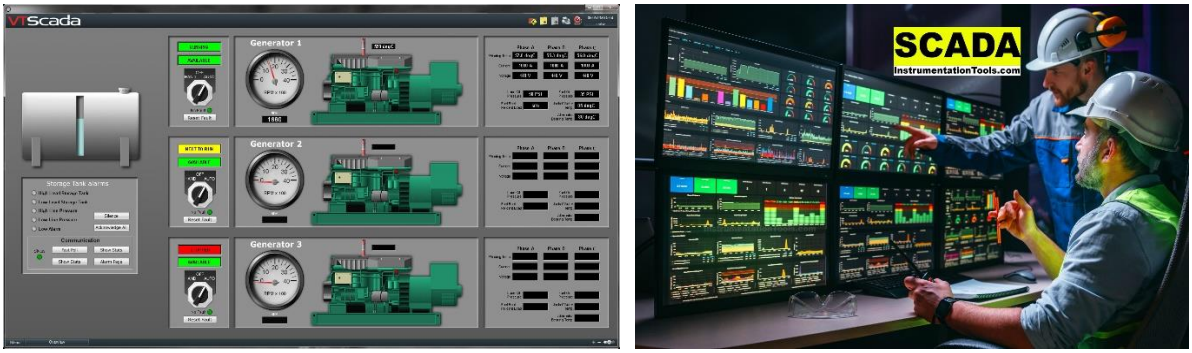
Şəkil 5-də Siemens S7-1200 PLC, SINAMICS G120 intiqal və HMI panelin PROFINET şəbəkəsi üzərindən inteqrasiyası göstərilmişdir.



Şəkil 5. *Siemens S7-1200 PLC, SINAMICS G120 intiqal və HMI panelin PROFINET şəbəkəsi üzərindən inteqrasiyası*

PLC-nin diaqnostika funksiyaları nasazlıqların səbəbini və yerini tez bir zamanda təyin etməyə kömək edir, təmir müddətini qısaldır. Sistemin proqram təminatını dəyişməklə və ya yeni modullar əlavə etməklə gələcək tələblərə asanlıqla uyğunlaşdırmaq olar.

Sistemin SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sisteminə qoşulması, məlumatların sahildəki mərkəzi ofisdən uzaqdan monitorinqinə və bütün donanmanın enerji effektivliyinin təhlilinə imkan yaradır. Şəkil 6-da Sistemin SCADA vasitəsilə xətaların analizi, aradan qaldırılması və idarə olunması panelləri göstərilmişdir.



Şəkil 6. *Sistemin SCADA vasitəsilə xətaların analizi, aradan qaldırılması və idarə olunması panelləri*

Gələcəkdə toplanmış məlumatların (generatorların istismar saatları, temperatur, vibrasiya və. s) süni intellekt alqoritmləri ilə təhlili, potensial nasazlıqları yaranmadan əvvəl proqnozlaşdırmağa və planlı texniki xidməti optimallaşdırmağa imkan verəcək. Batareya sistemlərinin idarəetməsini də PLC-yə həvalə etməklə artıq yüklənməni kompensasiya etmək və daha yüksək enerji səmərəliliyinə nail olmaq mümkündür [5,6,7].

Nəticə. Aparılmış təhlillərdən məlum olmuşdur ki, Siemens S7-1200 seriyalı PLC-lər əsasında qurulmuş avtomatik enerji paylama sistemi müasir gəmilərin enerji infrastrukturunun idarə olunması üçün yüksək səmərəli, etibarlı və iqtisadi cəhətdən əlverişli bir həll təqdim edir. Bu sistem, generatorların işini optimallaşdıraraq, qəza hallarını effektiv şəkildə idarə edə bilir və insan əməyini minimuma endirərək, gəminin ümumi təhlükəsizliyini və əməliyyat davamlılığını

əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Texnologiyanın davamlı inkişafı ilə bu cür sistemlərin gələcəkdə daha da intellektual və yüksək idarəetmə imkanlarına sahib olacağını hədəfləyir.

Ədəbiyyat

1. E.F. Sultanov, T.A. Cəlilov "Müasir gəmi elektrik stansiyaları və şəbəkələri" Bakı, 2018, 357 səh.
2. E.F. Sultanov, S.S. İsmayılov, R.R. Əlicanov. Gəmi siqnal qurğularının proqramlaşdırılan məntiq kontrollerləri ilə idarə olunmasının üstünlükləri. "Elm və təhsilin əsasları", XIII Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı 2025, səh. 147-152.
3. E.F. Sultanov, E.M. Mənmmədov, R.R. Əlicanov. Gəmi sükan elektrik intiqallarının proqramlaşdırılan məntiq kontrollerləri (PLC) vasitəsi ilə idarə olunmasının üstünlükləri. "Elm və təhsilidə müasir tələblər", XVI tezislər toplusu, Bakı 2025, səh.80-83
4. Siemens AG, "SIMATIC S7-1200 System Manual," A5E02486680-AJ, 2023-864 p.
5. Williamson, G., & D.T. Hall. Reeds Marine Engineering Series, Vol. 7: Marine Electrical Systems and Practice. Adlard Coles, 2018-544 p.
6. IEEE Transactions on Marine Electrical Engineering and Automation, Vol. 48, Issue 2, pp. 215-228 p.
12. El-Hawary, M. E. Introduction to Marine Electrical Power Systems. CRC Press, 2017-799 p.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. İsmayılov A.Ş.

UOT 629.12.066

GƏMİ ELEKTROENERGETİK SİSTEMLƏRİNİN EKOLOJİ PROBLEMLƏRİ

Sultanov E.F., Səlimova A.K., Əlicanov R.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18
E-mail: elshen_sultanov@mail.ru, afag_sk@mail.ru, ralicanov@mail.ru

Xülasə. *Məqalədə Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (BDT) yüksək qiymətli neft məhsullarından istifadənin azaldılması və qaz emissiyalarının minimuma endirilməsi üçün getdikcə sərtləşən qaydaları fonunda gəmiçilik sənayesinin ənənəvi dizel mühərriklərindən daha təmiz və səmərəli enerji mənbələrinə keçidindən bəhs olunur. Gəmi elektrik stansiyalarında tətbiq edilən əsas alternativ enerji mənbələrinin–günəş enerjisi, külək enerjisi, batareya saxlama sistemləri və hidrogen yanacaq hüceyrələrinin ətraflı və müqayisəli təhlili aparılır. Həmçinin məqalədə hər bir texnologiyanın texniki xüsusiyyətləri, iqtisadi üstünlüyü və ekoloji problemləri hesablamalara və qrafik asılılıqlara əsaslanaraq təhlil edilmişdir.*

Abstract. *The article discusses the transition of the shipping industry from traditional diesel engines to cleaner and more efficient energy sources, against the backdrop of increasingly stringent International Maritime Organization (IMO) regulations to reduce the use of high-value petroleum products and minimize gas emissions. A detailed and comparative analysis of the main alternative energy sources used in ship power plants - solar energy, wind energy, battery storage systems and hydrogen fuel cells - is carried out. The article also analyzes the technical characteristics, economic advantages and environmental problems of each technology based on calculations and graphical dependencies.*

Аннотация. *В статье рассматривается переход судоходной отрасли от традиционных дизельных двигателей к более чистым и эффективным источникам энергии на фоне всё более строгих требований Международной Морской Организации (ММО) по сокращению использования высококачественных нефтепродуктов и минимизации выбросов газов. Проведён подробный сравнительный анализ основных альтернативных источников энергии, используемых в судовых энергетических установках: солнечной энергии, энергии ветра, аккумуляторных систем хранения энергии и водородных топливных элементов. На основе расчётов и графических зависимостей проанализированы технические характеристики, экономические преимущества и экологические проблемы каждой технологии.*

Açar sözlər: *gəmi, alternativ enerji, elektrik stansiyası, günəş enerjisi, külək enerjisi, hidrogen yanacaq hüceyrələri, ekologiya*

Key words: *ship, alternative energy, power plant, solar energy, wind energy, hydrogen fuel cells, ecology*

Ключевые слова: *судно, альтернативная энергетика, электростанция, солнечная энергия, ветровая энергия, водородные топливные элементы, экология*

Giriş. Tərkibində müxtəlif növ elektirik avadanlığı olan gəmi elektoenergetika sistemlərinin (GEES) vəzifəsi elektrik enerjisini hasil edib paylamaqdan ibarətdir. Bura, həmçinin, elektrik enerjisi çeviriciləri, o cümlədən transformatorlar da daxildir. Gəmi qurğularının əksəriyyətinin işləməsi üçün elektrik enerjisindən istifadə olunur. Buna əsas səbəb elektrik enerjisinin məsafəyə ötrülməsinin asan başa gəlməsi, elektrotexniki qurğuların yüksək iqtisadi göstəriciləri və elektrikləşmiş mexanizm-lərin idarəsində böyük imkanların yaranmasıdır. Gəmi elektrik stansiyasında əsas enerji mənbəyi olan generator aqreqatı elektromaşın generatoru və onu hərəkətə gətirən mühərrikdən ibarətdir. Hərəkətverici mühərrik kimi, dizellərdən, buxar və qaz turbinlərindən istifadə olunur [1].

Gəmilərin istismarı istər-istəməz ekoloji problemlərin yaranması və həllini nəzərdə tutur. Bütün digər insan fəaliyyətləri kimi dəniz və çay gəmiləri də ekoloji təhlükə mənbəyidir. Odur ki, layihələndirmə mərhələsi ətraf mühitə atılan zərərli maddələrin miqdarının qarşısını almaq və ya minimuma endirməklə ekoloji cəhətdən təhlükəli gəmi əməliyyatlarının qarşısının alınması məsələsini həll etməlidir.

Ən təhlükəli maddələrə gəmi energetik sistemlərində (dizel mühərrikləri, qazanlar, qaz turbinli mühərriklər) enerji daşıyıcısının (yanacaq) potensial enerjisinin çevrilməsi zamanı əmələ gələn və atmosferə buraxılan maddələr daxildir [5,6,7].

Gəmilərdə yanacaq və sürtkü materiallarının istifadəsi aşağıdakıları əhatə edir:

- səfər üçün lazım olan miqdarda yanacaq və sürtkü materiallarının çənlərdə və gəmi konteynerlərində qəbulu;
- yanacaq və sürtkü materiallarının səfər üçün ayrılmış vaxt ərzində çənlərdə və gəmi konteynerlərində saxlanması;

potensial enerjisini çevirmək üçün çatdırılmadan əvvəl yanacağın hazırlanması;

yanacağın hazırlanması prosesindən tullantıların yığılması və utilizasiyası və təkrar istifadə olunan mühərrik yağlarının, habelə işlənmiş silindr yağlarının təmizlənməsi;

təmizləyici mayelərdən istifadə etməklə çənlərin, qabların və digər avadanlığın yanacaq və yağ yataqlarının təmizlənməsi;

çən, konteyner və digər təmizləyici tullantıların yığılması və quruya atılması.

Yanacaq və sürtkü materiallarından istifadə ətraf mühitin onların buxarlanma məhsullarından qorunması məsələsini gündəmə gətirir. Dəyişkənlik müxtəlif yanacaq və sürtkü materialları arasında dəyişir: benzin sürtkü və ya ağır yanacaq yağlarından əhəmiyyətli dərəcədə yüksək dəyişkənliyə malikdir. Neft məhsulunun dəyişkənliyi onun fraksiya tərkibi ilə müəyyən edilir.mi elektrik stansiyalarının ilkin dizel mühərikləri tərəfindən havaya buraxılan qazlarının

zərərli olmasını və onun təsirini aradan qaldırılması üsullarını araşdırmaq məqəsədi ilə məqalədə gəmi elektrik stansiyalarında tətbiq edilən əsas alternativ enerji mənbələrinin – günəş enerjisi, külək enerjisi, batareya saxlama sistemləri və hidrogen yanacaq hüceyrələrinin geniş, texniki xüsusiyyətləri, səmərəliliyi, iqtisadi üstünlüyü və ekoloji faydaları hesablamalara və qrafik asılılıqlara əsaslanaraq təhlil edilmişdir.

Məlum olduğu kimi, dəniz nəqliyyatı qlobal ticarətin onurğa sütununu təşkil etsə də, eyni zamanda qlobal istixana qazı emissiyalarının təxminən 3%-nə sahibdir. Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı (BDT) 2050-ci ilə qədər gəmiçilikdən yaranan istixana qazı emissiyalarını 2008-ci il səviyyəsi ilə müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə azaltmağı hədəfləyir. Bu ambisiyalı hədəfə çatmaq üçün yeni texnologiyalara keçid zəruridir. Bu kontekstdə, ənənəvi dizel-generatorlarına alternativ olaraq günəş, külək, batareya və hidrogen kimi təmiz enerji mənbələrinin gəmi elektrik stansiyalarına inteqrasiyası getdikcə daha çox əhəmiyyət kəsb edir. Məqalədə, adı çəkilən alternativ enerji mənbələrinin müqayisəli təhlilini apararaq, onların texniki-iqtisadi və ekoloji göstəriciləri konkret hesablamalar və qrafiklər vasitəsilə təqdim edilmişdir [2,3,4].

Əsas hissə. Bu təhlildə hər bir alternativ enerji mənbəyinin kefiyyətini qiymətləndirmək üçün standart bir yanaşma tətbiq edilmişdir. Müqayisə üçün orta ölçülü yük gəmisi nümunə "Maestro Niyazi (layihə 19610)" tipli quru yük gəmisi seçilmişdir. Hər bir texnologiya üçün aşağıdakı parametrlər nəzərə alınmışdır:

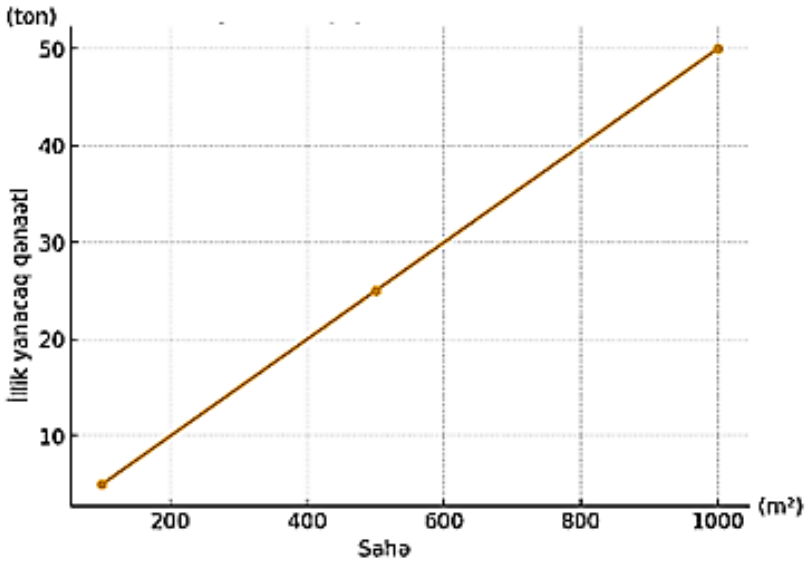
- *Enerji istehsalı: Vahid sahəyə və ya vahid qurğuya düşən enerji istehsalı və ya yanacağa qənaət;*
- *İlkin investisiya xərcləri: Sistemin alınması və quraşdırılması ilə bağlı bütün xərclər;*
- *Əməliyyat xərcləri: Baxım, təmir və digər cari xərclər;*
- *Yanacaq qənaəti və geri ödəmə müddəti: Texnologiyanın yanacaq sərfiyyatını nə qədər azaltdığı və ilkin investisiyanı nə qədər müddətə geri qaytardığı;*
- *Emissiyaların azaldılması: CO_2, SOx, və NOx kimi zərərli tullantıların azaldılma miqdarı.*

Hesablamalar üçün mövcud ədəbiyyatlardan, sənaye hesabatlarından və texniki xüsusiyyətlərdən əldə edilən real məlumatlardan istifadə edilmişdir.

Gəmilərin göyərtəsindəki geniş boş sahələr fotovoltaik (PV) panellərin quraşdırılması üçün əlverişli bir mühit yaradır. Günəş panelləri gəminin köməkçi enerji ehtiyaclarını (işıqlandırma, naviqasiya avadanlıqları və s.) ödəməyə və bununla da əsas mühərrikin yükünü azaltmağa kömək edə bilər. Dəniz mühitində günəş panellərinin səmərəliliyi bir neçə faktordan asılıdır. Günəş radiasiyasının intensivliyi (kVt/m²/gün), panelin növü və temperatur. Ortalama olaraq, müasir tipli PV panellərinin səmərəliliyi 20-22% təşkil edir. Məsələn, 1 m² panel gündə təxminən 1-1.2 kVt enerji istehsal edə bilər. 500 m² sahəyə malik bir PV sistemi olan bir gəmi, gün ərzində təxminən 500-600 kVt elektrik enerjisi istehsal edə bilər. Bir PV sisteminin ilkin investisiya xərci təxminən 1000-1500 ABŞ dolları təşkil edir. 100 kVt gücündə bir sistem üçün bu, 100,000-150,000 ABŞ dolları deməkdir. Gəmi dizelinin hazırkı qiymətlərini nəzərə alsaq, belə bir sistemin təmin etdiyi yanacaq qənaəti ilə geri ödəmə müddəti 5-8 il arasında dəyişə bilər. Günəş panelləri istismar zamanı sıfır emissiya yaradır. 100 kVt gücündə bir sistem, ildə təxminən 50-60 ton CO_2 emissiyasının qarşısını ala bilər. Şəkil 1-də Sahə (m^2) ilə illik yanacaq qənaəti (ton) arasındakı xətti aslılıq göstərilmişdir [2,3,4].

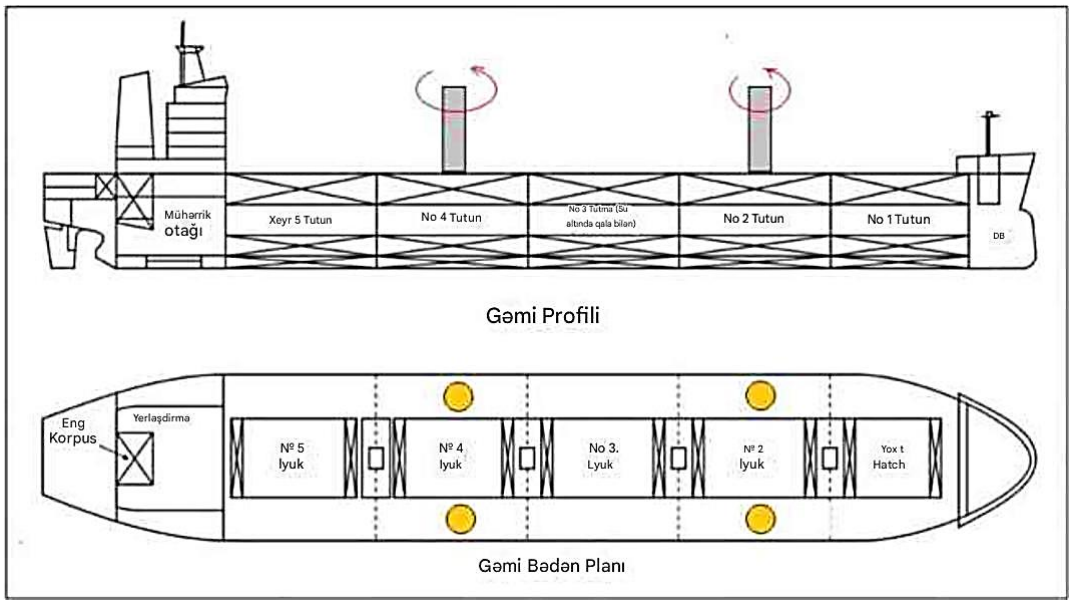
Günəş enerjisinin əsas məhdudiyyəti onun fasiləli olması (gecə və buludlu hava şəraiti) və göyərtədə məhdud yerin olmasıdır.

Gəmilərdə külək enerjisi adətən Flettner rotorlu turbinləri ilə istehsal olunur. Flettner rotorları, Magnus effektinə əsaslanaraq külək enerjisini gəminin hərəkətverici qüvvəsinə çevirən fırlanan silindrlərdir. Bu texnologiya, xüsusilə küləkli hava şəraitində əhəmiyyətli dərəcədə yanacaq qənaəti təmin edə bilər [2,3].



Şəkil 1. *Sahə (m^2) ilə illik yanacaq qənaəti (ton) arasındakı xətti aslılıq*

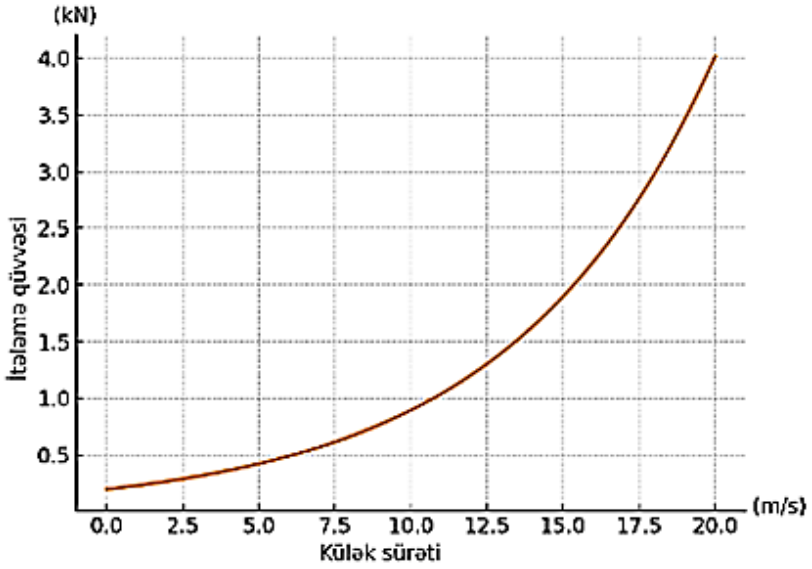
Flettner rotorlarının səmərəliliyi küləyin sürətindən və bucağından, həmçinin gəminin sürətindən asılıdır. Araşdırmalar göstərir ki, optimal şəraitdə Flettner rotorları 10-30% arasında yanacaq qənaəti təmin edə bilər. Bəzi xüsusi hallarda bu rəqəm 50%-ə qədər çata bilər. Məsələn, dörd rotorla təchiz edilmiş bir yük gəmisində aparılan bir araşdırma, illik yanacaq sərfiyyatında 22.28% azalma olduğunu göstərmişdir. Şəkil 2-də Flettner rotorların gəminin göyərtəsində yerləşdirilmə sxemi göstərilmişdir



Şəkil 2. *Flettner rotorların gəminin göyərtəsində yerləşdirilmə sxemi*

Bir Flettner rotorunun quraşdırılması milyonlarla dollara başa gələ bilər. Bununla belə, yüksək yanacaq qənaəti potensialı sayəsində geri ödəmə müddəti 4-9 il arasında ola bilər. Xüsusi təsnifat cəmiyyətləri tərəfindən hazırlanmış xüsusi hesablamalar, müxtəlif gəmi tipləri və hava şəraiti üçün potensial qənaəti hesablamağa imkan verir. Yanacaq sərfiyyatının azalması birbaşa

emissiyaların azalmasına gətirib çıxarır. 20% yanacaq qənaəti, eyni miqdarda CO_2, SOx və NOx emissiyalarının azalması deməkdir. Şəkil 3-də külək sürəti (m/s) ilə rotorun yaratdığı itələmə qüvvəsi (kN) arasındakı aslılıq qarfiki göstərilmişdir.



Şəkil 3. *Külək sürəti (m/s) ilə rotorun yaratdığı itələmə qüvvəsi (kN) arasındakı asılılıq*

Rotorların gəminin göyərtəsində yer tutması, gəminin dayanıqlığına potensial təsiri və yalnız müəyyən külək şəraitində səmərəli olması əsas məhdudiyyətlərdir.

Batareya sistemləri, yüksək tələbat zamanı əlavə güc təmin etmək, mühərrikin optimal rejimdə işləməsini təmin etmək (peak shaving) və limanlarda sıfır emissiyalı əməliyyatlar həyata keçirmək üçün istifadə olunur. Onlar xüsusilə günəş və külək kimi fasiləli enerji mənbələri ilə birlikdə hibrid sistemlərdə effektivdir [2,4].

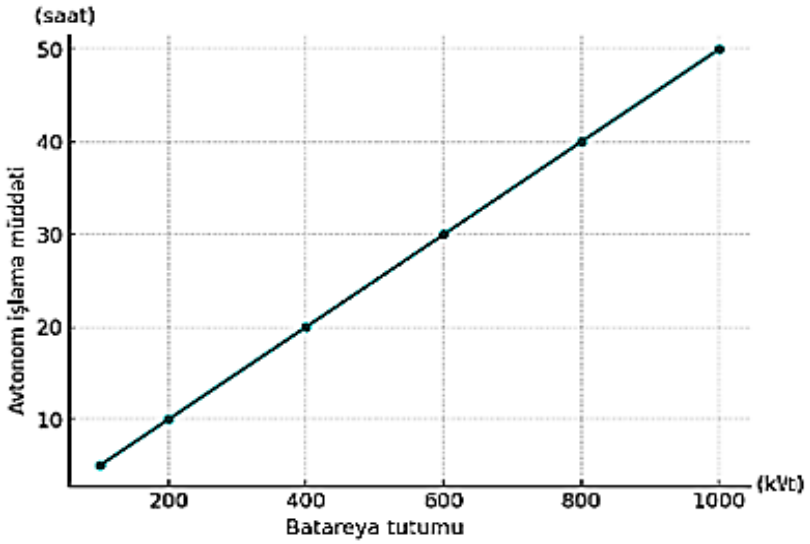
Yüksək enerji sıxlığına malik Litium-ion batareyalar geniş istifadə olunur. Enerji sıxlığı batareyanın çəkisi və həcmi üçün kritik bir göstəricidir. Müasir batareyalar 150-250 Vt/kq enerji sıxlığına malikdir. Batareya sistemlərinin ilkin investisiya dəyəri yüksəkdir (təxminən 500-800 ABŞ dolları). Lakin bu sistemlər yanacaq sərfiyyatını 10-15% azalda, mühərriklərin texniki xidmət xərclərini aşağı sala və limanlarda sahil qida mənbəyinə qoşulma ehtiyacını aradan qaldıraraq əlavə qənaət təmin edə bilər. Batareyalar enerji mənbəyindən asılı olaraq emissiyaları azaldır. Bərpa olunan mənbələrdən doldurulduqda, demək olar ki, təxminən sıfır emissiyalı bir həll təqdim edirlər. Limanlarda mühərrikləri söndürməyə imkan verməsi hava çirkliliyinin azaldılması üçün mühüm amildir. Şəkil 4-də batareya tutumu (kVt) ilə limanda avtanom işləmə müddəti (saat) arasındakı xətti aslılıq qrafiki göstərilmişdir.

Yüksək ilkin xərc, məhdud ömür, çəki və həcm, həmçinin təhlükəsizlik (yanğın riski) məsələləri batareya texnologiyasının əsas çətinlikləridir.

Hidrogen yanacaq hüceyrələri, hidrogen və oksigenin elektrokimyəvi reaksiyası nəticəsində elektrik enerjisi istehsal edir və yeganə əlavə məhsul sudur. Bu texnologiya, gəmiçiliyin tamamilə karbonsuzlaşdırılması üçün ən perspektivli uzunmüddətli həllərdən biri hesab olunur [3,4,5].

Proton mübadilə membranlı yanacaq hüceyrələri gəmiçilik üçün daha uyğun hesab edilir və səmərəliliyi 50-60% arasında dəyişir. Bərk oksid yanacaq hüceyrələri isə daha yüksək səmərəlilik (58%-ə qədər) təklif edir, lakin daha yüksək işləmə temperaturu tələb edir. Hazırda hidrogen yanacaq hüceyrə sistemlərinin və xüsusilə yaşıl hidrogenin (bərpa olunan enerji ilə istehsal olunan) istehsalı və saxlanması (mayeləşdirilmiş və ya sıxılmış formada) olduqca bahalıdır. Araşdırmalar

göstərir ki, hidrogenin qiyməti təxminən 2 ABŞ dolları/kq səviyyəsinə düşərsə, hidrogen yanacaqlı gəmilərin ümumi dəyəri ənənəvi dizel gəmiləri ilə rəqabət apara bilər. Texnologiyanın inkişafı ilə 2025-2030-cu illərdə rəqabət qabiliyyətli ola biləcəyi proqnozlaşdırılır. Yaşıl hidrogen istifadə edildikdə, yanacaq hüceyrələri tamamilə sıfır istixana qazı emissiyasına malikdir.



Şəkil 4. *Batareya tutumu (kVt) ilə limanda avtonom işləmə müddəti (saat) arasındakı xətti asılılıq*

Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı hazırda gəmilərdən dizel yanacağından azot oksidi emissiyalarını məhdudlaşdırmaq üçün qlobal razılaşma təklif edib. Oxşar regional təklif, Los-Anceles limanlarına gələn gəmilərdən azot oksidi emissiyalarına görə ödəniş etməyi təklif edən Kaliforniya Ətraf Mühitin Mühafizəsi Agentliyi (EPA) tərəfindən hazırlanmışdır.

Bu, BDT-nin uzunmüddətli dekarbonizasiya hədəflərinə çatmaq üçün ideal bir həlldir Təhlillər göstərir ki, seçim gəminin növündən, təyinatından və əməliyyat istiqamətindən asılıdır. Qısa və ortamüddətli perspektivdə, günəş, külək və batareya sistemlərini özündə birləşdirən hibrid enerji sistemləri ən yaxşı yanaşma kimi görünür [3,6,7].

Aşağıdakı cədvəl təhlil edilən dörd alternativ enerji mənbələrinin əsas göstəricilər üzrə müqayisəsini ümumiləşdirir.

Alternativ enerji mənbələrinin əsas göstəricilərinin müqayisəsi

Texnologiya	**İlkin investisiya**	**Yanacaq qənaəti / enerji təmini**	**Geri ödəmə müddəti**	**Emissiyaların azaldılması**	**Tərəqqi, inkişaf**
Günəş panelləri	Orta	Köməkçi enerji (5-10%)	5-8 il	Orta	Yüksək
Flettner rotorları	Yüksək	Yüksək (10-30%)	4-9 il	Yüksək	Orta
Batareya sistemləri	Çox Yüksək	Orta (10-15%), Pik tələbat	6-10 il	Orta-Yüksək	Yüksək
Hidrogen. Yanacaq hüceyrəsi	Çox Yüksək	Tam əvəzetmə (100%)	Uzunmüddətli (>10 il)	Çox Yüksək (Sıfır)	Aşağı-Orta

Nəticə. Aparılmış təhlillərdən məlum olmuşdur ki, gəmi elektrik stansiyalarında alternativ enerji mənbələrinin tətbiqi artıq bir seçim deyil, zərurətdir. Həmçinin təhlillər göstərir ki, hər bir texnologiyanın özünəməxsus üstünlükləri və çətinlikləri var. Qısa və ortamüddətli gələcəkdə, günəş, külək və batareya sistemlərini özündə birləşdirən hibrid enerji sistemləri ən yaxşı yanaşma

kimi görünür. Bu cür sistemlər həm yanacaq səmərəliliyini artırır, həm emissiyaları azaldır və həmçinin də enerji təchizatının etibarlılığını yüksəldir. Uzunmüddətli dövrdə isə yaşıl hidrogen texnologiyasının inkişafı və maya dəyərinin azalması ilə yanacaq hüceyrələri gəmiçilik sənayesində inqilab edəcək və tamamilə təmiz dəniz nəqliyyatına keçidi təmin edəcəkdir.

Ədəbiyyat

1. Sultanov E.F., Cəlilov T.A. "Müasir gəmi elektrik stansiyaları və şəbəkələri" Bakı, 2018, 357 səh.
2. Sultanov E.F., İsmayılov S.S. "Gəmilərdə alternativ enerji mənbələrindən istifadə imkanlarının araşdırılması"/ ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2021, səh. 151-157
3. Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Əlicanov R.R. Günəş panelləri və onların gəmilərdə tətbiqinin araşdırılması. ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2023, səh. 130-138.
4. Sultanov E.F., Məmmədov E.M., Əlicanov R.R. Hibrid texnologiyalardan istifadə etməklə gəmilərdə enerji səmərəliliyinin artırılması. "Elm və təhsilin əsasları" XIII Beynəlxalq elmi konfrans. Bakı 2025, səh. 236-240
5. Williamson, G., & D.T. Hall. Reeds Marine Engineering Series, Vol. 7: Marine Electrical Systems and Practice. Adlard Coles, 2018-544 səh.
6. IEEE Transactions on Marine Electrical Engineering and Automation, Vol. 48, Issue 2, pp. 215-228 p.
7. El-Hawary, M. E. Introduction to Marine Electrical Power Systems. CRC Press, 2017, 799 p.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. İsmayılov A.Ş.

UOT 621.311.161

ELEKTRİK ŞƏBƏKƏSİNİN ETİBARLILIQ VƏZİYYƏTİNİN TƏHLİLİ

Şıxəliyeva S.Y., Balayeva Ə.H., Ələkbərov İ.M.

"Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti" PHŞ
Az1010, Bakı şəh., Azadlıq pros., 20
"Sumqayıt Dövlət Universiteti" PHŞ
Az5008, Sumqayıt şəh,, Bakı küç., 1
E-mail: saadaasmar@mail.ru, balayeva.efile@mail.ru, rlayke95@gmail.com

Xülasə. *Bu məqalədə müasir elektroenergetika sistemlərinin etibarlılığı məsələsi hərtərəfli şəkildə araşdırılır və bu anlayışın struktur, funksional, balans və rejim olmaqla əsas komponentləri üzərində dayanılır. Enerji sistemlərinin etibarlılığı, ümumilikdə elektrik avadanlıqlarının və sistemlərin müəyyən edilmiş funksiyaları fasiləsiz, davamlı və təhlükəsiz şəkildə yerinə yetirmək qabiliyyəti kimi qiymətləndirilir. Bu, enerji təchizatının kəsintisiz və sabit olması, eyni zamanda sistemin texniki və əməliyyat baxımından güvənilir qalması üçün əsas şərtdir. Araşdırmanın nəticələri göstərir ki, hazırkı enerji şəbəkələrinin dayanıqlığı bir sıra texnoloji və infrastruktur problemlərlə üz-üzədir. Xüsusilə qeyd olunur ki, texniki nasazlıqların əhəmiyyətli bir hissəsi təxminən 24%-i avadanlıqların fiziki cəhətdən köhnəlməsi, düzgün istismar olunmaması və iqlim dəyişikliklərinin yaratdığı əlavə yüklənmələr nəticəsində baş verir. Bu, elektroenergetika sistemlərinin istismarında ciddi risklərə yol açır və fasiləsiz enerji təminatına birbaşa təsir göstərir. Statistik məlumatlar da bu vəziyyəti təsdiqləyir – enerji sistemlərində istifadə olunan avadanlıqların böyük bir hissəsi artıq istismar müddətini başa vurmuşdur. Nəticədə bu*

avadanlıqların texniki göstəriciləri və istismar parametrləri müasir təhlükəsizlik və məhsuldarlıq standartlarına cavab vermir. Bu isə sistemin ümumi fəaliyyətinə mənfi təsir edir və qəza risklərini artırır. Xüsusi olaraq güc transformatorları, kabel və hava xətləri, eləcə də rele mühafizə sistemlərində müşahidə olunan nasazlıqlar daha ətraflı təhlil edilir. Bu sahələrdə baş verən qüsurların təkrarlanma tezliyi və əsas səbəbləri araşdırılır, onların enerji sisteminin ümumi etibarlılığına necə təsir etdiyi izah olunur. Qeyd olunur ki, bu komponentlər enerji ötürülməsi və paylanması prosesində həlledici rol oynadığı üçün onların texniki vəziyyəti sistemin ümumi dayanıqlığı baxımından son dərəcə əhəmiyyətlidir.

Məqalənin nəticə hissəsində vurğulanır ki, enerji sistemlərinin fasiləsiz və təhlükəsiz fəaliyyəti yalnız kompleks və davamlı yanaşma ilə təmin edilə bilər. Bunun üçün ilk növbədə sistemin etibarlılıq göstəriciləri dərin və çoxşaxəli şəkildə qiymətləndirilməlidir. Eyni zamanda, qərarların qəbulunda statistik verilərə əsaslanan yanaşmalara üstünlük verilməli, risklərin azaldılması və texniki nasazlıqların qarşısının alınması üçün qabaqlayıcı tədbirlər görülməlidir.

Bu məqsədlə enerji sistemlərində istifadə olunan avadanlıqların mərhələli şəkildə yenilənməsi, müasir texnoloji tələblərə cavab verən sistemlərlə əvəz olunması və istismar proseslərinin təkmilləşdirilməsi zəruri hesab olunur. Belə tədbirlər, həm etibarlılığın artırılmasına, həm də sistemin uzunmüddətli iqtisadi və texnoloji dayanıqlığının təmin edilməsinə xidmət edəcəkdir.

Abstract. *This article comprehensively examines the issue of reliability of modern power systems and focuses on the main components of this concept: structural, functional, balance and regime. The reliability of power systems is generally considered to be the ability of electrical equipment and systems to perform their specified functions continuously, sustainably and safely. This is a key condition for the uninterrupted and stable power supply, as well as the technical and operational reliability of the system. The results of the study show that the stability of current power networks is faced with a number of technological and infrastructure problems. In particular, it is noted that a significant part of technical failures - about 24% - occurs as a result of physical obsolescence of equipment, improper operation and additional loads caused by climate change. This creates serious risks in the operation of power systems and directly affects the uninterrupted power supply. Statistical data also confirm this situation - a large part of the equipment used in power systems has already reached the end of its service life. As a result, the technical indicators and operating parameters of this equipment do not meet modern safety and efficiency standards. This negatively affects the overall performance of the system and increases the risk of accidents. In particular, the failures observed in power transformers, cable and overhead lines, as well as relay protection systems are analyzed in more detail. The frequency and main causes of failures occurring in these areas are investigated, and how they affect the overall reliability of the power system is explained. It is noted that since these components play a decisive role in the process of energy transmission and distribution, their technical condition is extremely important in terms of the overall stability of the system.*

The conclusion of the article emphasizes that uninterrupted and safe operation of power systems can only be ensured with a complex and continuous approach. For this, first of all, the reliability indicators of the system should be assessed in a deep and multifaceted manner. At the same time, approaches based on statistical data should be preferred in decision-making, and preventive measures should be taken to reduce risks and prevent technical failures.

For this purpose, it is considered necessary to gradually renew the equipment used in power systems, replace them with systems that meet modern technological requirements, and improve operational processes. Such measures will serve to both increase reliability and ensure the long-term economic and technological sustainability of the system.

Аннотация*. В данной статье всесторонне рассматривается вопрос надежности современных энергосистем и рассматриваются основные составляющие этого понятия:*

структурная, функциональная, балансовая и режимная. Под надежностью энергосистем принято понимать способность электротехнического оборудования и систем непрерывно, устойчиво и безопасно выполнять свои функции. Это является ключевым условием бесперебойного и стабильного электроснабжения, а также технической и эксплуатационной надежности системы. Результаты исследования показывают, что устойчивость современных энергосетей сопряжена с рядом технологических и инфраструктурных проблем. В частности, отмечается, что значительная часть технических отказов, около 24%, происходит вследствие физического устаревания оборудования, неправильной эксплуатации и дополнительных нагрузок, вызванных изменением климата. Это создает серьезные риски в работе энергосистем и напрямую влияет на бесперебойное электроснабжение. Статистические данные также подтверждают эту ситуацию – значительная часть оборудования, используемого в энергосистемах, уже выработала свой ресурс. В результате технические показатели и эксплуатационные параметры этого оборудования не соответствуют современным стандартам безопасности и эффективности. Это негативно влияет на общую производительность системы и увеличивает риск аварий. В частности, более подробно анализируются отказы, наблюдаемые в силовых трансформаторах, кабельных и воздушных линиях электропередачи, а также в системах релейной защиты. Исследованы частота повторения и основные причины отказов в этих системах, а также объясняется их влияние на общую надежность энергосистемы. Отмечено, что, поскольку эти компоненты играют решающую роль в процессе передачи и распределения энергии, их техническое состояние крайне важно с точки зрения общей устойчивости системы.

В заключении статьи подчеркивается, что бесперебойная и безопасная работа энергосистем может быть обеспечена только при комплексном и непрерывном подходе. Для этого, прежде всего, необходимо глубоко и многогранно оценивать показатели надежности системы. При этом предпочтение следует отдавать статистическим подходам при принятии решений, а также принимать превентивные меры для снижения рисков и предотвращения технических отказов.

Для этого предполагается поэтапное обновление оборудования энергосистем, замена его на оборудование, отвечающее современным технологическим требованиям, а также совершенствование технологических процессов. Реализация этих мер позволит повысить надежность и обеспечить долгосрочную экономическую и технологическую устойчивость энергосистемы.

Açar sözlər: *электроэнергетика, надежность, структурная надежность, функциональная надежность, балансовая надежность, режимная надежность, электрическая сеть, технические отказы, электроснабжение, силовой трансформатор, износ оборудования, релейная защита, устойчивость энергосистем*

Key words: *electric power, reliability, structural reliability, functional reliability, balance reliability, regime reliability, power grid, technical failures, power supply, power transformer, equipment wear, relay protection, stability of power systems*

Ключевые слова: *парные полюса, пазы статора, концентрические обмотки, группа катушек*

Giriş. Etibarlılıq - obyektin müəyyən olunmuş funksiyaları müəyyən olunmuş həcmdə və müəyyən edilmiş istismar şəraitində yerinə yetirmək qabiliyyətidir [1]. Əgər elektroenergetika sahəsini nəzərdən keçirsək, bu, enerji təchizatının keyfiyyət göstəricilərinin qəbul edilən hədləri daxilində fasiləsiz təmin olunması və insanlar və ətraf mühit üçün təhlükəli vəziyyətlərin istisna edilməsidir. Tədqiqat obyekti kimi həm ayrı-ayrı elementlər - məsələn, açarlar, xətlər, transformatorlar və s., həm də elementlərin cəmi - yarımstansiyalar və s. başa düşülür" [1].

Bəzən hesablamaları sadələşdirmək üçün “struktur etibarlılığı” və “funksional etibarlılıq” terminləri işlədilir.

“Birinci termin funksiyaların yerinə yetirilmə həcminin önəm daşımadığı şəraitdə etibarlılığı ifadə edir. Bu halda, vəziyyət dəyişənlərinin qəbul edilən qiymətləri sahəsinə yalnız struktur xarakteristikalar daxildir və rejim parametrləri təxmini şəkildə nəzərə alınır. Beləliklə, sistemin strukturu ilə - yəni elementlərin tərkibi, onların qarşılıqlı əlaqəsi, keçirmə qabiliyyəti ilə bağlı olan, lakin elementlərin funksiyalarını yerinə yetirmə xüsusiyyətləri nəzərə alınmadan formalaşan etibarlılıq komponenti struktur etibarlılığı adlanır (bu, layihələndirmə mərhələsində xüsusilə vacibdir).

Funksional etibarlılıq isə, əksinə, rejim parametrləri sahəsində etibarlılığı nəzərdən keçirir və struktur xarakteristikaların qiymətləri dəyişməz və əvvəlcədən verilmiş hesab olunur. Yəni burada rejimlərin analizi, onların məhdudiyyətləri və struktur dəyişdikdə keçirmə qabiliyyəti nəzərdən keçirilir (bu isə istismar zamanı xüsusilə vacibdir)" [4-6].

"Balans etibarlılığı" həm tədricən, həm də qəfil nasazlıqlar zamanı güc və ya enerji çatışmazlıqları ilə əlaqədardır. Bu nasazlıqlar istehlakçıların məhdudlaşdırılması və ya şəbəkədən ayrılması, həmçinin elektrik enerjisinin keyfiyyətinin aşağı düşməsi ilə müşayiət oluna bilər. Belə hallar, yükün mövcud və ya işlək gücü aşması və ya enerji resurslarının çatışmazlığı səbəbilə baş verə bilər.

Balans etibarlılığının pozulmasının qarşısını almaq üçün ilkin enerji resursları ilə təminat baxımından tədbirlərdən biri elektrik stansiyalarında bu resursların ehtiyatlarının yaradılmasıdır. Gələcək dövrlərdə istehsal gücləri ilə təminat yeni generasiya güclərinin və sistem əhəmiyyətli şəbəkələrin istismara verilməsi və ya əsas şəbəkənin gücləndirilməsi hesabına həyata keçirilir. İstismar mərhələsində isə bu məqsədlə qəza təmiri və ya avadanlığın planlı təmirdən vaxtından əvvəl çıxarılması üsullarından istifadə olunur» [1-3].

"Rejim etibarlılığı" isə statik və dinamik olmaqla iki yerə bölünür.

«Aşağı balans etibarlılığı təbii olaraq elektrik enerjisi sisteminin (EES) həm statik, həm də dinamik rejim etibarlılığına təsir edir. Dinamik rejim etibarlılığının növləri istehlakçılar üçün nəticələrinə görə fərqlənir: bu, qısa müddətli enerji keyfiyyətinin pisləşməsi və ya istehlakçıların ayrılması, sistemin dayanıqlığının pozulması, EES-in hissələrə bölünməsi, genişmiqyaslı istehlakçıların ayrılması, sistemin yaşarlığı (dayanıqlılığı) üçün isə kütləvi istehlakçı ayrılması və sistemin bölünməsi ilə nəticələnə bilər» [8].

Etibarlılığın qiymətləndirilməsi məsələlərinin həllinə çoxsaylı tədqiqatlar həsr olunmuşdur.

«Ehtimal nəzəriyyəsinin etibarlılığın təmin olunması məsələlərində tətbiqinə dair ilk nəşrlər 1930-cu illərdə meydana çıxdı, çünki qəza halları və onların nəticələrinin kəmiyyət göstəricilərinə ehtiyac yaranmışdı. Belə göstəriciləri əldə etmək üçün gələcəkdə müəyyən şəraitdə sistemlərin davranışını proqnozlaşdırmağa və hesablamağa imkan verən nəzəriyyə tələb olunurdu. Bu cür nəzəriyyə - etibarlılıq nəzəriyyəsi oldu.

Etibarlılıq nəzəriyyəsinin inkişafının başlanğıcını İkinci Dünya Müharibəsi dövrünə aid etmək olar. Əvvəlcə etibarlılıq problemi radioelektron cihazlara və avtomatika sistemlərinə aid olaraq formalaşdırılmışdı. Məlumdur ki, ilk formal etibarlılıq hesablamaları Almaniyanın FAU-1 və FAU-2 reaktiv mərmilərinin keyfiyyətsizliyinə izahat tapmaq cəhdləri zamanı aparılmışdır. Bu mərmilər çoxlu sayda detaldan ibarət idi və onların hər biri ayrı-ayrılıqda etibarlı hesab olunurdu. Lakin yalnız bu eksperimentdən sonra belə bir fundamental nəticəyə gəlinmişdir ki, hər hansı bir elementi sıradan çıxdıqda bütün sistemin işləməməsi ilə nəticələnən sistemin etibarlılığı, həmin müstəqil elementlərin etibarlılıq göstəricilərindən asılıdır və buna görə də bəzən ən aşağı göstəricidən belə çox aşağı ola bilər.

Bu sadə nəticə bu gün yaxşı bilinsə də, həmin dövrdə bu əsl kəşf idi.

Müharibədən sonra etibarlılığın öyrənilməsinə dair ilk sistemli cəhdlər elektronika, nüvə və kosmik sənaye sahələrində edilmişdir, çünki bu sahələrdə artan mürəkkəblikli sistemlərdən yüksək

etibarlılıq tələb olunurdu. Təcrübə artdıqca, məsələlərin formallaşdırılması və digər texniki sahələrə yayılması ilə etibarlılıq nəzəriyyəsi tədricən ümumi elmi bir fənn xüsusiyyəti almağa başladı. Nəticədə, bu gün etibarlılıq nəzəriyyəsinin metodları müxtəlif texniki sahələrdə, o cümlədən elektroenergetika sahəsində də tətbiq olunur» [5].

ABŞ-da etibarlılıq nəzəriyyəsinin nəzəri və praktiki mütəxəssisləri IEEE – Elektronika və Elektrik Mühəndisləri İnstitutu tərəfindən təşkil olunan etibarlılıq konfranslarında toplanmağa başladılar [7].

Elektroenergetika sahəsində etibarlılıq üzrə ilk dərs vəsaitlərindən biri - R.Ya. Fedosenkonun 1959-cu ildə nəşr olunmuş "Şəhər elektrik şəbəkələrinin istehlakçılarının enerji təchizatının etibarlılığının hesablanması üsulları" kitabıdır. Elə həmin ildə N.S. Afoninin "Sənaye müəssisələrinin enerji təchizatının etibarlılığı" adlı kitabı nəşr olundu. Bu əsərdə enerji təchizatında baş verən pozuntuların istehlakçılara vurduğu nəticələrin qiymətləndirilməsi məsələləri araşdırılmışdır. Sonralar N.S. Afonin və Ş.Ç. Çokin göstərmişlər ki, etibarlılıq yalnız texniki deyil, iqtisadi kateqoriyadır. Bu səbəbdən düzgün qərarlar qəbul etmək üçün istehlakçıların iqtisadi itkilərinin analizi aparılmalıdır ki, bu da çox əmək tutan bir vəzifədir.

Elə dövrlər olub ki, yalnız bir enerji sisteminin etibarlılığı nəzərdən keçirilir, istehlakçılar üçün etibarsız enerji təchizatının nəticələri isə nəzərə alınmırdı. Lakin sübut olunmuşdur ki, belə yanaşma çoxsaylı məsələlərin, xüsusilə də enerji istehlakının idarə olunması məsələlərinin həllinə imkan vermir» [6].

Buna görə də, elektrik enerjisinin təchizatında planlı və ya qəfil pozuntular zamanı istehlakçıların normal iş rejiminin pozulmasının texniki və iqtisadi nəticələrinin kompleks və sistemli analizi aparılmalıdır.

Əsas hissə. Şəbəkə elektroenergetika kompleksinin dayanıqlı fəaliyyəti magistral və paylayıcı elektrik şəbəkələrinin etibarlı işi olmadan mümkün deyil. Buna görə də, enerji təchizatının etibarlılığı elektroenergetika sisteminin səmərəliliyinin əsas göstəricilərindən biridir.

Etibarlılıq kompleks bir xüsusiyyətdir və obyektin təyinatından və onun istismar şəraitindən asılı olaraq bir neçə ayrıca xüsusiyyətdən ibarət olur. Cədvəl 1-də etibarlılığın xüsusiyyətləri göstərilmişdir.

Cədvəl 1

E t i b a r l ı q							
İmtina-sızlıq	Uzun-ömürlülük	Təmirə yararlılıq	Bərpa-olunma	Daya-nıqlıq	Rejim idarəetməsi	Yaşamlılıq	Təhlükəsizlik

İmtinasızlıq - obyektin müəyyən edilmiş zaman intervalı ərzində məcburi fasilələr olmadan işlək vəziyyətdə davamlı qalmaq xüsusiyyəti [9].

Uzunömürlülük - obyektin müəyyən edilmiş texniki xidmət və təmir sistemi ilə limit vəziyyətə çatana qədər işlək vəziyyətdə qalmaq xüsusiyyəti.

Təmirə yararlılıq - obyektin nasazlıqlarının və zədələrinin yaranma səbəblərinin qabaqlanması və aşkar edilməsinə, eləcə də texniki xidmət və təmir vasitəsilə onların nəticələrinin aradan qaldırılmasına uyğunluğu xüsusiyyəti.

Bərpaolunma - obyektin nasazlıqların yaranma səbəblərinin qabaqlanmasına, aşkar edilməsinə və aradan qaldırılmasına uyğun olması xüsusiyyəti.

Dayanıqlıq - obyektin müəyyən müddət ərzində parametr dəyərlərinin icazə verilən həddən kənara çıxmadan zədələnmədən pozuntulara qarşı davamlılığını qorumaq və qəza öncəsi rejimi bərpa etmək xüsusiyyəti.

Rejim idarəetməsi - obyektin idarəetmə vasitəsilə normal rejimi saxlamaq, yəni normal iş rejimini qorumaq və ya pozuntudan sonra bərpa etmək xüsusiyyəti.

Yaşamlılıq - obyektin pozuntulara qarşı müqavimət göstərməsi və onların kaskad şəkildə inkişaf edərək kütləvi istehlakçı enerji təchizatının pozulmasına yol verməməsi xüsusiyyəti.

Təhlükəsizlik - insanlar və ətraf mühit üçün təhlükəli vəziyyətlərin qarşısını almaq üçün obyektin xüsusi təhlükəsizliyi.

Etibarlılığın qarşılığı uğursuzluqdur. Əsas uğursuzluq növləri cədvəl 2-də göstərilmişdir.

Cədvəl 2

		İmtinaların növləri
İmtinalar	Tam	Funksionallığı qeyri mümkündür
	Katastrofik	Qəfil tam imtina (q.q., izolysiyanın deşilməsi və s.)
	Təsadüf	Çoxlu sayda müstəqil amillərin qarşılıqlı təsiri nəticəsində obyektin normal fəaliyyəti zamanı yaranan
	Köhnəlmə ilə bağlı	Materialın həddindən artıq işlənməsi, köhnəlməsi, aşınması səbəbi olaraq xidmət müddəti qısalır və sonda uğursuzluqlar baş verir
	Hissəli	Bir və ya bir neçə parametr məqbul həddən kənardadır
	Qəflətən	Obyektin işində kəskin pozulma bir və ya bir neçə parametr dəyişdikdə baş verir.
	Parametrik	Təyinedici parametr (temperatur, gərginlik, müqavimət) zamanla davamlı olaraq dəyişəbilən
	Ardıcıl	Müəyyən edilmiş bir və ya bir neçə parametr dəyişdikdə performans səviyyəsində tədricən azalma olur
	Deqradasiyalı	Təbii qocalma, korroziya və istismar yorğunluq prosesin nəticəsi olaraq yaranan nöqsanlar
	Asılı	Digər elementlərin uğursuzluğu nəticəsində yaranan uğursuzluqlar
	Dayanıqlı	Funksionallığı bərpa etmək üçün təmir tələb olunur
	Öz-özünə kənarlaşan	İşçi bacarığın qısamüddətli sıradan çıxma ilə nəticələnən uğursuzluqlar
	Çoxluqlu	İkidən daha çox obyektin və ya elementin eyni səbəbdən, bib-birindən fərqli və asılı olmayan yaranan nöqsan və ya zədə uğursuzluqları
	Kaskadlı	İki və 2≥dən daha çox elementin ardıcıl uğursuzluqları, sonrakı elementin uğursuzluğu əvvəlkinin nəticəsidir
	İşlə bağlı	Məhsulun keyfiyyətinin həddən artıq normadan kənar olması, onun istismarının ilkin mərhələsində özünü göstərir
	İstehsalat	Istehsal və ya təmir zamanı müəyyən texnologiya prosesindən pozuntular və ya kənarlaşmalar nəticəsində yaranır
	Konstruktiv	Müəyyən edilmiş pozuntu və ya qeyri-kamillik nəticəsində yaranır dizayn və mühəndislik qaydaları və ya standartları
	Aydın görünən	Göründükdən dərhal sonra vizual və ya standart üsul və nəzarət və diaqnostika vasitələri ilə aşkar edilir
	Aydın görünməyən	Vizual olaraq və ya standart metodlar, monitorinq və ya diaqnostika vasitələri ilə ayan olunmayan və onları ayan etməkdə xüsusi metodlar və ya tədbirlərin tələbi lazım olur.
	Bazarla bağlı	Elektrik enerjisi bazarı iştirakçılarının plan və ya müqavilə öhdəliklərinin yerinə yetirilməməsi nəticəsində yaranır.
	Resurslu	Obyektin son vəziyyətinə çatması ilə nəticələnən davamlılıq uğursuzluqları
	Asılı olmayan	Digər obyektlərin nasazlığı nəticəsində yaranmır
	Dayanıqsız	Funksionallığı bərpa etmək üçün yalnız bağlanma tələb olunur (məsələn, uğurlu avtomatik yenidən bağlama)
	İstismarla bağlı	Qoyulmuş qaydaların, iş şəraitinin pozulması nəticəsində yaranır
	Təkrarlanma	Bənzər və ya eyni xarakterli təkrar nöqsanlar

Texniki təkmilləşdirmələr zamanı təmir işlərinin tezliyi və köhnəlmiş və fiziki cəhətdən köhnəlmiş avadanlığın qismən və ya tamamilə yeni, daha təkmil avadanlıqlarla dəyişdirilməsi

barədə qərar qəbul etmək üçün aşağıdakıları aparmaq lazımdır: - yarımstansiya və açıqda olan elektrik xətti qurğu və avadanlıq zədələnməsininin tam təhlili; - nöqsan və qəza halların səbəbinin tam təhlili; - vacib dəyişdirilməyə lazım olan EVX komponentini və avadanlığı müəyyən etmək.

Bir cox hallar göstərir ki, EŞ-indəki nasazlıqlar EŞ-nin tərkib hissələrindəki avadanlıqların zədə alması və ya şəbəkə elementlərində yolverilməz iş şəraitinin baş verməsi nəticəsində yaranır ki, bu da onların aradan qaldırılması üçün təcili tədbirlər görülməsini tələb edir.

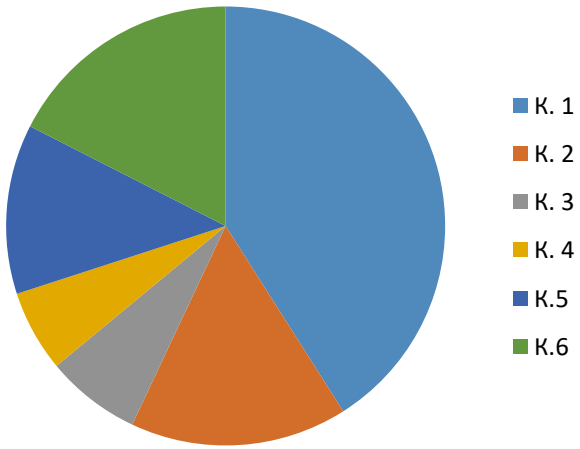
Elektrik şəbəkəsi avadanlığının zədələnməsi, elektrik qurğularının texniki parametrlərində yolverilməz olan kənarlaşmalar, o cümlədən elektrik istehlakçılarının plandankənar tam və ya müəyyən hissənin kəsilmə, sıradan çıxma prosesinin nöqsanı hesab edilir [10].

Bütün texnoloji nasazlıqlar təhqiqat və uçota alınır ki, bu da uzun müddət istismar dövründə EŞ-lərdə fövqəladə hallarla bağlı məlumat bazasının (MB) yaradılmasına şərait verir.

Yarımstansiyalarda elektrik avadanlıqlarının zədələnmə hallarının əsas səbəbləri diaqram şəklində şəkil 1-də göstərilmişdir.

Əsas EŞ-si sistemində yarımstansiyanın və ötürücü xətlərin avadanlığının vəziyyətini qiymətləndirmək üçün üç səviyyəli "işləyən - pozulmuş - qəza baş verməsindən öncə" qaydasından istifadə edilir. İstismar fəaliyyəti - nəzərdə tutulmuş funksiyaları yerinə yetirmək qabiliyyətinin saxlandığı və iş parametrlərinin qiymətlərinin normativ və texniki sənədlərin tələblərinə uyğun olduğu avadanlığın vəziyyəti; Təyin edilmiş funksiyaları yerinə yetirmək qabiliyyətini təsvir edən azı bir parametrinin dəyərinin normativ və texniki sənədlərlə müəyyən edilmiş həddi keçən avadanlığın göstəriciləri pisləşir [4].

2015-ci ilin ilk ayında yarımstansiya avadanlıqlarının 78%-i “işlək”, 22%-i isə “kozunmuş” kimi qiymətləndirilib. Avadanlıqlar "fövqəladə andan əvvəl" qiymətləndirilirsə, elektrik şəbəkəsində tələb olunan əməliyyatı etibarlı şəkildə aparılması üçün təmir və ya dəyişdirmə işləri aparılır.



Şəkil 1. *Avadanlıqda imtinaların inkişaf faizi*

K.1 – avadanlıqların həddindən artıq köhnəlmə halı 36%; K.2 – istismarla və təmirlə bağlı çatışmazlıqlar halı 10%; K.3 – avadanlıqda layihə defektləri halı 9%; K.4 – quraşdırma zamanı yaranan defektlər halı 6%; K.5 – kənar təsirlər halı 15%; K.6 – iqlim təsiri halı 25% .

Quraşdırılmış ilkin elektrik avadanlıqları ilk növbədə 1960-1970-ci illərdə istehsal edilmişdir və texniki xüsusiyyətlərə, çəki və ölçülərə görə müasir ekvivalentlərdən daha aşağıdır. Baxım və təmir xərcləri yaşla artır.

Rele mühafizəsi və avtomatlaşdırma cihazlarının 79% -i elektromexaniki relelərdən istifadə edir. 3%-i mikroelektron, 18%-i isə mikroprosessor əsaslıdır. İstismar müddəti uzadılan rele

mühafizəsinin və avtomatika cihazlarının tam payı (elektromexaniki üçün 25 il, mikroelektronika üçün 12 il, mikroprosessorlar üçün 15 il) 53,2% olur.

Paylayıcı şəbəkə (PŞ) qurğularının vəziyyəti istismar müddəti artıq olan avadanlıqların aşağıdakı payı ilə xarakterizə olunur: yarımstansiyalar üçün 63% (25 ildən çox) və elektrik verilişi xətləri üçün 51% (35 ildən artıq), 50 ildən artıq işlək olan avadanlıqların payı isə yarımstansiyalar üçün 3% və elektrik verilişi xətlər üçün 5% təşkil edir.

Gərginlik sinfinə görə 35 ildən artıq istismarda olan hava xətlərinin xüsusi çəkisi 01.01.2016-cı il tarixinə: - 220 (330) kV-luq hava xətləri – 52%; - 110 kV-luq hava xətləri – 61%; - 35 kV-luq hava (açıq) xətləri – 63%; - 6-20 kV-luq hava (açıq) xətləri – 50%; - 0,4 kV-luq hava (açıq) xətləri – 46%" [7-10].

1 yanvar 2016-cı il tarixinə mövcud statistik məlumatlara əsasən, istismar müddəti 25 ildən artıq olan ilkin yarımstansiya avadanlıqlarının xüsusi çəkisi gərginlik sinfindən asılı olaraq aşağıdakı kimi olmuşdur: - nominal gərginliyi 220 kV və yuxarı olan avadanlıqları üçün – 34%; - nominal U=110 kV olan avadanlıqları üçün – 75%; - nominal U=35 kV olan avadanlıq üçün – 81%; - nominal U=6-20 kV olan avadanlıqları üçün – 62%.

Beləliklə, həm paylayıcı, həm də əsas elektrik şəbəkəsi sistemlərindəki ilkin elektrik avadanlığı əsasən standart xidmət müddətinə çatmışdır və texniki xüsusiyyətləri və etibarlılıq göstəricilərinə görə müasir ekvivalent qiymətindən daha da kiçikdir [11].

Bu, avadanlıqların xidmət müddəti artdıq olduqca texniki xidmət və təmir xərclərinin də artırılmasına tələbi artır.

“0,4-20 kV elektrik (açıq) veriliş xətlərində əsasən alüminium, çılpaq, kiçik en kəsikdə olan məftillər, ağacdan və dəmir-betondan olan dayaqlar.

0,4-110 (220) kV-luq elektrik verilişi xətləri minimum xərclərin nəzərdə olması ilə hesablanmış layihələndirmə və hesaba alınan iqlim şəraitinin də hər 5-10 ildən bir təkrarlana biləcəyi nəzərdə tutulmuşdur.

İstifadə olunan elektrik kabeli, ilk növbədə, alüminium keçiriciləri olan kağız yağı ilə izolyasiya edilmiş kabel idi.

35-110 (220) kV-luq yarımstansiyalar adətən iki güc transformatoru ilə təchiz edilir (yarımstansiyaların ümumi sayının təxminən 70%-i)”.

"Rele mühafizəsi və avtomatlaşdırılmasının (RPA) əksəriyyəti elektromexaniki relelərə əsaslanır – 79%. 5% mikroelektron, 16% isə mikroprosessor əsaslıdır." İstismar müddəti başa çatmış (elektromexaniki cihazlar üçün 25 il, mikroelektron cihazlar üçün 12 il, mikroprosessor qurğuları üçün 15 il) rele mühafizəsi və avtomatlaşdırma cihazlarının ümumi payı 54% təşkil edir [12-14].

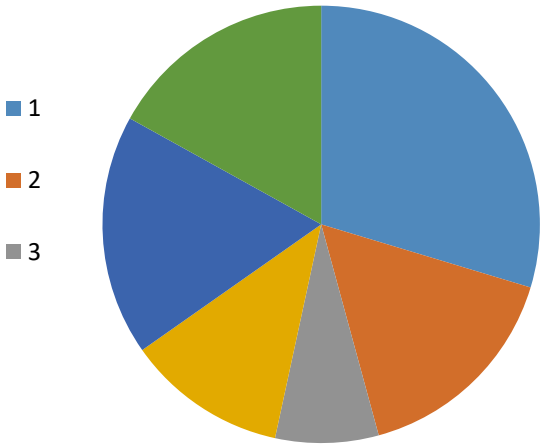
Paylayıcı sistemlərdə quraşdırılmış yarımstansiya avadanlıqların bir-neçə göstəricilərinə görə 25-30 il əvvəl texnoloji cəhətdən inkişaf etmiş ölkələrdə istifadə olunan avadanlıqlara uyğundur.

2015-ci ildə elektrik şəbəkəsi kompleksində avadanlıqların köhnəlməsi (paslanması) ilə bağlı texnologiyada nasazlıq və zədələrin cəm payı 24% təşkil olub. Bu da istismarda uzun müddətdə olan avadanlıqların xüsusi çəkisinin artmasının qarşısını almaq üçün istehsalat parkının kifayət qədərincə həcmin yenilənməsini də təmin etməyi lazım bildirir.

2018-ci ildən etibarən yüksək gərginlikli elektrik açarlarının, həmçinin rele mühafizəsi (RM) və avtomatika cihazlarının (AC) istismarı, texniki xidmət (TX) zamanı yaranan nasazlıqlar nəticəsi olaraq zədələrin sayının azalması ilə bağlı qəzaların sayı azalıb.

"Elektrik xətlərinin zədələnməsinin əsas səbəbləri ildırımların vurulması, izolyasiya elementlərinin çirklənməsi, üçüncü şəxslər adlanan təsirlər və yanğınlardır. Aşan ağaclar səbəbindən texnoloji pozulmaların sayı da davamlı yüksək olur.

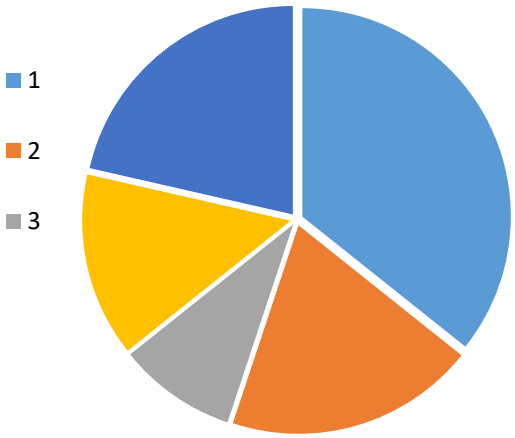
6-20 kV olan şəbəkələrə daxil olan 100 km-lik hava və kabel xətlərində orta hesabla ildə 30-a qədər kəsinti baş verir. 0,4 kV-luq şəbəkələrdə hər 100 km-də ildə 100-ə qədər kəsinti olur" [15].6-20 kV-luq hava xətlərində nasazlıq statistikası şəkil 2-də təqdim olunur.



Şəkil 2. *6-35 kV-luq EVX-lərdə zədələnmə səbəbləri*

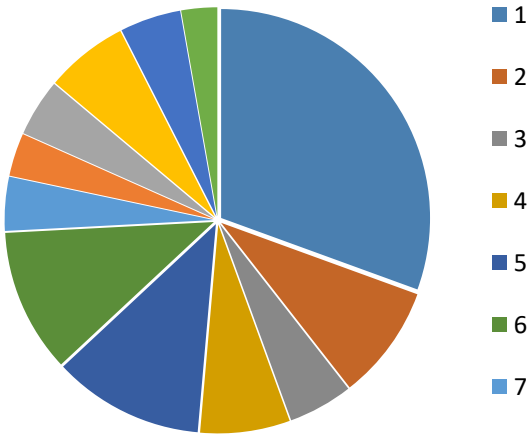
1- Zərərin izah edilməmiş səbəbləri - 28%;
2- İqlim təsirləri (külək, buz və onların birləşməsi) dizayn dəyərlərindən artıq - 19%;
3- Əməliyyat tələblərinə əməl edilməməsi, kadr səhvləri - 6%;
4- İstismar zamanı konstruksiyaların və materialların korlanması - 18%;
5- İldırım dalğaları - 13%;
6- Xarici, icazəsiz təsirlər - 16%.

0,4 - 110 (220) kV gərginlik siniflərində kabel xətlərinin zədələnməsinin səbəbləri şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 3*. 0,4-110 (220) kV-luk kabel xətlərində zədələnmə səbəbləri*

1 - Elektrik kabellərinin təbii yaşlanması - 31% ;
2 - Quraşdırma qüsurları - 20%;
3 - Korroziya - 9%;
4 - İstehsal qüsurları - 10%;
5 - Mexanik zərər - 30%.



Şəkil 4. *Güc transformatorlarının zədələnməsinin səbəbləri*

1 - Sarma izolyasiyasının köhnəlməsi;
2 -Materialın həddindən artıq köhnəlməsi (aşınma, metalın yorğunluq əlaməti, tırkib elementlərin aşınması, conta materiallarının köhnəlməsi);
3 - İstehsal qüsuru;
4 - Dizayn qüsuru;
5 - Qüsuru təmir edin;
6 - Quraşdırma qüsuru;
7 - Əməliyyat qüsurları;
8 - İqlim təsirləri;
9 - Xarici təsirlər;
10 - Səbəblər müəyyən edilməmişdir;
11 - Yolverilməz iş şəraiti;
12 - Sarı örtük:

Güc transformatorlarının daxili zədələnməsinin əsas sayılan səbəbləri olaraq (materialların və izolyasiyanın köhnəlməsi), qəbuledilməz iş şəraiti olub, transformator sarımları ən çox zədələnib - 11,3%.

Beləliklə, təhlillərin nəticələri göstərdi ki, 110-500 kV-luq güc transformatorlarının işində nasazlıqların ən çox yayılmış səbəbi kolların və OLTC qurğularına aid zədələnmələr (zərərin 46%-ti təşkil edir).

Nəticə. Etibarlılıq tələbinin mövcud və inkişaf vəziyyəti təhlil edilərək araşdırılıb. Göstərilib ki, elektrik şəbəkəsi sistemlərinin etibarlılığının müəyyən edilməsi elektrik enerjisi sənayesinin inkişafının indiki mərhələsində vacibdir.

Ötürücü və paylayıcı şəbəkə qurğularının vəziyyətinin təhlili dərindən aparılır. Məlum olub ki, avadanlığın həddindən artıq köhnəlməsi nəticəsi olaraq elektrik şəbəkəsinin bütün hissələrində baş verən nasazlıqların tam payı 24 faiz təşkil edir ki, bu da elektrik şəbəkəsi obyektlərinin texniki yenidən qurulması və yenidən qurulması işlərinin artırılmasına ehtiyac olduğunu göstərir. Güc transformatorlarının və alət transformatorlarının nasazlıq sxeminin təhlili aparılmışdır. Etibarlılıq baxımdan və fasilə olmadan işin təmin edilməsi üçün tədbirlərin işlənib hazırlanması məqsədilə müxtəlif növ avadanlıqların və ümumi enerji təchizatı sisteminin etibarlılığının qiymətləndirilməsinin zəruriliyi nümayiş etdirilir.

Ədəbiyyat

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Şıxəliyeva S.Y., Aşurova U.İ., Azərbaycanın elektrik şəbəkələrində elektrik enerjisi itkilərinin hesablanması, təhlili və tənzimlənməsi təcrübəsi // Tətbiqi fizika və energetikanin aktual məsələləri, III Beynəlxalq elmi konfrans, SDU, Sumqayıt, 27-28 oktyabr 2022, s.130-132.
7. 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.
8. 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.
9. Sultanov E., Məmmədov E.M., Həsənov E.A., İsmayılov S.S., Application of soft starting and braking for electricaldrives of boom mechanism of shipboard cranes, “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – 2023. Issue 56, Volume 15, Number 3, page. 303-308
10. Sultanov E., Həsənov E.A., İsmayılov S.S., Məmmədov E.M., Transient process of electrical drive of a ship mooring controlled by a frequency converter, “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – 2023. Issue 56, Volume 15, Number 3, page. 290-297
11. Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. М.: Изд-во журнала «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. 196 с. 42.
12. Нозик А.А., Можаев А.С., Струков А.В., Гладкова И.А. Применение программного комплекса АРБИТР в задачах проектной оценки надежности структурно-сложных систем//Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 67. Актуальные проблемы надежности систем энергетики.2015. С. 4-8. 43.
13. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. 135 с. 44.
14. Папков Б.В., Пашали Д.Ю. Надежность и эффективность электроснабжения: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2005. 380 с. 45.
15. Папков Б. В., Куликов А. Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. М. : Изд-во Юрайт, 2016. 470 с.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: prof. Lazımov T.M.

UOT 681.5.01

ELEKTRİK TƏCHİZAT SİSTEMİNDƏ GƏRGİNLİK SƏVİYYƏSİNİN STATCOM VASİTƏSİLƏ QORUNMASI

Zeynalova N.F.

"Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu" MMC
Az1122, Bakı şəh., Həsən bəy Zərdabi küç., 94
Azərbaycan Texniki Universiteti
Az1073, Bakı şəh., H. Cavid pr., 37
E-mail: zeynalovanuride0@gmail.com

Xülasə. *Müasir sənayenin inkişafı çox sayda müxtəlif elektrik aparatlarının və mürəkkəb elektron cihazların tətbiqi ilə ayrılmaz şəkildə bağlıdır. Bu proses, elektrik istehlakının əhəmiyyətli dərəcədə artması ilə müşayiət olunur. Bu prosesdə ciddi maneələrdən biri müəssisənin işində pozuntulara və avadanlıqların sıradan çıxmasına səbəb olan gərginlik düşmələridir. Məqalədə mövzunun aktuallığı təsvir olunur və gərginlik düşməsi anlayışının tərifi verilir. Müəssisələrdə gərginlik düşməsinin əsas səbəbləri və nəticələri haqqında məlumatlar təqdim olunur.*

Abstract. *The growth of modern industry directly connects to the introduction of a wide variety of electrical apparatus and complex electronic devices. This growth inevitably leads to a significant increase in electricity consumption. Voltage sags present a serious obstacle in this process, causing disruptions in operations and equipment failures, which can lead to costly downtimes and increased maintenance expenses. The article discusses the relevance of the topic, defines voltage sags. The analysis presents data on the primary causes and effects of voltage sags at various enterprises.*

Аннотация. *Развитие современной промышленности неразрывно связано с внедрением большого количества разнообразных электрических аппаратов и сложных электронных устройств. Данный процесс неизбежно сопровождается значительным ростом потребления электроэнергии. Серьезным препятствием в этом процессе являются провалы напряжения, приводящие к нарушениям работы предприятия и поломке оборудования. В статье описана актуальность темы, дано определение понятия провала напряжения. Представлены данные об основных причинах и последствиях провалов напряжения на предприятиях.*

Açar sözlər: *elektrik təchizat sistemi, gərginliyin kəskin düşməsi, statik reaktiv güc kompensatoru, STATCOM*

Key words: *power supply system, voltage drop, static reactive power compensator, STATCOM*

Ключевые слова: *система электроснабжения, провал напряжения, статический реактивный силовой компенсатор, СТАТКОМ*

Giriş. Məlumdur ki, fasiləsiz enerji təchizatı olmadıqda, müəssisələrdə quraşdırılmış texnoloji avadanlıqlar normal işləyə bilməz [1]. Şəkil 1-də gərginliyin kəskin düşməsinin qiyməti və davametmə müddəti ilə xarakterizə olunan gərginliyin kəskin düşməsi təsvir edilmişdir.

Mürəkkəb texnoloji proseslərə malik sənaye müəssisələrinin enerji təchizatı sistemləri (kimya, neft hasilatı, neft emalı və s.) mürəkkəb strukturu və mühərrik yüklərinin (nasoslar, kompressorlar, ventilyatorlar və s.) böyük nisbəti və gücü ilə xarakterizə olunur. Enerji təchizatı sistemində gərginliyin enməsi və kəskin düşməsi zamanı elektrik mühərriki yüklərinin yüksək

etibarlılığı, avtomatik olaraq yenidən işə salınması və ehtiyat gücün avtomatik daxil edilməsini təmin etmək lazımdır.

Sənaye müəssisələrinin xarici elektrik təchizatı şəbəkələrində gərginliyin azalmasının əsas səbəbi birfazalı qısaqapanmalardır. 6-10 kV gərginlikli sənaye müəssisələrinin daxili enerji təchizatı şəbəkələri üçün gərginliyin azalmasının əsas səbəbləri:

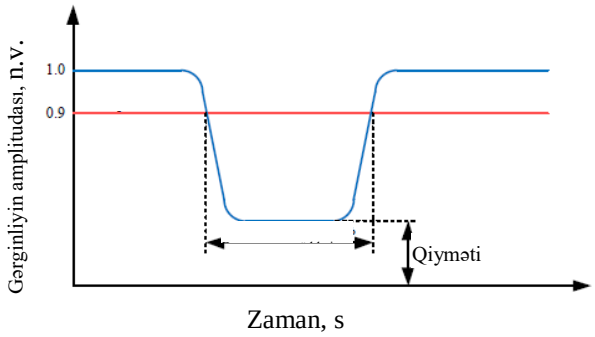
- 6-10 kV-lik şəbəkədə qısaqapanmalar;
- güclü elektrik mühərriklərinin işə salınması və öz-özünə işə düşməsi.

6-10 kV-lik şəbəkədə zədələnmənin əsas növü iki fazalı qısaqapanmaya keçən yerlə bir fazalı qapanma və ya ikiqat yerlə qapanmadır.

Texnoloji avadanlıqların pozulmasının əsas səbəbləri bunlardır:

- gərginlik düşməsi;
- mexaniki aşınma;
- mənfi ekoloji şərait;
- proqram səhvləri.

Əsas hissə. Müəssisələrin elektrik təchizat sistemlərində yaranan problemlərdən ən əsası gərginliyin kəskin düşməsidir ki, bu da sistemdə qəza vəziyyəti yaradır. Buna görə də, elektrik təchizatı şəbəkələrində gərginliyin sabitliyini qorumaq hazırda bir çox aparıcı sənaye müəssisələri üçün çox vacibdir.



Şəkil 1. *Gərginliyin kəskin düşməsinin tipik nümunəsi*

Gərginliyin kəskin düşməsi, elektrik sisteminin müəyyən edilmiş nöqtəsində gərginliyin təyin olunmuş qiymətindən müvəqqəti azalması kimi müəyyən edilir [2]. Onlar adətən, düzbucaqlı bir formaya malikdirlər, qiyməti və davametmə müddəti ilə xarakterizə olunurlar. Şəkil 1-də gərginliyin kəskin düşməsinin forması göstərilmişdir [3].

Elektrik gərginliyinin qiymətinin 0,9 Unom-dan aşağı düşməsi, burada Unom - nominal gərginlikdir. Gərginliyin nominal qiymətindən 10%-dən çox aşağı düşməsi pozulma kimi müəyyən edilir [4].

[5]-ə görə, elektrik şəbəkələrində gərginliyin kəskin düşməsini əsas səbəbləri aşağıdakılar ola bilər:

1. Elektrik nasazlıqları. Enerji paylama sistemindəki qısa qapanma, fazalararası qapanmalar və faza və yer arasında qapanma gərginliyin kəskin düşməsinə əsas səbəbdir. Onlar 35-500 kV gərginlikli sənaye müəssisələrinin xarici enerji təchizatı şəbəkələrində və 6-10 kV gərginlikli sənaye müəssisələrinin daxili enerji təchizatı şəbəkələrində baş verir.

2. İcazəsiz açılmalar. Heyətin səhv hərəkətləri, texnoloji mühafizədən açılma və ya əks-qəza avtomatik qurğularından açılma. Bu tip kəskindüşmələr qidalanma gərginliyinin olmaması ilə xarakterizə olunur və onların davametmə müddəti (T = 0,1-4 s) olmaqla avtomatik mühafizə cihazlarının cavab müddəti ilə müəyyən edilir.

3. Şəbəkənin dəyişdirilməsi. Belə hallarda, güclü mühərriklərin işə salınması nəticəsində yaranan gərginliyin kəskin düşmə miqyası 30 saniyəyə qədər davam edən 0,8 Unom-a çata bilər. Bu enişlərin nəticələri icazəsiz bağlanmaların yaratdığı nəticələrlə eynidir.

Sənaye şəraitində gərginliyin azalmasının nəticələri ciddi ola bilər: istismarda kiçik fasilələrdən tutmuş avadanlıqların əhəmiyyətli zədələnməsinə və istehsal itkilərinə qədər. Əsas nəticələr bunlardır:

1. İşdə nasazlıqlar və boşdayanmalar. Avtomatlaşdırılmış istehsal xətlərinin, robot texnikasının və digər sənaye avadanlıqlarının düzgün işləməsi sabit gərginlikdən asılıdır. Gərginliyin düşməsi bu sistemlərdə nasazlıqlara, onların sıfırlanmasına və ya tam dayanmasına səbəb ola bilər. Hətta qısamüddətli fasilə istehsal proseslərini dayandıra bilər, xüsusən də avtomobil istehsalı və ya kimyəvi emal kimi yüksək sürətli, fasiləsiz əməliyyatları olan sənayelərdə dayanma vaxtı və əhəmiyyətli itkilərə səbəb ola bilər.

2. Avadanlıqların nasazlıqları. Gərginliyin azalması proqramlaşdırıla bilən məntiq kontrollerləri (PLC), tezlik-tənzimləmə intiqalları və idarəetmə sistemləri kimi həssas elektronikada nasazlıqlara səbəb ola bilər.

3. Mühərrikin effektivliyinin aşağı düşməsi və dayanma. Elektrik mühərrikləri konveyerlərdən və nasoslardan tutmuş istilik, havalandırma və kondisioner sistemlərinə qədər sənaye tətbiqlərində geniş istifadə olunur. Gərginliyin kəskin düşməsi fırladıcı momenti azaldır, nəticədə məhsuldarlıq azalır. Bəzi hallarda mühərriklər dayana bilər və bu, həddindən artıq istiləşməyə və ya zədələnməyə səbəb ola bilər. Təkrarlanan dayanmalar mühərrikin aşılanmasına, avadanlığın ömrünün azalmasına və texniki xidmət xərclərinin artmasına səbəb ola bilər.

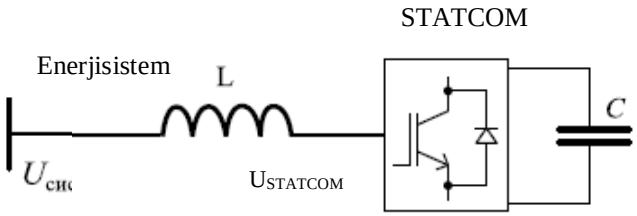
4. Mühafizə cihazlarının tez-tez işə düşməsi. Avtomatik açarlar, relelər və qoruyucular gərginliyin kəskin düşməsinə cavab olaraq, baş verənləri həddindən artıq yüklənmə və ya nasazlıq kimi başa düşərək, işə düşə bilərlər. Bu, zavodun maşın və avadanlıqlarının lazımsız şəkildə dayandırılmasına, əməliyyatların daha da pozulmasına səbəb ola bilər. Mürəkkəb avadanlıqları olan sənayelərdə sistemlərin yenidən işə salınması əhəmiyyətli vaxt və səy tələb edə bilər ki, bu da istehsalın gecikməsinə səbəb olur.

Qeyd edildiyi kimi gərginliyin kəskin düşməsinin əsas xarakteristikası onun qiyməti və davametmə müddətidir. Ona görə də onun təsirini aşağı salmaq üçün tətbiq olunan tədbirləri iki yerə ayırmaq olar:

1) Gərginliyin kəskin düşməsinin dərinliyini azaltmaq üçün vasitələr [6]:
- statik reaktiv güc kompensatoru;
- statik fasiləsiz enerji təchizatı;
- dinamik gərginlik təhrif kompensatoru;
- volan (maxovik);
- batareyanın enerji saxlama sistemi;
- sinxron maşınların təsirlənmə sürətinin artırılması.

2) Gərginliyin kəskin düşməsinin davametmə müddətini azaltma üsulları:
- Ehtiyatın yüksək sürətli avtomatik qoşulması;
- Yüksək sürətli mühafizənin istifadəsi.

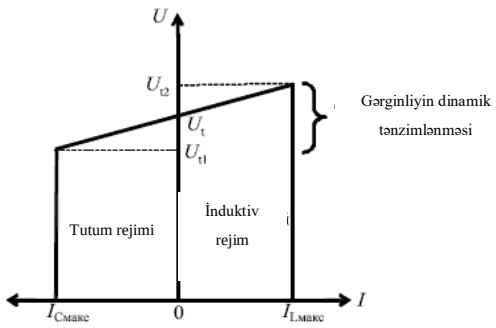
Statik reaktiv güc kompensatoru (STATCOM) dəyişən cərəyan ötürmə xətlərində quraşdırılmış və paralel qoşulmuş bir qurğudur [7]. Onun əsas elementləri izolyasiya edilmiş qapılı bipolyar tranzistorlar (IGBT) kimi güc yarımkeçirici cihazları və kondensatorlar, rezistorlar və induktorlar kimi passiv elementlərdir [8]. STATCOM, FACTS (Flexible AC Transmission System) texnologiyası ilə əlaqəli cihazlar qrupunun bir hissəsidir [9]. FACTS (Flexible AC Transmission System) idarəetmə qabiliyyətini və enerji ötürmə imkanlarını təkmilləşdirmək üçün əsas komponentləri güc elektron cihazları və digər statik kontrollerlər olan sistemdir ki, bu da elektromexaniki bazadan istifadə edən sistemlərlə müqayisədə daha sürətli cavab verir [9]. STATCOM-un elektrik şəbəkəsinə qoşulma sxemi şəkil 2-də göstərilmişdir.



Şəkil 2. *STATCOM-un şəbəkəyə birləşmə sxemi*

STATCOM-un əsas hissəsi bir-birinə bağlı IGBT tranzistorları seriyası ilə təmsil olunan statik çeviricidən ibarətdir. O, iki rejimdə işləyə bilər - reaktiv gücün generasiyası və istehlakı. İnverterlər C kondensatorunun yaratdığı sabit gərginliyi dəyişən gərginliyə çevirir. L induktorları ilə təmsil olunan birləşdirici transformatordan istifadə edərək, STATCOM yüksək gərginlikli sistem ilə statik kompensatorun nominal gərginliyi arasında izolyasiyanı təmin edərək, elektrik şəbəkəsinə qoşulur [9].

STATCOM-un tədqiqi üçün şəkil 3-də göstərilən STATCOM-un volt-amper xarakteristikası nəzərə alınmalıdır.



Şəkil 3. *STATCOM-un volt-amper xarakteristikası*

Şəkildə STATCOM-un iki iş rejimi göstərilir:

1. Gərginliyin tənzimlənməsi;
2. Elektrik şəbəkəsində reaktiv güc balansının təmin edilməsi.

Şində gərginlik nominal qiymətdən U_t kənara çıxırsa və U_{t1} və U_{t2} arasında dəyişirsə, STATCOM gərginliyin tənzimlənməsi rejimində işləyir və şində gərginliyini nominal qiymətdə saxlayır. Şin gərginliyi U_{t1}-dən aşağı düşərsə və ya U_{t2}-dən yuxarı qalxarsa, STATCOM sistemə tutum və ya induktiv cərəyan verməklə şəbəkədəki reaktiv gücü idarə etməyə başlayır.

Dinamik xüsusiyyətlərinə görə, STATCOM digər reaktiv güc kompensatorlarını əhəmiyyətli dərəcədə üstələyir.

Nəticə. 1. Bu məqalədə müasir sənaye müəssisələrində enerji təchizatının xüsusiyyətlərini araşdırılır. Sənaye enerji sistemlərində qəza hallarının əsas səbəbləri təqdim olunur. Gərginliyin kəskin düşməsi texnoloji avadanlıqların nasazlığının əsas səbəbi olduğu göstərilir. Sənaye müəssisələri üçün gərginliyin azalmasının texnoloji və iqtisadi nəticələri də təsvir edilmişdir.

2. Gərginliyin kəskin düşməsi ilə mübarizə üçün əsas vasitələrin və üsulların siyahısı verilmişdir. Şəbəkədə gərginliyi sabitləşdirmək üçün ən təsirli cihazlardan biri - STATCOM hesab olunur. STATCOM-un iş prinsipi təsvir edilmiş, onun şəbəkəyə qoşulmasının təsviri verilmiş və onun əsas iş xüsusiyyətləri verilmişdir.

Ədəbiyyat

1. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., Ахметшин А.Р. Эффективный метод определения места короткого замыкания в электрических сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(2):71-83. https://doi.org/-10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83
2. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(4):90-104. https://doi.-org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104
3. Khaleel M., Yusupov Z., Elmnifi M., Elmenfy T., Rajab Z., & Elbar, M. (2023). Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid. Int. J. Electr. Eng. And Sustain., 1(3), 10–26. Доступно по: https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/40 Ссылка активна на 16 января 2025.
4. Корнилов Г.П., Коваленко А.Ю., Николаев АА., и др. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 2(23). – С. 44-48. – EDN SNOTPZ.
5. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков; Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – Москва: Элекс-КМ, 2005. – 407 с. – ISBN 5-93815-025-6. – EDN QMIQZR.
6. Qingguang Y., Pei L., Wenhua L. and Xiaorong X. Overview of STATCOM technologies. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings, Hong Kong, China, 2004, pp. 647-652 Vol.2, doi: 10.1109/DRPT. 2004.1338063.
7. Hamdan I., Ibrahim A.M.A., Noureldeen O. Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag // SN Appl. Sci. 2020. N2, p. 364. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6
8. Sharma V., Chandrakar V. Power Quality Enhancement by minimizing the effect of Voltage Sag in Non-linear Load Using D-STATCOM // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2325. 012019. 10.1088/1742-6596/2325/1/012019.
9. Zeynalova N.F., Hacıyev N.I., Rəcəbov K.D., Nuriyeva N.C. Reaktiv gücün müasir üsullarla kompensasiyası. SDU, “Elmi xəbərlər”, Cild 23, 2023, №1

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Tövsiyə edib: dos. Sultanov E.F.

GƏMİÇİLİKDƏ TƏBİƏT ELMLƏRİNİN PROBLEMLƏRİ

UOT 517.957

HİPERBOLİK FUNKSİYALARIN TƏTBİQİ İLƏ İNTEQRALLARIN HESABLANMASI

Ağarzayev B.K., Abdullayeva A.R.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az.1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç.,18
E-mail:bahruz.agarzayev@asco.az, aynur.abdullayeva@asco.az

Xülasə. *Hiperbolik funksiyalar terminə ilk dəfə 1757-ci ildə Vinçenço Rikkatinin işlərində rast gəlinir. O, vahid hiperbola üzərində tədqiqat apararkən bu funksiyaları daxil etmişdir. Hiperbolik funksiyaların xassələri daha dolgun, geniş şəkildə İohann Henrix Lanbertin işlərində verilir. Ümumiyyətlə hiperbolik funksiyalar elementar funksiyalar sinfinə aid olub, sıx şəkildə triqonometrik funksiyalarla əlaqəlidir, bu funksiyalar eksponensial funksiyalarla ifadə olunur. Deməli, bu funksiyalar ilk dəfə XVIII əsrdə riyazi analiz və analitik həndəsəyə tətbiq olunmağa başlamışdır, daha sonra müxtəlif elm sahələrində, mühəndis işlərində də istifadə olunmuşdur.*

Məqalədə hiperbolik funksiyaların tətbiqi ilə bəzi irrasional ifadələrin inteqrallanmasından bəhs edilir. Belə ki, uyğun əvəzləmələrin köməyilə inteqralaltı funksiyalar sadələşdirilib cədvəl inteqrallarının hesablanmasına gətirilir.

Abstract*. The term Hyperbolic Functions was first encountered in the works of Vincenzo Riccati in 1757. He introduced these functions while conducting research on the unit hyperbola. The properties of hyperbolic functions were given more fully and extensively in the works of Johann Heinrich Lambert. In general, hyperbolic functions belong to the class of elementary functions and are closely related to trigonometric functions, being expressed using exponential functions. Therefore, these functions first began to be applied in Mathematical Analysis and Analytical Geometry in the 18th century, and were later used in various fields of science and in engineering work.*

The article discusses the integration of certain irrational expressions through the application of hyperbolic functions. Thus, with the aid of appropriate substitutions, the integrands are simplified and reduced to the calculation of table integrals (or standard integrals).

Аннотация. *Термин "гиперболические функции" впервые встречается в работах Винченцо Риккати в 1757 году. Он ввел эти функции, проводя исследования на единичной гиперболе. Свойства гиперболических функций более полно и широко изложены в работах Иоганна Генриха Ламберта. В целом, гиперболические функции относятся к классу элементарных функций, тесно связаны с тригонометрическими функциями и выражаются через экспоненциальные функции. Следовательно, эти функции впервые стали применяться в математическом анализе и аналитической геометрии в XVIII веке, а затем нашли применение в различных областях науки и в инженерных работах.*

В статье рассматривается интегрирование некоторых иррациональных выражений с помощью гиперболических функций. Так, с помощью соответствующих замен подынтегральные функции упрощаются и сводятся к вычислению табличных интегралов.

Açar sözlər: *funksiya, inteqral, hiperbolik, triqonometrik əvəzləmə, kvadrat üçhədli*

Key words: *function, integral, hyperbolic, trigonometric substitution, quadratic trinomial (or quadratic polynomial)*

Ключевые слова: *функция, интеграл, гиперболический, тригонометрическая замена, квадратный трехчлен*

Giriş. Məlumdur ki, hiperbolik funksiyalar aşağıdakı şəkildə təyin edilir [1].

$$sh\,x=\frac{e^{x}-e^{-x}}{2} \qquad ch\,x=\frac{e^{x}+e^{-x}}{2}$$

$$th\,x=\frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}} \qquad cth\,x=\frac{e^{x}+e^{-x}}{e^{x}-e^{-x}}$$

Hiperbolik funksiyaların bəzi sadə xassələrini qeyd edək:

1) $ch^{2}x-sh^{2}x=1$
2) $sh\,2x=2\,ch\,x\,sh\,x$
3) $ch\,2x=ch^{2}x+sh^{2}x$
4) $th\,2x=\dfrac{2th\,x}{1+th^{2}x}$
5) $cth\,2x=\dfrac{1}{2}(th\,x+cth\,x)$

Əsas hissə. Burada $\int R(x,\sqrt{ax^{2}+bx+c})\,dx$ şəklində olan inteqralların hesablanması məsələlərinə baxılır. İnteqral altındakı kvadrat üçhədlini aşağıdakı şəkildə yazırıq [2].

$$ax^{2}+bx+c=a\left[\left(x^{2}+\frac{b}{a}x+\frac{b^{2}}{4a^{2}}\right)+\frac{c}{a}-\frac{b^{2}}{4a^{2}}\right]=a\left[\left(x+\frac{b}{a}\right)^{2}+\frac{4ac-b^{2}}{4a^{2}}\right]=a\left(y+\frac{4ac-b^{2}}{4a^{2}}\right)$$

Burada $x+\dfrac{b}{a}=y$

a -nın işarəsindən asılı olaraq aşağıdakı hallara baxırıq:

1) Əgər $a>0$ isə onda $\dfrac{4ac-b^{2}}{4a^{2}}=\pm h^{2}$ əvəzləməsi aparıb $dx=dy$ olduğunu nəzərə alaraq baxılan inteqralı aşağıdakı şəklə gətiririk:

$$\int R(x,\sqrt{ax^{2}+bx+c})\,dx=\int R(y-\frac{b}{2a},\sqrt{a}\cdot\sqrt{y^{2}\pm h^{2}})\,dy \qquad (1)$$

2) Əgər $a<0$ olarsa, onda $ax^{2}+bx+c=-a\left(\dfrac{b^{2}-4ac}{4a^{2}}-y^{2}\right)$ kimi yazıb,

$\dfrac{b^{2}-4ac}{4a^{2}}=h^{2}$ qəbul edib alırıq ki,

$$\int R(x,\sqrt{ax^{2}+bx+c})\,dx=\int R(y-\frac{b}{2a},\sqrt{-a}\cdot\sqrt{h^{2}-y^{2}})\,dy \qquad (2)$$

Beləliklə çevirmələrin köməyilə yuxarıdakı (1) və (2) inteqrallarının hesablanması

$$J_{1}=\int R_{1}(y,\sqrt{y^{2}+h^{2}})\,dy \qquad J_{2}=\int R_{1}(y,\sqrt{y^{2}-h^{2}})\,dy \text{ və}$$

$$J_{3}=\int R_{1}(y,\sqrt{h^{2}-y^{2}})\,dy$$

inteqrallarının tapılmasına gətirilir.

Burada R_{1} - rasioanal funksiyanın simvoludur.

$y = h\,sht$ əvəzləməsinin köməyilə J_1 inteqralı hiperbolik funksiyaların inteqrallanmasına gətirilir:

$$J_1 = \int R_1(h\,sht, h\,cht)\,h\,cht\,dt = \int R_2(sht, cht)\,dt \tag{3}$$

Analoji qayda ilə J_2 və J_3 inteqralları da uyğun olaraq $y = h\,cht$, $y = h\,tht$ əvəzləmələrinin köməyilə hesablanır [3].

İndi isə aşağıdakı misallara baxaq:

Misal 1. $\int \sqrt{x^2 + a^2}\,dx$ inteqralını hesablayın.

Həlli: Tutaq ki, $x = a\,sht$, onda $dx = a\,cht\,dt$ olar və

$$\int \sqrt{x^2 + a^2}\,dx = a^2 \int ch^2 t\,dt = \frac{a^2}{2}\int (ch\,2t + 1)dt = \frac{a^2}{2}\left(\frac{sh\,2t}{2} + t\right) + C =$$

$$= \frac{a^2}{2} sht\,cht + \frac{a^2}{2} t + C = \frac{1}{2} x\sqrt{x^2 + a^2} + \frac{a^2}{2} Arsh\frac{x}{a} + C$$

Burada $Arsh\dfrac{x}{a}$ funksiyası $x = a\,sht$ funksiyasının tərs funksiyasıdır.

Misal 2. $\int \sqrt{(x^2 - 1)^3}\,dx$ inteqralını hesablayın.

Həlli: Fərz edək ki, $x = cht$, deməli $dx = sh\,t\,dt$

$$\int \sqrt{(x^2 - 1)^3}\,dx = \int sh^4 t\,dt = \int\left(\frac{ch\,2t - 1}{2}\right)^2 dt = \frac{1}{4}\int ch^2\,2t\,dt -$$

$$-\frac{1}{2}\int ch\,2t\,dt + \frac{1}{4}\int dt = \frac{1}{32} sh\,4t - \frac{1}{4} sh\,2t + \frac{3}{8} t + C$$

Əgər

$$sh\,4t = 2\,sh\,2t\,ch\,2t = 4\,cht\,sht = \left(ch^2 t + sh^2 t\right) = 4x\sqrt{x^2 - 1}(2x^2 - 1),$$

$$sh\,2t = 2x\sqrt{x^2 - 1}, \quad t = Arch\,x = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$$

olduğunu nəzərə alsaq, yaza bilərik ki:

$$\int \sqrt{(x^2 - 1)^3}\,dx = \frac{1}{8}(2x^3 - 5x)\sqrt{x^2 - 1} + \frac{3}{8}\ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) + C$$

Nəticə. Beləliklə baxılan $\int R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c})\,dx$ inteqralında $x = a\,sht$, $x = a\,cht$ əvəzləmələrinin köməyilə inteqral daha asan yolla hesablanır. Çünki, triqonometrik əvəzləmə apardıqda inteqralaltı funksiya daha mürəkkəb şəklə düşür. Lakin, hiperbolik funksiyalarla əvəzləmə zamanı inteqralaltı funksiyanı müəyyən metodların köməyilə rasionallaşdırmaq olur. Burada metodlar dedikdə vuruqlara ayırma, qeyri-müəyyən əmsallar üsulu, hədd əlavə edib çıxma və digər üsullar nəzərdə tutulur.

Ədəbiyyat

1. Ю.Е. Печенежский, А.Н. Якунин. Гиперболические функции и их приложения. Харьков, 2000, стр. 81-100
2. M.V. Vəliyev. Riyazi analiz. Bakı, 2023, səh.100-150
3. B.K. Ağarzayev. Riyazi analiz. Bakı, 2024, səh.70-120

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UOT 629.621

ANALYSIS OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS FOR OPERATOR DIFFERENTIAL EGUATIONS IN HILBERT SPACES

[1,2,3]Aghayeva G.A., [3]Asgarov R.X., [3] Hasanova L.A.

[1]Baku State University, Baku, Azerbaijan
[2] Postdoctoral Department, University of Economics and Pedagogy, Karshi, Uzbekistan
[3]"Azerbaijan State Marine Academy" LEPL
E-mail: gulsumm_agayeva@mail.ru, rafiq.asgarov@asco.az, leyla.hasanova@asco.az

Abstract. *This study provides an in-depth investigation of the regular solvability of boundary value problems for second-order elliptic operator-differential equations defined on a finite interval and involving operator coefficients with discontinuities. Special attention is devoted to understanding how the structural properties of the operator coefficients, their spectral characteristics, and the nature of the boundary operators influence the existence, uniqueness, and stability of solutions.*

The analysis relies on modern techniques of operator theory and spectral analysis in Hilbert spaces, together with generalized boundary conditions that allow the treatment of a broad class of operator-differential models. The paper establishes sufficient conditions for the regular solvability of the boundary value problem, connecting these conditions with the spectral behavior of the corresponding operator coefficients. The results significantly contribute to the theoretical framework of operator-differential equations with discontinuous coefficients and provide a mathematical foundation for further applications in mathematical physics, wave theory, and related areas.

Xülasə. *Bu tədqiqat işində sonlu intervalda təyin edilmiş, əmsalları üzrə fasilələrə malik olan ikinci tərtib elliptik operator-diferensial tənliklər üçün sərhəd məsələlərinin müntəzəm həllolunma xüsusiyyətləri hərtərəfli araşdırılır. İşdə operator əmsalların struktur quruluşu, onların spektral xassələri və sərhəd operatorlarının tipi kimi amillərin həllin mövcudluğuna, yeganəliyinə və dayanıqlığına təsiri detallı şəkildə təhlil edilir.*

Tədqiqat Hilbert fəzalarında operator nəzəriyyəsinin müasir metodlarına əsaslanır və ümumiləşdirilmiş sərhəd şərtlərinin tətbiqi ilə daha geniş sinif operator-diferensial modellərinin təsvirinə imkan yaradır. Müntəzəm həllolunmanı təmin edən kifayət qədər şərtlər əldə edilmiş və bu şərtlərin operator əmsalların spektral xüsusiyyətləri ilə əlaqəsi göstərilmişdir. Alınan nəticələr operator-diferensial tənliklərin nəzəri bazasının dərinləşməsinə və riyazi fizika, dalğaların nəzəriyyəsi və digər tətbiqi sahələrdə modellərin təhlilinə mühüm töhfə verir.

Аннотация. *В данной работе проводится углублённое исследование регулярной разрешимости краевых задач для второго порядка эллиптических операторно-дифференци-*

альных уравнений, определённых на конечном интервале и содержащих операторные коэффициенты с разрывами. Особое внимание уделяется анализу влияния структурных особенностей операторных коэффициентов, их спектральных свойств, а также характера граничных операторов на поведение решений.

Предлагаемый подход основан на современных методах спектральной теории операторов в гильбертовых пространствах и использовании обобщённых граничных условиях, позволяющих описать широкий области операторно-дифференциальных моделей. Установлены достаточные условия регулярной разрешимости краевой задачи, обеспечивающие существование, единственность и устойчивость решения относительно исходных данных. Полученные результаты расширяют теоретическую базу исследования операторно-дифференциальных уравнений с разрывными коэффициентами и могут быть применены при анализе математических моделей в задачах математической физики, теории колебаний и смежных областях.

Key words: *operator-differential equation, boundary value problem, Hilbert space, self-adjoint operator, regular solvability, spectral analysis*

Açar sözlər: *operator-diferensial tənlik, sərhəd məsələsi, Hilbert məkanı, öz-özünə qoşulan operator, müntəzəm həllolunma, spektral təhlil*

Ключевые слова: *операторно-дифференциальное уравнение, краевая задача, гильбертово пространство, самосопряжённый оператор, регулярная разрешимость, спектральный анализ*

Mathematics Subjcet Classifitication: 35125 47A10,58140

1. Introduction.

Let $L_2((0,T);H)$ be the Hilbert space of all functions $f(t)$, defined almost everywhere on the interval $(0,T)$ with values in H, such that

$$\| f \|_{L_2((0,T);H)} = \left(\int_0^T \| f(t) \|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} < \infty .$$

Following the monographs [1, 2], we define the Hilbert space

$$W_2^2((0,T);H) = \{u : u'' \in L_2((0,T);H),\ A^2u \in L_2((0,T);H)\}$$

with the norm

$$\| u \|_{W_2^2((0,T);H)} = \left(\| u'' \|^2_{L_2((0,T);H)} + \| A^2 u \|^2_{L_2((0,T);H)} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Similarly, the spaces $L_2(R;H)$ and $W_2^2(R;H)$, where R is the real line.

We introduce the following subspace of $W_2^2((0,T);H)$

$$W_{2,K}^2((0,T);H) = \{u : u \in W_2^2((0,T);H),\ u'(0) = Fu(0),\ \ u'(T) = 0\},$$

where $F \in L(H_{3/2}, H_{1/2})$. Here, $L(X,Y)$ is the space of bounded linear operators acting from X into Y. In what follows, derivatives are understood in the sense of distributions [1, 2].

Consider the boundary value problem in the space H

$$-u''(t) + \rho(t)A^2u(t) + A_1u'(t) + A_2u(t) = f(t),\quad t \in (0,T), \tag{1}$$

$$u'(0) = Fu(0),\quad u'(T) = 0, \tag{2}$$

where $f(t), u(t)$ are functions with values in H, and the operator coefficients satisfy the following conditions:

1. A is a positively defined self-adjoint operator in H;
2. $\rho(t) = \begin{cases} \alpha^2, & t \in (0, t_0), \\ \beta^2, & t \in (t_0, T), \ t_0 \in (0,T), \ \alpha > 0, \ \beta > 0; \end{cases}$
3. $F \in L(H_{3/2}, H_{1/2})$;
4. $B_j = A_j A^{-j}$ is bounded in H, $j = 1,2$.

Definition. If for $f(t) \in L_2((0,T);H)$ there exists a vector-function $u(t) \in W_2^2((0,T);H)$, that satisfies equation (1) almost everywhere on $(0,T)$, the $u(t)$ is called a regular solution of equation (1).

2. Some results

Lemma 1. Let conditions 1)–3) hold and $\operatorname{Re} A^{-1}F \geq 0$ and $H_{3/2}$. Then for any $u \in W_{2,F}^2((0,T);H)$ the following inequality holds:

$$\left\|Au'\right\|^2_{L_2((0,T);H)} + \left\|\rho^{1/2}A^2u\right\|^2_{L_2((0,T);H)} \leq \operatorname{Re}(P_0u, A^2u)_{L_2((0,T);H)}. \tag{3}$$

Corollary 1. Under the conditions of the lemma, the homogeneous equation $P_0u = 0$ only the trivial solution.

Corollary 2. Under the lemma's conditions, for any $u \in W_{2,F}^2((0,T);H)$ the following inequalities hold:

$$\left\|A^2u\right\|_{L_2((0,T);H)} \leq \frac{1}{\min(\alpha^2;\beta^2)}\left\|P_0u\right\|_{L_2((0,T);H)},$$

$$\left\|Au'\right\|_{L_2((0,T);H)} \leq \frac{1}{2\min(\alpha;\beta)}\left\|P_0u\right\|_{L_2((0,T);H)}.$$

Main results.

Theorem 1. Let the conditions of lemma 1)-3) be satisfied. Then the operator P_0 is isomorphic to space $W_{2,F}^2((0,T);H)$ on $L_2((0,T);H)$.

Theorem 2. Let conditions 1)-4) be satisfied, $\operatorname{Re} A^{-1}F \geq 0$ in $H_{1/2}$ and there is an inequality

$$q(\alpha,\beta) = \frac{1}{2\min(\alpha,\beta)}\left\|B_1\right\| + \frac{1}{\min(\alpha^2,\beta^2)}\left\|B_2\right\| < 1.$$

Then the problem (1),(2) is regularly solvable.

Corollary 3. Let conditions 1) and 4) be satisfied and inequality holds $\frac{1}{2}\left\|B_1\right\| + \left\|B_2\right\| < 1$.

Then equestion

$$-u''(t)+A^2u(t)+A_1u'(t)+A_2u(t)=f(t),\ t\in(0,T),$$
$$u'(0)=0,\ \ u'(T)=0$$

regularly solvable.

The proof follows from Theorem 2 when $\rho(t)\equiv 1$ and $F=0$. This issue was examined in work [5]

References

1. Горбачук В. И., Горбачук М. И. Граничные задачи для дифференциально-операторных уравнений. Киев: Наукова думка, 1984, 284 с.
2. Лионс Ж.-Л., Мадженс Э. Неоднородные граничные задачи и их применения. М.: Мир, 1971, 371 с.
3. Крейн С. Г., Лаптев Г.И. Граничные задачи для дифференциальных уравнений второго порядка в банаховом пространстве.I // Дифференц. уравнения, 1966, 2:3, с.382-390.
4. Крейн С.Г., Лаптев Г.И. Корректность граничных задач для дифференциальных уравнений второго порядка в банаховом пространстве. II // Дифференц. уравнения, 1966, 2:7, с.919-926.
5. Гасымов М.Г., Мирзоев С.С. О разрешимости краевых задач для операторно-дифференциальных уравнений эллиптического типа второго порядка // Дифференц. уравнение, 1992, т.28, №4, с.652-651.
6. Мирзоев С.С., Якубова Х.В. О разрешимости краевых задач с операторами в краевых условиях для одного класса операторно-дифференциальных уравнений второго порядка // Докл. НАН. Азерб., 2001, 57:1-3, с.12-17.
7. Мирзоев С.С., Алиев А.Р., Рустамова А.А. Об условиях разрешимости краевой задачи для эллиптического операторно-дифференциального уравнения с разрывным коэффициентом // Метем. Заметки, 2012, вып.92, №5, с.789-793.
8. Мирзоев С.С., Салимов М.Ю. О разрешимости краевой задачи для уравнения второго порядка в гильбертовом пространстве с операторным коэффициентом в краевой условии // Матем. заметки, 2012, т.91, №6, с.861-869.
9. Мирзоев С.С., Сафаров Р.Ф. О голоморфных решениях некоторых краевых задач для операторно-дифференциальных уравнений второго порядка эллиптического типа // Украинский матем. журнал, 2011, 63:3, с.416-420.
10. Agayeva G.A. On a boundary value problem for operator-differential equations of the second order. Proceedings of the Pedagogical University, section of the natural sciences.p.9-17,(2017)
11. Agayeva G.A. On the existence and uniqueness of the generalized solution of a boundary value problem for second order operator-differential equations Transactions of NAS of Azerbaijan, №4, p. 3-8, (2014).
12. Agayeva G.A. On the solvability of a boundary value problem for elliptic operator-differential equations with an operator coefficient in the boundary condition. Bulletin of Baku University, №1, p.37-42, (2015)
13. Aliyev A.R. Boundary Value Problems for a Class of High-Order Operator-Differential Equations with Variable Coefficients. Matem zametki, 74(6), 803-814 (2003).
14. Gasımov M.G. On solvabilety of boundary value problem for a class operator-differential equation. DAN SSSR, 235(3),505-508 (1972).
15. Gasimova G.M. On solvability conditions of a boundary value problem with an operator in the boundary condition for a second order elliptic operator-differential equations. Proceeding of

the Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan Volume 40, p. 172-177, 2014
16. Gorbacuk V.İ.,Gorbacuk M.L., Boundary value problem for differential-operator equations. Kiev,Nauova Dumka,284 p(1984)
17. Mirzoyev S.S., Aghayeva G.A. On the solvability conditions of solvability of one boundary value problems for the second order differential equations with operator coefficients. Inter. Journal of Math. Analyzis, p.149-156, 2014, v.8, №4.
18. Mirzoyev S.S., Agayeva G.A. On correct solvability of one boundary value problems for the differential equations of the second order on Hilbert space. Applied Mathematical Sciences 2013,v.7, p.3935-3945.№79.
19. Mirzoev S.S., Aliyev A.R., Gasimova G.M. Solvability conditions for a boundary value problem with operator coefficients and related estimations of the norms of intermediate derivatives. Dokl.RAN №2, p. 511-513, 2016.
20. Mirzoyev S.S., Conditions for well-defined solvability of boundary value problems for operator differential equations Mirzoyev S.S., DAN, SSSR, №2, p.291-295(1983)
21. Skalikov A.A. Elliptic equations in Hilbert space and related problems. prof. I.G.Petrovsky seminars,14,140-224.
22. Yakubov S.Ya. Linear-differential equations and their applications Baku, Elm, 220p.(1985)

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UOT 517.957

MÜƏYYƏN İNTEQRALIN MEXANİKA MƏSƏLƏLƏRİNƏ TƏTBİQİ

Ağarzayev B.K., Hüseynova M.M.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç.,18
E-mail:leyla.hasanova@asco.az

Xülasə. *Məqalədə müəyyən inteqralın bəzi mexanika məsələlərinə tətbiqindən bəhs edilir. İnteqralın köməyi ilə müxtəlif hallarda görülən işin hesablanması araşdırılır və təyin olunur. Əvvəlcə suya batırılmış konus araşdırılır, suyun itələmə qüvvəsi təyin olunur və görülən iş tapılır. Sonra isə su ilə dolu olan hovuzun dibindəki kürəni hovuzdan çıxartmaq üçün görülən iş tapılır. Baxılan məsələlər sonda inteqralların köməyilə hesablanır.*

Аннотация. *В статье рассматривается применение определённого интеграла к некоторым задачам механики. Исследовано и определено вычисление работы, совершаемой в различных случаях с помощью интеграла. Сначала исследуется конус, погружённый в воду, определяется выталкивающая сила воды и находится совершаемая работа. Затем находится работа, совершаемая при выталкивании шара со дна бассейна, наполненного водой. Наконец, рассматриваемые задачи вычисляются с помощью интегралов.*

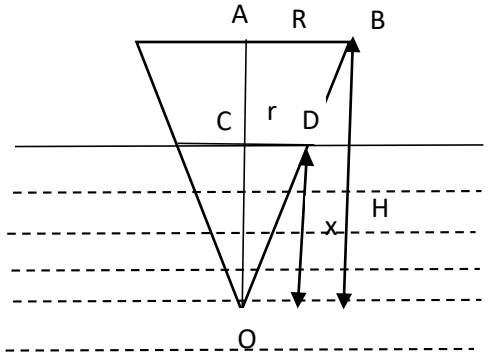
Abstract. *This article examines the application of the definite integral to certain problems in mechanics. The calculation of the work performed in various cases using the integral is explored and defined. First, a cone immersed in water is examined, the buoyant force of the water is determined, and the work performed is found. Next, the work done when pushing a ball off the bottom of a pool filled with water is found. Finally, the problems under consideration are calculated using integrals.*

Açar sözlər: *funksiya, inteqral, iş, çəki, ibtidai funksiya*

Ключевые слова: *функция, интеграл, работа, вес, первообразная функция*
Key words: *function, integral, work, weight, antiderivative function*

Giriş. Kəsilməz f(x) funksiyasının ibtidai funksiyalarının ümumi şəklinə f(x) funksiyasının inteqralı deyilir. İnteqral, riyaziyyatın əsas anlayışlarından biridir və bir çox hesablamalarda istifadə olunur. İnteqralın ən geniş tətbiq sahələrindən biri də Mexanika elmidir. Məsələn, funksiyanın müəyyən bir aralıqdakı integralı onun sahəsini müəyyən edir. Bundan başqa cismin həcminin hesablanmasında da inteqral tətbiq olunur. Bu tip məsələlərdən bir neçəsini araşdıraq.

Əsas hissə. Hündürlüyü H və oturacağının radiusu R olan bircins konus oxu şaquli vəziyyətdə olmaqla, təpəsi aşağı suya batır. Suyun itələmə qüvvəsinə qarşı görülən işin tapılması məsələsini araşdıraq.



Şəkil 1

Konus suya batarkən onun batan hissəsinin hündürlüyünü x ilə işarə edək $(0 \le x \le H)$ (şəkil 1).

Batan hissənin oturacağının radiusunu r ilə işarə edək. OCD və OAB üçbucaqlarının oxşarlığına əsasən alarıq:

$$\frac{r}{R} = \frac{X}{H} \quad \text{və ya} \quad r = \frac{R}{H}X$$

Bu halda batan hissənin həcmi aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$V = \frac{1}{3}\pi r^2 H = \frac{1}{3}\pi \cdot \frac{R^2}{H^2} \cdot x^3$$

və suyun itələmə qüvvəsi

$$F(x) = \frac{1}{3}\pi\rho g \frac{R^2}{H^2} \cdot x^3$$

şəklində olacaq. Onda məlum düstura əsasən görülən işi tapsaq, alarıq:

$$A = \frac{1}{3}\pi\rho g \frac{R^2}{H^2} \cdot \int_0^H x^3 dx = \frac{1}{3}\pi\rho g \frac{R^2}{H^2} \cdot \frac{x^4}{4}\Big|_0^H = \frac{1}{12}\pi\rho g R^2 H^2$$

Beləliklə, inteqralın köməyilə görülən işi asanlıqla tapmış olduq.

Daha belə bir məsələni nəzərdən keçirək. Radiusu R və xüsusi çəkisi δ olan kürə su ilə dolu olan H dərinliyində hovuzun dibindədir. Küreni hovuzdan çıxartmaq üçün görülən işi tapaq. Bunun üçün biz yenə inteqraldan istifadə edəcəyik.

Aydındır ki, küräni hovuzun dibindən suyun səthinə çatana qədər qaldırmaq üçün lazım olan F_1qüvvəsi sabit olub, bu kürənin $P_k = \frac{4}{3}\pi R^3\delta$ çıkisi ilə kürənin həcminə bərabər miqdarda suyun $P_{su} = \frac{4}{3}\pi R^3\delta_1$ çəkisi fərqinə bərabərdir (δ_1 – suyun xüsusi çəkisidir, $\delta_1 = 1$. Yəni

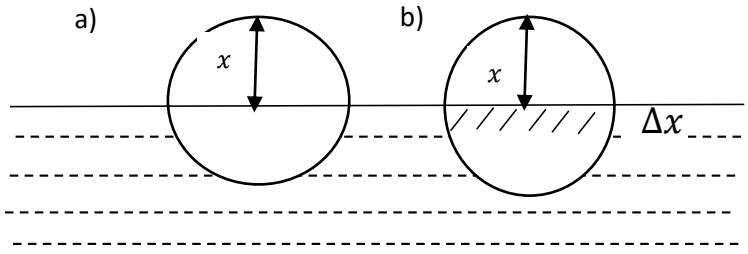
$$F_1 = P_k - P_{su} = \frac{4}{3}\pi R^3(\delta - 1)$$

Odur ki, küräni suyun səthinə çatana qədər qaldırarkən görülən A_1 işi F_1 qüvvəsi ilə $H - 2R$ qalxma hündürlüyünün hasilinə bərabər olur:

$$A_1P = F_1(H - 2R) = \frac{4}{3}\pi R^3(\delta - 1)(H - 2R)$$

İndi isə kürə suyun səthinə çatandan sonra onu çıxarmaq üçün görülən işi hesablayaq.

Kürənin sudan kənara çıxan hissəsinin (şəkil 2,a) hündürlüyünü x ilə işarə edək. Onda küräni sudan yuxarı qaldıran F_2 qüvvəsi x-dən asılı olaraq dəyişəcək: $F_2 = F_2(x)$.



Şəkil 2

Bu qüvvə kürənin P_k çəkisi ilə kürənin suda qalan hissəsinin həcmi miqdarında olan suyun P_{su}^* çəkisi fərqinə bərabər olur:

$$F_2 = P_k - P_{su}^*$$

Burada kürənin suda qalan hissəsinin həcmi, hündürlüyü $h = 2R - x$ olan kürə seqmentinin həcmi aşağıdakı şəkildə olduğu üçün

$$\pi h^2\left(R - \frac{h}{3}\right) = \frac{\pi}{3}(2R - x)^2(R + x) = \frac{\pi}{3}(x^3 - 3Rx^2 + 4R^3)$$

F(x) üçün alarıq:

$$F(x) = \frac{4}{3}\pi R^3 - \frac{\pi}{3}(x^3 - 3Rx^2 + 4R^3) = \frac{\pi}{3}[4R^3(\delta - 1) - x^3 + 3Rx^2]$$

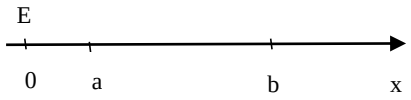
Əgər kürənin Δx qədər hündürlükdə (şəkil 2 b) olan hissəsini sudan çıxartmaq üçün görülən işi tapsaq, bu təqribi olaraq $F(x) \cdot \Delta x$ olacaq. Onda kürə suyun səthinə çatdıqdan sonra onun sudan çıxarılması üçün görülən işi A_2 ilə işarə etsək, məlum düstura əsasən alarıq:

$$A_2 = \int_0^{2R} F(x)dx = \frac{\pi}{3}\int_0^{2R}[4R^3(\delta - 1) - x^3 + 3Rx^2]\,dx =$$
$$= \frac{\pi}{3}4R^3(\delta - 1)x - \frac{x^4}{4} + Rx^3\Big|_0^{2R} = \frac{4}{3}\pi R^4(2\delta - 1)$$

Beləliklə küräni tamamilə hovuzdan çıxarmaq üçün görülən işi *A* ilə işarə esək, alarıq:

$$A=A_1+A_2=\frac{4}{3}\pi R^3(R+(\delta-1)H)$$

İnteqralın mexanikaya tətbiqinə misal olaraq daha bir məsələyə baxaq. Koordinat başlanğıcında yerləşən *E* elektrik yükünün təsiri ilə *e* elektronu (a,0) nöqtəsindən (b,0) nöqtəsinə qədər yerini dəyişmişdir (şəkil 3). Təsir qüvvəsinin gördüyü işi tapaq.



Şəkil 3

Kulon qanununa görə yüklərin təsir qüvvəsinin $F=K\cdot\frac{eE}{r^2}$ düsturu ilə təyin olundüğü məlumdur. Burada *r*-yüklər arasındakı məsafə, *K*-mütənasiblik əmsalıdır.

Aydındır ki, e-nin E-dən olan məsafəsini x ilə işarə etsək, $a\le x\le b$ olar, onda təsir qüvvəsi

$$F=F(x)=K\cdot\frac{eE}{x^2}$$

olacaq.

Elektronun kifayət qədər kiçik Δx $(a\le x+\Delta x\le b)$ məsafəsindəki hərəkəti zamanı təsir qüvvəsinin gördüyü işi tapsaq, bu iş təqribi olaraq

$$F(x)\Delta x=K\cdot\frac{eE}{x^2}\Delta x$$

olur. Beləliklə, tələb olunan işi tapsaq, (1) düsturuna əsasən alarıq:

$$A=\int_a^b F(x)dx=KeE\int_a^b\frac{dx}{x}=-KeE\cdot\frac{1}{x}\Big|_a^b=KeE\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)$$

Nəticə. Beləliklə, inteqralın bir çox sahəyə tətbiqilə yanaşı, mexanika məsələlərinin həllində də böyük yeri olduğunu müəyyən edir. Belə ki, baxılan işdə müəyyən inteqralın köməyilə bir neçə mexanika məsələsi həll olunmuşdur.

Ədəbiyyat

1. M.X. Nəsibov "Məktəb kursunda riyazi analizin elementləri", Metodik vəsait, Bakı 1991
2. S.K. Abdullayev, F.A Abdullayev, V.A.Mehrabov "Riyazi analiz", Bakı, 2011
3. H.P. Vəliyev "Riyazi analiz-1", Bakı, 2021
4. M.V. Vəliyev "Riyazi analiz", Bakı, 2023
5. B.K. Ağarzayev "Riyazi analiz", Bakı, 2024

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UOT 517.984

KƏSİLMƏ NÖQTƏLƏRİNDƏ QOŞMA ŞƏRTLƏRİLƏ VERİLƏN GECİKƏN ARQUMENTLİ MƏSƏLƏNİN ASİMPTOTİKASI

Bayramov A.M.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Bakı şəh., Azadlıq pr., 20
E-mail: azadbay2020@gmail.com

Xülasə. *Bu işdə kəsilmə nöqtələrində qoşma şərtləri ilə verilən gecikən arqumentli Şturm-Liuvill tip məsələnin məxsusi ədədlərinin asimptotikası öyrənilir və requlyarizə edilmiş izi hesablanır.*

Аннотация. *В данной работе изучается асимптотика собственных значений задачи типа Штурма-Лиувилля с запаздывающим аргументом и условиями сопряжения в точках разрыва и вычисляется регуляризованный след.*

Abstract. *In this paper, we study the asymptotic behavior of the eigenvalues of a Sturm-Liouville problem with a retarded argument and transmission conditions at discontinuity points and calculate the regularized trace.*

Açar sözlər: *gecikən arqumentli diferensial tənlik, məxsusi ədəd və məxsusi funksiyaların asimptotikası, requlyarizə edilmiş iz*

Ключевые слова: *дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом, асимптотика собственных значений и собственных функций, регуляризованный след*

Key words: *differential equation with retarded argument, asymptotics of eigenvalues and eigenfunctions, regularized trace*

İlk dəfə skalyar tənlik üçün requlyarizə edilmiş iz İ.M. Gelfand və B.M. Levitanın [1] işində hesablanmışdır. Bu təməl işdən sonra müxtəlif müəlliflərin requlyarizə edilmiş izlərə aid [2 − 6] tədqiqatları ortaya çıxmışdır. Bu işdə gecikən arqumentli Şturm-Liuvill tip məsələnin requlyarizə edilmiş izi hesablanır.

$[0, h_1) \cup (h_1, h_2) \cup (h_2, \pi]$ aralığında

$$y''(x) + q(x)y\big(x - \Delta(x)\big) + \lambda^2 y(x) = 0 \tag{1}$$

tənliyi

$$y(0)\cos\alpha + y'(0)\sin\alpha = 0, \tag{2}$$

$$y(\pi)\cos\beta + y'(\pi)\sin\beta = 0, \tag{3}$$

sərhəd şərtləri və

$$y(h_1 - 0) - \delta y(h_1 + 0) = 0\,, \tag{4}$$

$$y'(h_1 - 0) - \delta y'(h_1 + 0) = 0, \tag{5}$$

$$y(h_2 - 0) - \gamma y(h_2 + 0) = 0\,, \tag{6}$$

$$y'(h_2 - 0) - \gamma y'(h_2 + 0) = 0, \tag{7}$$

qoşma şərtləri ilə verilən sərhəd məsələsinin requlyarizə edilmişizi hesablanır, burada $q(x)$ $[0, h_1) \cup (h_1, h_2) \cup (h_2, \pi]$ aralıqlarının hər birində həqiqi qiymətli və kəsilməz funksiyadır, $q(h_i \pm 0) = \lim\limits_{x \to h_i \pm 0} q(x)$, $i = 1{,}2$ sonlu limiti var; $\Delta(x) \geq 0$ aralıqlarının hər birində həqiqi qiymətli və kəsilməz funksiyadır, $\Delta(h_i \pm 0) = \lim\limits_{x \to h_i \pm 0} \Delta(x)$, $i = 1{,}2$ sonlu limiti var;

$x - \Delta(x) \geq h_1,\ x \in [0, h_1)$ isə $x - \Delta(x) \geq h_2\ , x \in (h_1, h_2),$ isə $x - \Delta(x) \geq h_2\ \ x \in (h_2\ , \pi]$ isə $\lambda -$ həqiqi spektral parametr, $h_1, h_2\ \ \ \delta, \gamma$ həqiqi sabitlərdir, belə ki $0 < h_1 < h_2 < \pi\,,\ \sin\alpha \cos\alpha \neq 0.$

Bu işdə (1)-(7) məsələsinin requlyarizə edilmiş izi hesablanır.

Tutaq ki, $\omega_1(x, \lambda\,)$ (1) tənliyinin $[0, h_1)$ aralığında

$$\omega_1(0, \lambda\,) = \sin\alpha, \quad \omega_1'\,(0, \lambda\,) = -\cos\alpha$$

şərtlərini ödəyən həllidir. Bu başlanğıc şərtlər yeganə həll təyin edir (bax1).

Yuxarıdakı həlli təyin etdikdən sonra (1) tənliyinin $[h_1, h_2\,]$ aralığında $\omega_2(x, \lambda\,)$ həllini $\omega_1(x, \lambda\,)$ vasitəsi və

$$\omega_2(h_1, \lambda\,) = \delta^{-1}\,\omega_1(h_1, \lambda\,), \quad \omega_2'(h_1, \lambda\,) = \delta^{-1}\omega_1'(h_1, \lambda\,)$$

başlanğıc şərtləri ilə təyin edək.

Yuxarıdakı həlləri təyin etdikdən sonra (1) tənliyinin $[h_2, \pi\,]$ aralığında $\omega_3(x, \lambda\,)$ həllini $\omega_2(x, \lambda\,)$ vasitəsi və

$$\omega_3(h_2, \lambda\,) = \gamma^{-1}\,\omega_2(h_2, \lambda\,), \quad \omega_3'(h_1, \lambda\,) = \gamma^{-1}\omega_2'(h_2, \lambda\,)$$

başlanğıc şərtləri ilə təyin edək.

Nəhayət, $[0, h_1) \cup (h_1, h_2) \cup (h_2, \pi]$ aralığında

$$\omega(x, \lambda\,) = \begin{cases} \omega_1(x, \lambda\,), & x \in [0, h_1) \\ \omega_2(x, \lambda\,), & x \in (h_1, h_2) \\ \omega_2(x, \lambda\,), & x \in\ (h_2, \pi] \end{cases}$$

bərabərliyi ilə təyin olunmuş $\omega(x, \lambda\,)$ funksiyası $[0, h_1) \cup (h_1, h_2) \cup (h_2, \pi]$ aralığında (1) tənliyini, sol ucda sərhəd şərtini və keçid şərtlərini ödəyir.

Aşağıdakı düsturlar əldə edilir

$$\omega_1(x, \lambda\,) = \sin\alpha \cos\lambda x - \frac{\cos\alpha}{\lambda}\sin\lambda x -$$

$$-\frac{\sin\alpha}{2\lambda}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x - \Delta(\tau)\big)\,d\tau -$$

$$-\frac{\sin\alpha}{2\lambda}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x-2\tau+\Delta(\tau)\big)\,d\tau-$$

$$-\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-\Delta(\tau)\big)\,d\tau+$$

$$+\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-2\tau-\Delta(\tau)\big)d\tau+O\left(\frac{1}{\lambda^3}\right). \tag{8}$$

$$\omega_2(x,\lambda)=\frac{\sin\alpha}{\delta}\cos\lambda x-\frac{\cos\alpha}{\lambda\delta}\sin\lambda x-$$

$$-\frac{\sin\alpha}{2\lambda\delta}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x-\Delta(\tau)\big)\,d\tau-$$

$$-\frac{\sin\alpha}{2\lambda\delta}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x-2\tau+\Delta(\tau)\big)\,d\tau-$$

$$-\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2\delta}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-\Delta(\tau)\big)\,d\tau+$$

$$+\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2\delta}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-2\tau-\Delta(\tau)\big)d\tau+O\left(\frac{1}{\lambda^3}\right), \tag{9}$$

$$\omega_3(x,\lambda)=\frac{\sin\alpha}{\delta\gamma}\cos\lambda x-\frac{\cos\alpha}{\lambda\delta\gamma}\sin\lambda x-$$

$$-\frac{\sin\alpha}{\lambda\delta\gamma}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x-\Delta(\tau)\big)\,d\tau-$$

$$-\frac{\sin\alpha}{2\lambda\delta\gamma}\int_0^x q(\tau)\sin\lambda\big(x-2\tau+\Delta(\tau)\big)\,d\tau-$$

$$-\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2\delta\gamma}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-\Delta(\tau)\big)\,d\tau+$$

$$+\frac{\cos\alpha}{2\lambda^2\delta\gamma}\int_0^x q(\tau)\cos\lambda\big(x-2\tau-\Delta(\tau)\big)d\tau+O\left(\frac{1}{\lambda^3}\right). \tag{10}$$

$\omega(x,\lambda)$–i (3)-də yerinə yazsaq,

$$W(\lambda)\equiv\omega(\pi,\lambda)\cos\beta+\omega'(\pi,\lambda)\sin\beta=0. \tag{11}$$

xarakteristik tənliyini alarıq.

(8) –(11)-dən alırıq

$$W(\lambda)\equiv-\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\delta\gamma}\lambda\sin\lambda\pi+$$

$$+\frac{\sin(\alpha-\beta)\sin\beta}{\delta\gamma}\cos\lambda\pi-\frac{\cos\alpha\cos\beta}{\lambda\delta}\sin\lambda\pi-$$

$$-\frac{\sin\alpha\sin\beta}{2\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\cos\lambda\big(\pi-\Delta(\tau)\big)+\cos\lambda\big(\pi-2\tau+\Delta(\tau)\big)\right]d\tau-$$

$$-\frac{\sin\alpha\cos\beta}{2\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\sin\lambda\big(\pi-\Delta(\tau)\big)+\sin\lambda\big(\pi-2\tau+\Delta(\tau)\big)\right]d\tau+$$

$$-\frac{\cos\alpha\sin\beta}{2\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\sin\lambda\big(\pi-\Delta(\tau)\big)+\sin\lambda\big(\pi-2\tau+\Delta(\tau)\big)\right]d\tau+$$

$$+\frac{\sin\alpha\sin\beta}{4\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\pi-\Delta(\tau)-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau-$$

$$-\frac{\sin\alpha\sin\beta}{4\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\pi-2\tau+\Delta(\tau)+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau+$$

$$+\frac{\sin\alpha\sin\beta}{4\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\pi-\Delta(\tau)-2t_1+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau-$$

$$-\frac{\sin\alpha\sin\beta}{4\lambda\delta\gamma}\int_0^\pi q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\pi-2\tau+\Delta(\tau)+2t_1-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau+\ O\left(\frac{1}{\lambda^3}\right).$$

$$A_2(\lambda)=\frac{1}{2}\int_0^\pi q(\tau)\sin\lambda\Delta(\tau)\,d\tau,$$

$$A_1(\lambda)=\frac{1}{2}\int_0^\pi q(\tau)\cos\lambda\Delta(\tau)\,d\tau,$$

$$A_2(\lambda) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} q(\tau)\sin\lambda\Delta(\tau)\,d\tau,$$

$$B_1(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\cos\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$B_2(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$C_1(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\cos\lambda\big(\Delta(\tau)+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$C_2(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\Delta(\tau)+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$D_1(\lambda) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} q(\tau)\cos\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)\big)\,d\tau,$$

$$D_2(\lambda) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} q(\tau)\sin\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)\big)\,d\tau,$$

$$\mathrm{E}_1(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\cos\lambda\big(\Delta(\tau)+2t_1-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$E_2(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(\Delta(\tau)+2t_1-\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$\mathrm{H}_1(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\cos\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)-2t_1+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau,$$

$$H_2(\lambda) = \frac{1}{4}\int_0^{\pi} q(\tau)\left[\int_0^{\tau-\Delta(\tau)} q(t_1)\sin\lambda\big(2\tau-\Delta(\tau)-2t_1+\Delta(t_1)\big)\,dt_1\right]d\tau.$$

işarə edək.

Aşağıdakı teorem isbat edilir.

Teorem 1. (1)–(7) sərhəd məsələsinin məxsusi funksiyaları üçün $n\to\infty$ ikən aşağıdakı asimptotik düstur doğrudur:

$$\lambda_n = n + \frac{\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha - A_1(n) - D_1(n)}{n\pi} +$$
$$+ \frac{2D_2(n)\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta + \big(A_1(n) + D_1(n)\big)\big(A_2(n) + D_2(n)\big) - C_2(n)}{n^2\pi} +$$
$$+ \frac{B_2(n) - E_2(n) + H_2(n)}{n^2\pi} -$$
$$- \frac{\big(\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta + A_1(n) + D_1(n)\big)^2}{n^3} + O\left(\frac{1}{n^3}\right). \qquad (12)$$

Γ_{N_0} ilə dörd təpə nöqtəsi

$$A = N_0 + \varepsilon + iN_0, \qquad B = -N_0 - \varepsilon + N_0 i,$$
$$C = -N_0 + \varepsilon + iN_0, \qquad D = N_0 + \varepsilon - N_0 i,$$

olan və saat əqrəbi hərəkətinin əks istiqaməti üzrə yönəlmiş kvadrat konturu işarə edək, burada $i = \sqrt{-1}$ və N_0 natural ədəddir.

Məxsusi ədədlər üçün (12) düsturundan alırıq ki, kifayət qədər böyük N_0 üçün $|n| \le N_0$ olduqda λ_n ədədi Γ_{N_0}-nin daxilində yerləşir, amma $|n| > N_0$ olduqda λ_n ədədi Γ_{N_0}-nin xaricində yerləşir. Buradan alırıq ki,

$$\lambda_{-0}^2 + \lambda_0^2 + \sum_{0 \ne n = -N_0}^{N_0} (\lambda_n^2 - n^2) = -\frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} 2\lambda \ln\frac{W(\lambda)}{W_0(\lambda)}\, d\lambda =$$
$$= -\frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} 2\big(\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta + A_1(\lambda) + D_1(\lambda)\big)\operatorname{ctg}\lambda\pi\, d\lambda -$$
$$- \frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} 2\big(A_2(\lambda) + D_2(\lambda)\big) d\lambda -$$
$$- \frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} 2[-2D_2(\lambda)\operatorname{ctg}\alpha - \big(A_1(\lambda) + D_1(\lambda)\big)\big(A_2(\lambda) + D_2(\lambda)\big) +$$
$$+ C_2(\lambda) - B_2(\lambda) + E_2(\lambda) - \mathrm{H}_2(\lambda)]\frac{\operatorname{ctg}\lambda\pi}{\lambda} d\lambda -$$
$$= -\frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} 2[\operatorname{ctg}\alpha \operatorname{ctg}\beta + (\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha) A_1(\lambda) +$$
$$+ (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) D_1(\lambda) - C_1(\lambda) + B_1(\lambda) - E_1(\lambda) + \mathrm{H}_1(\lambda)]\frac{d\lambda}{\lambda} +$$
$$+ \frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n} \frac{\big(\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta + A_1(\lambda) + D_1(\lambda)\big)^2 \operatorname{ctg}^2\lambda\pi}{\lambda} d\lambda +$$

$$+\frac{1}{2\pi i}\oint_{\Gamma_n}\frac{\left(A_2(\lambda)+D_2(\lambda)\right)^2}{\lambda}d\lambda+O\left(\frac{1}{N_0}\right).$$

Buradan hesablamaqla alırıq ki,

$$\lambda_{-0}^2+\lambda_0^2+\sum_{0\neq n=-N_0}^{N_0}(\lambda_n^2-n^2)=$$

$$=-\frac{2}{\pi}\sum_{0\neq n=-N_0}^{N_0}\left(\operatorname{ctg}\alpha-\operatorname{ctg}\beta+A_1(n)+D_1(n)\right)-$$

$$-\frac{2}{\pi}\left(\operatorname{ctg}\alpha-\operatorname{ctg}\beta+A_1(0)+D_1(0)\right)-$$

$$-\sum_{0\neq n=-N_0}^{N_0}2\left[-2D_2(n)\operatorname{ctg}\alpha-\left(A_1(n)+D_1(n)\right)\left(A_2(n)+D_2(n)\right)+\right.$$

$$\left.+C_2(n)-B_2(n)+E_2(n)-\mathrm{H}_2(n)\right]\frac{1}{n\pi}+T-$$

$$-2[\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta+(\operatorname{ctg}\beta-\operatorname{ctg}\alpha)A_1(0)+$$

$$+(\operatorname{ctg}\alpha+\operatorname{ctg}\beta)D_1(0)-C_1(0)+B_1(0)-E_1(0)+\mathrm{H}_1(0)]-$$

$$-\left(\operatorname{ctg}\alpha-\operatorname{ctg}\beta+A_1(0)+D_1(0)\right)^2+$$

$$+\left(A_2(0)+D_2(0)\right)^2+O\left(\frac{1}{N_0}\right), \qquad (13)$$

burada

$$T=\operatorname{Res}_{\lambda=0}\left\{2\left[\left[2D_2(\lambda)\operatorname{ctg}\alpha+\left(A_1(\lambda)+D_1(\lambda)\right)\left(A_2(\lambda)+D_2(\lambda)\right)-\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.-C_2(\lambda)+B_2(\lambda)-E_2(\lambda)+\mathrm{H}_2(\lambda)\right]\frac{\operatorname{ctg}\lambda\pi}{\lambda}d\lambda\right\}.$$

(9)-da $N_0\to\infty$ ikən limitə keçsək alarıq:

$$\lambda_{-0}^2+\lambda_0^2+\sum_{0\neq n=-\infty}^{\infty}\{\lambda_n^2-n^2-\frac{2}{\pi}[\operatorname{ctg}\beta-\operatorname{ctg}\alpha-A_1(n)-D_1(n)]+$$

$$+\left[-2D_2(n)\operatorname{ctg}\alpha-\left(A_1(n)+D_1(n)\right)\left(A_2(n)+D_2(n)\right)+\right.$$

$$\left.+C_2(n)-B_2(n)+E_2(n)-\mathrm{H}_2(n)\right]\frac{1}{n\pi}\Big\}=$$

$$=\frac{2}{\pi}\left(\operatorname{ctg}\beta-\operatorname{ctg}\alpha-A_1(0)-D_1(0)\right)-\operatorname{ctg}^2\alpha-\operatorname{ctg}^2\beta-$$

$$-2(\operatorname{ctg}\alpha-\operatorname{ctg}\beta)\left(A_1(0)+D_1(0)\right)-$$

$$-\left(A_1(0)+D_1(0)\right)^2+-\left(A_2(0)+D_2(0)\right)^2-$$

$$-2[\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta+(\operatorname{ctg}\beta-\operatorname{ctg}\alpha)A_1(0)+$$
$$+(\operatorname{ctg}\alpha+\operatorname{ctg}\beta)D_1(0)-C_1(0)+$$
$$+B_1(0)-E_1(0)+\mathrm{H}_1(0)+T. \quad (14)$$

(14) bərabərliyin sol tərəfinə (1)–(7) sərhəd məsələsinin requlyarizə edilmiş izi deyilir.

Beləliklə, requlyarizə edilmiş iz haqqında əsas teorem isbat edilir.

Ədəbiyyat

1. Гельфанд, И.М., Левитан, Б.М. Об одном простом тождестве для собственных значений дифференциального оператора второго порядка.//-Москва: Доклады Академии Наук СССР, -1953. т.88, №4, -с.593-596.
2. Дикий, Л.А. Об одной формуле Гельфанда-Левитана.//-Москва: Успехи матем. наук, -1953. т.8, вып.2, -с.119-123.
3. Максудов, Ф.Г., Байрамоглы, М., Адыгезалов, А.А. О регуляризованном следе оператора Штурма-Лиувилля на конечном отрезке с неограниченным операторным коэффициентом.//-Москва: Доклады Академии Наук СССР, -1984. т.277, №4, -с.795-799.
4. Пикула, М. О регуляризованных следах дифференциального оператора типа Штурма-Лиувилля с запаздывающим аргументом. // -Москва: Дифференциальные уравнения, -1990. т.25 №1, -с.103-109.
5. Митрохин, С.И. О спектральных свойствах одного дифференциального оператора с суммируемыми коэффициентами с запаздывающим аргументом.//-Уфа: Уфимский математический журнал, -2011. т.3, №4, -с.95-115.
6. Albayrak İ., Köklü, K., Bayramov, A.M. A regularized trace formula for differential equations trace class operator coefficients.// Rocky Mountain Journal of Math. -2010. vol.40, №4, -p.1095-1110.

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UDC 539.4

APPLICATION ASPECTS OF INTERNAIONAL QUANTUM STANDARTS IN ELECTRICAL MEASUREMENTS

[1]Hasanov Y.N., [2]Ahmadov B.B., [2]Yusibov Sh.T., [2]Aziz S.Sh.

[1]*"Azerbaijan State Marine Academy" LEPL*
AZ1000, Baku, Z. Aliyeva str.,18
[2]*"Azerbaijan Technical University" LEPL*
Az1073, Baku city, H.Javid ave., 25
E-mail: yusif.hasanov@asco.az; ahmedov.beyalı@aztu.edu.az; sarvan.aziz@aztu.edu.az

Abstract. *Quantum measurement standards are essential for implementing the International System of Units (SI) and ensuring global metrological traceability. Managed by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), these standards utilize fundamental quantum phenomena to achieve unmatched accuracy, consistency, and reproducibility [1,2]. The International Committee for Weights and Measures (CIPM) promotes their global acceptance through the Mu-*

tual Recognition Arrangement (MRA), facilitating precise calibration and comparison with national standards [3]. The BIPM oversees quantum standards for voltage (volt) and resistance (ohm), critical for uniform electrical measurements [4]. Select National Metrology Institutes (NMIs) maintain standards based on the Josephson and quantum Hall effects, participating in BIPM key comparisons, achieving absolute uncertainties as low as 0.2 nV for Josephson standards and relative uncertainties of 3.8×10^{-9} to 4.6×10^{-9} for Hall standards [4].

Xülasə. *Kvant ölçmə standartları Beynəlxalq Vahidlər Sistemi (SI)-nin tətbiqi və qlobal metrologiya izlenebilirliyinin təmin olunması üçün mühüm əhəmiyyət daşıyır. Beynəlxalq Ölçü və Çəki Bürosu (BIPM) tərəfindən idarə olunan bu standartlar fundamental kvant hadisələrindən istifadə edərək misilsiz dəqiqlik, sabitlik və təkrarlanma qabiliyyəti təmin edir [1,2]. Beynəlxalq Ölçü və Çəki Komitəsi (CIPM) bu standartların dünya miqyasında tanınmasını Qarşılıqlı Tanınma Sazişi (MRA) vasitəsilə təşviq edir ki, bu da milli standartlarla dəqiq kalibrləmə və müqayisəni asanlaşdırır [3]. BIPM gərginlik (volt) və müqavimət (om) üzrə kvant standartlarını nəzarətdə saxlayır; bunlar elektrik ölçmələrinin vahidliyini təmin etmək üçün əsas göstəricilərdir [4]. Seçilmiş Milli Metrologiya İnstitutları (NMI) Josephson və kvant Hall effektlərinə əsaslanan standartları saxlayır, BIPM-in əsas müqayisələrində iştirak edir və Josephson standartları üçün 0.2 nV qədər mütləq qeyri-müəyyənliklərə, Hall standartları üçün isə 3.8×10^{-9} – 4.6×10^{-9} aralığında nisbi qeyri-müəyyənliklərə nail olurlar [4].*

Аннотация. *Квантовые эталоны измерений играют ключевую роль в реализации Международной системы единиц (СИ) и обеспечении глобальной метрологической прослеживаемости. Управляемые Международным бюро мер и весов (BIPM), эти эталоны используют фундаментальные квантовые явления для достижения непревзойдённой точности, согласованности и воспроизводимости [1, 2]. Международный комитет мер и весов (CIPM) способствует их мировому признанию через Соглашение о взаимном признании (MRA), что обеспечивает точную калибровку и сопоставимость с национальными эталонами [3]. BIPM контролирует квантовые эталоны для напряжения (вольт) и сопротивления (ом), которые являются ключевыми для обеспечения единообразных электрических измерений [4]. Отдельные Национальные метрологические институты (NMI) поддерживают эталоны, основанные на эффектах Джозефсона и квантового Холла, участвуют в ключевых сравнениях BIPM и достигают абсолютных неопределённостей до 0.2 нВ для эталонов Джозефсона и относительных неопределённостей 3.8×10^{-9} – 4.6×10^{-9} для эталонов Холла [4].*

Key words*: quantum metrology, electrical units, calibration, measurement uncertainty, traceability*

Açar sözlər: *kvant metrologiyası, elektrik vahidləri, kalibrləmə, ölçmə qeyri-müəyyənliyi, izlənə bilmək*

Ключевые слова: *квантовая метрология, электрические единицы, калибровка, неопределённость измерений, прослеживаемость*

Subject Classification: PACS:06.20.-f, 06.30.-k, 74.50.+r, MSC:47A10, 35Q40

Introduction. International measurement standards are reference tools that define precise values of physical quantities, serving as benchmarks for calibrating other instruments. Recognized through global agreements, these standards are defined in the International Vocabulary of Metrology (VIM) [1] and maintained by organizations like the BIPM. In the current SI system, quantum measurement standards are crucial for realizing units and ensuring traceability [2]. These standards leverage quantum effects, providing exceptional stability, universality, and reproducibility worldwide.

The advantages of quantum standards include:

- **Precision**: Derived from fundamental constants.

- **Consistency**: Reproducible across different systems.
- **Modernization**: Replacing traditional analog standards.
- **Decentralized accuracy**: No reliance on a single reference.

Their primary purpose is to establish a global framework for metrological traceability by comparing national standards and conducting precise calibrations [3]. This process is supported by the CIPM MRA, which ensures mutual recognition of national standards and calibration certificates [3]. As of mid-2025, around 260 NMIs, Designated Institutes, and four international organizations participate in the CIPM MRA [3].

Core Quantum Standards for Electrical Units. The most accurate standards for electrical units are based on the Josephson effect for voltage and the quantum Hall effect for resistance [12]. These standards derive units from the elementary charge ($e = 1.602176634\times10^{-19}$ C) and the Planck constant, fixed in the 2018 SI revision [2].

Josephson Standard. The Josephson standard produces voltage according to:

$$V = \frac{nhf}{2e}$$

where V is the voltage, n is an integer (step number), h is the Planck constant, f is the applied signal frequency, and e is the elementary charge [7].

This standard uses a superconducting Josephson junction, where two superconductors are separated by a thin insulator. At low temperatures (a few kelvins) and with microwave radiation (e.g., 70 GHz), quantized voltage steps are generated with an accuracy of one part per billion [7]. Large laboratories employ arrays of thousands of junctions to produce stable voltages up to 10 V [8]. Programmable Josephson standards, such as those at PTB (Germany), enable calibration of DC and AC voltages with uncertainties as low as 10^{-10} [9]. PTB's system supports comparisons up to 10 V with an absolute uncertainty of 1 nV [4].

Quantum Hall Standard. The quantum Hall standard defines resistance using:

$$R_H = \frac{h}{i e^2}$$

where R_H is the Hall resistance, h is the Planck constant, e is the elementary charge, and i is an integer (quantization index, typically 1, 2, 3, …) [10]. For $i = 1$, $R_H \approx 25812.807$ Ohm, used as a metrological resistance reference [10].

This standard involves a two-dimensional electron gas (e.g., GaAs/AlGaAs) cooled to below 1.5 K under a strong magnetic field (~10 T). In this state, longitudinal resistance vanishes, and transverse (Hall) resistance takes discrete values determined by fundamental constants [10]. Research addresses challenges like temperature fluctuations and small Hall signals, achieving relative uncertainties as low as 2.4×10^{-8} using potentiometric and cryogenic current comparator methods [11].

Utilization of BIPM Quantum Standards. The BIPM uses Josephson and Hall standards as references for its electromagnetic calibration services, underpinning its Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) [4]. These services support the CIPM MRA by enabling NMIs to compare their standards with BIPM's, ensuring SI traceability [5]. Smaller NMIs rely on these services, while larger ones validate their primary standards' equivalence [5].

The BIPM employs portable quantum standards for on-site comparisons at NMIs, supported by BIPM experts for accuracy and knowledge transfer [6]. Calibration of reference resistors and voltage standards (e.g., Zener diodes) is advised every two years, with a limit of three standards per nominal value [4].

BIPM.EM-K10 Comparisons (Josephson Standards). Since 1991, BIPM has conducted BIPM.EM-K10 comparisons for nominal voltages of 1.018 V and 10 V [4]. Results include:

- **1.018 V**: 25 NMIs participated, with NIM (China) achieving the lowest uncertainty (0.2 nV), followed by BNM-LCIE (France) and NMIA (Australia) at 0.3 nV each [4].
- **10 V**: 29 NMIs participated, with LNE (France) at 0.2 nV, PTB at 1.0 nV, and CENAM (Mexico) at 1.3 nV [4].

These comparisons link to regional metrology organizations (e.g., EURAMET, SIM, COOMET) [6]. The NSC "Institute of Metrology" (Kharkiv) calibrated its Josephson standard at BIPM but has not completed inter-regional CMC review as of mid-2025 [4].

BIPM.EM-K12 Comparisons (Hall Standards). Since 1993, BIPM has conducted BIPM.EM-K12 comparisons for a nominal resistance of 100 Ohm and ratios of 10 kOhm/100 Ohm and 100 Ohm/1 Ohm [4]. Results include:

- **100 Ohm**: 11 NMIs participated, with NIST (USA) at 4.0×10^{-9} and PTB at 4.4×10^{-9} relative uncertainty [4].
- **10 kOhm/100 Ohm**: NIM (China) and KRISS (South Korea) at 4.6×10^{-9} [4].
- **100 Ohm/1 Ohm**: PTB and METAS (Switzerland) at 3.8×10^{-9}, NRC (Canada) at 4.2×10^{-9} [4].

The NSC "Institute of Metrology" calibrated its Hall standard at BIPM for 1 Ohm, 100 Ohm, and 10 kOhm, but inter-regional CMC review is pending as of mid-2025 [4].

Visual Representation of Comparison Results. The following figures vividly depict the BIPM.EM-K10 and BIPM.EM-K12 comparison outcomes, showcasing uncertainty data derived from detailed analyses [4].

- **Figure 1**: BIPM.EM-K10 results for 1.018 V, displaying uncertainties for NMIs including NIM (0.2 nV), BNM-LCIE (0.3 nV), and NMIA (0.3 nV). *(Insert Figure 1 here: Bar chart showing 1.018 V uncertainties for NMIs like NIM, BNM-LCIE, and NMIA, with values such as 0.2 nV, 0.3 nV, and 0.3 nV.)*
- **Figure 2**: BIPM.EM-K10 results for 10 V, highlighting uncertainties for LNE (0.2 nV), PTB (1.0 nV), and CENAM (1.3 nV). *(Insert Figure 2 here: Bar chart showing 10 V uncertainties for NMIs like LNE, PTB, and CENAM, with values such as 0.2 nV, 1.0 nV, and 1.3 nV.)*
- **Figure 3**: BIPM.EM-K12 results for 100 Ohm, with NIST (4.0×10^{-9}) and PTB (4.4×10^{-9}) leading in precision. *(Insert Figure 3 here: Bar chart showing 100 Ohm uncertainties for NMIs like NIST and PTB, with values such as 4.0×10^{-9} and 4.4×10^{-9}.)[13]*
- **Figure 4**: BIPM.EM-K12 results for the 10 kOhm/100 Ohm ratio, showing NIM and KRISS at 4.6×10^{-9}. *(Insert Figure 4 here: Bar chart showing 10 kOhm/100 Ohm ratio uncertainties for NMIs like NIM and KRISS, with a value of 4.6×10^{-9}.)*
- **Figure 5**: BIPM.EM-K12 results for the 100 Ohm/1 Ohm ratio, with PTB and METAS at 3.8×10^{-9}. *(Insert Figure 5 here: Bar chart showing 100 Ohm/1 Ohm ratio uncertainties for NMIs like PTB and METAS, with a value of 3.8×10^{-9}.)*

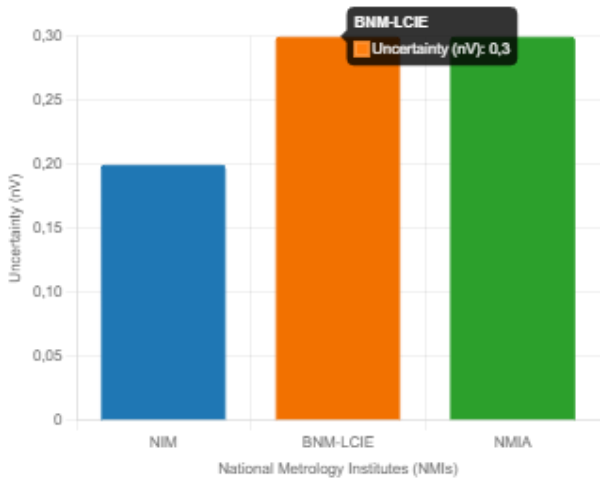


Figure 1. *BIPM.EM-K10 for 1.018 V*

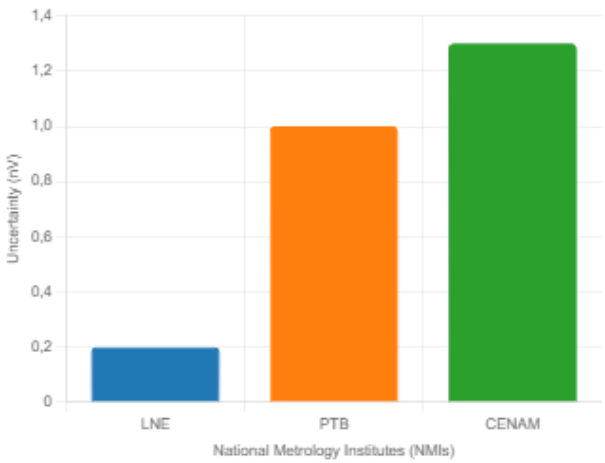


Figure 2. *BIPM.EM-K10 for 10 V*

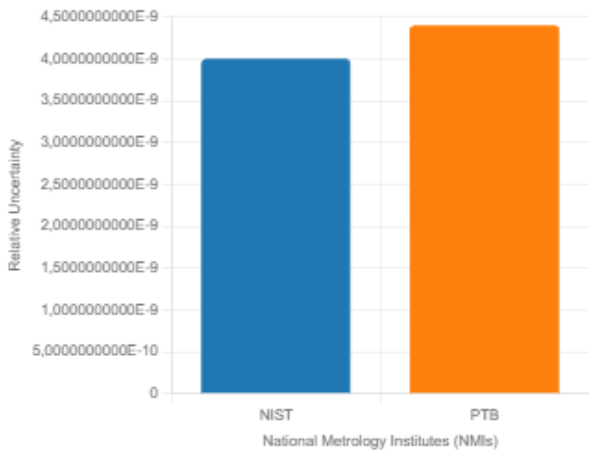


Figure 3. *BIPM.EM-K12 for 100 Ohm*

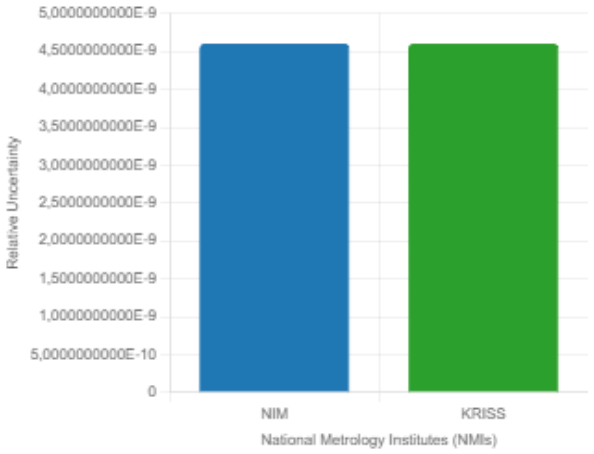


Figure 4. *BIPM.EM-K12 for 10 kOhm/100 Ohm Ratio*

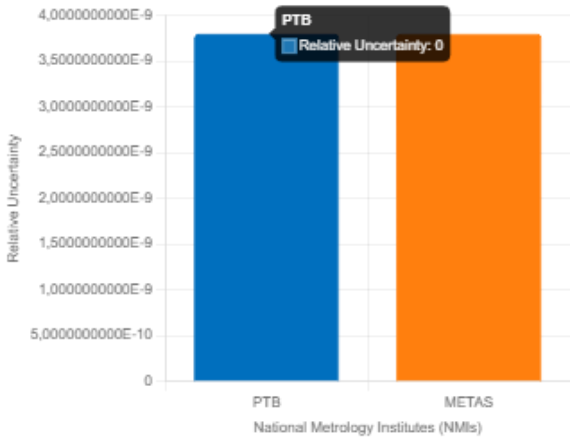


Figure 5. *BIPM.EM-K12 for 100 Ohm/1 Ohm Ratio*

Conclusion. The BIPM's quantum standards for voltage and resistance are vital for implementing SI electrical units and ensuring global traceability [2, 3]. Based on the Josephson and Hall effects, these standards enable precise comparisons under the CIPM MRA [3, 6]. Only select NMIs maintain these standards, participating in BIPM's key comparisons [4]. Josephson standards achieve uncertainties as low as 0.2 nV for 1.018 V and 10 V, while Hall standards reach relative uncertainties of 3.8×10^{-9} to 4.6×10^{-9} for resistance measurements [4]. These advancements ensure the reliability of global electrical metrology.

References

[1] De Bièvre, P. (2009). The 2007 International Vocabulary of Metrology (VIM), JCGM 200: 2008 [ISO/IEC Guide 99]: Meeting the need for intercontinentally understood concepts and their associated intercontinentally agreed terms. Clinical biochemistry, 42(4-5), 246-248.

[2] Kovalevsky, J., & Quinn, T. J. (2004). The international system of units (SI). Comptes rendus physique, 5(8), 799-811.

[3] Henson, A. (2017). International recognition of NMI calibration and measurement capabilities: The CIPM MRA. In Metrology: from Physics Fundamentals to Quality of Life (pp. 171-186). IOS Press.

[4] Moreno, J. A., Gournay, P., & Dewi, M. K. (2023). Bilateral comparison of 10 pF and 100 pF standards (ongoing BIPM key comparisons BIPM. EM-K14. a and 14. b) between the NMIM (Malaysia) and the BIPM. Metrologia, 60(1A), 01007.
[5] Velychko, O., & Kuzmenko, Y. (2024). Modern components of activities and models of national metrological institutes. Measurements infrastructure, (7).
[6] MRA-D, C. I. P. M. (2016). Measurement comparisons in the CIPM MRA. Metrologia, 3-28. [7] Kose, V. (2012). Recent advances in Josephson voltage standards. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (4), 483-489.
[8] Hamilton, C. A., Burroughs, C. J., & Benz, S. P. (2002). Josephson voltage standard-a review. IEEE transactions on applied superconductivity, 7(2), 3756-3761.
[9] Behr, R., Bauer, S., Kraus, M., Kieler, O., Pimsut, Y., & Palafox, L. (2025). Accurate measurements with Josephson-based quantum voltage standards. Measurement: Sensors, 38, 101427.
[10] Hartland, A. (1992). The quantum Hall effect and resistance standards. Metrologia, 29(2), 175.
[11] Lindemuth, J., & Mizuta, S. I. (2011, September). Hall measurements on low-mobility materials and high resistivity materials. In Thin Film Solar Technology III (Vol. 8110, pp. 65-71). SPIE.
[12] Ю.Н. Гасанов, Т.Б. Гордиенко. Метрологическая прослеживаемость: нормативные обеспечение и основные компоненты. Bakı, Çaşıoğlu, 2010, 216 səh.
[13] Ю.Н. Гасанов, Т.Б. Гордиенко Обработка результатов измерений: основы и нормативные обеспечение. Bakı, Çaşıoglu, 2011, 386 səh.

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: dos. Ağarzayev B.K.

UOT 532.1

SUYUN ƏSAS FİZİKİ VƏ KİMYƏVİ XASSƏLƏRİ VƏ METROLOJİ TƏMİNATI

Həsənov Y.N., Şıxaliyeva H.P.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
E-mail: yusif.hasanov@asco.az., hokumakhanim.shikhaliyeva@asco.az

Xülasə. *Məqalə suyun (H_2O) əsas fiziki və kimyəvi xassələrini, təbiətdəki yayılmasını və molekulyar formalarını (hidrol, dihidrol, trihidrol) təhlil edir. Əsas diqqət suyun iki anomal xüsusiyyətinə yönəlib: donduqda genişlənmə (həcmin 10% artması) və maksimal sıxlığa +4°C-də çatması. Bu anomallıqlar su hövzələrindəki canlı orqanizmlərin sağ qalması üçün həlledicidir. Məqalədə suyun digər mühüm fiziki xassələri, o cümlədən sıxlıq (4°C-də 1000 kq/m^3), yüksək istilik tutumu, buxarlanma və ərimənin gizli istiliyi, həmçinin axın prosesləri üçün vacib olan özlülük (μ və ν) və kapilyarlıq xassələri ətraflı izah olunur. Sonda su nümunələrinin keyfiyyət analizi və Azərbaycan Metrologiya İnstitutunda istifadə olunan Dövlət Sıxlıq Etalonları (DMA 5000 M, DMA 4500 M) barədə məlumat verilir. Mətn suyun hidrologiya və ekologiya üçün müstəsna əhəmiyyətini elmi dəlillərlə əsaslandırır.*

Abstract. *This article analyzes the fundamental physical and chemical properties of water (H_2O), its distribution in nature, and its molecular forms (hydrol, dihydrol, trihydrol). The main focus is on water's two anomalous properties: expansion upon freezing (a 10% increase in volume) and reaching its maximum density at +4°C. These anomalies are crucial for the survival of living organisms in water bodies. The article also provides a detailed explanation of other important physical properties of water, including density (1000 kg/m^3 at 4°C), high heat capacity, the latent*

heat of vaporization and melting, as well as viscosity (μ and ν) and capillarity, which are essential for flow processes. Finally, information is provided on the quality analysis of water samples and the State Density Standards (DMA 5000 M, DMA 4500 M) used at the Azerbaijan Metrology Institute. The text scientifically substantiates water's exceptional importance for hydrology and ecology.

Аннотация. *Данная статья анализирует основные физические и химические свойства воды (H_2O), её распространение в природе и молекулярные формы (гидроль, дигидроль, тригидроль). Основное внимание уделяется двум аномальным свойствам воды: расширению при замерзании (увеличение объема на 10%) и достижению максимальной плотности при +4°C. Эти аномалии являются решающими для выживания живых организмов в водоемах. В статье также подробно объясняются другие важные физические свойства воды, включая плотность (1000 кг/м^3 при 4°C), высокая теплоемкость, скрытая теплота парообразования и плавления, а также вязкость (μ и ν) и капиллярность, которые важны для процессов течения. В заключение представлена информация об анализе качества проб воды и Государственных эталонах плотности (DMA 5000 M, DMA 4500 M), используемых в Азербайджанском институте метрологии. Текст научно обосновывает исключительную значимость воды для гидрологии и экологии.*

Açar sözlər: *sıxlıq; H_2O; özlülük; gizli istilik; kapilyarlıq; hidrol; trihidrol; istilik tutumu; sıxlıq etalonu; su nümunəsinin analizi*

Key words: *density; H_2O; viscosity; latent heat; capillarity; hydrol; trihydrol; heat capacity; density standard; water sample analysis*

Ключевые слова: *плотность; H_2O; вязкость; скрытая теплота; капиллярность; гидроль; тригидроль; теплоемкость; эталон плотности; анализ проб воды*

Giriş. Suyun əsas fiziki və kimyəvi xassələri. Təbiətdə tam təmiz su yoxdur. Hətta yağış suyunun tərkibində müəyyən qədər qarışıqlar vardır. Təmiz kimyəvi su oksigenlə hidrogenin birləşməsidir. Onun kimyəvi tərkibi H_2O-dur və hidrol adlanır. Məhşur fransız kimyaçısı A.A.Lavuazye (XVIII əsr) ilk dəfə müəyyən etmişdir ki, suyun 85%-ni oksigen, 15%-ni isə hidrogen təşkil edir. İki su molekulunun birləşməsi $(H_2O)_2$- dihidrol, üç molekulun birləşməsi isə $(H_2O)_3$-trihidrol adlanır. Buzda trihidrol molekulları daha çoxdur. Su təbiətdə üç aqreqat halda ola bilir: maye, qaz və bərk halda. Təbiətdə su maye halında daha çox yayılmaqla əsasən okeanlarda, dənizlərdə, çaylarda, göllərdə, bataqlıqlarda və yer altında olur. Su qaz halında atmosferdə, bərk halda isə (buz və qar şəklində) qütb dənizlərinin buzlarında, materik və dağ buzlaqlarında, qar örtüyündə olur. Su başqa mayelərdən fərqli olaraq, anomal (qeyri-adi) xassələrə malikdir. Bu onun molekullarının quruluş xüsusiyyətlərindən irəli gəlir [1].

XVII əsrdə Q.Qaliley belə bir mülahizə irəli sürmüşdür ki, su donduqda sıxılmır. Bu mülahizəni R.Boyl təcrübə yolu ilə təsdiq etmişdir. Beləliklə, başqa maddələrdən fərqli olaraq su donduqda sıxılmır, əksinə genişlənir. Bu zaman onun həcmi 10%-ə qədər artır. Suyun ikinci anomallığı ondan ibarətdir ki, o, maksimal sıxlığa temperatur 4°C dərəcədə malik olur. Suyun sıxlığı temperatur 0°-dən 4°C-yə qalxdıqda əvvəlcə artır, sonra isə temperatur artdıqca sıxlıq azalmağa başlayır. Bu hadisəni ilk dəfə J.Delyuk XVIII əsrdə müəyyən etmişdir. Təbiətdə suyun bu anomal xassələrinin böyük əhəmiyyəti vardır. Əgər adi maddələr kimi temperatur azaldıqca suyun sıxlığı artsaydı, onda buz çayın və ya gölün dibinə enər, bu su obyektləri tamamilə donardı. Bu isə çaylarda və sututarlarda olan canlı orqanizmlərin məhv olması ilə nəticələnərdi.

Məsələnin qoyuluşu. Sıxlıq. Suyun və ya buz kütləsinin (kq) öz həcmlərinə (V) olan nisbətinə sıxlıq (ρ) deyilir. Suyun sıxlığı 4°C-də maksimum olur – 1000 kq/m^3. Qarın sıxlığı eyni həcmdə götürülmüş qarın çəkisinin suyun çəkisinə olan nisbətinə deyilir.

$$\rho_q = WG \qquad (1)$$

Təzə yağmış qarın sıxlığı 100 kq/m^3 olur. Qar qaldıqca onun sıxlığı artır və 150-200 kq/m^3-a çatır. Qarda olan su layını təyin etmək üçün onun sıxlığını (ρ_q) qarın qalınlığına (h_q) vurmaq lazımdır.

$$h_s = \rho_q \cdot h_q \quad (2)$$

Qar örtüyünün su saxlamaq qabiliyyəti, məsaməliliyi və istilikkeçirmə qabiliyyəti onun sıxlığı ilə əlaqədardı r. Suyun, qarın və buzun fiziki xassələrindən biri də suyun buxarlanmasının, qar və buzun əriməsinin gizli istiliyidir. Suyun buxarlanması nın gizli istiliyi bir qram suyun normal atmosfer təzyiqində temperaturunu dəyişmədən buxar halına keçməsi üçün lazım olan istiliyin miqdarıdır. 0°C-də suyun buxarlanmasının gizli istiliyi 597.2 kal/q, 1 100°C-də 538.9 kal/q-dır. Buzun və qarın əriməsinin gizli istiliyi, yəni bir qram buz və qarın maye hala keçdikdə udduğu istiliyin miqdarı müxtəlif temperaturlar üçün hesablanmışdır. Misal üçün, 0°C-də təmiz buzun əriməsinin gizli istiliyi 79.4 kal/q bərabərdir. Suyu bir dərəcə qızdırmaq üçün lazım olan istilik miqdarına suyun istilik tutumu və ya xüsusi istilik tutumu deyilir. 0°C-də suyun istilik tutumu 0.487 kal/q dərəcədir. Suyun istilik tutumu temperaturdan asılı olaraq dəyişir. Temperatur 1°C dəyişdikdə bir sm qalınlığında su layının 1 sm^2 sahəsindən 1 saniyədə keçən istilik axınına istilik keçirmə əmsalı deyilir:

$$Q = \lambda \, dydt \quad (3)$$

burada, Q- 1sm^2 sahədən 1 saniyədə keçən istilik axını (kal); dy dt - şaquli temperatur qradiyenti; λ -istilik keçirmə əmsalıdır (0°C-də λ =0.001358 kal /(sm^2·san·dərəcə). Qarın istilik keçirmə əmsalı onun sıxlığından asılıdır:

$$\lambda_q = 0.0067 \, \rho_q^2 \quad (4)$$

Burada ρ_q - qarın sıxlığıdır.

Özlülük. Suyun hissəciklərinin nisbi hərəkətinə (sürüşməsinə) müqavimət göstərmə xassəsinə suyun özlülüyü deyilir. Suyun özlülük xassəsi ancaq hərəkət zamanı meydana çıxır. Tutaq ki, çay axınının bir hissəsini ayrı-ayrı qatlara ayırmışıq. İndi ixtiyari qatın nisbi hərəkətinə baxaq. Tutaq ki, birinci qatın sürəti U_1, ikinci qatın sürəti isə U_2-dir və qatların çayı n dibindən olan məsafəsi Y_1 və Y_2-dir. Onda iki qatın sürətlər fərqi $dU=U_1-U_2$, aralarındakı məsafə isə $dY=Y_1-Y_2$ olacaqdır və onların nisbəti dUdY sürət qradiyenti, yəni sürətin Y oxu boyu dəyişməsidir. İlk dəfə İsaak Nyuton göstərmişdir ki, sürtünmə qüvvəsindən yaranan toxunma gərginliyi sürət qradiyenti ilə düz mütənasibdir:

$$T = \pm \mu \, dUdY \quad (5)$$

Burada T -toxunma gərginliyi və ya sürtünmə gərginliyi, kq/m2; μ -mütənasiblik əmsalıdır və onu dinamiki özlülük əmsalı adlandırırlar. Toxunma gərginliyi T həmişə müsbət ədəd olmalıdır, mənfi və ya müsbət işarəsi isə dU- dən asılı olaraq götürülməlidir. Dinamiki özlülük əmsalının μ ölçü dY vahidi N·san və ya kq·san-dır. Dinamiki özlülük əmsalı puazla da göstərilir [2].

Dinamiki özlülük əmsalı suyun temperaturundan asılıdır və temperatur artdıqca azalır. Əksər hallarda aşağıdakı nisbətdən istifadə edilir:

$$\mu = \nu \cdot \rho \quad \text{və ya} \quad \nu = \mu\rho^2 \quad (6)$$

Burada ρ-suyun sıxılığı, μ-dinamiki özlülük əmsalı, ν-kinematik özlülük əmsalıdır, sm^2. Kinematik özlülük əmsalı həm də stoksla (st) ifadə olunur: san 1st=1 sm^2=10−4 m^2san san Sürət epyurası Kinematik özlülük əmsalı da suyun temperaturundan asılı olaraq dəyişir: temperatur azaldıqca kinematik özlülük əmsalı artır.

Alınmış nəticənin analizi. Suyun sərbəst səthində, 0.0080 yəni suyun hava ilə sərhəddində molekulların cazibə qüvvəsi təsirindən səthi gərilmə baş verir. Səthi gərilmə suyun fiziki xassəsi olub, onun temperaturundan asılı olan səthi gərilmə əmsalı σ ilə səciyyələndirilir. Bu əmsal temperatur artdıqca azalır. Suyun səthi gərilməsi çox böyük olur. Məsələn, 20°C-də σ=0.0726 n/m=0.0074 kq/m. Suyun kiçik diametrli borularda və qruntda səthi gərilmə qüvvəsinin təsiri

altında qalxması və enməsi kapilyarlıq adlanır. Qruntlarda suyun süzülmə 3 prosesini öyrəndikdə, kapilyar qalxma hündürlüyü müəyyən edilir. Kapilyar qalxmanın hündürlüyü aşağıdakı ifadəyə görə təyin edilir:

$$h = r\,2 \cdot k\,\gamma \qquad (7)$$

Burada r-kapilyar borunun radiusu; γ -suyun xüsusi çəkisi; k-kapilyarlıq sabitidir. Suyun qardan torpağa keçmə prosesinə suvermə deyilir. Qarın suvermə qabiliyyəti bu prosesin şiddətliyi ilə səciyyələnir. Vahid zamanda qarın verdiyi suyun miqdarına suvermə şiddətliyi deyilir (mm/dəq). Götürülmüş su nümunələri bir sıra fiziki-kimyəvi xassələri çöl şəraitində müəyyən edilmir. Əsaslı kimyəvi analiz üçün isə nümunə laboratoriyaya göndərilir. Çöl şəraitində su nümunəsinin tez dəyişə bilən fiziki-kimyəvi xassələri təyin edilir. Bunlara aşağ ıdakılar daxildir: suyun temperaturu, suyun rəngi, şəffaflığı, dadı və iyi, hidrogen ionlarının (pH) miqdarı; suda olan karbon (CO_2) qazı; həll olmuş oksigenin (O_2) miqdarı və s. Əsaslı kimyəvi analiz üçün 2.5 l həcmində nümunə götürülür. Nümunəni bakterioloji prosesin təsirindən qorumaq üçün, butulkaların hər birinə 2 ml xlorofil və 0.5 l butulkaya isə 1 ml 25%- li sulfat turşusu məhlulu əlavə edilir. Butulkalar propka ilə bağlanır və nümunə götürülən yerin təsviri, suyun çöl şəraitində təyin edilmiş fiziki-kimyəvi xassələri xüsusi kağızda qeyd edilərək butulkanın ağız hissəsinə bağlanır. Su mənbələrindəki suların tərkibindəki maddələrin miqdarı və keyfiyyətinin öyrənilməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir. Bu öyrənilən məlumatlar əsasında su mənbələrindəki sudan müxtəlif məqsədlər üçün istifadə etməyin mümkün olub-olmaması müəyyən olunur və keyfiyyətsiz suları yararlı hala salmaq üçün tədbirlər hazırlanır. Çay sularının tərkibinin dəyişməsi çay hövzəsinin illik şəraiti, birki örtüyü, çayın qidalanması xüsusiyyəti, torpaq və qruntun litoloji tərkibi, sənaye obyektlərinin və yaşayış məntəqələrindən daxil olan tullantı suları da xeyli təsir göstərir [3].

Nəticə. Yuxarıda qeyd edilən parametrləri təyini. Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Antiihisar və İstehlak Bazarına Nəzarət Dövlət Agentliyinin Metrologiya institunda suyun sıxlığının ölçülməsi Dövlət Etalonları vasitəsi ilə həyata keçirilir. Onların Metroloji xarakteristikaları aşağıdakı kimidir.

1. Birinci etalonun adı:

- Dövlət ilkin sıxlıq kəmiyyət vahidi etalonu - DMA 5000 M, S/N 83360534 (şək.1)



Şəkil 1

Etalonun təsviri:

- Dövlət ilkin sıxlıq kəmiyyət vahidi etalonu "DMA – 5000 M" tipli sıxlıqölçən sıxlığın, xüsusi çəkinin və konsentrasiyanın ölçü aləti olan, yüksək ölçmə dəqiqliyinə malik rəqəmsal, avtomatlaşdırılmış cihazdır. Konstruktiv olaraq sıxlıqölçən vahid blok şəklində hazırlanıb.

Metroloji Xidmət klassifikasiya kodu:

- M (CIPM təsnifatına uyğun olaraq ölçmə və kalibrləmə imkanları kodları)

Kəmiyyət vahidinin nominal qiyməti və ya ölçmə diapazonu: - (0 ÷ 3) q/sm^3.

Qeyri-müəyyənlik, k=2: - 0,000032 q/sm^3.

Saxlanılma yeri: "Azərbaycan Metrologiya İnstitutu" publik hüquqi şəxsin Sıxlıq və özlülük dövlət etalonları laboratoriyası.

"DMA – 5000 M" tipli sıxlıqölçən Etalonun tətbiq sahəsi:

- Sıxlıq kəmiyyət vahidinin reallaşdırılması, saxlanılması və ötürülməsinin ən yüksək dəqiqliklə təmin edilməsi.

Kalibrlənmə intervalı: - 1 il

Beynəlxalq tutuşdurmalar: - 555/AZ-a/12 (COOMET.M.D-S1)

Etalonun kalibrləmə imkanı: - (0,650-1,840) g/cm3 diapazonda

2. İkinci etalonun adı:

- Dövlət sıxlıq kəmiyyət vahidi etalonu - DMA 4500 M, S/N 83345036 (şək.2)



Şəkil 2

Ölçmə növü:

- mayelərin sıxlığının ölçülməsi
- təsdiq edilməsi haqqında sənəd və tarixi:
- standart nümunələrin və ölçmə vasitələrinin dövlət reyestr nömrəsi: - 4461-2021

Kəmiyyət vahidinin nominal qiyməti və ya ölçmə diapazonu: - (0 ÷ 3) q/sm^3

Qeyri-müəyyənlik, k=2: - 0,000066 q/sm^3

Etalonun tətbiq sahəsi: sıxlıq kəmiyyət vahidinin kəmiyyət vahidi etalonlarına və ölçmə vasitələrinə ötürülməsinin təmin edilməsi.

Etalonun təsviri:

- Dövlət sıxlıq kəmiyyət vahidi etalonu DMA - 4500 M tipli sıxlıqölçən sıxlığın, xüsusi çəkinin və konsentrasiyanın ölçü aləti olan, yüksək ölçmə dəqiqliyinə malik rəqəmsal, avtomatlaşdırılmış cihazdır. Konstruktiv olaraq sıxlıqölçən vahid blok şəklində hazırlanıb.

Kalibrlənmə intervalı: - 1 il

Beynəlxalq tutuşdurmalar: Etalonun kalibrləmə imkanı:

- (0,650-1,840) q/sm^3 diapazonda.

Sadalanan parametrin Azərbaycan Respublikası "Ölçmələrin vəhdəti haqqında" Qanunun tələblərinə uyğunlaşdırılması respublika ərazisində insanların sağlamlığı və ətraf mühütin təhlükəsizliyinə yönəlmiş addımdır və bu fəaliyyət daim diqqət mərkəzindədir.

Ədəbiyyat

1. Алимов А.К., Мамедова Э.А. Водно солевой режим покровной толщи Северной Мугани и гидрогеологические прогнозы. - Баку: «Элм», 1995.
2. Y.N.Həsənov, A.M.Həşimov. Metrologiya: ölcmə nəticələrinin işləməsinin qeyri-müəyyənliyə və normativ təminat (dərs vəsaiti) AMEA, Bakı Elmi əsərlər 2023, 309 səh.
3. Y.N.Həsənov, A.M.Həşimov, O.A.Abbasov. Qanunverici metrologiyanın əsasları. Bakı, "Elm nəşriyyatı-2011, 394 səh.
4. ISO 15212-1, Oscillation-type density meters. Part 1: Laboratory instruments
5. ISO 15212-2, Oscillation-type density meters - Part 2: Process instruments for homogeneous liquids
6. ISO 12185, Crude petroleum and petroleum products - Determination of density - Oscillating U-tube method
7. ISO/IEC 98-3:2008 - Uncertainty of measurement - Part 3 Guide to the expression of Uncertainty in Measurements (GUM 1995)
8. Instruction Manual and Safety Information for DMA 5000 M
9. Instruction Manual and Safety Information for DMA 4500 M
10. 03-AzMİ09-L-064
11. EA-4/02 M:2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration
12. 03-AzMİ09-L-064
13. 03-AzMİ09-L-010

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: dos. Ağarzayev B.K.

UOT 539.4

YARIMKEÇİRİCİ - POLİMER ƏSASLI KOMPOZİT QEYRİ-XƏTTİ MÜQAVİMƏTLƏRİN MEXANİKİ XASSƏLƏRİ

İmanova A.Y.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ
Az1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18
E-mail: almaz.imanova@asco.az

Xülasə. *Məqalədə yarımkeçirici və polimer əsaslı kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki xassələrinin disperqatorun həcmi faizindən asılı olaraq dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Həmçinin polimer matrisasının növündən (polyar və ya qeyri polyar) asılı olaraq nümunələrin mexaniki möhkəmliyi öyrənilmişdir.*

Abstract. *The article investigates the change in mechanical properties of semiconductor and polymer-based composite nonlinear resistors as a function of the volume percentage of the dispersant. The mechanical strength of the samples was also studied depending on the type of polymer matrix (polar or nonpolar).*

Аннотация. *В статье исследовано изменение механических свойств композитных нелинейных резисторов на основе полупроводников и полимеров в зависимости от объемного процента диспергатора. Также была изучена механическая прочность образцов в зависимости от типа полимерной матрицы (полярная или неполярная).*

Açar sözlər: *polimer, yarımkeçirici, mexaniki xassələr, volt-amper xarakteristikası, varistor effekti, kompozit, disperqatorun həcmi faizi*

Key words: *polymer, semiconductor, mechanical properties, current-voltage characteristic, varistor effect, composite, volume percentage of dispersant*

Ключевые слова: *полимер, полупроводник, механические свойства, вольт-амперная характеристика, варисторный эффект, композит, объемный процент диспергатора*

Giriş. Son illərdə yarımkeçirici-polimer kompozitlərinə olan maraq, onların unikal elektrik və mexaniki xassələrinin kombinasiyası sayəsində xeyli artmışdır. Bu materiallar yüksək gərginlikli avadanlıqlarda elektrik sahəsinin tənzimlənməsi və elastik elektron cihazların (o cümlədən varistor tipli qoruyucu elementlərin) inkişaf etdirilməsi üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Bərk cisimlərin əsas sınaq parametrlərindən biri mexaniki möhkəmlik və mikrobərklikdir. Göstərilən parametrlər mexaniki gərginliklərə qarşı cismin müqavimətini və deformasiya qabiliyyətini xarakterizə edir.

Tədqiq edilən kompozitlərin də mexaniki xassələrinin öyrənilməsi və onların xarici mexaniki təsir baxımından davamlılığı əhəmiyyət kəsb edən məsələdir.

Məlumdur ki, möhkəmlik nəzəriyyəsi dağılmanın energetik kriteriyasına və çatların, struktur boşluqlarının ətrafında yaranan lokal yüksək intensivliyə malik gərginliyi hesablamağa imkan verən elastiklik nəzəriyyəsinə əsaslanır.

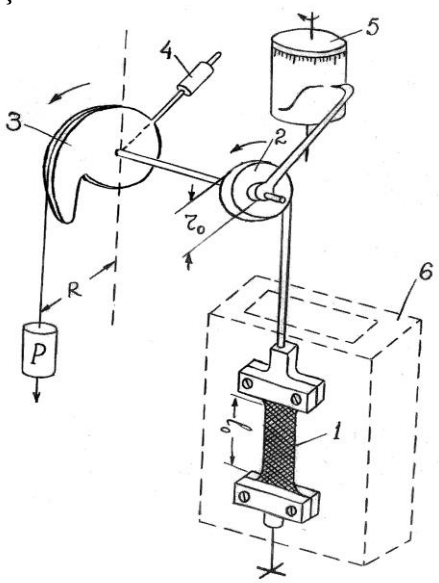
Qeyd edək ki, hal-hazırda polimer materialların tam birmənalı dağılma nəzəriyyəsi mövcud deyildir. Mexaniki dağılma prosesinin nisbətən tam nəzəriyyəsi şüşə və bəzi metallar üçün mövcuddur [1, 3]. Mexaniki dağılma prosesinin tədqiqində Qriffits nəzəriyyəsi mühüm rol oynayır.

Bütün aktiv və passiv kompozitlərdə olduğu kimi kompozit qeyri-xətti müqavimətlər üçün də elektrik və mexaniki xassələrin öyrənilməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Elektrik və mexaniki möhkəmliklərin təyin edilməsi kompozitlərdə varistor effektinin formalaşması zamanı elektron-

ion proseslərinin və fazalararası təsirlərin rolunu öyrənməyə imkan verir. Bunlardan başqa göstərilən makroskopik parametrlərin təyin edilməsi kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin istismar rejimlərinin optimallaşdırılmasında da böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Məsələnin qoyuluşu. Məqalədə yarımkeçirici və polimer əsaslı kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki xassələrinin disperqatorun həcmi faizindən və polimer matrisasının növündən (polyar və ya qeyri-polyar) asılı olaraq dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Kompozitin komponentləri kimi toz halında yarımkeçirici monokristallik silisiumdan (p-tip Si), polyar polivinildenftoriddən (PVDF) və qeyri-polyar polipropilendən (PP) istifadə olunmuşdur. Qeyri-xətti müqavimətlərin alınması üçün lazım olan monokristallik Si, əvvəlcədən farfor küräli dəyirmanda dənəciklərinin ölçücü 60 mkm daha kiçik olana qədər üyüdülmüşdür. Kompozitlər, komponentlərin homogen qarışığının 180°C temperatur və 15 MPa təzyiq altinda isti preslənməsi yolu ilə alınmışdır. Sintez edilmiş nümunələr buzlu suda möhkəmlətmə üsulu ilə soyudulmuşdur. Tədqiq edilən kompozitlərin tərkibi geniş diapozonda (uyğun olaraq 30-60% Si və 70-40% polimer) dəyişir. Nümunələrin qalınlığı 150 mkm-ə bərabərdir.

Kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki xassələrini təyin etmək üçün kompozitdən xüsusi kəsiyə malik olan bıçaqla iki pər tipli nümunə kəsilib. Nümunənin işlək hissəsinin uzunluğu 10 mm, eni isə 3 mm-dir. Nümunənin bu quruluşda seçilməsi sınaq zamanı tətbiq olunan gərginliyin nümunənin en kəsiyi üzrə bərabər paylanmasını təmin edir. Kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki möhkəmliyini təyin etmək üçün şəkil 1-də göstərilən xüsusi qurğudan istifadə edilib. Təcrübə zamanı sınaq temperaturunun və tətbiq olunmuş mexaniki dartma gərginliyinin sabit qalması əsas şərtdir.



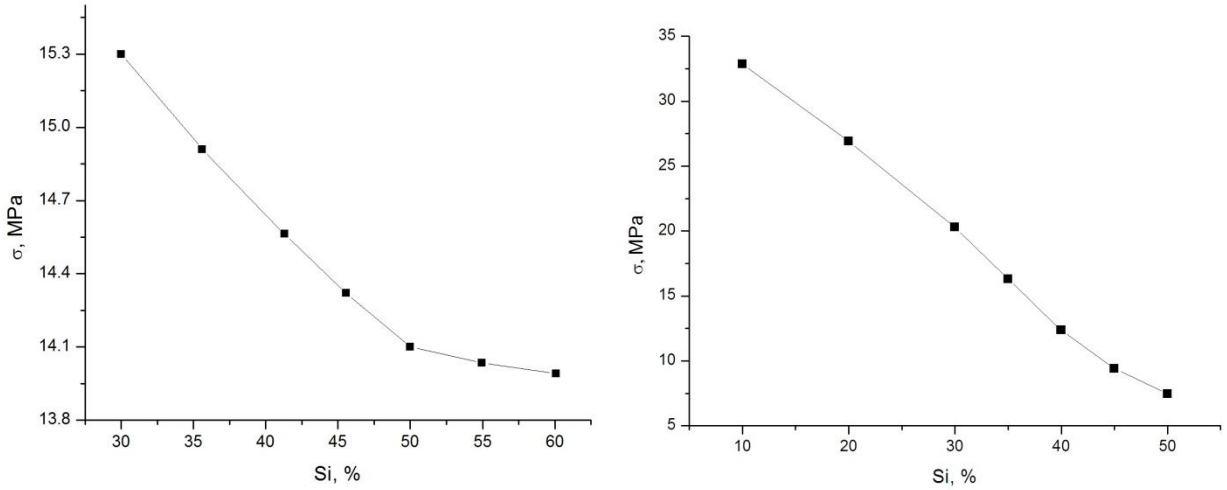
Şəkil 1. *Kompozitlərin mexaniki gərginliyini təyin etməkl üçün istifadə edilən qurğu: 1-nümunə; 2-blok; 3- fiqurlu ling; 4-lingin yarada biləcəyi qüvvəni kompensasiya edən yük; 5-saat mexanizmi; 6-temperatur kamerası*

Məlumdur ki, mexaniki yaşama müddəti təyin edildikdə nümunə deformasiya edərək uzanır, yəni onun en kəsiyinin sahəsi azalır. Ona görə də deformasiyaya uyğun olaraq tətbiq olunan mexaniki gərginlik azalmalıdır ki, mexaniki qüvvənin nümunənin en kəsiyinin sahəsinə olan nisbəti sabit qalsın. Buna görə də qeyd olunmuş qurğuda fiqurlu lingdən istifadə olunmuşdur.

Gərginliyin sabit qalması üçün nümunəyə tətbiq olunan müxaniki qüvvə fiqurlu ling vasitəsilə ona verilir. Nümunənin en kəsiyinin sahəsi azaldıqca şəkil 1-də göstərilən qüvvənin P qolu azaldığı üçün nümunədə həmişə eyni mexaniki gərginlik yaranır.

Nümunənin deformasiyası fırlana bilən saat mexanizmi vasitəsilə təyin edilir. İstifadə olunan kompozitlərin qalınlığı 150 mkm-ə bərabərdir. Qalınlıq xüsusi optik qalın ölçən cihaz (İZV-2) vasitəsilə 1 mkm dəqiqliklə təyin edilmişdir.

Alınmış nəticələrin analizi. Şəkil 2-də yarımkeçirici Si və müxtəlif polimer əsaslı kompozitlərin mexaniki möhkəmliyinin disperqatorun həcmi faizindən asılılıqları verilmişdir. Şəkillərdən görünür ki, matrisadakı polimerin növündən asılı olmayaraq disperqatorun həcmi faizi artdıqca mexaniki möhkəmlik azalır. Bununla yanaşı mexaniki gərginliyin qiyməti PVDF əsaslı kompozitdə PP əsaslı kompozitə nisbətən 1,5 dəfə çoxdur (şəkil 2). Alınan nəticələri izah etmək üçün nəzərə almaq lazımdır ki, polimerin real quruluşunda defektlər çoxdur və kompozitdə daxili gərginliyin qiyməti də böyükdür. Temperaturun sabit qiymətində nümunəyə nə qədər çox gərginlik verilərsə, kimyəvi əlaqələrin qırılma ehtimalı da bir o qədər çox olar.



a – PP+Si b – PVDF+Si

Şəkil 2. *Si və polimer əsaslı kompozitin mexaniki möhkəmliyinin disperqatorun həcmi faizindən asılılığı*

Qriffits nəzəriyyəsinə [4] görə bu gərginlik çatların artmasına gətirib çıxarır və bunun nəticəsində nümunə dağılır.

Mexaniki möhkəmliyin kinetik nəzəriyyəsinə [3] əsasən kompozitlərdə disperqatorun həcmi faizi artdıqca mexaniki möhkəmliyin azalmasının əsas səbəblərini aşağıdakı kimi izah etmək olar:

1) Kompozitdə disperqatorun hissəcikləri arasındakı polimer matrisanın rolu böyükdür və kompozitin mexaniki möhkəmliyi disperqatorun hissəcikləri arasındakı polimer qatı ilə təyin olunur. Ona görə də disperqatorun həcmi faizi artdıqca kompozitin mexaniki möhkəmliyinin azalması disperqatorun hissəcikləri arasındakı polimer qatının azalması ilə əlaqədardır.

2) Matrisanın (polimerin) makromolekulları arasındakı istilik enerjisi hissəciklər arasında bərabər paylanmadığı üçün bu enerji müəyyən bir hissəyə daha çox düşür və bu da öz növbəsində nümunənin dağılmasının əsasını qoyan çatların yaranmasına səbəb olur. Zaman keçdikcə bu çatlar kompozitdə daha böyük çatlara çevrilir və nəticədə nümunə dağılır.

İş [3]-a əsasən əvəzedicisi nizamsız olan polimerlər amorf olurlar və onların kristallaşma dərəcəsi kiçik olur. Polipropilen polimerinin əvəzləyicisi olmadığı üçün onun kristallaşma dərəcəsi polivinilidenftorid polimerinin kristallaşma dərəcəsindən böyükdür. PVDF polimerində əvəzedici flüor atomları hesabına onların kristallaşma dərəcəsi azdır (50-60%).

Qeyd edək ki, PVDF polimerində flüor atomu üstünlük təşkil edir və elektromənfiliyə malik olan flüor atomu ilə karbon atomları arasındakı rabitə çox güclüdür (onların parçalanma enerjisi

480 kC/mol-dur). Buna görə də flüor atomları ilə polimer atomları arasındakı rabitəni qırmaq üçün həmin sistemə böyük qüvvə sərf etmək lazımdır. Aldığımız təcrübələr deyilənləri təsdiq edir.

Nəticə. Beləliklə, yarımkeçirici və polimer əsaslı kompozit qeyri-xətti müqavimətlərin mexaniki xassələrinin disperqatorun həcmi faizindən asılı olaraq dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, matrisası polyar PVDF olan kompozitlərdə, matrisası qeyri-polyar PP olan kompozitlərə nisbətən mexaniki möhkəmliyin çox olmasının əsas səbəbi PVDF polimerində yüksək elektromənfi xassəyə malik flüor atomlarının olmasıdır.

Ədəbiyyat

1. Мустафаев З.Э. Влияние зарядового состояния и межфазного взаимодействия на прочностные свойства композитов на основе полимер-пьезоэлектрик. Канд. дис., 2005, 155 с.
2. Hull and Bacon. Introduction to dislocations". 5th Edition. Butterworth-Heinemann, 2011.
3. Anderson T.L. Fracture mechanics: Fundamentals and applications. 4th Edition, CRC Press, 2017.
4. Suresh S. Fatigue of materials. 2nd Edition. Cambridge University Press, 1998.

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

UDC 699.871

THE ROLE OF SOME PEROVSKITE MATERIALS IN THE PHOTOCATALYTIC REDUCTION OF CARBON DIOXIDE

[1]Zakiyeva I.H., [2]Suleymanli M.A., [3]Huseynova Sh.M., [1,2]Samadova U.F.

[1]Institute of Physics Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan
Az1073, Baku, H.Cavid, 131
[2] "Azerbaijan State Marine Academy"PHŞ
Az1000, Baku, Z. Aliyeva st., 18
[3]Azerbaijan Land Transport Agency
Az1033, Baku, Haji Mammadov st., 5
E-mail:neytrino7@gmail.com

Abstract. *Perovskite materials, particularly due to their ability to tune structural and electronic properties, are widely used in energy conversion applications. These materials exhibit high efficiency in environmental protection-oriented photocatalytic reactions, such as CO_2 reduction and water splitting. The major advantage of perovskite materials lies in their ability to undergo significant structural changes and accommodate various cations. This property allows for the optimization of their photocatalytic activity. Additionally, perovskites have the ability to absorb a broad spectrum of light, which enhances energy production in photocatalytic processes. Furthermore, their performance is improved through combinations and ion doping methods that regulate their zone structures. While perovskite materials show better results than traditional methods in CO_2 reduction, challenges remain, though strategies are being developed to overcome these limitations.*

Xülasə. *Perovskit materialları, xüsusilə onların strukturunun və elektron xüsusiyyətlərinin tənzimlənə bilməsi səbəbindən enerji çevrilməsi tətbiqlərində geniş istifadə olunur. Bu materiallar, CO_2-nin azaldılması və suyun parçalanması kimi ətraf mühitin qorunmasına yönəlmiş fotokatalitik reaksiyalarda yüksək effektivliyə malikdir. Perovskit materiallarının ən böyük üstünlüyü, onların*

kristal quruluşunun geniş dəyişikliklərə məruz qalması və müxtəlif katyonları qəbul etmə qabiliyyətidir. Bu xüsusiyyət, onların fotokatalitik fəaliyyətini optimallaşdırmağa imkan verir. Ayrıca, perovskit materialları geniş spektrli işıq udma qabiliyyətinə malikdir, bu da onların fotokatalitik proseslərdə enerji istehsalını artırır. Bundan əlavə, perovskit materiallarının birləşməsi, ion doping metodları ilə zona quruluşlarının tənzimlənməsi kimi xüsusiyyətlər onların performansını artırmağa kömək edir. Perovskit materiallarının tətbiqi CO_2 azaldılması ilə bağlı ənənəvi metodlardan daha üstün nəticələr verə bilir, lakin hələ də bəzi məhdudiyyətlər mövcuddur, ancaq bu məhdudiyyətləri aradan qaldırmaq üçün müxtəlif strategiyalar inkişaf etdirilməkdədir.

Аннотация. *Перовскитные материалы, особенно из-за их способности регулировать структуру и электронные характеристики, широко используются в приложениях по преобразованию энергии. Эти материалы обладают высокой эффективностью в фотокаталитических реакциях, направленных на охрану окружающей среды, таких как редукция CO_2 и водородное распадение. Главное преимущество перовскитных материалов заключается в их способности подвергать кристаллическую структуру значительным изменениям и принимать различные катионы. Эта характеристика позволяет оптимизировать их фотокаталитическую активность. Также перовскитные материалы обладают способностью поглощать широкий спектр света, что способствует увеличению производства энергии в фотокаталитических процессах. Кроме того, их комбинации, такие как регулировка структуры зон с помощью ионного легирования, помогают улучшить их производительность. Применение перовскитных материалов может дать более высокие результаты по снижению CO_2 по сравнению с традиционными методами, но все еще существуют определенные ограничения, однако разрабатываются различные стратегии для их преодоления.*

Key words**:** *perovskite materials, CO_2 reduction, photocatalysis, energy conversion, environmental protection*

Açar sözlər**:** *perovskit materiallar, CO_2 reduksiyası, fotokataliz, enerji çevrilməsi, ətraf mühitin qorunması*

Ключевые слова: *материалы перовскита, редукция CO_2, фотокатализ, преобразование энергии, защита окружающей среды*

Introduction. The escalating concentration of atmospheric carbon dioxide (CO_2) due to anthropogenic activities has become a pressing global concern, driving the search for sustainable technologies to mitigate its environmental impact. Specially, the transportation industry, specifically automobiles, is one of the largest contributors to atmospheric pollution, primarily through the emission of greenhouse gases like CO_2. Cars are a major source of CO_2 emissions, which are released during the combustion of fossil fuels, and these emissions significantly contribute to global warming and climate change. As global populations increase and urbanization expands, the need to mitigate the impact of car emissions on the environment has never been more pressing. Photocatalysis, particularly through the use of perovskite materials, has emerged as a promising technology for addressing this challenge. These materials, with their ability to catalyze the reduction of CO_2 into useful products, offer a potential solution to reduce the environmental impact of car emissions and other sources of atmospheric pollutants. By harnessing solar energy to drive these reactions, photocatalytic processes could play a crucial role in combating climate change and creating more sustainable energy systems. Among various strategies, photocatalytic reduction of CO_2 into value-added fuels or chemicals has emerged as a promising approach to simultaneously address energy and environmental challenges. The efficiency of such processes critically depends on the choice of photocatalyst, which must possess appropriate band structures, high surface area, and excellent charge separation capabilities. Perovskite materials, characterized by the general formula ABO_3, have attracted considerable attention in this context due to their unique structural flexibility,

tunable electronic properties, and robust physicochemical stability. Their ability to accommodate a wide variety of cations at both A- and B-sites enables precise engineering of optical and electronic features, which is crucial for enhancing light absorption and charge carrier dynamics. Moreover, the presence of oxygen vacancies and variable valence states in perovskite oxides further promotes redox activity, making them highly effective for catalytic applications. Recent studies have demonstrated that perovskite-based photocatalysts can efficiently activate CO_2 molecules, facilitate electron transfer, and selectively produce fuels such as CO, CH_4, and methanol under solar irradiation.

Perovskite Materials. The versatility of perovskite materials extends beyond single ABO_3 structures to double and layered derivatives, allowing fine-tuning of surface chemistry, charge mobility, and light-harvesting efficiency. These attributes, combined with emerging synthesis techniques such as sol-gel, co-precipitation, and 4D printing of perovskite hydrogels, have paved the way for high-performance, stable, and scalable photocatalysts. Consequently, perovskite materials stand out as a promising class of compounds for advancing CO_2 photoreduction technologies and addressing the global energy-environment nexus.

Perovskite materials, named in honor of the Russian mineralogist Lev Alekseyevich von Perovski, form a distinctive family of compounds defined by their exceptional crystal structure and versatile physicochemical properties. Their natural abundance and structural adaptability have rendered them highly attractive for applications spanning photovoltaics, optoelectronics, piezoelectric devices, and emerging technologies, including solar energy conversion, CO_2 reduction, organic pollutant degradation, energy storage, and various electronic devices [1]. Among transition metal oxides (TMOs), perovskite oxides are particularly notable for their ability to host a wide variety of cations at both the A- and B-sites of their ABO_3 lattice. Partial cation substitution at these sites introduces oxygen vacancies and variable valence states, enabling fine-tuning of structural and electronic characteristics. Remarkably, approximately 90% of elements in the periodic table can potentially occupy these positions, providing significant compositional flexibility (Fig. 1). In the idealized ABO_3 structure, A-site cations reside at the cube corners, typically represented by rare-earth or alkaline-earth metals with a coordination number of 12, while B-site cations, generally six-coordinated transition metals, occupy the unit cell center, and oxygen atoms occupy the face-centered positions. The structural robustness and compositional versatility of perovskites make them ideal candidates for electrocatalytic applications.

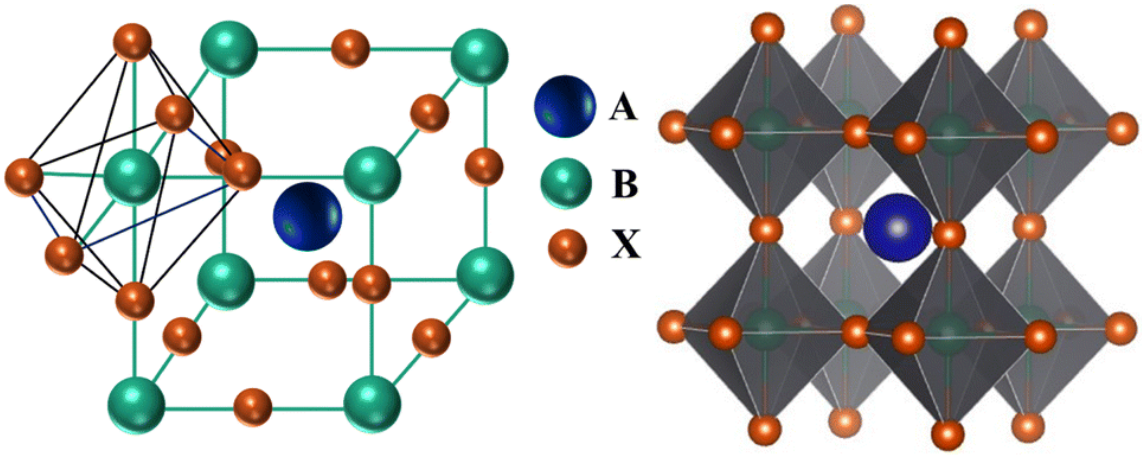


Figure 1. *The basic structure of ABX_3 with corner-sharing BX_6 octahedral [2]*

The coexistence of multiple cation species allows precise tuning of electronic and catalytic properties, thereby enhancing their performance in oxygen evolution reactions (OER) and other electrochemical processes. Specifically, their diverse redox behavior, coupled with favorable ionic

and electronic conductivities and chemical stability, contributes to their high electrocatalytic activity. Strategies to optimize the photoelectrocatalytic performance of perovskite oxides include surface deposition of noble metals, cation doping, and coupling of semiconductors with complementary band structures (e.g., Z-scheme configurations). Ion doping enables modulation of the bandgap and alteration of intrinsic crystal structures, with ions such as Li^{+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Y^{3+}, $NaNbO_3$, and $KNbO_3$ being commonly employed [3–7]. Additionally, codoping at the A-site can stabilize B-site metal valences, further enhancing photocatalyst durability. Despite their versatility, perovskite oxides face limitations that can hinder electrochemical performance. High initial overpotentials during OER, low specific surface areas, and limited electrical conductivity can reduce the number of active sites and impede charge transfer. Furthermore, structural degradation or phase transitions over time can compromise long-term stability.

Perovskite derivatives also include ferroelectric compounds, which exhibit spontaneous polarization. First described by Joseph Valasek in 1920 through studies on Rochelle salt, ferroelectric materials, primarily complex oxides, are utilized in actuators, non-volatile memories, capacitors, sensors, and energy harvesters [8, 9]. Their A-sites typically accommodate alkali, alkaline-earth, or rare-earth cations, whereas B-sites host transition metals, and X-sites (O, N, etc.) complete the lattice. Rational element substitution at these sites enables precise tuning of crystal and electronic structures, thus affecting physical properties and photocatalytic performance [10]. Perovskites, including ABO_3 and A_2BO_4 oxides, demonstrate low cost, chemical stability, and multifunctionality, with applications in catalysis, adsorption, optics, magnetism, electronics, and ferroelectricity. They are employed in oxygen-permeable membranes, fuel cells, magnetic materials, sensors, and wastewater treatment. Various synthetic techniques-sol-gel, proteic, Pechini, combustion, co-precipitation, and chelating precursor methods-allow control over structural and functional properties, optimizing perovskites for specific applications [11]. Their structural resilience and ability to accommodate diverse cations make them particularly suitable for photocatalytic, electrocatalytic, and photoelectrocatalytic processes. In photocatalysis, perovskites efficiently absorb light over broad spectra, facilitating charge carrier generation for reactions such as water splitting or CO_2 reduction. In electrocatalysis, reversible redox behavior and tunable chemical composition enhance catalytic activity. In photoelectrocatalysis, the combination of light absorption and electrochemical reactivity allows efficient conversion of solar energy to chemical energy. Careful engineering of composition and structure ensures broad applicability of perovskites in sustainable energy solutions.

Classifications of perovskite materials. *Lead-based perovskites* are a distinctive class of materials that have gained attention not only in the realm of optoelectronics but also for their potential applications in photocatalysis, particularly in the reduction of CO_2. These materials are structured in the form of the perovskite crystal lattice, with lead ions occupying the B-site of the structure. The chemical flexibility of perovskite materials allows for various modifications, making them versatile for different applications, including CO_2 reduction. The unique feature of lead-based perovskites lies in their ability to absorb a wide range of the solar spectrum and generate electron-hole pairs upon light absorption. This makes them particularly promising for solar-driven photocatalytic reactions. Recent studies have focused on developing lead-based perovskites with high stability and efficiency in photocatalytic CO_2 reduction. Researchers have explored different compositions, such as the use of formamidinium and methylammonium lead halides, to optimize the photocatalytic performance. For example, lead-based perovskites like $CH_3NH_3PbI_3$ [12] have demonstrated exceptional CO_2 reduction activity under visible light. The material's high light absorption and efficient charge separation have been identified as key factors contributing to its photocatalytic performance. Moreover, the incorporation of other elements or hybridization with other materials has been explored to improve the stability and selectivity of CO_2 reduction products, such as methane and carbon monoxide. However, despite the promising performance of lead-based perovskites, the toxicity of lead and the challenges related to their stability in aqueous environments

or over prolonged use remain a critical concern. Consequently, ongoing research is focused on improving the environmental safety and long-term performance of these materials. This has led to the exploration of strategies like lead replacement, protective coatings, and the development of composite materials that combine the advantages of lead-based perovskites with those of other stable materials.

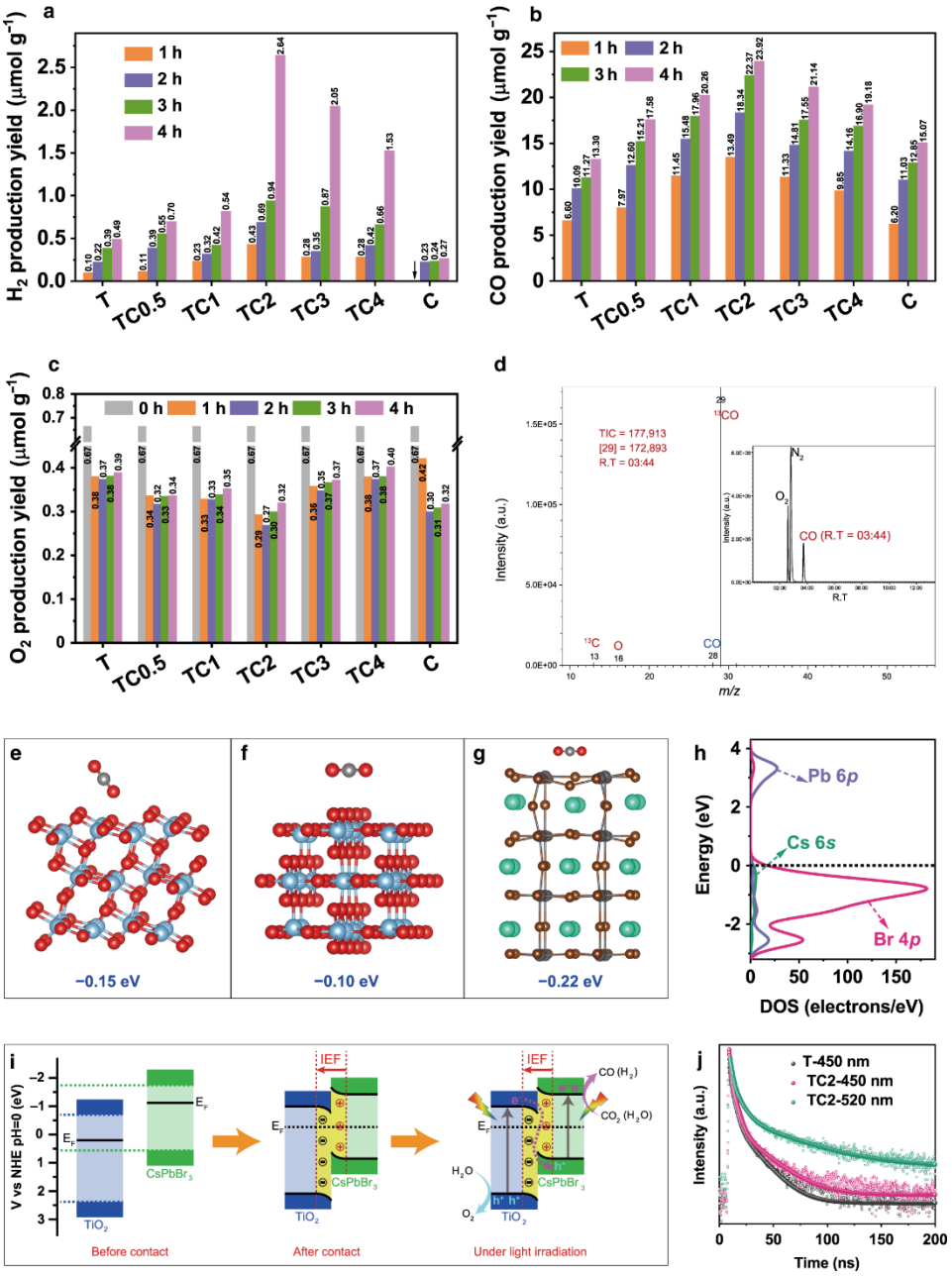


Figure 2. *Photocatalytic activities of CO_2 reduction over TiO_2, TCx, and $CsPbBr_3$ quantum dots (QDs) during 4-h experiment performed under UV–vis light irradiation: time course of (a) H_2, (b) CO, and (c) O_2 production yields. (d) Mass spectra of 13CO and total ion chromatography (inset) over TC_2 in the photocatalytic reduction of $13CO_2$. Optimized structures of CO_2 molecule adsorbed on (e) anatase TiO_2 (101), f rutile TiO_2 (110), and (g) $CsPbBr_3$ (001) facets. h The DOS of $CsPbBr_3$. (i) Schematic illustration of $TiO_2/CsPbBr_3$ heterojunction: internal electric field (IEF)-induced charge transfer, separation, and the formation of S-scheme heterojunction under UV–visible-light irradiation for CO_2 photoreduction. (j) Time-resolved photoluminescence (TRPL) spectra of TiO_2 (T) and TC_2 at emission wavelengths of 450 and 520 nm, respectively.*

In summary, lead-based perovskites represent a promising material class for photocatalytic CO_2 reduction due to their high efficiency, tunable properties, and significant progress in research aimed at addressing their limitations. These materials are an exciting area of investigation for advancing renewable energy technologies and mitigating the impacts of climate change through the conversion of CO_2 into useful products. For example, cesium lead bromide ($CsPbBr_3$) quantum dots have demonstrated significant photocatalytic activity for CO_2 reduction. When combined with graphene oxide, these composites exhibit enhanced charge separation and increased production of CO and CH_4 under visible light irradiation.

The introduction of graphene oxide facilitates electron transfer, improving overall catalytic efficiency. This approach underscores the potential of integrating perovskite quantum dots with carbon-based materials to enhance photocatalytic performance [13]. Moreover, in the study [14], authors have developed TiO_2/perovskite ($CsPbBr_3$) S-scheme heterojunctions via a straightforward electrostatic-driven self-assembly method, Fig.2. Both density functional theory (DFT) calculations and experimental observations confirm the electron transfer from $CsPbBr_3$ quantum dots (QDs) to TiO_2, leading to the formation of an internal electric field (IEF) that directs from $CsPbBr_3$ to TiO_2 upon hybridization. This IEF facilitates the movement of photoexcited electrons from TiO_2 to $CsPbBr_3$ under light irradiation, as demonstrated by in-situ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis. The results indicate the creation of an S-scheme heterojunction within the TiO_2/$CsPbBr_3$ nanohybrids, significantly enhancing the separation of electron-hole pairs, thereby improving CO_2 photoreduction efficiency. The hybrid nanofibers exhibit a higher CO_2 reduction rate of 9.02 μmol g^{-1} h^{-1}, compared to pristine TiO_2 nanofibers, which show a rate of 4.68 μmol g^{-1} h^{-1}. Isotope ($13CO_2$) tracer experiments further validate that the reduction products are derived from the CO_2 source.

$Cs_2AgBiBr_6$, a lead-free double perovskite, has shown promising results in photocatalytic CO_2 reduction. Under visible light, this material produced CO and CH_4, demonstrating its potential as a stable and efficient photocatalyst. The stability and photocatalytic activity of $Cs_2AgBiBr_6$ make it a viable alternative to lead-based perovskites for CO_2 reduction applications [14].

In recent years, 2D materials have garnered significant attention as promising supporting materials across various applications. The combination of halide perovskites with 2D materials presents an effective strategy for enhancing charge transfer and minimizing electron-hole recombination in perovskite-based photocatalysts. In a notable study conducted by Xu et al. in 2018, the $CsPbBr_3$/Pd Schottky junction was developed to investigate the improved electron consumption rate for CO_2 photoreduction [15]. The $CsPbBr_3$ nanocrystals (NCs) were deposited onto Pd nanosheets under ambient conditions using a simple technique on a glass substrate, and the photocatalytic reduction of CO_2 to CO and CH_4 was examined. The dynamics of charge transport and carrier behavior within the composite were analyzed through photoluminescence (PL) and femtosecond transient absorption spectroscopy (fs-TAS). A notable PL quenching of 0.5–8.6% was observed in the $CsPbBr_3$/Pd composite compared to the pristine sample, as shown in Figure 3a. Similarly, the time-resolved PL (TRPL) analysis revealed a reduced PL decay with an average lifetime of 2.71–13.38 ns for the composite, compared to 52.03 ns for pure $CsPbBr_3$ (Figure 3b). A consistent trend was observed in the fs-TAS analysis, where the composite exhibited a significantly lower peak intensity compared to the pristine $CsPbBr_3$ (Figure 3c). These results suggest that the integration of $CsPbBr_3$ with Pd nanosheets reduces the recombination rate of electron-hole pairs, thereby enhancing the CO_2 reduction process to form CH_4 and CO (Figure 3d). Remarkably, the Schottky junction formed between the $CsPbBr_3$/Pd composite resulted in an increased electron consumption rate of up to 33.80 μmol g^{-1} (for CH_4 and CO production), 2.43 times higher than that of the pure $CsPbBr_3$, with improved quantum efficiency (Figure 3e, f). These findings demonstrate that combining halide perovskites with 2D materials is a promising approach for photocatalytic CO_2 reduction.

Perovskite oxides, a subclass of perovskite materials, have emerged as promising candidates for photocatalytic CO_2 reduction due to their unique crystal structure and tunable properties. These materials, characterized by the ABO_3 structure, allow for the modification of electronic properties and catalytic activity by adjusting the A- and B-site cations. Their high ionic and electronic conductivity, redox activity, and stability make them ideal for CO_2 reduction reactions. Materials like $SrTiO_3$, $LaFeO_3$, and $BaTiO_3$ have shown strong photocatalytic performance, producing carbon-based fuels like methane, carbon monoxide, and formic acid.

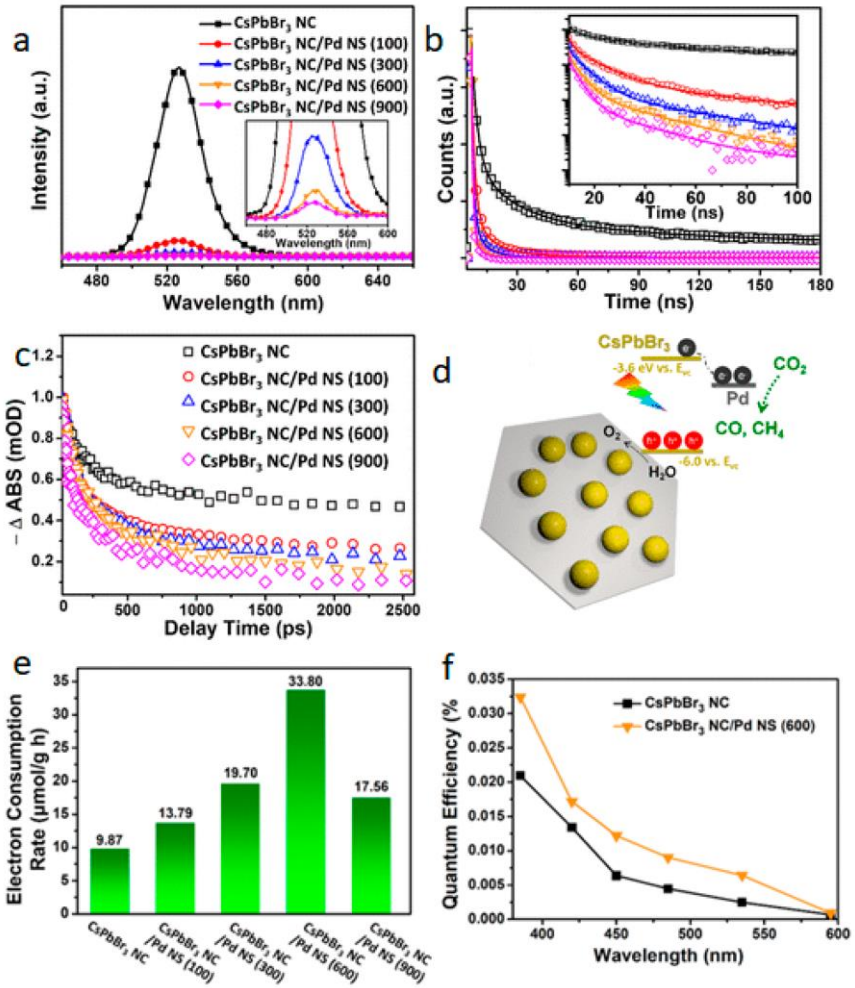
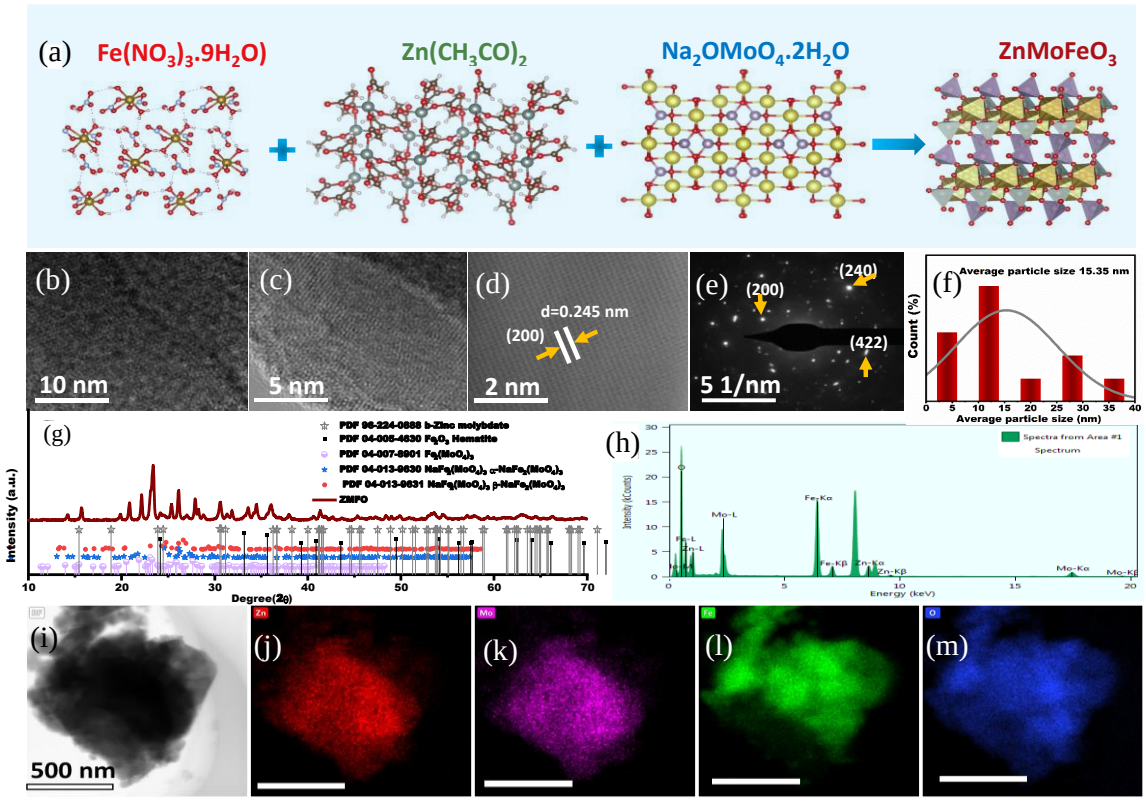


Figure 3. *The comparative (a) PL spectra, (b) PL decay, (c) transient absorption kinetic plots (at an excitation wavelength of 400 nm) among $CsPbBr_3$ NC and composite samples, (d) schematic illustration and band alignment of $CsPbBr_3$/Pd composite for CO_2 reduction, (e) photocatalytic CO_2 reduction performance, and (f) quantum efficiency of different samples.*

The metal cations at the B-site and surface modifications, such as oxygen vacancy engineering, enhance their photocatalytic efficiency. Despite promising results, challenges like stability and product selectivity remain, prompting ongoing research into optimizing these materials or combining them with other semiconductors. Perovskite oxides offer great potential for sustainable energy applications in CO_2 reduction. For example, $LaCoO_3$, a perovskite oxide, has been utilized as a cocatalyst in photocatalytic CO_2 reduction. When combined with other photocatalysts, $LaCoO_3$ enhances the production of CO under visible light irradiation. Its role as a cocatalyst underscores the importance of perovskite oxides in facilitating efficient CO_2 reduction processes [16].

Incorporation of sulfur (S) and carbon (C) into Sr_2CoTaO_6 perovskite oxide has been shown to boost its photocatalytic CO_2 reduction activity by more than eleven orders of magnitude compared to the pristine material. This enhancement is attributed to improved charge carrier dynamics and increased surface area, highlighting the significance of compositional modifications in perovskite oxides for photocatalytic applications.

Two-dimensional perovskites have garnered attention for their stability and unique excitonic properties, making them suitable for photocatalytic CO_2 reduction. These materials exhibit high stability under photocatalytic conditions and possess exciting characteristics such as quantum well structures and high exciton binding energies, which can enhance photocatalytic efficiency [men].



Figuire 4. *(a) Synthetic illustration of the optimized geometrical structure of $ZnMoFeO_3$, (b-e) HRTEM and HAADF-STEM (f) average particle size (g) XRD (h) EDS spectra (i) TEM*

Specially, novel perovskite $ZnMoFeO_3$ (ZMFO) nanosheets as promising semiconductor photocatalysts for CO_2 reduction. Experimental results show that ZMFO has a narrow bandgap, exceptional visible light response, large specific surface area, high crystallinity, and various surface-active sites, leading to an impressive photocatalytic CO_2 reduction activity of 24.87 $\mu molg^{-1}h^{-1}$ and strong stability. Theoretical calculations reveal that CO_2 conversion into CO and CH_4 on the ZMFO surface follows formaldehyde and carbine pathways. This study provides significant insights into designing innovative perovskite oxide-based photocatalysts for economical and efficient CO_2 reduction systems [1], Figure 4.

Metal-organic frameworks (MOFs) are a class of materials that consist of metal ions or clusters coordinated to organic ligands, forming a porous and crystalline structure. MOFs have gained significant attention in photocatalytic CO_2 reduction due to their high surface area, tunable porosity, and the ability to incorporate different metal centers, which can act as catalytic sites. Their

structural flexibility, along with the possibility of functionalizing the organic ligands, makes them ideal candidates for enhancing photocatalytic performance.

One notable example of MOFs in CO_2 reduction is MOF-5 (also known as IRMOF-1), which consists of zinc ions connected by terephthalic acid ligands. MOF-5 is known for its high surface area and porosity, which provides a large number of catalytic sites for CO_2 adsorption. Studies have shown that modifications to the linker molecules or the inclusion of co-catalysts, such as gold nanoparticles or copper ions, can significantly enhance its photocatalytic activity for CO_2 reduction. ZIF-8, a zinc-based MOF with imidazolate linkers, is another widely studied material for photocatalytic CO_2 reduction. ZIF-8 has a high surface area and thermal stability, which is beneficial for photocatalytic processes that require high temperatures. Its microporous structure is ideal for CO_2 capture, and doping with transition metals or coupling with other semiconductors has been shown to improve its CO_2 reduction efficiency. Additionally, MIL-101 is a chromium-based MOF with a large surface area and a flexible structure, which can accommodate various metal centers to enhance its photocatalytic activity. The incorporation of platinum or palladium nanoparticles into MIL-101 has been explored to improve its performance in CO_2 reduction reactions. In general, MOFs exhibit promising properties for photocatalytic CO_2 reduction, such as their high surface area, tunable porosity, and the ability to integrate catalytic sites. However, challenges remain in improving their efficiency, selectivity, and stability under practical reaction conditions. Continued research into the design and functionalization of MOFs, as well as their integration with other catalytic materials, is essential to overcome these challenges and make MOF-based photocatalysts viable for large-scale CO_2 reduction applications [17].

Conclusions. Perovskite materials, especially perovskite oxides and lead-based variants, exhibit significant potential in photocatalytic CO_2 reduction. Their distinctive crystal structures, capacity to incorporate a wide variety of cations, and adjustable electronic properties offer a flexible platform for enhancing photocatalytic performance. Despite notable improvements in their efficiency and durability, there are still key challenges to address, particularly regarding product selectivity, long-term stability, and the integration of these materials into large-scale applications. A primary challenge in applying perovskite materials for CO_2 reduction is optimizing product selectivity. Current systems often generate multiple by-products, and achieving higher specificity for desired products such as methane or methanol remains a significant challenge. Moreover, the durability of perovskite materials under extended use is an issue, as they are prone to degradation, which diminishes their effectiveness over time. Enhancing their resistance to environmental stressors such as light, temperature fluctuations, and humidity is crucial for their sustained application in real-world settings.

To overcome these challenges, ongoing research is focused on modifying perovskite materials through methods like doping, hybridization, or composite formation to improve both stability and selectivity. Furthermore, optimizing reaction parameters, such as utilizing co-catalysts, controlling pH levels, and improving light absorption, is essential for advancing performance. Another critical area of research is scaling up perovskite-based photocatalytic systems for practical implementation, which will require advancements in material synthesis and reactor design.

In summary, while several obstacles remain in the widespread application of perovskite materials for CO_2 reduction, continuous innovation in material modification, reaction optimization, and scaling methods promises significant advancements. These developments hold great potential for advancing sustainable energy sources and carbon-neutral technologies, making substantial contributions to mitigating climate change.

References

1. Samadova, Ulkar, et al. "Novel Single Perovskite Material for Visible-Light Photocatalytic CO_2 Reduction via Joint Experimental and DFT Study." Small 21.2 (2025): 2407206.
2. Miah, M. H., Khandaker, M. U., Rahman, M. B., Nur-E-Alam, M., & Islam, M. A. (2024). Band gap tuning of perovskite solar cells for enhancing the efficiency and stability: issues and prospects. *RSC advances*, *14*(23), 15876-15906.
3. Lou, Q., Shi, X., Ruan, X., Zeng, J., Man, Z., Zheng, L., ... & Li, G. (2018). Ferroelectric properties of Li-doped BaTiO3 ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, *101*(8), 3597-3604.
4. Cortés-Vega, F. D., Montero-Tavera, C., & Yañez-Limón, J. M. (2020). Influence of diluted Fe3+ doping on the physical properties of BaTiO3. *Journal of Alloys and Compounds*, *847*, 156513.
5. Apostolova, I. N., Apostolov, A. T., & Wesselinowa, J. M. (2021). Phonon and optical properties of transition metal and rare earth ion doped BaTiO3. *Journal of Applied Physics*, *130*(17).
6. Ren, P., Wang, Q., Wang, X., Wang, L., Wang, J., Fan, H., & Zhao, G. (2016). Effects of doping sites on electrical properties of yttrium doped BaTiO3. *Materials Letters*, *174*, 197-200.
7. Cao, W. Q., Xu, L. F., Ismail, M. M., & Huang, L. L. (2016). Colossal dielectric constant of NaNbO3 doped BaTiO3 ceramics. *Mater. Sci.-Poland*, *34*(2), 322-329.
8. Dong, W., Xiao, H., Jia, Y., Chen, L., Geng, H., Bakhtiar, S. U. H., ... & Guo, Y. (2022). Engineering the defects and microstructures in ferroelectrics for enhanced/novel properties: an emerging way to cope with energy crisis and environmental pollution. *Advanced Science*, *9*(13), 2105368.
9. Li, Y., Li, J., Yang, W., & Wang, X. (2020). Implementation of ferroelectric materials in photocatalytic and photoelectrochemical water splitting. *Nanoscale Horizons*, *5*(8), 1174-1187.
10. Huang, Y., Liu, J., Deng, Y., Qian, Y., Jia, X., Ma, M., ... & Wang, Z. (2020). The application of perovskite materials in solar water splitting. *Journal of Semiconductors*, *41*(1), 011701.
11. Garba, Z. N., Zhou, W., Zhang, M., & Yuan, Z. (2020). A review on the preparation, characterization and potential application of perovskites as adsorbents for wastewater treatment. *Chemosphere*, *244*, 125474.
12. Lee, J., Chai, S. P., & Tan, L. L. (2024). Perovskite paradigm shift: a green revolution with lead-free alternatives in photocatalytic CO2 reduction. *ACS Energy Letters*, *9*(4), 1932-1975
13. Song, W., Qi, G., & Liu, B. (2023). Halide perovskite quantum dots for photocatalytic CO 2 reduction. *Journal of Materials Chemistry A*, *11*(24), 12482-12498.
14. Xu, F., Meng, K., Cheng, B. *et al.* Unique S-scheme heterojunctions in self-assembled TiO_2/$CsPbBr_3$ hybrids for CO_2 photoreduction. *Nat Commun* **11**, 4613 (2020).
15. Hiragond, Chaitanya B., Niket S. Powar, and Su-Il In. 2020. "Recent Developments in Lead and Lead-Free Halide Perovskite Nanostructures towards Photocatalytic CO2 Reduction" Nanomaterials 10, no. 12: 2569.
16. Guo, X., Qiu, C., Wang, L., Ding, J., Zhang, J., Wan, H., & Guan, G. (2024). The A-site and B-site regulation of LaCoO3 nanofiber based on electrospinning for boosting photocatalytic CO2 conversion. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 452, 115606.
17. Alkhatib, I. I., Garlisi, C., Pagliaro, M., Al-Ali, K., & Palmisano, G. (2020). Metal-organic frameworks for photocatalytic CO2 reduction under visible radiation: A review of strategies and applications. Catalysis Today, 340, 209-224.

Məqalə qəbul olunub: 14.10.25
Tövsiyə edib: prof. Həsənov Y.N.

MƏQALƏLƏRİN TƏRTİBİ QAYDALARI

1. Əlyazma A4(210x297mm) formatlı, yuxarı və aşağıdan 25 mm, soldan və sağdan 20 mm boş yer saxlamaqla çap olunur. Əlyazmanın həcmi **8-10 səhifədən** çox olmamalıdır.
2. Hər bir məqalədə **UOT indekslər** və ya PACS tipli kodlar göstərilməlidir.
3. **Məqalə üç dildə - azərbaycan, rus və ingilis** dillərində çap oluna bilər. **Məqalədə xülasə 3 dildə və 100-150 söz aralığında verilməlidir**. Müxtəlif dillərdə olan xülasələrin mətnləri eyni və məqalənin məzmununa uyğun olmalıdır. Açar sözlər üç dildə - azərbaycan, rus və ingilis dillərində verilməlidir (5 sözdən az olmamaqla).
4. Məqalənin mətni azərbaycan dilində - latın, rus dilində - kiril, ingilis dilində - ingilis əlifbası ilə Times New Roman versiyasında 12 şrift ilə, bir intervalla yığılmalıdır.
5. Tənliklər və düsturlar mətndən bir boş sətirlə ayrılmalıdır.
6. Düsturları, ardıcıl olaraq, sətrin sağ tərəfində dairəvi mötərizələrdə yerləşdirilmiş ərəb rəqəmləri ilə nömrələmək lazımdır.
7. Simvolların və ədədi əmsalların izahı bilavasitə düsturun altında, onların düsturda rast gəlindiyi ardıcıllıqla verilməlidir.
8. Məqalənin nəticələrində, elm sahəsinin və məqalənin xarakterinə uyğun olaraq, işin elmi yeniliyi, tətbiqi əhəmiyyəti, iqtisadi səmərəsi və alınan əsas nəticələr aydın şəkildə verilməlidir.
9. Məqalənin sonunda verilən ədəbiyyat siyahısı istinad olunan ədəbiyyatların mətndə rast gəlindiyi ardıcıllıqla verilməlidir. Onlara istinad [1] və ya [1, s.119] kimi işarə olunmalıdır. Ədəbiyyat siyahısında son 5-10 ilin elmi məqalələrinə, monoqrafiyalarına və s. istinadlara üstünlük verilməlidir.
10. Məqalədə müəllif(lər)in işlədiyi müəssisə və onun ünvanı, müəllifin elektron poçt ünvanı göstərilməlidir.
11. Məqalənin sonunda məqaləni çapa tövsiyə edən müəssisənin elmi şurasının müvafiq iclas protokolunun nömrəsi və tarixi qeyd olunmalıdır.
12. Müəllif(lər) məqalənin çap olunması üçün yazılı surətdə razılıq verməlidir(lər).
13. Səhifələr vərəqin sağ tərəfdəki aşağı küncündə karandaşla nömrələnməlidir.
14. Əlyazmada aşağıdakı ardıcıllıq gözlənməlidir:

- UOT indeks (qalın, 12 ölçü, böyük hərflərlə, məqalənin yuxarısında, sol hissədə abzasdan yazılmalı);
- məqalənin adı (qalın, 12 olçü, böyük hərflərlə yazılmalı, UOT indeksilə məqalənin adı arasında iki interval buraxılmalıdır);
- müəllif(lər)in soyadı, adı, atasının adı (qalın, 12 olçü, kiçik hərflərlə yazılmalı, məqalənin adı ilə müəllif(lər)in soyadı arasında bir interval buraxmalıdır);
- təşkilatın adı, ünvanı, e-mail (12 olçü, kursiv, kiçik hərflərlə yazılmalı, müəllif(lər)in soyadı ilə təşkilatın adı, ünvanı, e-mail arasında bir interval buraxılmalıdır);
- **Xülasə**
- **Abstract**
- **Аннотация**
- **Açar sözlər**
- **Key words**
- **Ключевые слова**
- **Giriş**
- **Məsələnin qoyuluşu**
- **Alınmış nəticələrin analizi**
- **Nəticə**
- **İstifadə olunmuş ədəbiyyat**

15. Əlyazmalar çap və elektron variantda təqdim olunur.

PREPARATION RULES ARTICLES

1. Handwriting is published leaving 20 mms space from right and left, 25 mms from top and bottom in A4 (210 x 297 mm) form. The volume of handwriting must not exceed **8 – 10 pages.**
2. In each article indexes of **UOT** and/or PACS types codes must be shown
3. **The article can be published in three languages: Azerbaijani, Russian and English.** The texts of abstracts in different languages must be the same and must conform to the content of the article. Key words must be given in three languages: Azerbaijani, Russian and English.
4. The texts of the article in Azerbaijani must be typed in Azerbaijani language in Latin, in Russian language in Cyrillic and in the English language in Latin alphabets with one interval, with the size of 12 in Times New Roman version.
5. Equations and formulae must be separated from the text by one empty line.
6. Formulae must be systematically numbered in Arabic figures given in round brackets on the right side of the page.
7. Explanation of symbols and literary coefficient must directly be given under the formulae with the succession they are met in the equations.
8. Scientific innovation and importance of the application, economic benefit of the work must be given in accordance with the character of the article and field of science in the summary of the article.
9. The list of literature given at the end of article must be given by succession as they are referred to in the article. The reference to them must be noted like [1] or (1, p.119). Advantage must be given to the references to the scientific articles, monographs of the last 5- 10 years in the literature list.
10. The place of work of the author(s), their addresses, and e – mail address must be shown in the article.
11. At the end of the article the number of the protocol of the appropriate meeting and date of scientific council of the institution advising the article for printing must be noted.
12. The author(s) must give written consent for the printing of the article.
13. The pages must be numbered by pencil in the right corner of the bottom of the paper.
14. The following succession must be observed.

- UOT index (bold, size 12, big letters, on the top of the article, on the left side from the new line);
- Title of the article (bold, size 12, big letters, Two-unit space must be between the title of the article and UOT index);
- Surname and initials of the author(s), e-mail, name of the organization, its addresses must be in bold, size of 12, with the small letters. Two-unit space must be between the name of the article and the author(s)
- Name of the organization and its address and e-mail must be in italics of 12 size in small letters. One-unit interval must be between the name of the article.
- **Abstract**
- **Key words**
- **Introduction**
- **Formulation of the issue**
- **Analysis of the results achieved**
- **Result**
- **The literature used**

15. Handwritings must be presented and electronic version

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Рукопись печатается в формате А4 (210х297 мм), отступ сверху и снизу – 25 мм, слева и справа – 20 мм. Объём рукописи не должен превышать **8-10 страниц.**
2. В каждой статье должны быть указаны индексы **УДК или коды типа PACS**.
3. Статья может быть написана на одном из трёх языков: азербайджанском, русском или английском. Аннотация представляется на 3 языках. Тексты аннотации на этих языках должны быть идентичными и соответствовать содержанию статьи. Ключевые слова должны быть идентичными и соответствовать содержанию статьи. Ключевые слова должны быть на трёх языках: азербайджанском, русском и английском (не менее 5 слов).
4. Текст статьи должен быть набран с интервалом 1, шрифтом 12 версии Times New Roman: на азербайджанском языке - латиницей, на русском - кириллицей, на английском - английским алфавитом.
5. Уравнения и формулы должны быть отделены от текста одной пустой строкой.
6. Уравнения необходимо последовательно нумеровать с правой стороны строки в круглых скобках.
7. Пояснения и числовые коэффициенты даются непосредственно под уравнением в той же последовательности, что и в уравнении.
8. В выводах статьи должны в ясной форме указаны соответствующие характеру статьи научная новизна работы, прикладное значение, экономическое значение.
9. В конце статьи необходимо указывать использованную литературу в той последовательности, в которой она встречается в статье. Ссылки на источники должны обозначаться как [1] или [1, с. 119]. В качестве использованной литературы нужно отдавать предпочтение источникам, опубликованным за последние 5-10 лет.
10. В статье необходимо указывать место работы автора (авторов), его адрес и адрес электронной почты.
11. В конце статьи необходимо указывать номер и дату заседания учёного совета предприятия, рекомендующего статью к печати.
12. Автор (авторы) должны в письменной форме дать согласие на публикацию.
13. Страницы должны быть пронумерованы карандашом с правой стороны внизу страницы.
14. В статье должна быть информация в следующем порядке:

- Индекс УДК (жирно, размер 12, прописными буквами и набраны в левой части с абзаца).
- Название статьи (жирно, размер 12, прописными буквами, между индексом УДК и названием статьи должно быть два интервала).
- Фамилия и инициалы строчными буквами, жирно, размер 12. Между названием статьи и информацией об авторах должен быть пробел в один интервал.
- Название организации, адрес, e-mail авторов строчными буквами, курсив, размер 12. Между фамилиями авторов и информацией о них должен быть пробел в один интервал.

Статья должна иметь следующую структуру:

- **Аннотация**
- **Ключевые слова**
- **Введение**
- **Постановка задачи**
- **Анализ полученных результатов**
- **Выводы**
- **Литература**

15. Статьи необходимо представлять в печатюм и в электронной версии.

Yığılmağa verilib: 18.11.25. Çapa imzalanıb 27.11.25.
Format 60x84 $^{1}/_{8}$. F.ç.v.28,75. Sifarış №41
Kağız əla növ. Tiraj 60 nüsxə. Qiyməti müqavilə ilə.

"Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ-nin mətbəəsi