

Milli Aviasiya Akademiyası



ISSN 1811-7341

ELMİ MƏCMUƏ

Cild 27, №3 2025



National Aviation Academy

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 27, № 3 2025

Baş redaktor

F.-r.e.d., akademik Arif Mir Cəlal oğlu Paşayev

Elmi redaktor

T.e.d., prof. Rasim Nəsim oğlu Nəbiyev

Redaksiya heyətinin üzvləri (elm sahələri üzrə)

Texnika elmləri

T.e.d., prof. Afiq Rəşid oğlu Həsənov (redaktor)

T.e.d., prof. Ədalət Soltan oğlu Səmədov

F.-r.e.d., prof. Məsud Arif oğlu Əfəndiyev, Helmhols Mərkəzi, Münhen, Almaniya

F.-r.e.d., prof. Əli Tofiq oğlu İsmayılzadə, Karlsruhe Texnologiya İnstitutu, Almaniya

T.e.d., prof. Aleksandr Alekseyeviç İqolkin, Samara Universiteti, Rusiya

T.e.n., dos. Oleq Borisoviç Spiridonov, Cənub Federal Universiteti, Rusiya

T.e.d., prof. İsmayıl Mahmud oğlu İsmayilov

T.e.d., prof. Əhəd Xanəhməd oğlu Cənəhmədov

T.e.d., prof. Pərviz Şahmurad oğlu Abdullayev

F.-r.e.d., prof. Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

T.e.d., prof. Xəqani İmran oğlu Abdullayev

F.-r.e.d., prof. Kamal Əsgər oğlu Əsgərov

T.e.d., prof. Nazim Şəkər oğlu Hüseynov

T.e.d., prof. Aytac Nəzif qızı Bədəlova

F.-r.e.n., prof. İslam Əsəd oğlu İsgəndərov

T.e.n., dos. Elman Mehdi oğlu Nəcəfov

T.e.n., dos. Fuad Həsən oğlu Dadaşov

Hüquq elmləri

H.e.d., prof. Ayxan Xankiş oğlu Rüstənzadə (redaktor)

Prof. Dr. Cavid Sədulla oğlu Abdullazadə, Ankara Universiteti, Türkiyə

Prof. Dr. Yener Ünver, Özyeğin Universiteti, Türkiyə

Prof. Dr. Ömer Çınar, İbn Haldun Universiteti, Türkiyə

H.e.d., prof. Nazim Həsən oğlu Cəfərli

H.e.d., prof. Sübhan Fərmayıl oğlu Əliyev

H.e.d. Fərdin Yaşar oğlu Xəlilov

H.e.d., dos. Rauf Məmməd oğlu Qarayev

İqtisad elmləri

İ.f.d., dos. Gulnarə Telman qızı Əhmədova (redaktor)

İ.e.d., prof. Heydər Sərdar oğlu Həsənov

İ.e.d., prof. Rustem Tursunoviç Yuldaşev, Moskva Dövlət Beynəlxalq Münasibətlər İnstitutu, Rusiya

İ.e.d., prof. Səlim Yanvar oğlu Müslümov

İ.e.d., prof. Sərvər Alcan oğlu Abbasov

İ.e.d., prof. Elnur Məhəmməd oğlu Sadıqov

İ.e.n., dos. Fəridə Fərid qızı Ələkbərova

İ.f.d., dos. Vəfa Qurban qızı Nəcəfova

İ.f.d., dos. Fuad Mürvət oğlu Mirzəyev

"Elmi Məcmuə"nin bölmələri: aviasiya və raket-kosmik texnikası, aeronavika, aviasiya təhlükəsizliyi, aviasiya meteorologiyası, aerokosmik monitoring və ətraf mühitin qorunması, cihazqayırma, radioelektronika, telekommunikasiya, informasiyanın emalı, nəqliyyat logistikası, fizika, bərk cisim elektronika, materialşünaslıq, informasiya texnologiyaları, sistemli analiz, idarəetmə sistemləri, hüquq, iqtisadiyyat, menecment, ictimai elmlər.

"Elmi məcmuə" 1999-cu ildə Azərbaycan Respublikası Mətbuat və İnformasiya nazirliyində qeydiyyatdan keçmişdir (Qeyd. № 492).

Jurnal Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının "Azərbaycan Respublikasında məqalələrin dərc olunması tövsiyə edilən dövrü elmi nəşrlərin siyahısı"na daxildir.

Redaksiyanın ünvanı: AZ1045, Bakı şəh., Mərdəkan pr. 30, Milli Aviasiya Akademiyası

Tel. (+994) 12 497 28 24. E-mail: em@naa.edu.az Veb sayt: <https://scientific-journals.naa.edu.az/>



aak.gov.az

<https://aak.gov.az>

I JOURNALS
MASTER LIST

OPEN ACCESS



AVIASIYA VƏ RAKET-KOSMİK TEXNİKASI

UOT 623.746.-519

DOI: 10.30546/EMNAA.2025.25.03.101

PUA ƏSASLI HAVA MÜŞAHİDƏSİNİN OPTİMALLAŞDIRILMASI: EFFEKTİVLİK MEYARLARI, İMKANLARIN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ VƏ STRATEJİ HƏDƏFLƏRİN MÜŞAHİDƏSİ

Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A.
Milli Aviasiya Akademiyası

Məqalədə fəvqəladə vəziyyətlərdə, sərhəd təhlükəsizliyində, su ehtiyatlarının qiymətləndirilməsi və xəritəçəkmədə, eləcə də arxeoloji və geoloji tədqiqatlar zamanı pilotsuz uçuş aparatlarının tətbiqinin səmərəliliyi nəzərdən keçirilmişdir. Pilotsuz uçuş aparatları vasitəsi ilə müşahidə zamanı qarşıya çıxan tipik problemlərin müzakirəsi və maraq sahəsinə uyğun təsnif edilən kateqoriyalar öyrənilmiş, təhlil edilmiş və ümumiləşdirilmişdir. Həmçinin mövcud yanşmaların və mümkün həll yollarının məhdudiyyətləri, təqdim olunan tədqiqat istiqamətlərində olan boşluqlar və gələcək tətbiq istiqamətlərinin müzakirəsi təqdim edilmişdir. Pilotsuz uçuş aparatı sistemlərinin avtonomluğunun, etibarlılığının və səmərəliliyinin yüksəldilməsi, eləcə də süni intellekt və böyük həcmdə verilənlərin analitik analizi, həmçinin digər texnologiyalara integrasiyası kimi məsələlərin tədqiqatçılar tərəfindən araşdırılmasına böyük ehtiyacın olması qeyd edilmişdir. Müşahidə tapşırıqlarının yerinə yetirilməsində pilotsuz uçuş aparatlarından istifadənin üsul və vasitələri ətraflı öyrənilərək təhlil edilmişdir.

Pilotsuz uçuş aparatlarından hüquq mühafizə orqanlarının, güc qurumlarının, kənd təsərrüfatı, mədən sənayesi, xəritəçəkmə və ekoloji monitoring fəaliyyətləri zamanı heyətin operativ işləməsinin təmin edilməsində, eləcə də onların vacib kəşfiyyat və vizual izləmə görüntü məlumatları ilə təmin edilməsində, ən əsas təhlükəsizlik risklərinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldılmasında müvəffəqiyyətlə tətbiq edildi qeyd edilmişdir.

Müşahidə tapşırıqlara qoyulan əsas tələblərinin icmalından başlayaraq, geniş miqyaslı fəlakətlər və mürəkkəb ssenarilər, xüsusən ərazidə çevik yerləşmə, səmərəli müşahidə və çətin keçilə bilən yerlərdə dəqiq mövqe tutmaq üçün pilotsuz uçuş aparatlarının məhdudiyyətləri necə aşə biləcəyinə dair araşdırmalar aparılmışdır. Əlavə olaraq, bu texnologiyaların üzləşdiyi cari problemlər, eləcə də müşahidə və kəşfiyyat məlumatlarının toplanılması zamanı pilotsuz uçuş aparatlarının rolunun daha da artırılmasına yönəlmiş gələcək inkişafın mümkün istiqamətləri müzakirə olunmuşdur. Texnologiyalar inkişaf etdikcə və pilotsuz uçuş aparatlarının tətbiq istiqamətləri genişləndikcə ondan istifadənin hüquqi, etik və məxfilik məsələlərinə xüsusi diqqətin yetirilməsi tələb olunduğu bildirilmişdir. Həmçinin, mürəkkəb şəraitlərdə müdafiə və təhlükəsizlik istiqamətində aparılan fəaliyyətlər zamanı pilotsuz uçuş aparat sistemlərindən istifadənin inkişaf etdirilməsinin vacibliyi qeyd edilmişdir.

Həmçinin məqalədə havadan müşahidə aparmağın effektivlik meyarları müəyyənləşdirilmişdir. Bir uçuşda pilotsuz uçuş aparatları ilə müşahidə aparılan ərazinin sahəsi, müşahidənin aparılma dəyəri və yer səthinin təyin edilmiş sahəsindən müşahidə aparmaqla

məlumatın əldə edilmə dəyərinin hesablanması üçün tətbiqi hesablama üsulları təqdim edilmişdir.

Açar sözlər: *Pilotsuz uçuş aparatları, müşahidə, optimallaşdırma, elektron - optik kamera, süni intellekt.*

Giriş. Müasir dövrdə ətraf mühitin və resursların qlobal idarə edilməsi getdikcə əsas problemə çevrildiyindən innovativ texnologiyaların tətbiqi ən yüksək həddə çatmışdır. PUA texnologiyası ətraf mühitin və resursların müşahidəsi, eləcə də nəzarəti üçün yeni imkanlar təklif edir.

PUA-lar elektron-optik müşahidənin aparılması ilə ətraf mühitin mühafizəsi, resurslardan davamlı istifadə və elmi-tədqiqatların həllində yeni üsullar və analitik həllər təqdim etmişdir. Bu məqsədlə məqalədə arxeologiya, xəritəçəkmə, dəniz fəaliyyətləri, meşə və ağıllı kənd, geologiya, mədən və vulkanların öyrənilməsi üçün PUA ilə müşahidəni nəzərdən keçirəcəyik [1-2].

PUA-lara inteqrasiya olunan elektron-optik (gündüz, gecə, termal və İQ) sistemlərin köməyi ilə operator real zamanda maraq doğuran obyektləri müşahidə etməklə onlar haqqında kəşfiyyat məlumatlarını toplaya bilər. İnteqrasiya olunmuş belə sistemlər göstərilən məqsədlərin icrası üçün aşağıdakı imkanlara malikdirlər:

- havada 20-30 saatdan çox qalma imkanı;
- tapşırıqdan asılı olaraq uçuş sürətini tənzimləməyin mümkünlüyü;
- meteoroloji vəziyyətdən asılı olaraq daha yüksək pilotaj limitləri daxilində olması.

PUA-ların ətraf mühit və resursları müşahidə imkanı daha kompleks perspektiv yanaşmanı və innovativ texnoloji səviyyənin inkişafını tələb edir. Belə ki:

- məlumatların ümumiləşdirilməsinə və mərkəzləşdirilməsinə;
- zamana görə görüntü fərqlərinin müqayisəli analizinin aparılması üçün proqram təminatı imkanlarının artırılmasına;
- xəritəçəkmə sənayesi üçün xammal rolunu oynayan yüksək ayırdetməli üstün keyfiyyətə sahib görüntünün əldə edilməsinin sadələşməsi [3-5].

Pilotlu və pilotsuz uçuş aparatları ilə patrul-nəzarət və müşahidə uçuşunun aparılmasını müqayisə etdikdə PUA-nın həm güclü, həm də zəif cəhətlərini müəyyən etmək mümkün olar. PUA-dan istifadənin əsas üstünlüklərinə daxildir:

- uzaq məsafədə və çətin keçilən ərazilərdə geniş taktiki imkanlara malik olması;
- insan həyatı üçün təhlükənin, riskin olmaması;
- uçuşun dəyərinin aşağı olması;
- vizual, akustik və radioelektron aşkaredilmə vasitələri ilə aşkarlanma ehtimalının aşağı olması;
- qiymətinin pilotlu aviasiya ilə müqayisədə çox aşağı olması.

PUA-nın üstün cəhətlərinə baxmayaraq onların müşahidə, tətbiq və pilotaj imkanlarına mane olan bəzi problemlər zaman-zaman qeydə alınmışdır. Təəssüf ki, PUA-dan istifadənin ilk dövrlərdə bir sıra qəza hadisələri qeydə alınmışdı. Zaman keçdikcə PUA-ların naviqasiya, aerodinamika və avionika aqreqatlarında aparılan təkmilləşmə işləri daha keyfiyyətli və təhlükəsiz üstün keyfiyyətə sahib yeni nəsil PUA-ların yaranmasına gətirib çıxarmışdır [6-8].

PUA-ların digər çatışmayan cəhətinə, müşahidə aparmaq üçün təyinatlı olan elektron-optik və İQ cihazın fəaliyyətinin meteoroloji şəraitdən (duman, çən, buxarlanma, ilin fəslindən, havanın təmizliyindən) birbaşa asılı olmasıdır. Optik sistemin fəaliyyətinə bulud və yüksək rütubət ən çox təsir edən amillərdəndir [9, 10].

Müşahidə məqsədləri üçün yuxarıda qeyd edilən təsirləri minimuma endirmək üçün, PUA-larda sintez olunmuş aperturalı (1) radiolokasiya sistemlərinin (RLS) quraşdırılması ilə bu çatışmazlıqları aradan qaldırılmasına çalışılmışdır. Lakin bu tip RLS-lər ilk dövrlərdə hərəkətdə olan hədəflərin izlənməsində zəif nəticə göstərmişdilər. Bu səbəbdən əlavə olaraq sintez olunmuş aperturalı RLS-lərə hərəkətin indikasiya sistemi integrasiya edilməklə qeyd edilən çatışmazlıqları aradan qaldırılmasına çalışılmışdır. Belə geniş funksiyalar PUA-nın qiymət, istismar və texniki qulluq xərclərinin artmasına səbəb olmuşdu [11, 12].

1.1. Arxeoloji tədqiqatlar zamanı PUA ilə müşahidə. Son onilliklərdə müxtəlif mədəni, coğrafi və iqlim şəraitlərində PUA vasitəsi ilə müşahidə arxeologiyasının simasını dəyişdirmiş və arxeoloqları yeni və güclü tədqiqat “aləti” ilə təmin etmişdir. PUA-lar zərurət yarandıqda geniş ərazidə müşahidə aparmaqla keyfiyyətli təsvirlər və xəritələrin hazırlanması üçün yüksək ayırdetməli fotoşəkillər ilə mütəxəssisləri təmin etməyə qadirdirlər. Belə ki, PUA-lara integrasiya olunan faydalı yük və duyğaclardan istifadə etməklə PUA ilə müşahidənin (aşkaretmə) arxeoloji tədqiqatların metodologiyasını təkmilləşdirdiyi və müxtəlif mədəni, coğrafi və iqlim kontekstində arxeoloqlara kömək etdiyi özünü sübut etmişdir.

Arxeoloji tədqiqatlar zamanı PUA-lara infraqırmızı (İQ), çoxspektral və hiperspektral kameralar, yerə nüfuz edən radarlar, “lidar” və müxtəlif duyğac sistemləri, eləcə də arxeoloji müşahidələrin aparılması üçün faydalı yük sistemləri integrasiya oluna bilər [13-15].

Arxeologiyanın tədqiqat sahələri morfoloji, stratiqrafiya, topoqrafiya və arxeoloji tarixi ərazilərin aşkarlanma xüsusiyyətlərinə görə fərqlənilir. PUA tətbiqi ilə məlumatların və görüntülərin əldə edilməsi mürəkkəb emal və analitik üsullardan istifadə etməklə əldə edilir. Bu dəqiq arxeoloji məlumatların əldə edilməsi və məlumat bazasının zənginləşdirilməsinə yaranan ehtiyacın qarşılanması üçün tətbiq edilir. PUA ilə arxeoloji kəşfiyyat, aşkarlama və müşahidə tədqiqatları bu istiqamətin perspektivli gələcək inkişafına təkan vermişdir.

Tapşırıqdan, tətbiq yerindən və arxeoloji sahənin xüsusiyyətlərindən asılı olaraq PUA-lardan fərqli şəkildə istifadə edilir. Bu səbəbdən müxtəlif bölgələrdə, mədəniyyətlərdə, tarixi mərhələlərdə PUA ilə arxeoloji əməliyyatların analizinə ehtiyac vardır.

PUA-lardan istifadə etməyin səmərəli istiqamətləri:

- hərəkət marşrutunun və atılacaq addımların planlaşdırılmasında;
- ərazinin 3D modelinin hazırlanmasında;
- ortofotoqrafiya, rəqəmsal yüksəklik modelləşdirilməsinin hazırlanmasında;
- arxeoloji ərazilərin xəritələşdirilməsində;
- görüntülərin qeydə alınmasında;
- 3D modelləşdirmə əsasında PUA tərəfindən maraq sahəsinin tam müşahidəsi;
- monitorinqin aparılması.

PUA-ların müşahidə imkanlarından istifadə etməklə tarixi yerlərdə olan təbii mühitlərin “olduğu” formada modelləşdirilməsi üçün məlumatların toplanması ilə yanaşı, onların süni intellektin imkanlarından istifadə etməklə strukturların arxeoloji tamamlanması və formalaşdırılmasında istifadə edilir [16, 17].

Qaya rəsmlərinin, arxeoloji tapıntı və komplekslərin, eləcə də potensial təhlükəli ərazilərin xəritəsini çıxaran zaman fiziki olaraq müşahidə üçün (rəqəmsal fotoqrammetriya və ya məsafədən tətbiq olunan optik müşahidə) təyinatlı FY-in kameraları və naviqasiya qəbuledicilərin ərazidə dəqiq quraşdırılması tələb olunur. Daha sonra, PUA operatorları tərəfindən arxeoloqlarla birlikdə arxeoloji ərazinin yüksək dəqiqlikli ortofotoları və arxeoloji tikili komplekslərinin və ona təsir edən ərazilərin

görüntüləri müşahidə edilməklə görüntü məlumatları emal edilir. Həmçinin operatorların təhlükəsizliyini təmin etmək şərti ilə girişi çətin olan təhlükəli ərazilərin böyük miqyasda görüntülərin müşahidəsində və səmərəli tətbiq oluna bilən tam 3D rəqəmsal modellərin əldə edilməsində PUA-lardan istifadə edilir.

1.2.Yerüstü dayaq nöqtəsinə bağlı aerofotoçəkilişlərin aparılmasında PUA tətbiqi. RTK (Real Time Kinematic), PPK (Post Processed Kinematic) sistemi. PUA ilə xəritəçəkmə zamanı yerölçmə fotoçəkilişində qiymətləndirmənin dəqiqliyinin artırılması, dəqiq geolokasiya edilmiş çoxsaylı yerüstü dayaq nöqtələrindən (YDN) istifadə edilməsini tələb edir. Fotoqrammetriya/xəritəçəkmə üçün proqram bu yerüstü dayaq nöqtələrindən istifadə edərək dəqiq qiymətləndirmə əldə etmək üçün layihəyə düzəlişlər edir.

Yerdəki nəzarət nöqtələrinə ehtiyacı minimuma endirmək və ya aradan qaldırmaq, o cümlədən xərci azaltmaq üçün GPS Düzəliş Texnologiyasından istifadə edilir. GPS düzəliş texnologiyası. Son zamanlarda PUA-larda fotoqrammetriya üçün təklif edilmiş GPS düzəliş texnologiyası, dəqiq və aydın məlumat əldə etmək üçün qlobal mövqəyinetmə sistemi (GPS) qəbuledicilərinin köməyi ilə yerdə obyektin coğrafi mövqeyi və havada PUA-nın yeri haqqındakı məlumatların keyfiyyətini artırır.

Hazırda iki GPS düzəliş texnologiyası tətbiq edilir:

-Real Time Kinematic (RTK) - çəkiliş üçün PUA obyektin fotosəkilini tanıdıqda, onların yerləşmə məlumatlarının real vaxt rejimində düzəlişini təmin edən GPS düzəliş texnologiyasıdır.



a)



b)

Şəkil 1. Yerüstü RTK sistemi

-Post Processed Kinematic (PPK) - PUA-dan məlumatları topladıqdan və yüklədikdən sonra coğrafi mövqe haqqında məlumatlara düzəliş etmək üçün işləyən başqa GPS düzəliş texnologiyasıdır.

RTK və PPK-nin müqayisəsi. RTK ilə PPK arasındakı əsas fərq, mövqeyə düzəliş ediləndə olur. RTK-da uçuş zamanı, PPK-da isə uçuşdan sonra düzəliş edilir. Hər iki texnologiya çox oxşardır, lakin PPK dayanıqlığı və proseslərin bir-biri ilə uzlaşması səbəbindən həlledici üstünlüyə malikdir. RTK ilə işləyən PUA-lar real vaxt rejimində məlumatları emal etmək üçün birlikdə işləyən çox xüsusi baza stansiyası və digər avadanlıq tələb edir. GPS qəbuledicisi və kamera ilə təchiz edilmiş PUA, süni peyklərdən alınan hesablanmış bir neçə məsafəyə və yerdən verilən məlumatlara görə kameranın koordinatlarını 2-3 sm dəqiqliklə təyin edə bilər. Lakin, radiorabitə kəsildikdə və ya peyk məlumatlarının emalı çətinləşdikdə xətlər onlarla santimetrə çatır. Xətlər bəzən bir neçə metr ola bilər, bu da RTK-sız uçuşda olduğu dəqiqlik həddindədir.

PPK ilə işləyən PUA-lar baza stansiyasından daha uzaq məsafədə istifadəçilərə daha çox rahatlıq verir və etibarlı uçuşu təmin edir. Digər tərəfdən PPK, coğrafi mövqe və yerləşmə yeri haqqında məlumatları uçuşdan sonra emal edir. PUA-da qeydə alınan məlumatlar, uçuş başa çatdıqda baza stansiyasının məlumatları ilə birləşdirilir. Nəticədə, radio rabitənin kəsilməsi səbəbindən məlumatların itki riski yoxdur. Emal RTK-ya bənzəyir, lakin daha əhatəli nəticələr vermək üçün məlumatları dəfələrlə izlədiyindən PPK bir az daha dəqiqdir.

Bəzi yerlərdə məhdudiyyətlər və ya çətin ölçmə prosedurları səbəbindən yerüstü idarəetmə (dayaq) nöqtələrindən (GCP) istifadə etmək istəməyəndə RTK/PPK dronlarını RTK-sız dronlardan üstündür. Hər iki sistemin nəticəsi nöqtələr buludundan ibarət həcmi təsviri, yerin rəqəmsal üçölçülü modelini (DTM, DSM və s.) və ortofoto mozaikalarını qurmaq üçün ərazinin dayaq nöqtələri qismində formalaşdırılmış şəkilləridir. Yerüstü sistemdə tətbiq olunan GPS-in təsviri şəkil 1-də verilmişdir [18].

1.3. Dəniz fəaliyyətləri zamanı PUA ilə müşahidə. Sahil zolağının xəritələşdirilməsi və dəniz fəaliyyətinin monitorinqi PUA ilə müşahidənin əsas tətbiq olunduğu sahələləndir. Bu da, dəniz resurslarının idarə edilməsi, ekoloji mühafizə və iqlim tədqiqatçıları üçün əvəzedilməz imkanlar təklif edir. PUA-ların yüksək hündürlükdən görüntü verməsi və çevikliyi, onları dəniz mühiti, eləcə də dənizdə işləyən insanların monitorinqi və mühafizəsi üçün əsas alətə çevrilmişdir.

Dəniz akvatoriyası coğrafi baxımından fərqli struktura sahib olur. Bu da uzaqdan zondlama metodu ilə sahil zolağı haqda hərtərəfli və dəqiq məlumatların əldə edilməsini və ənənəvi xəritəçəkmə işini çətinləşdirir. PUA-lara integrasiya olunan müşahidə kameralarının köməyi ilə sahil zolağının müşahidəsini aparmaq və geniş radiusda nəzarətdə saxlamaq, eləcə də istifadəçilərə daha dəqiq coğrafi məlumatlar təqdim etmək mümkündür. PUA texnologiyası sayəsində mürəkkəb coğrafi mühitə sahib sahil zolağının daha əlverişli qiymətə əhatəli yüksək keyfiyyətli görüntüsünü əldə etmək mümkündür [19].

Həmçinin PUA-lara integrasiya olunan “Dəniz Patrul Radar- (MPR)”-dan və “sintez olunmuş opturalı Radar- (SAR)”-dan istifadə etməklə dənizdə strateji obyektlərin, neft-qaz boru kəmərlərinin, eləcə də ekoloji mühitin müşahidəsini nəzarətdə saxlamaq mümkündür [20, 21].

1.4. PUA ilə vulkan hadisələrinin müşahidəsi. Vulkan ocaqlarının monitorinqində PUA-lardan istifadə bu istiqamətdə çalışan mütəxəssislərin fəaliyyətini daha da asanlaşdırır. Baş verən coğrafi və geoloji prosesləri izləmək üçün vulkanologiya və qabaqcıl PUA texnologiyalarının vəhdətini birləşdirir.

Vulkanlar yer səthində olan ən dinamik və gözlənilməz geoloji hadisələrdən biridir. Onların aktivləşməsi yaxınlıqdakı insanlar və ətraf mühit üçün əhəmiyyətli təhlükə yarada bilər. PUA-lar aktivləşən təhlükəli vulkan ocaqlarının üzərindən uçmaqla görüntülərin əldə edilməsi, vulkan fəaliyyətinin öyrənilməsi və real vaxt rejimində monitorinqin təmin edilməsində əsas rol oynayır. Bu məqsədə vulkan monitorinqinin yeni üsul və vasitələrini yaradılmışdır [22, 23].

1.5. Mədən sənayesində PUA müşahidəsinin tətbiqi. PUA-lar mədən sənayesində geoloji kəşfiyyatın aparılmasında, melorasiya və ehtiyatların idarə edilməsində mühüm rol oynayır. PUA ilə əldə edilən yüksək ayırdetməli təsvirlər, lazer skanlama, termal, İQ və elektron-optik müşahidə məlumatları geoloqlara yeraltı yataqların struktur tərkibi və yayılmasını daha yaxşı tədqiq etməyə imkan yaradır. Bu məlumatlar kəşfiyyat və resursların qiymətləndirilməsini təmin etməyə, nəticədə mədən sənayesi əməliyyatlarının səmərəliliyini və iqtisadi rentabelliyini yaxşılaşdırmağa kömək edir. Əldə olunan məlumatlar resurslardan səmərəli istifadəyə nəzarət və ətraf mühitin mühafizəsi işinin təşkili zamanı lazım olur.

PUA-lardan mədən ərazilərində aparılan işlərə nəzarət etmək, əməliyyatların gedişini real vaxt rejimində qeydə almaq, ərazidə təhlükəsizlik və ekoloji tədbirləri yoxlamaq, fəvqəladə hallarda yardım göstərmək, həmçinin mədən, yer quruluşu, suların idarəedilməsi və davamlı mədən infrastruktur planlarının hazırlanması və ekosistemlərin qorunmasında ətraf mühitə təsirlərin öyrənilməsində müvəffəqiyyətlə tətbiq edirlər [24, 25].

1.6. Sərhəd təhlükəsizliyinin təşkilində PUA-ların tətbiqi. Ölkələr arasında sərhədlərin etibarlı mühafizəsinin və müdafiəsinin təşkilində PUA-ların tətbiqi effektiv nəticələrin əldə edilməsində əvəzedilməz rola malikdir. PUA-ların effektiv tətbiq prosesini ABŞ-Meksika, Avropa İttifaqı və İsrail dövlətinin sərhədlərinin etibarlı mühafizəsi və müdafiəsi misalında öyrənilmiş və tədqiq edilmişdir [26, 27].

Belə ki, 2000-ci illərin əvvəlindən başlayaraq ABŞ - Meksika sərhədində narkotik və silah qaçaqmalçılığında, eləcə də qanunsuz miqrasiyanın qarşısının alınmasında PUA-lardan müvəffəqiyyətlə tətbiq olunmağa başlanılmışdır. ABŞ sərhəd xidməti həmin dövrdə kütləvi və qanunsuz miqrant axını olan sərhəd rayonlarında patrul-nəzarəti gücləndirmək üçün "Predator-B" tipli PUA-larla yanaşı İsrail istehsalı olan "Hermes 450S" PUA-lardan istifadə etmişdi. Bu tip PUA-lar sutkalıq nəzarəti təmin edən elektron-optik (gündüz-TV, termal) sistem ilə təchiz olunmuşdu. 20 saata qədər havada qalma imkanına malik bu PUA-nın texniki imkanları pozucunu 15-20 km-ə qədər məsafədən aşkar etməyə imkan verirdi.

Zaman keçdikcə yenilənmiş "Predator-B" tipli PUA-lar ilə sərhəd pozucularını 10 km-dən artıq məsafədə aşkar etmək mümkün olurdu. Əldə olunan məlumatlar yerüstü idarəetmə stansiyasına, daha sonra isə canlı olaraq gömrük və sərhəd nəzarəti məntəqələrinə ötürülürdü.

PUA-ların tətbiqi ilə sərhəd məntəqələri arasında yerləşən bataqlıq, meşəlik, dağ, kolluq, göl, əkin sahələrində narkotik daşınması, qanunsuz miqrant və terrorçu keçidləri üçün əlverişli ola biləcək ərazilərə nəzarəti gücləndirməklə sərhədlərin etibarlı mühafizəsinin və müdafiəsinin təşkilində müvəffəqiyyətlə tətbiqinə dair konsepsiya işlənib hazırlanmışdı.

Avropada 2006-cı ildə "La-Manş" boğazı və Aralıq dənizi sahil rayonlarında, həmçinin Balkan yarımadasında da PUA-larla patrul-nəzarətin aparılmasına dair qərar qəbul edilmişdi. PUA-ların tətbiq olunması Avropa İttifaqı ərazisində gömrük və sərhəd xidmətlərinin müasir nəzarət-müşahidə sistemləri ilə təchiz olunması layihəsinin icrası çərçivəsində planlaşdırılmışdır [28].

2. PUA ilə müşahidə apararkən qeydə alınan boşluqlar. PUA ilə müşahidə aparmaqla ətraf mühitin mühafizəsi və sərhəd təhlükəsizliyi, ekoloji tədqiqatlar və resursların idarə edilməsində əhəmiyyətli irəliləyişlər əldə edilmişdir. Lakin PUA-ların müşahidə, potensial tədqiqat və kəşfiyyat imkanlarından tam istismar edilmədən boşluqlar vardır. Perspektivdə daha əhatəli və dəqiq ekoloji məlumatların əldə edilməsində PUA-lara yüksək funksional və texniki imkanlara sahib FY sistemlərinin inteqrasiya edilməsi təklif edilir [29, 30].

-PUA-nın idarəetmə sistemlərinin təkmilləşdirilməsi onların havadan müşahidə aparmaq imkanlarının artmasına səbəb olacaqdır;

-PUA platformalarına məlumat qəbuletmək üçün duyğac (sensor) sistemlərinin inteqrasiyası istiqamətində elmi-tədqiqat işlərinin davam etdirilməsinə böyük ehtiyac vardır;

-mina və partlamamış sursatların (partlayıcı məmulatlar, silah sursat) axtarışında və zərərsizləşdirilməsində PUA-lara (dronlara) inteqrasiya olunmuş İQ spektral skaner və "lidar" duyğac sistemlərinin təkmilləşdirilməsi və inkişaf etdirilməsi;

-PUA-ların müşahidə aparmaq imkanlarının böyük potensiala malik olması gələcəkdə tədqiqat işləri və innovativ həllər zamanı bu sahəni inkişaf etdirilməsinə təkan verəcəkdir.

3. PUA ilə strateji obyektlərin müşahidəsi işinin optimallaşdırılması [31]. Müşahidə tapşırıqlarının həllində PUA-lardan istifadə əhəmiyyətli dərəcədə artmışdır. Bu da PUA ilə müşahidə aparmağın yeni hədəf və problemlərini üzə çıxartmışdır. PUA-da müşahidə tapşırıqlarının icrası zamanı problemlər bir neçə əsas mənbədən yaranır. Buna çoxsaylı PUA-ların koordinasiyası və onlar arasında qarşılıqlı əlaqədə yaranan problemlər, həmçinin PUA vasitələri ilə yerüstü idarəetmə stansiyaları, faydalı yüklər və duyğalar arasında uzlaşmada problemlərin olmasıdır. Maraqlı doğuran ərazilərin, strateji obyektlərin dəqiq yenilənmiş ortofoto, tif və rastır xəritələrinin olması müşahidənin aparılmasının keyfiyyətini yüksəldilməsinə və prosesin optimallaşdırılmasına səbəb olur.

PUA-nın müşahidə imkanlarının köməyi digər bölmələrin və istiqamətlərin öz tapşırıqlarını daha dəqiq və vaxtında yerinə yetirməsinə və nəticələnməsinə imkan yaradılır. Bu səbəbdən müşahidə məlumatlarının genişləndirilməsi bölmələr və hissələr arasında qarşılıqlı olaraq müştərək tapşırıqların həllini inkişaf etdirilə bilər.

4. PUA ilə müşahidə aparılan zaman effektivliyinin qiymətləndirilməsi

Havadan müşahidə aparılmasının əsas tapşırıqlarından biri cavabdeh ərazidə olan obyektlər haqqında kəşfiyyat məlumatlarının toplanılması, hədəfin axtarışı və izlənməsi, eləcə də nəzarət altında saxlanmasıdır. Maraqlı doğuran strateji obyektlərin axtarışı, - aşkar edilmə ehtimalından, hərəkətililiyindən, ölçüsündən, hədəf haqqında digər mənbələrdən əldə edilmiş kəşfiyyat məlumatlarının təhlilindən, yerləşmə yerindən və sıxlığından asılı olaraq həyata keçirilir [32].

Strateji obyektlərin axtarışının əsas üsulları aşağıdakılardır:

- müəyyən bir lokal ərazidə axtarış-müşahidə;
- maraq zonada axtarış;
- obyektlərin üzərindən uçmaqla axtarış;
- verilmiş nöqtəyə uçmaqla obyektin havadan müşahidəsini aparmaq;
- verilmiş bucaq sektorlarında obyektin axtarışı;
- verilmiş uçuş marşrutunda obyektin axtarışı.

4.1. Müəyyən bir lokal ərazidə axtarış-müşahidə - bu üsul taktiki və orta əməliyyat dərinliklərində tək və qrup halında olan hədəflərin, həmçinin Hərbi Dəniz Qüvvələrinin (HDQ) və yaxud sahil mühafizəsinin qayıq əleyhinə tapşırıqlarında və digər güc strukturlarının axtarış tədbirlərində istifadə olunur. Bu üsulun üstünlüyü müşahidənin (kəşfiyyatın) planlaşdırılmasının nisbətən sadə olmasıdır. Əldə olunmuş göstəricilərin digər PUA-ların nəticələri ilə birlikdə təhlilinin və analizinin asan olmasıdır. Uçuş uzaqlığına, uçuş müddətinə və enerji təminatına görə təsnifatlanmaya əsasən orta və böyük ölçülü PUA-ların uzaq məsafəyə uçmaq və ona geroskopik-stabilizasiya platformalı elektron-optik faydalı yükün (FY) integrasiya olunma imkanlarının olması əldə olunan nəticələrin yüksəlməsinə səbəb olur [33].

Kəşfiyyat fəaliyyəti zamanı PUA ilə obyekt arasında məsafə az olduqda gizliliyinin təmin edilməsinin mürəkkəb olması, bu üsulun əsas çatışmayan cəhətidir. Belə ki, Hava Hücumundan Müdafiə (HHM), Radioelektron Mübarizə və Radioelektron Kəşfiyyat (REM və REK) sistemlərinin aktiv fəaliyyəti şəraitində bu üsuldən istifadə etdikdə kəşfiyyat PUA-sının aşkar edilmə və zərərsizləşdirmə ehtimalı yüksək olur [34].

4.2. Maraqlı zonada axtarış - taktiki dərinliklərində vəziyyətin müşahidə olunması üçün əsas kəşfiyyat üsuludur. Bu zaman kəşfiyyat məlumatları canlı olaraq yerüstü idarəetmə stansiyasına (YİS) ötürülür. HHM sistemlərinin aktiv təsir sektoruna daxil olmadan məsafədən elektron-optik FY-dən istifadə etməklə ərazinin görüntüsünün əldə edilməsi təmin edilir. Lakin bu üsuldən istifadə

edildikdə operatoru əməliyyat şəraitinə dair dəqiq məlumatların (yüksək ayırdetməli görüntü ilə təmin edilməsində) çətinliklər yaranır.

Daha yaxşı nəticələr PUA-ların uzun müddətli uçuşları zamanı əldə olunur (20 saatdan artıq). Lakin bu halda PUA-nın uçuş sürətinin aşağı olması səbəbindən PUA-YİS arasında olan telemetriya və görüntü mübadiləsinin (Tx, Rs) aşkar edilməsi və nəticədə PUA-nın REM və REK vasitələrinin təsirinə məruz qalmasına səbəb olur.

4.3. Obyektlərin üzərindən uçmaqla axtarış. Gizlilik və aşağı aşkaredilmənin təmin edildiyi üçün bu üsul ən effektiv üsullardan biri sayılır. Burada məlumatların real vaxtda mübadiləsi vacibdir. Bir qayda olaraq bu üsuldan HHM vasitələrindən aktiv fəaliyyəti zamanı istifadə olunur. Əməliyyat və strateji dərinliklərə uçan zaman passiv kəşfiyyat vasitələrindən (elektron-optik, REK) istifadə edildikdə PUA-nı itirmə riski aşağı olur. Hədəf axtarışının bu üsulu PUA-larda aparılan hava kəşfiyyatı üçün texniki cəhətdən ən vacibidir. Bu üsul öz geniş tətbiqini RTK, nəzarət-müşahidə kəşfiyyatı və sərhəd təhlükəsizliyinin təşkilində keçirilən fəaliyyətlərdə tapmışdır. Bu üsulun tətbiqi zamanı müşahidə olunan sektorun düz xəttliyi epizodik xarakterli olur. Bu da müəyyən hallarda informasiyanın aktuallığının itirməsinə səbəb olur. Əlaqə kanallarının PUA-nı kəşfiyyat vasitələri üçün asan hədəf edə bilməsi bu üsulun çatışmayan cəhətləri kimi xarakterizə olunur [22-25].

4.4. Verilmiş nöqtəyə uçmaqla obyektin havadan müşahidəsini aparmaq. Bu üsul təkrar yoxlama kəşfiyyatında konkret obyektlərin döyüş düzümü dərinliyində verilmiş nöqtəyə çıxış və onu ötürüb keçməklə kəşfiyyatın aparılması üçün istifadə olunur. Hədəfin koordinatları məlum və onun vəziyyətinin dəqiqləşdirilməsi tapşırığı qarşıya qoyulduqda bu üsuldan geniş istifadə olunur. Kəşfiyyat zamanı gizlilik və görünməməzlik təmin edilir. Bu üsulun çatışmayan cəhəti qəbul edilən məlumatın az həcmli (konkret) olmasıdır. Hədəf axtarışının bu üsulu PUA ilə hava kəşfiyyatı aparılması üçün texniki cəhətdən ən əlverişlisidir.

4.5. Verilmiş bucaq sektorlarında obyektin axtarışı: Axtarışın bu üsulu hərəkətli və məhdud hərəkətli obyektlərin digər aviasiya növləri ilə birgə kəşfiyyatı üçün təyinatlıdır. Düşmən ərazisində fəaliyyət zonasından uzaq məsafələrdə və maraq obyektinin təxmin olunan yerləşmə yeri məlum olmadıqda istifadə olunur. Bu üsulda maraqlı olan ərazi ayrı-ayrı sektorlara bölünür və hər bir sektorda tapşırığı ayrı PUA yerinə yetirir. Maraqlı olan müşahidə sektorunun qısa olduğu hallarda bu üsul yüksək effektivlik nümayiş etdirir.

4.6. Verilmiş uçuş məşrutunda obyektin axtarışı: Coğrafi mövqedən asılı olaraq bir və ya bir qrup obyektlərin yerləşməsi və hərəkət istiqaməti haqqında ilkin məlumat olan halda aşağı hündürlüklərdə obyektlərin müşahidəsində bu üsuldan istifadə etmək əlverişlidir. Obyektin axtarışı və müşahidəsi zamanı PUA-nın bütün məşrutu aralıq nöqtələrə bölünür. Havadan kəşfiyyatın aparılması zamanı əsasən yüksək uçuş davamiyyətinə malik PUA-dan istifadə etmək məsləhət görülür [15, 26-30].

5. Aşağıda qeyd olunan məsələləri sadalamaq olar:

-PUA idarəetmə və müşahidə şəbəkəsində daha çox idarəedilən element olduqda sistemin idarəedilməsi mürəkkəbləşir;

-PUA müşahidəsinin optimallaşdırılmasına, dəyişkən relyefli ərazi, dağlar, meşələr və şəhərlər kimi mürəkkəb mühitlərin monitorinqinə xüsusi diqqət yetirmək tələb edilir;

-qeyri-bərabər relyef, sıx bitki örtüyü və mürəkkəb şəhər strukturu PUA-ların səmərəli fəaliyyəti və istismarı üçün xüsusi çətinliklər yaradır [35].

Bu məqsədlə müşahidə tapşırıqlarının səmərəlilik və dəqiqliyini artırmaq üçün PUA və ya PUA şəbəkələrinin optimallaşdırılmasında qabaqcıl alqoritm və strategiyalardan tətbiq edilməsi tələb edilir;

-dağlıq və mürəkkəb relyefli ərazilərdə müşahidə prosesini çətinləşdirə bilər. Müşahidə tapşırıqlarının icrası zamanı ətrafdakı obyektlər PUA-ların naviqasiya, rabitə və sabit uçuşunu davam etdirməsinə təsir edir. PUA-dan maneələri effektiv aşkar etməklə onlardan yayınmanı, mürəkkəb mühitlərə dayanıqlı olmasını, keyfiyyətli müşahidəni təmin etmək üçün təkmilləşdirilmiş və avtonom qərar qəbul etmə imkanları tələb edir;

-PUA-nın müşahidə tapşırıqlarının icrasına mürəkkəb mühit amillərinin təsiri: tədqiqatçılar əvvəllər yalnız PUA-ların müşahidə tapşırıqlarını yerinə yetirməsi üçün ideal mühitə diqqət yetirirdi. Lakin realıqda PUA-lardan çox vaxt dağlıq ərazilərdə, şəhərlərdə, meşələrdə və s.

Mürəkkəb mühit nəinki müşahidə üçün böyük çətinliklər, həm də PUA-lar üçün avtonom şəkildə uçmaqla maneələrdən yayınmaq və uçuş marşrutunu planlaşdırılmasında çətinliklər yaradır. PUA-lar üçün mürəkkəb mühiti qiymətləndirmək və keyfiyyətli müşahidəni təmin etmək üçün optimal uçuş marşrutu və konfigurasiyalarını layihələndirilməsinə zərurət vardır [33]:

-süni intellekt elementlərinin PUA ilə müşahidənin aparılmasına integrasiyası. Maşın öyrənməsi, neyron şəbəkələri və generativ süni intellekt indi həm elmi, həm də mühəndis tədqiqatçıların diqqət mərkəzindədir. Süni intellekt elementləri optimal texniki həlli tapmağa və PUA ilə müşahidənin avtonom şəkildə aparılmasının spesifik strategiyalarını hazırlamağa imkan verir. Həmçinin, nəzarət-müşahidə tapşırıqlarının icrası, məqsədə çatmaq və vəziyyətin dəyərləndirilməsində PUA-lara, eləcə də son nəticədə tapşırıqın müvəffəqiyyətlə yerinə yetirilməsində böyük köməklik göstərir.

Süni intellekt alqoritmləri PUA-larda optimal uçuş marşrutları və enmə yerlərini planlaşdırmaqda, böyük həcmli müşahidə məlumatlarını sürətlə emal etməkdə və uçuş zamanı dəyişən şəraitlərdə dəqiq qərarlar qəbul etməyə kömək edə bilər. Maşın məntiqi ilə PUA-larda uçuşa nəzarət daha sürətlə və daha dəqiq həyata keçirə bilər. Eyni zamanda, süni intellekt PUA vasitəsi ilə mürəkkəb tapşırıqları daha avtonom şəkildə yerinə yetirməyə və müxtəlif mühitlərə və vəziyyətlərə uyğunlaşmağa, PUA-nın uçuş təhlükəsizliyini yaxşılaşdırmağa və maneələrin aşkarlanması, həmçinin yayınma sistemlərini təkmilləşdirməklə qəza riskini azaltmağa kömək edə bilər.

Hazırda süni intellekt integrasiya olunmuş PUA-lardan rabitə, naviqasiya, hədəfin izlənilməsi və şəhər mühitində uçuşun naviqasiyasının optimallaşdırılması kimi bir neçə sahədə uğurla tətbiq edilməkdədir [36, 37]:

-PUA-ların enerji təminatı məsələlərinin həlli. PUA-nın uçuş məsafəsi və müddəti onun müşahidə imkanlarını məhdudlaşdırır. Nano, mikro, mini PUA-larda (dronlarda) enerji mənbəyi qismində əsasən məhdud enerji tutumlu akkumulyator batareyalarından (AB) istifadə edilir. PUA-larda AB-lərin dəyişdirilməsi və boşalmış AB-ləri yüklənməyə qoyulması vaxt itkisi və xərclərin artmasına səbəb olur. Mümkün potensial tədqiqat istiqamətlərdən biri, müşahidə, kəşfiyyat və döyüş PUA-larının uçuş müddətlərini və uçuş radiusunu artırmaq üçün hibrid və yaxud təhlükəsizlik şərtləri qorunmaqla hidrogen enerji mənbələri ilə istismarını təmin etməkdir.

Nəticə

1. Hədəfin yerləşmə yeri məlum olmadıqda böyük ərazidə hədəf axtarışına kiçik ölçülü pilotsuz uçuş aparatlarının cəlb edilməsi effektivliyi kifayət qədər deyil.

2. Radioelektron mübarizə vasitələrinin aktiv fəaliyyəti zamanı pilotsuz uçuş aparatı ilə müşahidə aparmaq üçün aviasiya texnikasının dayanıqlı naviqasiya və rabitə sisteminə malik olması vacib şərtidir.

3. Kəşfiyyat məlumatlarının toplanılmasına az sayda pilotsuz uçuş aparat cəlb edildiyi zaman məlumatların əldə edilmə dəyəri yüksək olur.

4. Pilotsuz uçuş aparat ilə strateji obyektlərin müşahidəsi zamanı uçuş aparatının və faydalı yükün texniki xüsusiyyətləri, uçuş hündürlüyü eləcə də hədəfin hərəkət sürəti və istiqaməti nəzərə alınmalıdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Linchant, J.; Lisein, J.; et.al. Are unmanned aircraft systems (UAS s) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. *Mammal Rev.* 2015, 45, 239–252.
2. R.N. Nabiyev, G.I. Garayev and A.A. Abdullayev. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane. *Proceedings of the IOP Conference Series: Conference Scopus. Materials Science and Engineering.* 862, 022043, 2020, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022043>
3. Hu, S., Yuan, X. Visual Camouflage and Online Trajectory Planning for UAV-Based Disguised Video Surveillance: *Recent Advances and a Case Study. IEEE Veh. Technol. Mag.* 2023, 18, 48–57. DOI: 10.1109/MVT.2023.3263329
4. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. Structural drafting of convertiplane-type unmanned aerial vehicle. *Norwegian Journal of development of the International Science*, №94, 2022, pp. 45-51, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7198424>
5. Li, X.; Huang, H.; Savkin, A.V. Autonomous Navigation of an Aerial Drone to Observe a Group of Wild Animals with Reduced Visual Disturbance. *IEEE Syst. J.* 2022, 16, 3339–3348. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3135982
6. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. (2024) On-board control-measurement system for micro convertiplane-type unmanned aerial vehicles. *Eurasian Physical Technical Journal.* 21, 2(48), 61-69. <https://doi.org/10.31489/2024No2/61-69>
7. A.A. Abdullayev. VTOL mikro PUA-nin uçuşunun müxtəlif uçuş rejimlərində bort nəzarət-ölçü sistemi ilə tədqiqi *International Conference on Artificial intelligence: from theory (AICON-2024)*, 17-18 sentember 2024, Nakhchvan, Azerbaijan. s. 271-277. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14031849>
8. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A., Garayev G.I. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024) E3S Web of Conf. Volume 592, 06024 (2024), DOI: 10.1051/e3sconf/202459206024
9. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И., Аббасов В.А. Определение центра тяжести беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа // Известия ЮФУ-Технические науки, № 5 (229), 2022, с.258-268. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-5-258-268.
10. Набиев Р.Н., Гараев Г.И., Абдуллаев А.А., Аббасов В.А. Требования к беспилотным летательным аппаратам на мультиротационной основе. Авиакосмическое приборостроение, Москва, 2018 г. № 9, с. 3-11, DOI: 10.25791/aviakosmos.09.2018. 166

11. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Сравнительный анализ особенностей аккумуляторных батарей на основе лития. *Авиакосмическое приборостроение*, Москва, № 9. 2019, с. 42-55. DOI: 10.25791/aviakosmos.09.2019.867
12. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Анализ особенностей водорода в качестве источника энергии. *Авиакосмическое приборостроение*, Москва, 2021 г. № 3. с. 41-58. DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2021.1211
13. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Разработка концептуальной функциональной схемы беспилотного конвертоплана с гибридным источником энергии. *Авиакосмическое приборостроение*, Москва, №5. 2021, с. 03-18 DOI: 10.25791/aviakosmos. 5.2021.1217
14. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А. Исследование основных аэродинамических параметров планера беспилотного летательного аппарата конвертпланового типа // *Авиакосмическое приборостроение*, Москва, 2022 г. № 4. с 17-33. DOI:10.25791/aviakosmos. 4.2022.1274.
15. Fang, Z.; Savkin, A.V. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review. *Drones* 2024, 8, 193. <https://doi.org/10.3390/drones8050193>
16. Maddern W., Pascoe G., et.al. Real-time Kinematic Ground Truth for the Oxford RobotCar Dataset.
17. Ростопчин В.В. Дмитриев М.Л. Применение цифровых оптических систем для беспилотных аппаратов. http://uav.ru/articles/opteq_uav.pdf.
18. Ростопчин В.В. «Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки». -http://www.uav.ru/articles/basic_uav_efficiency.pdf
19. Е.Евгений. Беспилотные летательные аппараты и защита границ. <http://uav.ru/articles/granitsa.pdf>.
20. D.Magdalena and T. Piotr et.al. Hybrid Fuel Cell - Battery System as a Main Power Unit for Small Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 (2013) 8442 - 8463.
21. Gailler, L.; Labazuy, P.; et.al. Validation of a New UAV Magnetic Prospecting Tool for Volcano Monitoring and Geohazard Assessment. *Remote Sens.* 2021, 13, 894. <https://doi.org/10.3390/rs13050894>
22. Evans, I.; Jones, T.H.; Pang, K.; et.al. Use of drone technology as a tool for behavioral research: A case study of crocodilian nesting. *Herpetol. Conserv. Biol.* 2015, 10, 90–98.
23. M. Hassanalian, D. Rice, A. Abdelkefi. Evolution of space drones for planetary exploration: A review. *Progress in Aerospace Sciences* 97 (2018), 61–105 p.
24. Groves, P.A.; Alcorn, B.; Wiest, et.al. Testing unmanned aircraft systems for salmon spawning surveys. *Facets* 2016, 1, 187–204. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0019>
25. Chio, S.H.; Lin, C.H. Preliminary Study of UAS Equipped with Thermal Camera for Volcanic Geothermal Monitoring in Taiwan. *Sensors* 2017, 17, 1649. <https://doi.org/10.3390/s17071649>
26. Wakeford, Z.E.; Chmielewska, M.; et.al. Combining thermal imaging with photogrammetry of an active volcano using UAV: An example from Stromboli, Italy. *Photogramm. Rec.* 2019, 34, 445–466. <https://doi.org/10.1111/phor.12301>
27. Hodgson, J.C.; Koh, L.P. Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Curr. Biol.* 2016, 26, R404–R405.

28. Huang, H.; Savkin, A.V.; Huang, C. Autonomous Navigation and Deployment of UAVs for Communication, Surveillance and Delivery; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2022.
29. S. Joachim. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme. "Hybrid-Electric Propulsion Systems for Small Unmanned Aircraft". *Die Dissertation wurde am 12.12.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.07.2014 angenommen.* 2013, 188 p.
30. Pashayev, A., Nəbiyev, R., Abdullayev, A. et. al. Research of a vertical takeoff and landing micro UAV in the plane mode with the onboard control - measurement system. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. Vol. 46(1), 2025, pp. 870-878, ISSN 1001-4055
31. Р.Н. Набиев, А.А. Абдуллаев Оптимизация наблюдательных возможностей беспилотных летательных аппаратов // *Естественные и технические науки*. Москва, 2025. №2 (201), с. 258-268, doi: 10.25633/ETN.2025.02.19
32. Nəbiyev, R.N., Abdullayev, A.A., Qarayev, Q.İ. Bort nəzarət-ölçü sistemi ilə konvertoplan li t mikro PUA-nın VTOL rejimində tədqiqi \ \ – Bakı: Milli Aviasiya Akademiyasının El Məcmuələri, – 2024, №4, cild 26, – s. 1-7. doi: 10.30546/EMNAA.2024.04.1010
33. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. Basics of drone surveillance // *Proceedings of the 11 International Scientific and Practical Conference «Theory and practice of science: key aspect Roma, İtaliya, Scientific Collection «InterConf+», - 19-20.04.2025, № 56(244).* - p. 278-283. DOI 10.51582/interconf.19-20.04.2025.030
34. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. Methods of conducting observation with unmanned flight vehicles // *World of conferences. XVI International Scientific and Practical Conference «World science priorities», 03-04.04.2025, Vienna. Austria.* -p.143-145. DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.15181208>
35. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. Basics of electron-optical surveillance with UAVs // *The-Scientific Heritage, Budapest, Hungary, -2025, Vol. 159, -p.140-143.* DOI: 10.5281/zenodo.15292417
36. Barr, J.R.; Green, M.C.; et.al. Drone surveys do not increase colony-wide flight behaviour at waterbird nesting sites, but sensitivity varies among species. *Sci. Rep.* 2020, 10, 3781. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60543-z>
37. Набиев, Р.Н., Абдуллаев, А.А. Методы поиска при наблюдении за стратегическими объектами с использованием беспилотных летательных аппаратов //—Москва: Естественные технические науки. —2025. №4 (203), —с. 346-354. <https://doi.org/10.25633/ETN.2025.04.28>

REFERENCES

1. Linchant, J.; Lisein, J.; et.al. Are unmanned aircraft systems (UAS s) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. *Mammal Rev.* 2015, 45, 239–252.
2. R.N. Nəbiyev, G.I. Garayev and A.A. Abdullayev. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane. *Proceedings of the IOP Conference Series: Conference Scopu. Materials Science and Engineering.* 862, 022043, 2020, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022043>
3. Hu, S., Yuan, X. Visual Camouflage and Online Trajectory Planning for UAV-Based Disguised Video Surveillance: *Recent Advances and a Case Study. IEEE Veh. Technol. Mag.* 2023, 18, 48–57. DOI: 10.1109/MVT.2023.3263329

4. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. Structural drafting of convertiplane-type unmanned aerial vehicle. *Norwegian Journal of development of the International Science*, №94, 2022, pp. 45-51, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7198424>
5. Li, X.; Huang, H.; Savkin, A.V. Autonomous Navigation of an Aerial Drone to Observe a Group of Wild Animals with Reduced Visual Disturbance. *IEEE Syst. J.* 2022, 16, 3339–3348. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3135982
6. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. (2024) On-board control-measurement system for micro convertiplane-type unmanned aerial vehicles. *Eurasian Physical Technical Journal*. 21, 2(48), 61-69. <https://doi.org/10.31489/2024No2/61-69>
7. A.A. Abdullayev. Flight study of VTOL micro UAV in different flight modes with on-board control-measurement system. *International Conference on Artificial intelligence: from theory (AICON-2024)*, 17-18 sentember 2024, Nakhchvan, Azerbaijan. pp. 271-277. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14031849>
8. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A., Garayev G.I. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024) E3S Web of Conf. Volume 592, 06024 (2024), DOI: 10.1051/e3sconf/202459206024
9. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev, et.al. Determination of the center of gravity of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type. *İzvestiya SfedU. Engineering sciences*, № 5 (229), 2022, pp.258-268, DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-258-268
10. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev, et. al. Requirements for unmanned aerial vehicles on multi-rotational basis. *Journal Aerospace Instrument-Making*, M. 2018. № 9, pp. 3-11, DOI: 10.25791/aviakosmos.09.2018.166
11. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev, et.al. Comparative analysis the features of the lithium-based accumulator batteries. *Journal Aerospace Instrument-Making*, M. № 9. 2019, pp. 42-55. DOI: 10.25791/aviakosmos.09.2019.867
12. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. Analysis of the features of hydrogen as an energy source. *Journal Aerospace Instrument-Making*, M. 2021. № 3. pp. 41-58. DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2021.1211
13. R.N. Nabiyev, A.A. Abdullayev and G.İ. Garayev. Processing a Conceptual Functional Diagram of an Unmanned Convertiplane With a Hybrid Energy Source. *Journal Aerospace Instrument-Making*, M. №5. 2021, pp. 03-18, DOI: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217
14. R.N. Nabiyev and A.A. Abdullayev. Research of the basic aerodynamic parameters of the unmanned aircraft planer of convertoplan type. *Journal Aerospace Instrument-Making*, M. № 4, 2022, pp. 17-33, DOI: 10.25791/aviakosmos.4.2022.1274
15. Fang, Z.; Savkin, A.V. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review. *Drones* 2024, 8, 193. <https://doi.org/10.3390/drones8050193>
16. Maddern W., Pascoe G., et.al. Real-time Kinematic Ground Truth for the Oxford RobotCar Dataset.
17. Rastopcin V.V., Dmitriev M.L. Primenenie cifrovix opticeskix sistem dlya bespilotnix apparatov. http://uav.ru/articles/opteq_uav.pdf.
18. Rastopcin V.V. Elementernie osnovie ocenki effektivnosti primeneniya bespilotnix avioconnix sistem dlya vozdushnoy razvedki: www.uav.ru, 2006. 15 c.
19. E.Evqeniy. Bespilotnie letetelnoe apparati i zashita qranic. <http://uav.ru/articles/granitsa.pdf>.

20. D.Magdalena and T. Piotr et.al. Hybrid Fuel Cell - Battery System as a Main Power Unit for Small Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 (2013) 8442 - 8463.
21. Gailler, L.; Labazuy, P.; et.al. Validation of a New UAV Magnetic Prospecting Tool for Volcano Monitoring and Geohazard Assessment. *Remote Sens.* 2021, 13, 894. <https://doi.org/10.3390/rs13050894>
22. Evans, I.; Jones, T.H.; Pang, K.; et.al. Use of drone technology as a tool for behavioral research: A case study of crocodilian nesting. *Herpetol. Conserv. Biol.* 2015, 10, 90–98.
23. M. Hassanalian, D. Rice, A. Abdelkefi. Evolution of space drones for planetary exploration: A review. *Progress in Aerospace Sciences* 97 (2018), 61–105 p.
24. Groves, P.A.; Alcorn, B.; Wiest, et.al. Testing unmanned aircraft systems for salmon spawning surveys. *Facets* 2016, 1, 187–204. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0019>
25. Chio, S.H.; Lin, C.H. Preliminary Study of UAS Equipped with Thermal Camera for Volcanic Geothermal Monitoring in Taiwan. *Sensors* 2017, 17, 1649. <https://doi.org/10.3390/s17071649>
26. Wakeford, Z.E.; Chmielewska, M.; et.al. Combining thermal imaging with photogrammetry of an active volcano using UAV: An example from Stromboli, Italy. *Photogramm. Rec.* 2019, 34, 445–466. <https://doi.org/10.1111/phor.12301>
27. Hodgson, J.C.; Koh, L.P. Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Curr. Biol.* 2016, 26, R404–R405.
28. Huang, H.; Savkin, A.V.; Huang, C. *Autonomous Navigation and Deployment of UAVs for Communication, Surveillance and Delivery*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2022.
29. S. Joachim. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme. "Hybrid-Electric Propulsion Systems for Small Unmanned Aircraft". *Die Dissertation wurde am 12.12.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.07.2014 angenommen.* 2013, 188 p.
30. Pashayev, A., Nabiyeu, R., Abdullayev, A. et. al. Research of a vertical takeoff and landing micro UAV in the plane mode with the onboard control - measurement system. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. Vol. 46(1), 2025, pp. 870-878, ISSN 1001-4055
31. R.N. Nabiyeu and A.A. Abdullayev. Optimizaciya nablyudatelnix vozmojnostey БНЛА. *Estestbennie i texniceskie nauki. M, №2 (201), 2025, pp. 258-268,* <https://doi.org/10.25633/ETN.2025.02.19>
32. Nəbiyev, R.N., Abdullayev, A.A., Qarayev, Q.İ. Bort nəzarət-ölçü sistemi ilə konvertoplan tipli mikro PUA-nın VTOL rejimində tədqiqi \ – Bakı: Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri, – 2024, №4, cild 26, – s. 1-7. *doi: 10.30546/EMNAA.2024.04.1010*
33. Nabiyeu R.N., Abdullayev A.A. Basics of drone surveillance // *Proceedings of the 11 th International Scientific and Practical Conference «Theory and practice of science: key aspects».* Roma, İtaliya, Scientific Collection «InterConf+», - 19-20.04.2025, № 56(244). - p. 278-283. DOI 10.51582/interconf.19-20.04.2025.030
34. Nabiyeu R.N., Abdullayev A.A. Methods of conducting observation with unmanned flight vehicles // *World of conferences. XVI International Scientific and Practical Conference «World science priorities», 03-04.04.2025, Vienna. Austria. -p.143-145. DOI https://doi.org/10.5281/zenodo.15181208*

35. Nabiyeu R.N., Abdullayev A.A. Basics of electron-optical surveillance with UAVs // The Scientific Heritage, Budapest, Hungary, -2025, Vol. 159, -p.140-143. DOI: 10.5281/zenodo.15292417
36. Barr, J.R.; Green, M.C.; et.al. Drone surveys do not increase colony-wide flight behaviour at waterbird nesting sites, but sensitivity varies among species. *Sci. Rep.* 2020, 10, 3781. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60543-z>
37. R.N. Nabiyeu and A.A. Abdullayev. Metodi poiska pri nabludenii za strategiceskimi obyektlami s ispolzovaniem. *Estestbennii i texniceskie nauki. M, №4 (203), 2025*, pp. 346-354, <https://doi.org/10.25633/ETN.2025.04.28>

OPTIMIZING UAV-BASED AERIAL SURVEILLANCE: EFFECTIVENESS CRITERIA, CAPABILITY ASSESSMENT, AND STRATEGIC TARGET MONITORING

Nabiyeu R.N., Abdullayev A.A.
National Aviation Academy

The article reviews the effectiveness of the use of unmanned aerial vehicles in emergencies, border security, water resources assessment and mapping, as well as archaeological and geological surveys. Typical problems encountered during observation using unmanned aerial vehicles are discussed, and categories classified according to the field of interest are studied, analyzed, and summarized. The limitations of existing approaches and possible solutions, gaps in the presented research directions, and future application directions are also discussed. It is noted that there is a great need for researchers to study issues such as increasing the autonomy, reliability, and efficiency of unmanned aerial vehicle systems, as well as artificial intelligence and analytical analysis of large volumes of data, as well as their integration with other technologies. Methods and means of using unmanned aerial vehicles in the performance of observation tasks are studied and analyzed in detail.

It was noted that unmanned aerial vehicles have been successfully used in law enforcement agencies, power structures, agriculture, mining, mapping and environmental monitoring activities to ensure the operational work of personnel, as well as to provide them with important reconnaissance and visual surveillance image data, and most importantly, to significantly reduce security risks.

Starting from an overview of the main requirements for surveillance tasks, research was conducted on how unmanned aerial vehicles can overcome their limitations in large-scale disasters and complex scenarios, in particular, for flexible deployment in the area, effective observation and accurate positioning in difficult-to-access places. In addition, the current problems faced by these technologies, as well as possible directions for future development aimed at further enhancing the role of unmanned aerial vehicles in the collection of surveillance and intelligence data, were discussed. As technologies develop and the application areas of unmanned aerial vehicles expand, special attention is required to be paid to legal, ethical and privacy issues of their use. The importance of developing the use of unmanned aerial vehicle systems in complex defense and security activities is also noted.

The article also identifies the criteria for the effectiveness of aerial surveillance. Applied calculation methods are presented for calculating the area of the area observed by unmanned aerial

vehicles in one flight, the cost of conducting the observation, and the cost of obtaining information by observing a given area of the earth's surface.

Key words: *unmanned aerial vehicles, surveillance, optimization, electro-optical camera, artificial intelligence.*

Rəyçilər: *h.f.d., dosent Nağıyev N.T.*
f.-r.f.d., professor İsgəndərov İ.Ə.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Nəbiyev Rasim Nəsib oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Aviasiya Elektronikaşı şöbəsinin müdiri t.e.d., prof.	nabiyevrasim@gmail.com mob: (+994) 55 754-76-46
Abdullayev Anar Arif oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Milli Aviasiya Akademiyasının doktorantı f.-r.f.d.	anarcafarov009@gmail.com mob: (+994) 77 756-48-75

AVIASIYA TƏHLÜKƏSİZLİYİ

UOT 62

DOI: 10.30546/EMNAA.2025.25.03.102

PARTLAYICILARIN AŞKARLANMASINDA SÜRƏTLİ QAMMA NEYTRON AKTİVLƏŞMƏ ANALİZİ VƏ DƏRİN NEYRON ŞƏBƏKƏLƏRİNİN BİRLƏŞDİRİLMƏSİ

Əsgərov K.Ə., Əhmədova S.T.
Milli Aviasiya Akademiyası

Partlayıcı maddələrin aşkarlanması məsələsi birinci dünya müharibəsindən bəri açıq bir problem olaraq qalır. Son dövrlərdə texnologiyanın sürətli inkişafı və dünyada fəaliyyət göstərən təşkilatlanmış terror qruplarının intellekt səviyyəsinin artması nəticəsində onlar ənənəvi partlayıcı aşkarlama üsullarının çoxunu sındıra bilmişlər. Bu səbəbdən tədqiqatçılar, itlərin qoxu alma qabiliyyətinə və rentgen cihazlarına əsaslanan klassik metodları üstələyəcək alternativ partlayıcı aşkarlama sistemləri üzərində işləməyə başlamışlar. Beləliklə, bir çox tədqiqatçı partlayıcıların aşkarlanmasında alternativ texnikalara diqqət yetirməyə başlamışdır.

Tədqiqatların əksəriyyəti partlayıcıların kimyəvi aşkarlanması üzərində cəmlənmişdir. Məsələn, nanoelektrik cihazlar massivləri ilə kimyəvi modifikasiya edilmiş multipleks rejimdən istifadə etməklə çox həssas partlayıcı identifikasiyası və fərqləndirilməsi üsulu işlənib hazırlanmışdır. Digər tədqiqatçılar isə otaq temperaturunda peptid reseptoru ilə dəyişdirilmiş qrafen oksid əsaslı qaz sensoru vasitəsilə dinitrotolueni aşkar etməyə nail olmuşlar. Araşdırmalar göstərmişdir ki, mikroporoz polimer şəbəkələr asan və aşağı qiymətə istehsal edilə bilən partlayıcı aşkarlama cihazları kimi istifadə oluna bilər.

Klasterləşmə, regressiya və təsnifat sahələrində maşın öyrənməsinin böyük analitik gücünü nəzərə alaraq, müxtəlif mühitlərdə sensor məlumatlarının təhlilində müxtəlif maşın öyrənmə üsullarından istifadə edilən tədqiqatlar aparılmışdır. Bəzi tədqiqatçılar partlayıcıları konvolusion neyron şəbəkələri vasitəsilə üçölçülü voksel radar texnologiyası ilə vizuallaşdırmağa çalışmışlar. Bundan əlavə, dərin öyrənmə texnologiyası əl ilə daşınan yeraltı nüfuzetmə radarları vasitəsilə partlayıcıların aşkarlanmasında tətbiq edilmişdir. Süni intellektin süni neyron şəbəkələri ailəsinə daxil olan çoxqatlı perseptron modelləri partlayıcıların aşkarlanması üçün impulsiv sürətli termal neytron aktivləşdirmə texnikası ilə birləşdirilmişdir. Bu yanaşma termal neytron tomoqrafiyası vasitəsilə əldə olunan görüntülərlə birlikdə tətbiq edildikdə, partlayıcı və narkotik maddələrin mövcudluğunu 97% dəqiqliklə proqnozlaşdırma bilmişdir.

Açar sözlər: *partlayıcı maddə, dərin neyron şəbəkələri, kölgələnmə effekti, neytron spektroskopiyası, karbohidrogenlərin təsnifatı, nüvə analizi.*

Giriş

Partlayıcıların aşkarlanmasında nüvə əsaslı üsullar ilk dəfə 1986-cı ildə tətbiq olunmuşdur. Son 20 ildə bu üsulların aviasiya təhlükəsizliyi məqsədilə istifadəsi bir çox tədqiqatçılar tərəfindən araşdırılmışdır. Bu sahədə geniş potensialı və tətbiq imkanları səbəbilə sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi üsulu ətraflı öyrənilmişdir. Sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi kəmiyyət

xarakterli izotop identifikasiyası texnikasıdır. Tipik bir sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi sistemi neytron mənbəyi, naməlum nümunə və detektor massivindən ibarətdir. Hədəf nümunəyə neytron şüası ilə bombardman edildikdə, neytronlar hədəf nüvələri ilə qarşılıqlı təsirə girərək müəyyən enerji piklərini əhatə edən qamma spektrini yayır. Bu enerji pikləri hədəfin izotop tərkibinin “barmaq izlərini” təmsil edir. Hər bir enerji üzrə müşahidə olunan piklərin hündürlüklərinin təhlili nümunənin tərkibi haqqında kəmiyyət məlumatı verir.

Sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnologiyasının partlayıcı aşkarlanmasında əsas üstünlüklərindən biri də şüalanma və deteksiya prosesinin eyni vaxtda baş verməsidir. Bu səbəbdən sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnikası partlayıcıların identifikasiyasında yüksək səmərəlilik göstərmiş, həmçinin hava limanlarında və sərhəd-buraxılış məntəqələrində baqajların yoxlanması üçün tələb olunan vaxtı azaldaraq sənişin sıralarında gecikmələrin qarşısını almışdır. Bununla belə, sürətli qamma neytron aktivləşmə analizinin əsas çatışmazlıqlarından biri tədqiq olunan hədəfin qalxan (shield) ilə örtülməsi məsələsidir. Əgər hədəf neytron və ya qamma şüaları üçün qalxanla örtülsə, bu qalxan detektorlar tərəfindən oxunan qamma spektrini təhrif edir (şəkil 1). Bu halda sistem pik hündürlüklərini düzgün təyin edə bilmir və nəticədə hədəfin izotop tərkibi yanlış təyin olunur [1].

İşin məqsədi partlayıcı maddələrin etibarlı və sürətli aşkarlanması üçün sürətli Qamma Neytron Aktivləşmə Analizi texnologiyasını dərin neytron şəbəkələri ilə birləşdirərək neytron- γ spektrləri əsasında dəqiq identifikasiya və mürəkkəb mühitlərdə səmərəli signal emalını təmin edən yeni yanaşma işləyib hazırlamaqdır.

Problemin həlli üsulu

Sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi digər bir çatışmazlığı isə sistemin verdiyi nəticələr əsasında qərar vermək üçün təcrübəli operator tələb etməsidir. Bunun qarşısını almaq məqsədilə qamma spektrlərinin təhlilində K ən yaxın qonşu regressorları və qərar ağacı klassifikatoru kimi maşın öyrənməsi alqoritmlərindən istifadə edilmiş və bu yanaşma partlayıcı və qeyri-partlayıcı karbohidrogenlərin ayırd edilməsində 92% dəqiqliklə nəticə vermişdir. Qalxan problemi bir sıra tədqiqatlarda araşdırılmışdır. Bəzi tədqiqatçılar qalxan qalınlığına, digərləri isə neytron qalxanının partlayıcı aşkarlanmasına təsirinə diqqət yetirmişlər. Bu məqalədə biz sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnikasının dərin neytron şəbəkələri ilə birləşdirilməsinin qalxan probleminin həllinə necə kömək edə biləcəyini göstəririk. Bu yanaşma nəticəsində operatora ehtiyacı azaldacaq və detektorlar massivindən oxunan qamma spektrlərinin avtomatik təhlilinə imkan verəcək başdan-sonadək avtomatlaşdırılmış bir çərçivə təklif olunur.

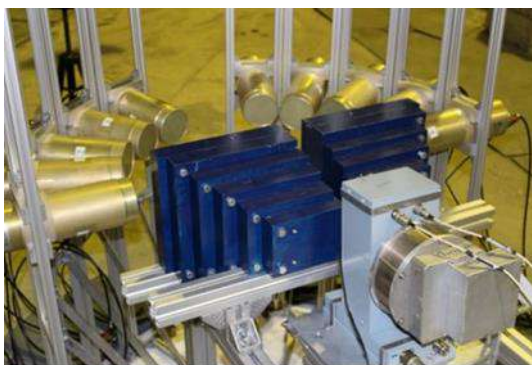
Hazırkı tədqiqatda təklif olunan avtomatlaşdırılmış çərçivə dörd reqissor və bir klassifikatordan ibarətdir. İlk giriş məlumatları qamma enerjisi piklərinin hündürlükləri, çıxış isə bu piklərin birləşməsinin partlayıcı karbohidrogenə aid olub-olmadığıdır. Bu çərçivənin hazırlanması üç əsas mərhələdən ibarət olmuşdur:

- məlumatların generasiyası;
- reqissorların hazırlanması;
- klassifikatorun hazırlanması.

Çərçivə, ilkin xam məlumatlardan başlayaraq minimum səhvlə proqnozlaşdırılmış dəyərlərlə başa çatan məlumat emal ardıcılığından ibarət bir boru xətti formasında təşkil olunmuşdur. Bu mərhələlərə məlumatların təmizlənməsi, əlamətlərin seçilməsi, ölçülərinin azaldılması, modelin qurulması, test edilməsi, tənzimlənməsi və yekun nəticənin proqnozlaşdırılması daxildir [2].

Tədqiqatın həssas təbiətini nəzərə alaraq eksperimental məlumatlar əvəzinə sintez olunmuş məlumatlardan istifadə edilmişdir. Naməlum karbohidrogen nümunəsi haqqında məlumat almaq üçün sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnikasından istifadə olunmuşdur. Təklif olunan çərçivə qalxanın olub-olmamasından asılı olmayaraq partlayıcı və qeyri-partlayıcı karbohidrogenlərin

fərqləndirilməsi üçün hazırlandığından, əsas diqqət hidrogen (H), karbon (C), azot (N) və oksigen (O) elementlərini təmsil edən qamma enerji piklərinə yönəldilmişdir. Məlumatların generasiyası üçün nüvə şüalanmasının hesablanması istifadə olunan Monte Karlo əsaslı kompüter simulyasiya alətindən kodundan istifadə olunmuşdur. Bu simulyasiya nümunələrlə neytron qarşılıqlı təsirini və detektorlar massivinin oxuduğu qamma spektrlərini təqlid edir.



Şəkil 1. ROMASHA qurğusunun real görüntüsü

Romasha qurğusu 14.1 meV neytronlar yaradan ING-27 D-T neytron generatorundan, altı dəmir plitədən ibarət kollimator və 30 sm radiuslu yarımhalqa şəklində yerləşdirilmiş On BGO detektorundan ibarət idi (şəkil1). Nümunə ilə neytron qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranan qamma şüaları müxtəlif istiqamətlərə yayılır. Buna görə də, sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi qurğularında qamma spektrinin aşkar edilməsi üçün detektorların massiv şəkildə yerləşdirilməsi standart prosedurdur. Biz D-T neytron generatorundan çıxan neytronları 14.1 meV enerji səviyyəsində isotropik nöqtə mənbəyi kimi modelləşdirilir [3]. Beləliklə, araşdırılan nümunənin istiqamətinin dəyişdirilməsi nəticədə alınan qamma spektrinə təsir göstərməyəcəkdir. Əvvəllər hazırlanmış və təsdiqlənmiş MCNP modelindən istifadə edilirdi. Məlumatların yaradılması prosesində istifadə edilən MCNP modelində təbii radioaktivlik fonu nəzərə alınmayıb. Yer üzündəki təbii radioaktivlik adətən qamma şüalarından ibarətdir, neytron fon şüalanması isə əhəmiyyətsizdir və adətən tətbiq dizaynında nəzərə alınmır. Qamma fon şüalanması səviyyəsinə gəldikdə isə, bu, şüa aşkarlanması daxil olan hər bir qurğu üçün standart prosedurdur və detektorlar uyğun enerji kanallarından fon qamma oxumalarını çıxarmaq üçün kalibrlənir. Bizim halda isə uyğun kanallar əlavə cədvəl 1-də göstərilmişdir. Təsdiqlənmiş MCNP modeldən istifadə etməklə, qalxan qalınlığı sıfır (qalxansız) ilə üç santimetr arasında dəyişən qalxanlı və qalxansız partlayıcı və partlamayan hidrokarbonların 1,478 nümunəsini yaradıldı. Məlumatların yaradılması prosesində 22 müxtəlif hidrokarbon partlayıcı daxil edilmişdir; onların kimyəvi tərkibi (kütlə fraksiyaları ilə), sıxlıqları (ρ q/cm³-də), həcmi (Vol sm³-də) və kütlələri (M q-da) cədvəl 1-də verilmişdir. Tədqiq edilən qalxanlar bor (B), yüngül su (H₂O), borlu yüngül su, polietilen (Poly), borlu polietilen, qurğuşun (Pb), dəmir (Fe) və poladdır.

Problemin həlli qaydası

Araşdırılacaq adi baqajda rast gəlinən hidrokarbon materiallarının tərkibindəki təsadüfi dəyişkənliyi əks etdirmək üçün partlayıcı olmayan hidrokarbon nümunələri üçün H, C, N və O elementlərinin kütlə paylarını təsadüfi seçdik. Bütün boru kəmərinə leave-one-out üsulu ilə çarpaz yoxlamaq məqsədilə, yaradılmış 1 478 nümunəni 11 verilənlər dəstinə böldük. Son test dəstinə formalaşdırmaq üçün bütün qalxan variasiyaları ilə iki partlayıcı hidrokarbonu (50 nümunə) və hər

Cədvəl 1

Tədqiq edilmiş partlayıcıların kimyəvi tərkibi [1]

Partlayıcı maddə	ρ (g/cm ³)	V_{ol} (cm ³)	H	C	N	O	M (g)
Ammonium Picrate	1.72	500	0.025	0.293	0.228	0.455	860
AN	1.72	500	0.050	0.000	0.350	0.600	860
CI-20	2.04	500	0.014	0.164	0.384	0.438	1,020
DMNB	0.45	500	0.070	0.409	0.159	0.360	225
EGDN	1.49	500	0.026	0.158	0.184	0.632	745
Guanidine nitrate	1.44	500	0.050	0.098	0.459	0.393	720
HMTD	1.57	500	0.057	0.346	0.135	0.460	785
HMX	1.91	500	0.027	0.162	0.378	0.432	955
Hydrazine nitrate	1.64	500	0.053	0.000	0.442	0.501	820
Mannitol hexanitrate	1.73	500	0.018	0.159	0.186	0.637	865
NG	1.6	500	0.022	0.159	0.185	0.634	800
NM	1.14	500	0.049	0.200	0.230	0.525	570
PETN	1.77	500	0.025	0.190	0.177	0.607	885
Picric acid	1.76	500	0.013	0.314	0.183	0.489	880
RDX	1.858	500	0.027	0.162	0.378	0.432	929
TATB	1.93	500	0.023	0.279	0.326	0.372	965
TATP	1.2	500	0.081	0.486	0.000	0.432	600
Tetryl	1.73	500	0.017	0.293	0.244	0.446	865
TNAZ	1.84	500	0.021	0.188	0.292	0.500	920
TNB	1.76	500	0.014	0.338	0.197	0.451	880
TNT	1.65	500	0.022	0.370	0.185	0.423	825
UN	1.59	500	0.040	0.097	0.340	0.520	795

dəstədən təsadüfi qalxan variasiyaları olan 50 partlayıcı olmayan təsadüfi hidrokarbonu çıxardıq. Nəticədə hər bir işləmə dəsti 1 378 nümunədən ibarət oldu. Yaradılmış verilənlərə aid orta standart sapmalar Əlavə cədvəl 5-də göstərilmişdir. Bu konsepsiya sübutunda alınan qamma spektri mənbə neytronu başına və saniyəlik hesablanmışdır [4]. Modelin hazırlanması mərhələsi üçün zəruri olan ilkin emalda qamma spektrinin giriş xüsusiyyətləri 0-la 1 arasında normallaşdırılmışdır; buna görə təqdim olunan nəticələr saniyəlik şüalandırmaya aiddir. Bununla belə, praktik tətbiqdə şüalandırma vaxtının və D-T neytron generatoru intensivliyinin 10^9 -dan 10^{12} n/sm²·s-ə qədər artırılması daha yaxşı nəticələr verə bilər. Rentgen tipli ilkin skan qurğusundan istifadə şübhəli baqajın digər konveyerə yönləndirilməsinə şərait yaradaraq ümumi yoxlama vaxtını qısaldır və beləliklə, D-T neytron generatorlu aşkar etmə sisteminə gətirib çıxarır. Əgər praktikada baqajın 10 %-i şübhəli hesab olunarsa və yüksək intensivlikli neytron generatoru tətbiq edilərsə, çoxsəddli yoxlama prosesi sürətlənəcək və həm qalxanlı, həm də qalxansız qadağan olunmuş materiallar səmərəli şəkildə aşkarlanacaq [5,6]. Rentgen əsaslı ilkin skan qurğusu ayrıca neytron generatorunun bağlamadakı konkret sahələrə yönəldilməsinə kömək edəcək və ikinci yoxlama mərhələsinin vaxtını azaldacaq.

Repressor bu, ədədi asılı dəyişənləri proqnozlaşdırmağa və proqnozlaşdırılan dəyərlə real dəyər arasındakı səhvi həm asılı dəyişənlərin bütün diapazonu, həm də müstəqil dəyişənlərin bütün sahəsi üzrə minimallaşdırmağa qadir model yaradan bir üsuldur. Biz tədqiq edilən nümunələrdə H, C, N və O elementlərinin kütlə paylarını proqnozlaşdırmaq üçün dörd dərin neyron şəbəkəsi əsaslı Repressor hazırladıq. Hər bir repressor üçün giriş məlumatı detektor massivindəki on detektor tərəfindən oxunan 11 qamma enerji pikinin hündürlükləri idi. Beləliklə, ümumi giriş xüsusiyyətlərinin sayı 110 olmuşdur [7]. Hər dörd Repressorun çıxışları isə müvafiq olaraq H, C, N və O elementlərinin kütlə payları idi. Yaradılmış verilənlər dəstlərində hər bir işləmə dəstindən 80 %-i təlim, 20 %-i isə test üçün ayrıldı. Beləliklə, hazırlanan modellərin hər biri beş qat üzrə çarpaz yoxlama ilə qiymətləndirildi. Hər bir qatda test nümunələri təsadüfi şəkildə seçildi. Repressorların keyfiyyət göstəriciləri kimi orta kvadratik səhv (MSE), orta mütləq səhv (MAE) və təyinetmə əmsalı (R^2) istifadə olundu. Bunlar cədvəl 2-də göstərilmişdir. R^2 göstəricisi regressiya üçün uyğunluq keyfiyyətini qiymətləndirən metrikadır və proqnozlaşdırılmış ədədi dəyərlərin bütöv verilənlər dəstinə nisbətən düzgünlük faizini göstərir.

Oksigenin kütlə payı üçün qurulmuş Repressorun test MAE göstəricisi ən yüksək olsa da, H və C elementlərinin kütlə paylarını proqnozlaşdırən Repressorlar ən zəif və bir qədər zəif nəticələr göstərmişdir, çünki onların təlim və test MAE-ləri arasında fərq daha böyük olmuşdur. Bu isə modelin regressiya prosesində çoxöyrənməyə (overfitting) meyli olduğunu göstərir. Bu vəziyyətin səbəbi isə məlumatların yaradılması prosesində yüngül su (H₂O) və polietilen kimi qalxanların mövcudluğudur [8].

Cədvəl 2

Hazırlanmış dörd Repressor üçün orta göstəricilər [2]

Model name	Training MSE	Training MAE	Training R ²	Test MSE	Test MAE	Test R ²
Hydrogen	0.001	0.025	0.955	0.003	0.036	0.888
Carbon	0.003	0.038	0.868	0.004	0.043	0.836
Nitrogen	0.002	0.029	0.926	0.002	0.032	0.905
Oxygen	0.004	0.047	0.872	0.004	0.048	0.859

Cədvəl 3

Hazırlanmış 11 klassifikator üçün təsnifat göstəriciləri [2]

Model number	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Model 1	0.931	0.931	0.932	0.931
Model 2	0.964	0.964	0.965	0.964
Model 3	0.946	0.946	0.946	0.946
Model 4	0.942	0.942	0.942	0.942
Model 5	0.942	0.942	0.943	0.942
Model 6	0.953	0.953	0.953	0.953
Model 7	0.960	0.960	0.960	0.960
Model 8	0.957	0.957	0.957	0.957
Model 9	0.960	0.960	0.960	0.960
Model 10	0.949	0.950	0.950	0.949
Model 11	0.946	0.946	0.946	0.946
Average	0.950	0.950	0.950	0.950

Bu iki spesifik qalxana yüngül su və polietilenə xas olan cəhət onların tərkibində H (hidrogen) və C (karbon) elementlərinin mövcudluğudur. H və C elementlərinin əla neytron qalxanları sayılması bir yana, bu elementlərin neytronlarla qarşılıqlı təsiri detektorlar tərəfindən oxunan H və C-yə aid qamma enerji piklərinin hündürlüyünü də artıracaq. Bu isə yalnız neytron qalxanlaması nəticəsində yaranan qamma spektrini təhrif etməyəcək, eyni zamanda tədqiq edilən nümunədə həqiqətən mövcud olmayan H və C kütlə paylarını göstərən yanılıcı enerji piklərinə səbəb olacaq. Yüngül suda oksigen (O) elementi olsa da, O neytronlara qarşı "şəffaf" hesab olunur və neytronlarla qarşılıqlı təsir ehtimalı aşağıdır. Bu səbəbdən, O elementinin kütlə payını proqnozlaşdıran Reqressorun reqrressiya keyfiyyət göstəriciləri H və C elementləri üçün olanlara nisbətən daha yaxşı nəticələr göstərmişdir. Digər tərəfdən, N (azot) elementinin kütlə payını proqnozlaşdıran Reqressor ən aşağı MSE və MAE, həmçinin ən yüksək R^2 göstəricilərini əldə etmişdir. Bu isə tədqiq edilən qalxanların heç birində N elementinin olmaması ilə izah olunur. Klassifikator bu, ona daxil olan xüsusiyyətlər toplusuna əsasən müxtəlif kateqoriyalı verilənləri müəyyən etməyə qadir model yaradan bir üsuldur. Boru kəmərinin son mərhələsində biz, araşdırılan hidrokarbonun qalxanlı olub-olmamasından asılı olmayaraq, partlayıcı və partlayıcı olmayan hidrokarbonları fərqləndirmək üçün klassifikator hazırladıq. Klassifikatorun girişi kimi dörd Reqressorun çıxışları istifadə olunmuşdur [9]. Klassifikatorun çıxışı isə həmin Reqressorlarla proqnozlaşdırılmış H, C, N və O kütlə paylarının partlayıcı və ya partlayıcı olmayan hidrokarbonu təmsil edib-etmədiyini göstərir. Reqressorların hazırlanmasında olduğu kimi, klassifikator üçün də təlim və test verilənlərinin ölçüləri müvafiq olaraq hər işləmə verilənlər dəstindən 80 % və 20 % təşkil etmişdir. Klassifikator beş qat üzrə çarpaz yoxlama ilə qiymətləndirilmişdir. Hazırlanmış klassifikatorun keyfiyyət göstəriciləri kimi düzgünlük (accuracy), dəqiqlik (precision), geri çağırma (recall) və F1 göstəriciləri istifadə edilmişdir. Dəqiqlik (Accuracy) — proqnozlaşdırılmış kateqoriyalardan neçəsinin düzgün təsnifləndirildiyini bütün verilənlər dəstinə nisbətən göstərir. Lakin balanssız verilənlərdə yanılıcı ola və statistik əhəmiyyət daşımaya bilər. Dəqiqlik (Precision) — düzgün proqnozlaşdırılmış müsbət hallar ilə ümumi müsbət proqnozların (həm doğru, həm də yanlış müsbətlər) nisbətidir. Geri çağırma (Recall) — düzgün proqnozlaşdırılmış müsbət hallar ilə ümumi real müsbət halların (doğru müsbətlər və yanlış mənfilər) nisbətidir. F1 göstəricisi — dəqiqlik və geri çağırma göstəricilərinin harmonik ortalamasıdır. Dəqiqlik və geri çağırma əks nisbətdə dəyişdiyinə görə, yüksək F1 göstəricisi modelin doğru müsbət, doğru mənfi,

yalnış müsbət və yalınş mənfi halları effektiv şəkildə proqnozlaşdırmaq qabiliyyətinə işarə edir [9]. Modelin səhv yayılma ehtimalını azaltmaq m əqsədilə, klassifikatoru ilkin verilənlərlə deyil, Regressorla proqnozlaşdırılmış H, C, N və O kütlə payı dəyərləri ilə təlim etdik. Hazırlanmış klassifikatorlar bütün çəkilmış orta keyfiyyət göstəriciləri üzrə 95 %-lik nəticə göstərmişdir. Hər bir klassifikator üçün keyfiyyət göstəricilərinin detalları cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 4

Hazırlanmış 11 boru kəməri üçün işləmə verilənlər dəsti üzərində test zamanı əldə olunmuş təsnifat göstəriciləri [3]

Model number	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Model 1	0.946	0.947	0.947	0.946
Model 2	0.964	0.964	0.964	0.964
Model 3	0.945	0.945	0.946	0.945
Model 4	0.951	0.952	0.952	0.951
Model 5	0.928	0.929	0.930	0.928
Model 6	0.947	0.947	0.948	0.947
Model 7	0.947	0.947	0.948	0.947
Model 8	0.940	0.940	0.941	0.940
Model 9	0.959	0.959	0.959	0.959
Model 10	0.940	0.940	0.941	0.940
Model 11	0.933	0.934	0.934	0.933
Average	0.946	0.946	0.947	0.946

Cədvəl 5

Hazırlanmış 11 boru kəməri üçün yekun test verilənlər dəsti üzərində test zamanı əldə olunmuş təsnifat göstəriciləri [3]

Model number	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Model 1	0.810	0.804	0.851	0.810
Model 2	0.650	0.607	0.766	0.650
Model 3	0.680	0.653	0.762	0.680
Model 4	0.760	0.745	0.838	0.760
Model 5	0.850	0.847	0.885	0.850
Model 6	0.840	0.836	0.879	0.840
Model 7	0.950	0.950	0.950	0.950
Model 8	0.730	0.715	0.792	0.730
Model 9	0.720	0.703	0.786	0.720
Model 10	0.860	0.857	0.890	0.860
Model 11	0.930	0.930	0.932	0.930
Average	0.800	0.786	0.848	0.800

Xülasə olaraq, biz 11 boru kəməri (pipeline) hazırladıq. Hər bir boru tədqiq edilən nümunədə H, C, N və O elementlərinin kütlə paylarını proqnozlaşdırmaq üçün dörd Regressor və həmin nümunənin partlayıcı hidrokarbon olub-olmamasını müəyyənləşdirmək üçün bir klassifikatordan ibarət idi [11,12]. Hər boru hazırlanması zamanı 11 işləmə verilənlər dəstindən biri seçilmişdir. Nəhayət, hər bir boru iki dəfə test edilmişdir. Gözləniləndiyi kimi, boru kəmərlərinin işləmə verilənlər dəstində test edilməsi nəticəsində çəkilmış orta düzgünlük (accuracy), dəqiqlik (precision), geri

çağırma (recall) və F1 göstəriciləri klassifikatorların inkişaf mərhələsində əldə edilən göstəricilərlə eyni — 95 % olmuşdur. Digər tərəfdən, boru kəmərləri yekun test verilənlər dəstləri üzərində sınaqdan keçirilərkən bu göstəricilər aşağıdakı kimi azalmışdır: düzgünlük — 80 %, dəqiqlik — 79 %, geri çağırma — 85 %, F1 göstəricisi — 80 %. Bu nəticələr, boru kəmərlərinin qalxanlı və ya qalxansız olmasından asılı olmayaraq, tanınmamış partlayıcı və partlayıcı olmayan maddələrə qarşı ümumiləşdirmə qabiliyyətini göstərir. İnkişaf verilənlər dəsti və yekun test verilənlər dəsti üçün təsnifat göstəricilərinin ətraflı nəticələri müvafiq olaraq cədvəl 4 və cədvəl 5-də təqdim olunmuşdur. Yekun test verilənlər dəstlərində aparılmış sınaqlar əsasında müəyyən olunmuşdur ki, orta yalnız həyəcan faizi 2 %-dir.

Nəticə

Yuxarıdakı müzakirələr göstərir ki, hazırlanmış başdan-sonadək çərçivə, təlim prosesinə əvvəlcədən daxil edilmiş partlayıcı maddələr üçün daha yüksək təsnifat göstəriciləri əldə etmişdir. Təhlükəsizlik problemlərinin təbiətinə görə və partlayıcı maddələrin məhdud sayda olmasını nəzərə alaraq, bütün məlum partlayıcıları Reqressorlar və klassifikatorların təliminə daxil etmək mümkündür.

Bununla belə, bəzi hazırlanmış boru kəmərləri aşağıdakı nəticələr əldə edə bilmişdir:

- 920 qram trinitroazetidin (TNAZ) 84% düzgünlüklə,
- 800 qram nitroqliserin (NG) və 825 qram trinitrotoluenin (TNT) hər biri 88% düzgünlüklə,
- 880 qram pikrin turşusu, 865 qram trinitrofenilmetil nitramin (tetril) və 795 qram karbamid nitratı (UN) hər biri 92% düzgünlüklə,
- 885 qram pentaeritritol tetranitratı (PETN) 100% düzgünlüklə aşkar edilmişdir.

Qeyd olunan partlayıcılar həm təlim, həm də test mərhələsində aid olduqları işləmə verilənlər dəstlərinə daxil edilməmişdir. PETN-in üç santimetr qalınlığında müxtəlif qalxanlar vasitəsilə minimal aşkarlana bilən kütləsini test edərkən, boru su, borlu su, dəmir, qurğuşun və bor qalxanları üçün PETN-in minimum 708 qram kütləsini aşkarlaya bilmişdir. Həmçinin, üç santimetr qalınlığında borlu polietilen, polietilen və polad qalxanları altında müvafiq olaraq 177, 354 və 531 qram PETN-in aşkarlanması mümkün olmuşdur.

Beləliklə, dərin neyron şəbəkələrinin sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnikası ilə birləşdirilməsi, sürətli qamma neytron aktivləşmə analizi texnikasının neytron və qamma qalxanları səbəbindən yaranan məhdudiyyətlərini partlayıcıların aşkarlanması və təhlükəsizlik tətbiqlərində aşmaq üçün böyük potensial nümayiş etdirmişdir.

Gələcəkdə daha çox parametrləri ehtiva edən eksperimental məlumatlar daxil olmaqla, daha böyük verilənlər dəstlərinin hazırlanmasının təklif olunan boru partlayıcı aşkarlanmasında səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdıracağına inanırıq. Gələcək işlərdə, qalxanlı nümunənin ətrafına müxtəlif hidrokarbon birləşmələri yerləşdirilmiş real baqajların tədqiqi daxil ola bilər. Polietilen və borlu polietilen qalxanlarından istifadə edildi, çünki onlar neytron uducular hesab olunur və tədqiq edilən nümunəni qalxanlamaq üçün istifadə edilə bilirlər. Bundan əlavə, onlar adi baqajda yerləşdirilən əşyalarla əhatə olunmuş nümunələrin tədqiqinə davam etmək üçün işin genişləndirilməsi barədə anlayışlar verir.

Hazırlanmış başdan-sonadək çərçivə (pipeline) təlim prosesinə daxil edilmiş partlayıcı maddələrin daha düzgün və yüksək dəqiqliklə təsnifatını təmin etmişdir. Təhlükəsizlik səbəbləri və partlayıcıların məhdud sayı nəzərə alınaraq, bütün məlum partlayıcıların reqressor və klassifikatorların təliminə daxil edilməsi mümkündür. Bununla belə, bəzi boruəsaslı skanlama protokolları aşağıdakı nəticələri əldə etmişdir:

- 920 qram trinitroazetidin (TNAZ) - 84% düzgünlük;
- 800 qram nitroqliserin (NG) və 825 qram trinitrotoluen (TNT) - hər biri 88% düzgünlük;

-880 qram pikrin turşusu, 865 qram trinitrofenilmetil nitramin (tetril) və 795 qram karbamid nitratı (UN) — hər biri 92% düzgünlük;

-885 qram pentaeritritol tetranitrat (PETN)- 100% düzgünlük.

PETN-in üç santimetr qalınlığında müxtəlif müdafiə vasitəsilə minimal aşkarlana bilən kütləsini yoxlayarkən, boru su, borlu su, dəmir, qurğuşun və bor qalxanları üçün PETN-in ən az 708 qram kütləsi aşkar edilə bilmişdir. Üç santimetr qalınlığında borlu polietilen, polietilen və polad qalxanları altında müvafiq olaraq 177, 354 və 531 qram PETN aşkarlanması mümkün olmuşdur.

ƏDƏBİYYAT

1. Im, H.-J. et al. Analytical capability of an explosives detection by a prompt gamma-ray neutron activation analysis. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Acceler. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 566(2), 442–447 (2006).
2. Holloway, J. P. & Akkurt, H. The fixed point formulation for large sample PGNA—Part 1: theory. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Acceler. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 522(3), 529–544 (2004).
3. Im, H. J. & Song, K. Applications of prompt gamma ray neutron activation analysis: detection of illicit materials. Appl. Spectrosc. Rev. 44(4), 317–334 (2009).
4. Gozani, T., Morgado, R. E. & Seher, C. C. Nuclear based techniques for explosive detection. J. Energ. Mater. 4(1–4), 377–414 (1986).
5. Gates, P. M., Furlong, E. T., Dorsey, T. F. & Burkhardt, M. R. Determination of nitroaromatic explosives and their degradation products in unsaturated-zone water samples by high-performance liquid chromatography with photodiode-array, mass spectro-metric, and tandem mass spectrometric detection. Trends Anal. Chem. 15(8), 319–325 (1996).
6. National Research Council. Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques (The National Academies Press, Washington, DC, 2004).
7. Lichtenstein, A. et al. Supersensitive fingerprinting of explosives by chemically modified nanosensors arrays. Nat. Commun. 5(1), 4195 (2014).
8. Lee, K. et al. Highly selective reduced graphene oxide (rGO) sensor based on a peptide aptamer receptor for detecting explosives. Sci. Rep. 9(1), 10297 (2019).
9. Räupe, A. et al. Highly sensitive gas-phase explosive detection by luminescent microporous polymer networks. Sci. Rep. 6(1), 29118 (2016).
10. Brockner, B., Williams, K., Luke, R., Sheen, D., Dowdy, J., Anderson, D. & Veal, C. Convolutional neural network based side attack explosive hazard detection in three dimensional voxel radar. In Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIII (2018).
11. Besaw, L. Detecting buried explosive hazards with handheld GPR and deep learning. In SPIE Defense + Security (2016).
12. Wang, H., Li, Y., Yang, Y., Hu, S., Chen, B. & Gao, W. Study of artificial neural network on explosive detection with PFTNA method. In Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005 IEEE, Vol. 1 (2005).

INTEGRATION OF PROMPT GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS AND DEEP NEURAL NETWORKS IN EXPLOSIVES DETECTION

Asgarov K.A., Ahmadova S.T.
National Aviation Academy

The detection of explosive materials has remained an open problem since the First World War. In recent years, rapid technological advancements and the increased intellectual capacity of organized terrorist groups worldwide have enabled them to bypass many traditional explosive detection methods. Therefore, researchers have begun working on alternative explosive detection systems that can outperform classical methods based on dogs' olfactory abilities and X-ray devices. Consequently, many researchers have started focusing on alternative techniques for explosives detection.

Most studies have concentrated on chemical detection of explosives. For example, a highly sensitive method for identification and differentiation of explosives has been developed using multiplexed chemically modified nanoelectronic device arrays. Other researchers have successfully detected dinitrotoluene using a graphene oxide-based gas sensor modified with peptide receptors at room temperature. Studies have shown that microporous polymer networks can be used as inexpensive and easily manufactured explosive detection devices.

Considering the significant analytical power of machine learning in clustering, regression, and classification, various studies have employed different machine learning methods to analyze sensor data in diverse environments. Some researchers have attempted to visualize explosives using convolutional neural networks combined with three-dimensional voxel radar technology. Additionally, deep learning technology has been applied in explosive detection using handheld ground-penetrating radars. Artificial intelligence models belonging to the artificial neural network family, such as multilayer perceptrons, have been combined with impulsive fast thermal neutron activation techniques for explosives detection. When applied alongside thermal neutron tomography imaging, this approach has been able to predict the presence of explosives and narcotics with 97% accuracy.

Key words: *explosive material, deep neural networks, shadowing effect, neutron spectroscopy, hydrocarbon classification, nuclear analysis.*

Rəyçilər: *t.e.d., professor Nəbiyev R.N.*
f.-r.f.d., professor İsgəndərov İ.Ə.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Əsgərov Kamal Əsgər oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Milli Aviasiya Akademiyası Elm İstehsalat Birliyinin Baş direktoru, f.-r.e.d., professor	kamal.asgarov@naa.edu.az mob: (+994) 50 223-22-87
Əhmədova Səidə Tahir qızı	Milli Aviasiya Akademiyası	“Aviasiya təhlükəsizliyi” kafedrasının müəllimi	sahmadova@naa.edu.az mob: (+994) 50 659-05-19

AEROPORTLARIN MÜHAFİZƏ KOMPLEKSİNİN YARADILMASININ OPTİMAL TEXNİKİ ŞƏRTLƏRİNİN MÜƏYYƏNLƏŞDİRİLMƏSİ

Nəbiyev R.N., Rüstəmov R.R., Mövsümzadə Ü.F.
Milli Aviasiya Akademiyası

Məqalədə mülki aviasiyanın terroristlər üçün cəlbedici hədəf olduğu, terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının çoxsaylı itkilərlə nəticələndiyi qeyd edilmişdir. Buna əsaslanaraq, aviasiya təhlükəsizliyinin təkmilləşdirilməsinin vacibliyi vurğulanmışdır. Aviasiya təhlükəsizliyinin bütün istiqamətlərdə, xüsusilə də aeroportun perimetrinin mühafizəsi üzrə təkmilləşdirilməsi terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının vurduğu zərərin azaldılmasına imkan yaradır.

Bunu nəzərə alaraq, məqalədə məqsədin perimetrdə tətbiq edilən müasir sistemlərə qoyulan tələblərin araşdırılması ilə aeroportun mühafizə kompleksinin yaradılmasının optimal texniki şərtlərinin müəyyənəşdirilməsindən ibarət olduğu göstərilmişdir. Bu məqsədlə, aeroportun perimetr üzrə qorunmasının zəruri normativ-hüquqi tələbləri qeyd edilmiş və müasir dövrdə strateji obyektlərin perimetr mühafizə sistemlərində daha geniş tətbiq edilən duyğacaların, videomüşahidə və dron əleyhinə müdafiə sistemlərinin, eləcə də şəxslərin və avtomobillərin eyniləşdirilmə sistemlərinin iş prinsipləri, funksional imkanları, üstünlük və çatışmazlıqları təhlil edilmişdir.

Təhlillər nəticəsində məlum olmuşdur ki, Beynəlxalq Mülki Aviasiya Təşkilatı tərəfindən qoyulmuş zəruri normativ-hüquqi tələblər aeroportların effektiv mühafizə kompleksinin yaradılmasını tələb etdiyindən, müasir texnologiyalara əsaslanan sistemləri orqanik şəkildə birləşdirən mühafizə kompleksinin qeyd edilən optimal texniki şərtlərin nəzərə alınaraq yaradılması məqsədəuyğundur.

Vahid mərkəzdən idarə edilən mühafizə kompleksinin yaradılması üçün təklif olunan optimal texniki şərtlər, aeroportlarda aviasiya təhlükəsizlik sisteminin effektivliyinin artırılması istiqamətində zəruri addım hesab edilir. Çünki nəzərdə tutulan duyğac və sistemlərin integrasiyası ilə yaradılan mühafizə kompleksi vasitəsilə aeroportların ərazisində terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının başvermə ehtimalını məqbul səviyyədə saxlamaqla, itkilərin minimuma endirilməsinə nail olmaq və aviasiya təhlükəsizliyini təkmilləşdirmək mümkündür.

Açar sözlər: mülki aviasiya, aviasiya təhlükəsizliyi, perimetr mühafizə sistemi, mühafizə kompleksi, duyğac, pozucu, obyekt, videomüşahidə, biometrik eyniləşdirmə.

Mülki aviasiya sahəsi bir çox səbəblərə görə terroristlər üçün cəlbedici hədəfdir. Aviasiyanın cəlbedici olması həm insan amili, həm də iqtisadi və psixoloji təsirlərlə əlaqədardır. Aeroportlara və hava gəmilərinə edilən hücumlar genişmiqyaslı insan tələfatı ilə yanaşı, böyük ictimai və siyasi rezonansa səbəb ola bilər. Terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının aeroportlara vurduğu zərəri azaltmaq üçün mülki aviasiya sahəsində yeni texnoloji vasitələrin tətbiqi ilə təhlükəsizliyin daim təkmilləşdirilməsi vacibdir [1-4].

Bütün üzv dövlətlərin Beynəlxalq Mülki Aviasiya Təşkilatının müəyyən etdiyi altı prioritet istiqamətlərdən birinin "Texnoloji resursların təkmilləşdirilməsi və innovasiyaların tətbiqi" olduğunu nəzərə alması zəruridir [4, s. 22]. Bu səbəbdən də aviasiya təhlükəsizliyinin effektivliyini yüksəltmək üçün aeroportların yeni texnoloji üsullarla qorunması təmin edilməlidir [5].

Aeroportların qorunmasının diqqət mərkəzində saxlanılan əsas sahələrindən biri perimetrin mühafizəsidir. Perimetrin mühafizəsi, aeroportun ətraf ərazisinin fiziki, texnoloji vasitələrlə fasiləsiz nəzarət və qorunmasını təmin edən mühüm təhlükəsizlik tədbiridir. Məhz bu səbəblərdən, aeroportların perimetr üzrə mühafizə kompleksinin hazırlanması xüsusi əhəmiyyət kəsb edir [6].

Məqalədə məqsəd, aeroportun perimetrində tətbiq edilən müasir sistemlərə qoyulan tələbləri araşdırmaqla mühafizə kompleksinin yaradılmasının optimal texniki şərtlərini müəyyənləşdirməkdən ibarətdir.

Müasir dövrdə beynəlxalq və regional təhlükəsizlik mühitində baş verən dəyişikliklər, o cümlədən terror aktlarının və təxribat xarakterli fəaliyyətlərin artması, yüksək risk daşıyan infrastruktur obyektlərinin, xüsusilə də aeroportların mühafizəsini və təhlükəsizliyini prioritet məsələyə çevirmişdir. Aeroportlar yalnız nəqliyyat və logistika baxımından deyil, həm də strateji əhəmiyyətə malik, ictimai həyatın fasiləsizliyini təmin edən obyektlər kimi qiymətləndirilir. Bu obyektlərdə təhlükəsizlik rejiminin pozulması insan tələfatına, ciddi iqtisadi itkilərə və dövlətin təhlükəsizliyinə qarşı mühüm təhdidlərin yaranmasına səbəb ola bilər. Buna görə də, aeroportların layihələndirilməsi zamanı beynəlxalq standartların və tövsiyə olunan təcrübələrin tələbləri nəzərə alınmalıdır [1, 7]. Terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının vurduğu zərəri minimuma endirmək üçün aeroportların layihələndirilməsinə aşağıdakı əsas elementlər daxil edilməlidir [8, s. 181-182]:

- ərazinin perimetr üzrə mühafizəsi;
- mülki aviasiya obyektlərinin fiziki mühafizəsi;
- girişə nəzarət tədbirləri;

-təhlükəsizlik zonalarına daxil olan bütün şəxslərin və onların əşyalarının təhlükəsizlik məqsədi ilə yoxlanılmasının təşkil edilməsi mümkünlüyü.

Ümumiyyətlə, aeroportun perimetr üzrə qorunması üçün kompleks yanaşma tələb edilir və aşağıdakı istiqamətlər üzrə spesifik tədbirlərin həyata keçirilməsi nəzərdə tutulur [9]:

-ərazinin perimetri üzrə fiziki maneələrin, videomüşahidə sistemlərinin, işıqlandırılma vasitələrinin və pozucuların aşkar edilməsi üçün müvafiq duyğaların quraşdırılması;

-şəxslərin və nəqliyyat vasitələrinin təhlükəsizlik zonalarına keçməsinə effektiv nəzarətin təşkil edilməsi;

-nəqliyyat vasitələrinin dayanacaq yerlərinin, yanacaq-sürtgü anbarlarının, aeronaviqasiya obyektlərinin, sərnişin və yük terminallarının fiziki və elektron vasitələrlə gücləndirilmiş şəkildə mühafizə edilməsi;

-terror və qanunsuz müdaxilə aktları zamanı operativ reaksiya imkanlarını artırmaq üçün hər bir aeroportun tədbirlər planının əvvəlcədən hazırlanması və mühafizə qrupunun mütəmadi olaraq təlimlərə cəlb edilməsi;

-aeroportun təhlükəsizliyinin beynəlxalq və milli tələblərə uyğunluğunu təmin etmək üçün müvafiq nəzarət tədbirlərinin həyata keçirilməsi və s.

Aeroportun ərazisini qanunsuz müdaxilə aktlarından qorumaq üçün nəzərdə tutulan təhlükəsizlik tədbirləri müvafiq milli orqan tərəfindən aparılan risklərin qiymətləndirilməsinə əsaslanmalıdır [4, s. 15-17]. Bunun üçün aeroportun perimetri üzrə mühafizə sistemi quraşdırılmalıdır [10]. Mühafizə sistemi ərazinin sərhədlərini müəyyən etməli, icazəsiz girişin qarşısını almalı, müdaxiləni aşkar edərək, pozucunu müəyyən müddət ləngitmək imkanlarına malik olmalıdır. Bu tələblər aeroportun mühafizə kompleksinin layihələndirilməsi zamanı nəzərə alınmalı və icazəsiz müdaxilənin qiymətləndirilmiş riskinə uyğun olmalıdır [1, 11].

Mühafizə sisteminin qorunma səviyyəsi quraşdırılan mühafizə çəpərinin materialından, hündürlüyündən, eləcə də sistemin keyfiyyətini və ya effektivliyini artırmaq üçün istifadə edilən əlavə təhlükəsizlik xüsusiyyətlərindən asılı olur. Mühafizə çəpəri tikanlı məftillərlə örtülməli, ərazi lazımı qaydada işıqlandırılmalı, mühafizə kompleksi spesifik xüsusiyyətlərə malik bir neçə alt sistemin inteqrasiyasından istifadə edilməklə hazırlanmalıdır [12].

Aeroportun perimetr üzrə mühafizə edilməsində işıqlandırma vasitələrinin effektivliyi təhlükəsizlik tədbirlərinin əsas elementlərindən biri hesab edilir. Ərazinin optimal işıqlandırılması həm təhlükəsizlik kameralarının aydın və keyfiyyətli görüntü təmin etməsinə, həm də pozucuların dərhal aşkar edilməsinə şərait yaradır. Ərazidə işıqlandırma zəif olduqda, videomüşahidə sistemlərinin effektivliyi azalır, qaranlıq sahələrdə pozucuların hərəkətlərini izləmək və hadisələrə operativ müdaxilə etmək çətinləşir [8, s. 184].

Təhlükəsizlik baxımından aeroportun işıqlandırılması adətən dörd əsas kateqoriyaya bölünür [13, 11-16]:

1) Davamlı işıqlandırılma. Ərazinin perimetri üzrə fasiləsiz olaraq, işıqlandırılma təşkil edilir. Bu, ərazini tam müşahidə altında saxlanmağa və potensial pozucuların gizlənməsinə şərait yaradan “kor nöqtələrin” sayını minimuma endirməyə imkan yaradır.

2) Ehtiyat işıqlandırılması. Aeroportun ərazisində şübhəli hallar aşkar edildikdə, avtomatik olaraq işə salınır.

3) Hərəkətli işıqlandırılma. Perimetr üzrə hərəkət edən potensial pozucuları izləməyə imkan yaradır.

4) Fövqəladə hallarda işıqlandırılma. Elektrik cərəyanının kəsilməsi və ya fəvqəladə hallar zamanı təhlükəsizlik sistemlərinin fasiləsiz işini təmin etmək üçün alternativ enerji mənbələri hesabına işə salınır.

İşıqlandırmanın effektiv olması üçün müəyyən texniki tələblərə əməl olunmalı və işıqlandırma vasitələrinin optimal şəkildə yerləşdirilməsinə diqqət yetirilməlidir [8, s. 184]. Məsələn, geniş ərazilərin eyni formada işıqlandırılmasını təmin etmək üçün işıqlandırma vasitələri 4,5 - 6 metr hündürlükdə yerləşdirilməlidir [11, 13, s. 20-21].

Pozucunun əraziyə asanlıqla keçməsinin qarşısını almaq üçün mühafizə çəpərinin hündürlüyü ən azı 2,44 m olmalıdır. Perimetrdən kənar ərazini müşahidə etmək üçün çəpərin konstruksiyasında daş, beton və s. kimi materiallardan istifadə etmək tövsiyə edilmir. Mühafizə çəpərinin təmir edilməsi və ya yararsız hala düşən hissələrinin dəyişdirilməsinin asanlığı nəzərə alınmalıdır [8, s. 184]. Mühafizə çəpərini aşmaq cəhdlərinin qarşısını almaq, onun quraşdırılmasını asanlaşdırmaq və əraziyə effektiv nəzarət etmək üçün mühafizə çəpəri mümkün qədər düz xətt üzrə çəkilməlidir. Buna görə də mühafizə çəpərinin istiqamətini dəyişdirmək üçün istifadə edilən döngələrin sayı minimuma endirilməlidir [11].

Yaxınlaşan pozucuların müşahidə edilməsi, eləcə də onların əraziyə keçmək cəhdlərinin qarşısının alınması üçün perimetr xəttinin hər iki tərəfinin ən azı 3 metrlik ərazisində işıq dirəkləri, yol nişanları, avtomobil, ağaclar və s. kimi köməkçi vasitələrin olması tövsiyə edilmir [8].

Perimetrin mühafizə sistemlərində daha geniş tətbiq edilən duyğacılar. Aeroportların perimetrinin mühafizə sistemlərində funksional imkanları, iş prinsipləri, üstünlük və çatışmazlıqları fərqli olan duyğacılar istifadə edilir. Belə duyğaclara misal olaraq, tutum, radiodalğalı, optik lifli, infraqırmızı şualı, vibrasiyaya həssas, ifrat yüksək tezlikli və s. duyğacıları göstərmək olar. Bu duyğacıların iş prinsipi müxtəlif fiziki hadisələrə əsaslandığı üçün onları quraşdırarkən mühafizə edilən obyektin relyefini, ətraf mühit təsirlərini, mühafizə çəpərinin növünü və pozucunun xüsusiyyətlərini nəzərə almaq vacibdir [2].

Bununla yanaşı, bu növ duyğacıların perimetr üzrə aeroportun ərazisində optimal şəkildə yerləşdirilməsi və digər təhlükəsizlik sistemləri ilə inteqrasiyası aviasiya təhlükəsizliyinin təkmilləşdirilməsi üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir [14]. Bütün bunları nəzərə alaraq, müasir dövrdə strateji obyektlərin perimetr mühafizə sistemlərində daha geniş tətbiq edilən duyğacıların, videomüşahidə və dron əleyhinə müdafiə sistemlərinin, eləcə də şəxslərin və avtomobillərin eyniləşdirilmə sistemlərinin funksional imkanlarına, iş prinsiplərinə, üstünlük və çatışmazlıqlarına diqqət yetirək.

İki avtogenetorlu diferensial tutum duyğacı. Bu duyğac, aeroportların perimetr sistemlərində effektiv və etibarlı işləyə bilən iki avtogenetorlu diferensial tutum duyğacıdır (şəkil 1).

Duyğac biri ölçü, digəri isə dayaq tezlikli iki avtogenetordan ibarətdir. Hər iki avtogenetorun girişinə həssas element birləşdirilmişdir. Çıxış siqnallarının fərqi faydalı siqnal kimi müqayisə edilərək ölçüldüyündən diferensial tutum duyğacı adlandırılmışdır. Mühafizə edilən ərazinin perimetri üzrə quraşdırılan həssas elementlər bir-birinə və yer səthinə paralel olaraq yerləşdirilir. Onların hər birinin maksimal uzunluğu 250 metrə qədər ola bilər [15].



Şəkil 1. Diferensial tutum duyğacı

İki avtogeneratorlu diferensial tutum duyğacının iş prinsipi, həssas elementlərə pozucu yaxınlaşdıqda yerə nəzərən tutumun dəyişməsinə əsaslanır. Pozucu müəyyən məsafəyə qədər həssas elementin istənilən birinə yaxınlaşdıqda və ya ona toxunduqda, habelə həssas element kəsildikdə və ya onun izolyasiya edilməmiş hissəsi yerə toxunduqda həyəcan signalı yaranır. Bir nəfər pozucunun yaxınlaşması zamanı həyəcan signalının yaranması üçün təcrübi olaraq yoxlanılmış həssaslıq məsafəsi 3 m-dən çox olur [15, 16].

Bu duyğacın quraşdırıldığı aeroportun ərazisində, ideal və illik iqlim şəraitində (qar, yağış, toz, duman və s.) baş verə bilən qanunsuz müdaxil aktlarının aşkarlanması ehtimalları müvafiq olaraq, $P_{id.s} \approx 0,999$ və $P_{iq.s} \approx 0,958$ -ə bərabər olur [7].

Ümumiyyətlə, perimetr mühafizə sistemlərində quraşdırılan iki avtogeneratorlu diferensial tutum duyğacının avtogeneratorlarının elektrik sxemlərində tezlikmüəyyənedicisi qismində rəqəmsal məntiq elementlərindən istifadə edildiyi üçün bu duyğac aşağıdakı üstünlüklərə malikdir [17]:

- duyğacın həssaslıq məsafəsi çoxalır;
- sxemin sadələşdirilməsi hesabına duyğacın etibarlılığı artır.

Qeyd edilən üstünlüklərlə yanaşı, bu duyğacın bəzi çatışmazlıqları da vardır. Belə ki, həssas elementlər yerə paralel olaraq perimetr üzrə əks istiqamətlərdə quraşdırıldıqda, onların hər birinə həmin anda eyni çəkili pozucular yaxınlaşarsa, tezliklər fərqlinin sıfıra bərabər olması hesabına həyəcan signalının yaranması ehtimalı kəskin dərəcədə azalar. Digər çatışmazlığı isə duyğacın gün ərzində bir və ya iki dəfə yanlış həyəcan signalı verməsidir.

Vibrasiyalı-seysmik duyğac. Aeroport ərazisinin effektiv qorunmasında əsas tələblərdən biri pozucuların perimetr üzrə daha uzaq məsafələrdən aşkar edilməsidir. Bunun üçün maskalanmış şəkildə quraşdırıla bilən və pozucuların diqqətini cəlb etmədən, onların saxlanılmasına imkan yaradan mühafizə sistemlərindən istifadə edilməlidir. Bu funksiyanı yerinə yetirmək üçün vibrasiyalı-seysmik duyğaclardan ibarət mühafizə sistemləri quraşdırılır [18, 19].

Vibrasiyalı-seysmik duyğaclər, sürət duyğacı və akselerometrədən istifadə edərək yerin vibrasiyasını qeydə almaq üçün istifadə olunur. Əvvəllər yalnız zəlzələləri aşkar etmək üçün işlədilirdisə, hal-hazırda təhlükəsizlik sahəsində tətbiq edilən vacib duyğaclardan biri hesab edilir. Təhlükəsizlik məqsədi ilə tətbiq edilən bu duyğaclər, ərazidə hərəkət zamanı yaranan yerüstü vibrasiya signallarını qeydə alaraq, mühafizə çəpərinə yaxınlaşan pozucuları lazımi uzaqlıqda aşkar etməyə imkan yaradır [20].

Bu duyğaclərin həssas elementləri torpağın dərinliklərində quraşdırıldığı üçün onlar həm maskalanır, həm də vandal hərəkətlərinə məruz qalmır. Perimetrin mühafizəsində bu duyğaclərin iki növündən istifadə edilir: pyezoelektrik və geofon [2].

Geofon duyğac, yerdə yaranan vibrasiyalrı gərginlik signalına çevirir. Pyezoelektrik duyğac isə təzyiq dəyişikliklərini qeydə alır. Yalnız yerə perpendikulyar olan pyezoelektrik duyğac, üçoxlu geofon duyğaca nəzərən daha az informasiya emal edib, ötürmək imkanına malikdir. Geofonlar fiziki ölçülərinə görə pyezoelektrik duyğaclərdən əhəmiyyətli dərəcədə böyükdür. Bununla yanaşı,

geofonun qiyməti pyezoelektrik duyğacın qiymətindən təxminən 100 dəfə bahadır. Pyezoelektrik duyğac daha sadə quruluşa, yüksək həssaslığa və geniş tezlik diapazonuna malikdir.

Pyezoelektrik duyğacın bütün bu üstünlüklərinə baxmayaraq, şəxslərin hərəkəti zamanı yaranan vibrasiyalarla, atmosferdə yarana bilən əlavə küylər fərqləndirilə bilmədiyinə görə bu duyğacın səhv işə düşmələri daha çox olduğundan, onların bu sahədə tətbiqinə maraq azalmışdır [21, 22].

Beləliklə, geofon duyğacının qeyd edilən üstünlükləri nəzərə alınaraq, aeroportun perimetrində SmartSolo 3C geofon duyğacından daha çox istifadə edilir (şəkil 2). Bu duyğac vasitəsilə aeroportun perimetrinin ətrafında pozucuların hərəkəti zamanı yaranan yerüstü vibrasiyalar yüksək dəqiqliklə qeydə alınır və pozucu operativ şəkildə aşkar edilə bilər.



Şəkil 2. SmartSolo 3C geofon duyğacı

SmartSolo 3C geofon duyğacı əsasən aşağıdakı komponentlərdən ibarətdir [22, 23]:

- üç koordinat oxu üzrə vibrasiya siqnallarını qeydə alan 5 Hz-lik duyğac bloku;
- qeydə alınan vibrasiya siqnallarının saxlanması üçün daxili yaddaş qurğusu;
- vibrasiyaya səbəb olan pozucunun yerini müəyyənləşdirmək üçün GPS sistemi;
- qida bloku;
- siqnalların emalı və ötürülməsi üçün integrasiya olunmuş mikronəzarətçi blok.

SmartSolo 3C geofon duyğacının iş prinsipi, yer səthində yaranan mexaniki dalğaların (vibrasiyaların) duyğac bloku vasitəsilə qeydə alınmasına əsaslanır. Vibrasiyalar, müvafiq oxlar üzrə elektrik siqnallarına çevrilir və sistem daxilində emal edilərək vibrasiyanın mənbəyi, gücü və istiqaməti müəyyən olunur. Perimetr üzrə torpağa basdırılan SmartSolo 3C geofon duyğacları həm insan hərəkəti, həm də nəqliyyat vasitələrinin yaratdığı seysmik siqnalları qeydə alaraq nəzarət edilən əraziyə qanunsuz daxilolmaları aşkar edə bilər. Hərəkət edən pozucuların aşkar edilməsi zamanı seysmik dalğaların amplitud və tezlik fərqi təhlil edilir. Bu da pozucunun yerləşdiyi ərazinin koordinatlarının təyin edilməsinə şərait yaradır.

Yüngül çəkili, portativ və kabelsiz SmartSolo 3C geofon duyğaclarından ibarət mühafizə sisteminin ərazidə quraşdırılması çox sadədir. Sistem, ərazidə müstəqil mühafizə sistemi kimi işləmək imkanına malikdir. Amma ehtiyac duyulduqda, bu sistemi perimetrin mühafizə-xəbərdarlıq sisteminə integrasiya edərək, vahid mərkəzdən idarə etmək mümkündür [23].

Ümumiyyətlə, SmartSolo 3C geofon duyğacının aşağıdakı əsas üstünlükləri vardır:

- üç istiqamət (x, y, z) üzrə vibrasiyaların qeydə alınmasında yüksək dəqiqliyin olması;
- yüngül və portativ quruluşa malik olması;
- ərazidə asan quraşdırılması;
- kabelsiz və enerjiyə qənaətli olması;
- daxili yaddaşla vibrasiya siqnallarının uzunmüddətli saxlanması;
- müstəqil işləməsi və s.

Qeyd edilən üstünlüklərlə yanaşı, SmartSolo 3C geofon duyğacının aşağıdakı çatışmazlıqları da vardır [22, 23]:

-torpağın tərkibinin, rütubətin və temperaturun seysmik siqnalların yayılma xüsusiyyətlərinə təsiri ilə əlaqədar duyğacın yanlış işə düşməsi;

-vibrasiya siqnallarının keyfiyyətinin torpağın tərkibindən və duyğacın quraşdırılma yerindən asılı olaraq fərqlənməsi;

-sistemi təşkil edən geofon duyğacılarının ayrı-ayrılıqda qeydə aldığı vibrasiya siqnallarının emalı zamanı gecikmələrin olması ilə əlaqədar pozucunun olduğu ərazinin müəyyən edilməsində xətlərin yaranması;

-pozucunun insan və ya digər canlı olduğunun fərqləndirilməməsi və s.

Beləliklə, aparılan təhlillərə əsasən demək olar ki, SmartSolo 3C vibrasiyalı-seysmik duyğacı, strateji əhəmiyyətli obyektlərin, xüsusilə də aeroportların ərazisinin perimetr üzrə qorunmasında effektiv mühafizə sistemidir. Onun geniş ərazilərdə tətbiq edilməsi ilə pozucuların vaxtında aşkarlanmasına və onlara qarşı operativ şəkildə tədbirlərin görülməsinə imkan yaranır.

Videomüşahidə sistemi. Aeroportun videomüşahidə sistemi perimetr mühafizə sisteminin əsas komponentlərindən biridir və real vaxt ərzində ərazinin müşahidəsi üçün istifadə edilir. Müasir videomüşahidə sistemləri pozucuları və onların potensial hərəkətlərini avtomatik aşkar edərək, mühafizə qrupuna dərhal xəbərdarlıq siqnalı ötürmək imkanına malikdir. Bu sistemlər ərazini gecə-gündüz fasiləsiz olaraq nəzarətdə saxlamaqla bütün təsvirlərin arxivləşdirilməsini yerinə yetirir. Bu təsvirlər, mühafizə qrupunun və ya videomüşahidə operatorunun nəzarətindən yayınmış halların baş verməsi səbəblərini sonradan araşdırmaq və pozucuları cəzalandırmaq üçün istifadə oluna bilər [8, s. 183].

Videomüşahidə sistemində istifadə olunan PTZ (pan, tilt and zoom) kameraları vasitəsilə aeroportun perimetrinin ətrafında və ona bitişik ərazilərdə mövcud ola bilən “kor nöqtələrin” sayını minimuma endirmək mümkündür. Bu kameralar 360° bucaq altında dönərək, pozucunun hərəkətini izləməyə və onun təsvirini böyütməyə imkan yaradır [23]. Vandal hərəkətlərinə və atmosfer təsirlərinə qarşı davamlı olmaları üçün PTZ kameraları xüsusi qoruyucu səthlə örtülmüşdür.

Son zamanlar videomüşahidə sistemində infraqırmızı IP (Internet Protocol) kameralarından istifadə edilir. Bu kameralarla gecə vaxtı 30 metrə qədər məsafədə görüntü əldə etmək mümkündür.

Bütün bunlarla yanaşı, müşahidə edilən ərazidə pozucunun hərəkəti zamanı yaranan vibrasiyasını qeydə almaq üçün videomüşahidə sistemində Lazer Doppler Vibrometer (LDV) cihazı quraşdırılır. LDV-nin üstünlüyü ondan ibarətdir ki, bu videomüşahidə sistemi vasitəsilə pozucular həm vizual, həm də qeydə alınmış vibrasiya əsasında aşkar edilə bilər.

Bir sıra sahələrdə olduğu kimi, videomüşahidə sistemində də süni intellektin tətbiqinə rast gəlinir. Bu texnologiya əsasında “ağıllı” kameralar hazırlanıb və geniş şəkildə istifadə edilir. Qeyd edilən kameralar vasitəsilə müşahidə edilən ərazidə pozucuların eyniləşdirilməsini həyata keçirmək mümkündür. Bu halda, operator əraziyə daim nəzarət etmək öhdəliyindən azad olunur və hadisə zamanı operativ qərarlar qəbul etmək imkanı əldə edir.

Pozucunun hərəkətlərini izləmək üçün digər növ kameralarda hərəkət duyğacılarından istifadə edildikdə, yaxınlıqdan uçan quşlara və ya yırgalanan ağac budaqlarına görə yanlış həyəcan siqnallarının sayı çox olur. Süni intellekt texnologiyasına əsaslanan “ağıllı” kameralar isə bu əhəmiyyətsiz hallara reaksiya vermədiyi üçün pozucunun hərəkətlərini dəqiqliklə aşkarlamaq imkanına malikdir. Bu kameralar, brend loqolarını tanımaqla avtomobilin növünü (kupe, sedan və s.), o cümlədən markasını və modelini müəyyən edə bilər. Perimetr üzrə quraşdırılan “ağıllı” kameralar ərazidə baş verən yanlışları tez bir zamanda aşkar edir [25].

Videomüşahidə sisteminin əsas komponentləri aşağıdakılardan ibarətdir [24, 25]:

- kameralar;
- linzalar;
- korpus və dayaqqlar;
- monitorlar;
- informasiyanın ötürülməsi üçün avadanlıqlar;
- rəqəmsal videoregistratorlar;

- təsvirlərin arxivləşdirilməsi üçün avadanlıqlar;
- video idarəetmə sistemləri və s.

Bu əsas komponentlərdən başqa, ərazinin xüsusiyyətlərinə və əlavə tələblərə uyğun digər avadanlıqların da videomüşahidə sisteminin tərkibinə inteqrasiya etmək mümkündür [12, 26].

Videomüşahidə sistemi, aeroportun perimetri üzrə ərazini (çəpərin hər iki tərəfini) müşahidə edərək, yaxınlaşan pozucunu və digər vasitələri aşkar etmək, eləcə də bütün təsvirləri arxivləşdirmək üçün nəzərdə tutulmuşdur. Bu sistemdə istifadə edilən kameraların radar, video və termal olmaqla üç növü vardır. Radar kameralarından istifadə etməklə təsvirlərin uzaq məsafələrə (məftilsiz) ötürmək mümkündür. Video kameralar əsasən gündüz saatlarında ərazini daha effektiv müşahidə etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur. Termal kameralarla gecə-gündüz ətraf mühiti müşahidə etməklə canlıların bədən hərəkətlərinə görə hərəkətlərini izləmək olur [27, 28].

Ümumiyyətlə, aeroportların perimetrlərində fərqli xüsusiyyətlərə malik müxtəlif növ videomüşahidə sistemlərindən istifadə edilir. Bunlardan biri AXIS Perimeter Defender videomüşahidə sistemidir. Sistem aeroportların yerləşdiyi ərazinin landşaftına uyğunlaşdırıla bilər. Bu sistem perimetrin yaxınlığındakı ərazini gecə-gündüz müşahidə etməyə imkan yaradır və yanlış həyəcan signalının sayını minimuma endirərək, əhəmiyyətsiz hallara görə hadisə yerinə getmək ehtiyacını aradan qaldırır.

Geniş texniki imkanlara malik olan AXIS Perimeter Defender videomüşahidə sistemi bir neçə termal kamera ilə təchiz oluna bilər. Bununla da eyni vaxtda müxtəlif yerlərdə baş verən pozuntuları izləmək və qeydə almaq mümkündür. Sistemə termal kameralarla yanaşı, vandal hərəkətlərinə və atmosfer təsirlərinə qarşı davamlı olan PTZ kameraları və gecə vaxtı effektiv görüntü əldə edilməsi mümkün olan infraqırmızı IP kameralarının da quraşdırılması nəzərdə tutulmuşdur. Bu videomüşahidə sistemi, üfüqi müstəvidə 120-150° bucaq altında 50 metrə qədər məsafədə gecə-gündüz istənilən hərəkəti izləmək imkanına malikdir [29].

LiDAR (Light Detection and Ranging) duyğacı. Bu duyğac vasitəsilə aeroportun perimetrinə və geniş ərazisinə gecə və gündüz nəzarət etməklə, pozucuların yüksək dəqiqliklə aşkar edilməsinə imkan yaradılır. LiDAR duyğacı əsasən aşağıdakı komponentlərdən ibarət olur [30]:

- səpilən və qəbul edilən şüa arasındakı vaxt intervalının ölçülməsi üçün lazer diapazonunu təyin edən cihaz;
- obyektin x, y, z koordinatları üzrə üçölçülü təsvirini müəyyən etmək üçün GPS sistemi;
- ərazidəki pozucunun hərəkət sürətini və istiqamətini təyin etmək üçün inersial naviqasiya sistemi;
- təsvirlərin arxivləşdirilməsi üçün yaddaş qurğusu;
- rəqəmsal kameralar və ya termik cihazlar və s.

Duyğacın lazer şüalarından istifadə edərək, ərazinin üçölçülü təsvirini hazırlamaqla, qanunsuz müdaxilələri və şübhəli halları real vaxt rejimində aşkar etmək mümkündür. Hətta insanlar və digər canlılar ərazidə yerləşən obyektlərdən ayırd edilərək, onların hərəkətləri daim izlənilə bilər. Aeroportun perimetrinin və ərazisinin effektiv izlənilməsi üçün duyğacın yerləşdirilməsinə diqqət yetirilməlidir. Bunun üçün duyğacın nisbətən yüksək yerlərdə və görüntü məhdudiyyəti olmayan hissələrdə yerləşdirilməsi tövsiyə olunur. Belə olduqda, minimal sayda duyğac ilə daha geniş ərazini nəzarətdə saxlamaq mümkündür [30].

LiDAR duyğacının iş prinsipi, şüa ötürücüsü vasitəsilə lazer şüalarının ətraf ərazilərə səpilməsi, bu şüaların obyektlərdən əks edilərək şüa qəbuledicisinə qayıtması və müvafiq emal prosesindən keçərək həmin ərazinin üçölçülü xəritəsinin çəkilməsinə əsaslanır.

LiDAR duyğacından nüfuz edilən lazer şüalarının işıq sürəti ilə yayıldığını nəzərə alaraq, obyektə qədər məsafəni - S_{om} (1) ifadəsi ilə hesablamaq olar [31]:

$$S_{om} = \frac{t_{sm} \times C}{2} \quad (1)$$

Burada, t_{sm} - şüalanma müddəti, C - işıq sürətidir.

Ötürülən və qəbul edilən işıq şüaları arasındakı vaxt intervalını ölçməklə, eləcə də qayıdan şüanın obyektədən əksolunma bucağını təyin etməklə, pozucunun koordinatları və ərazinin üçölçülü təsviri yaranır.

Duyğac əraziyə müəyyən kabellərdən istifadə edilmədən quraşdırıldığından, onun etibarlılığı artmış olur. Lazım gələrsə, bu duyğac, aeroportun ümumi videomüşahidə sisteminə inteqrasiya edilə bilər. Bəzi hallarda, LiDAR duyğacı vasitəsilə əldə edilən təsvirləri real iş rejimində lazımı videomüşahidə sistemlərinə ötürmək olar. Belə olduğu halda, istənilən məntəqədən ərazini nəzarətdə saxlamaq və qanunsuz müdaxilə aktı zamanı dərhal həmin əraziyə əlavə qüvvə göndərmək mümkündür [30, 31].

LiDAR duyğacının üstünlükləri, təsvirlərin avtomatik arxivləşdirilməsi, əldə edilən məlumatların məxfiliyinin qorunması, yanlış həyəcan signalının yaranması ehtimalının nisbətən az olması, geniş ərazilərə nəzarət etmək imkanına malik olması, fərqli landşaftlara malik ərazilərdə də təsvirlərin yaranması mümkünüyü və s.

Bu üstünlüklərə baxmayaraq, LiDAR duyğacının intensiv ölçmə dəqiqliyinə bir neçə amil təsir edir. (2) ifadəsi ilə bu təsirləri təsvir etmək mümkündür [30, 31]:

$$P_q = \frac{P_o D_q^2 \sigma}{4\pi R^4 \beta_t^2} \quad (2)$$

Burada, P_q - qəbuledicinin gücü; P_o - ötürücünün gücü; D_q - qəbuledici diafraqma; R - obyektə qədər məsafə; σ - düşmə bucağından asılı olan geri səpilmə kəsiyi.

(2) ifadəsinə əsasən, təsir edən amilləri nəzərə alaraq, LiDAR duyğacının çatışmazlıqlarını dörd əsas kateqoriyaya bölmək olar [31]:

1) Ətraf mühit təsirləri. Görünən işıq diapazonunda duyğacın səpdiyi lazer şüaları toz, buxar, duman, bulud və digər atmosfer təsirlərinə (rütubət, temperatur, təzyiq) məruz qala bilər. Bu, yaş səthi olan cisimlərdən əks olunan şüaların daha az intensivliyə malik olması ilə bağlıdır. Lakin obyektin səthi yüksək əks etdirmə əmsalına malik olarsa, bu zaman əks olunan şüalar daha çox enerjiyə malik olduğu üçün onların intensivliyi də yüksək olur.

2) Obyektin səthinin xüsusiyyətləri. Şüşə, güzgü və ərazidə olan su hövzələri kimi yüksək əksətdirici səthlərdən lazer şüaları müxtəlif bucaq altında əks olunduğu üçün ərazidəki həmin obyektlərin təsvirini yüksək dəqiqliklə müəyyən etmək olmur. Eyni zamanda, yüksək əksətdirici səthlərə malik olan obyektlər duyğacdən uzaq məsafələrdə yerləşərsə, bu obyektlər daha böyük həcmdə görünür.

3) Aşkaretmə xətalı. Diyafraqmanın ölçüsü, lazer şüasının dalğa uzunluğu və şüanın emissiya gücü qəbuledilən şüanın intensivliyinə təsir göstərə bilər. Bu zaman obyektlərin ölçülərində və təsvirlərdə xətalər yaranar.

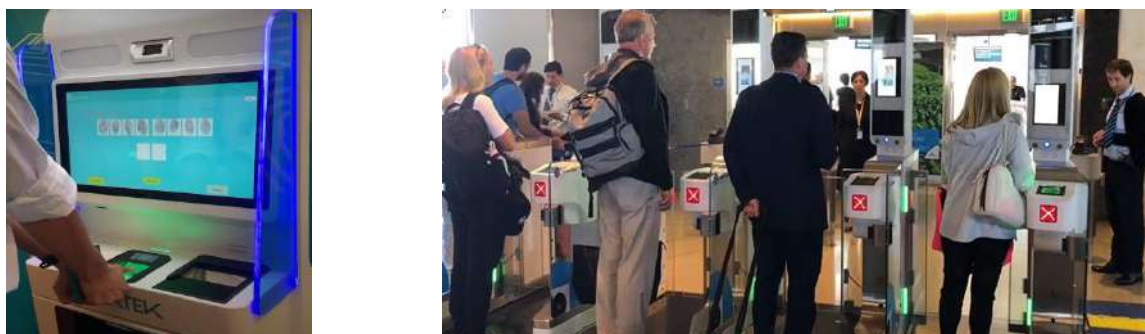
4) Geometrik ölçmələr. Duyğacla obyekt arasındakı məsafə və şüanın səpilmə bucağı qəbuledilən şüanın intensivliyinə təsir göstərə bilər. Böyük əraziyə nəzarət edərkən, lazer şüaları geniş sahələrə səpələnir və atmosfer təsirlərinə daha çox məruz qalır. Bu da obyektin üçölçülü koordinatlarına uyğun məsafənin düzgün müəyyən edilməsinə mane olur.

Biometrik eyniləşdirmə sistemi. Aeroportun ərazisinə daxil olan şəxslərin şəxsiyyətinin eyniləşdirilməsi aviasiya təhlükəsizliyi nöqtəyi-nəzərindən ən vacib məsələlərdən biri hesab edilir [8, s. 186-187]. Eyniləşdirilmə prosesi biometrik sistemlər vasitəsilə yerinə yetirilir (şəkil 3) [32, 33].

Biometrik sistemlərin iş prinsipi, insanın həyatı boyu dəyişməyən fərdi xüsusiyyətlərinin eyniləşdirilməsinə əsaslanır. İnsanın iki növ fərdi xüsusiyyəti vardır [33]:

1) İnsanın idarə oluna bilməyən fərdi xüsusiyyətləri (məsələn, sifət, barmaq izi, gözün qüzehli qişası (əlvan təbəqəsi) və s.;

2) İnsanın idarə oluna bilən davranış xüsusiyyətləri (yəni əl yazısı və ya imza nümunəsi).



Şəkil 3. Biometrik eyniləşdirmə sistemi və onun məntəqədə quraşdırılması

Hal-hazırda ən çox yayılmış biometrik sistemlər-barmaq izinin, gözün qüzehi qışasının, uzun və səsən eyniləşdirilməsi texnologiyası ilə işləyir. Sistem aşağıda sadalanan dörd əsas komponentdən ibarətdir [33]:

- 1) “Verilənlər bazası modulu” - istifadəçilərin şəxsi xüsusiyyətlərinin verilənlər bazasına əvvəlcədən daxil etmək üçün istifadə olunur;
- 2) “Duyğac modulu” - istifadəçinin fərdi xüsusiyyətlərini rəqəmsal şəkildə qeydə alaraq, onları kompüterə daxil edir;
- 3) “Xüsusiyyətlərin əksedilməsi modulu” - daxil edilən xüsusiyyətlərin emalını yerinə yetirir;
- 4) “Uyğunlaşdırma və qərar qəbul etmə modulu” - istifadəçinin fərdi xüsusiyyətlərini verilənlər bazasında olanlarla müqayisə edərək eyniləşdirmə aparır;

Bütün digər texnologiyalar kimi, biometrik eyniləşdirmə sisteminin də özünəməxsus üstünlük və çatışmazlıqları vardır [32, 34]. Biometrik sistemlərin geniş şəkildə tətbiq olunmasının əsas səbəbi istifadəçi ilə autentifikasiya mexanizmlərinin olmasının rahatlığıdır. Çünki insanın fərdi xüsusiyyətlərinin bir yerdə unudularaq özü ilə gətirməməsi və ya kənar şəxslərin əraziyə qanunsuz daxil olması üçün onlardan istifadə etməsi mümkün olmur. Sistemlərə daxil olmaq üçün istifadə edilən parollardan fərqli olaraq, biometrik sistemlərin məlumat bazasına daxil edilmiş insanın fərdi xüsusiyyətlərini mütəmadi olaraq yenilənməyə ehtiyac duyulmur.

Biometrik eyniləşdirmə sisteminin çatışmazlıqları [32, 33]:

- 1) Bəzi insanlar hələ də barmaq izlərinin autentifikasiyaya tərəddüd edirlər. Çünki bu prosedur əvvəllər cinayətkarların aşkar edilməsi üçün istifadə edilirdi.
- 2) Digərləri, gözlər üçün zərərli hesab etdikləri işığa məruz qalması səbəbindən gözün qüzehi qışasına əsaslanan tanınma prosedurundan narahat olurlar.
- 3) Üz tanıma sistemlərindən istifadə etdikdə, saqqal saxlamış insanların, üzləri şişmiş hamilə qadınların və ya plastik əməliyyat etdirmiş şəxslərin eyniləşdirilməsində çətinliklər yarana bilər.
- 4) Şəxslər boğaz ağrısı və ya səslərinin müvəqqəti batması kimi xəstəliklərdən əziyyət çəkdiyi zaman səs tanıma sistemi vasitəsilə effektiv eyniləşdirilmə aparıla bilməz.

Avtomatik dövlət nömrə nişanının tanınması (ADNNT) sistemi. Bu sistem vasitəsilə aeroportun nəzarət buraxılış məntəqələrindən əraziyə daxil olan (və ya çıxan) və perimetrin yaxınlığında hərəkət edən avtomobillərin dövlət nömrə nişanlarının eyniləşdirilməsi yerinə yetirilir. Sistem bütün atmosfer şəraitində gecə-gündüz yüksək dəqiqliklə aşkar etmə imkanlarına malikdir. ADNNT sistemində, dövlət nömrə nişanları olan nəqliyyat vasitələrini aşkar etmək üçün təsvirləri effektiv şəkildə emal edən süni intellekt proqramından istifadə edilir (şəkil 4) [34].

ADNNT sisteminin iş prinsipi üç mərhələdən ibarətdir [34, 35]:

1. Qeydə alınan təsvirə uyğun avtomobilin növünün dəqiqləşdirilməsi;
2. Dövlət nömrə nişanının yerinin müəyyənləşdirilməsi;
3. Nömrənin oxunaraq, bazadakı məlumatlarla müqayisə olunması və avtomatik olaraq müvafiq qərarın qəbul edilməsi.



Şəkil 4. Avtomatik dövlət nömrə nişanının tanınması sistemi

Birinci mərhələdə, ADNNT sisteminə MobileNet, InceptionV3, ResNet50 və Convolutional Neural Network (CNN) kimi müxtəlif texnologiyalardan birinin tətbiq edilməsi ilə avtomobilin növünün dəqiqləşdirilməsi yerinə yetirilə bilər. Digərləri ilə müqayisədə CNN texnologiyası sadə, effektiv və operativ olduğuna görə daha çox fərqlənir. CNN texnologiyası vasitəsilə avtomobilin növünün dəqiqləşdirilməsi yüksək dəqiqliklə həyata keçirilir. Bu texnologiyanın qeydə aldığı təsvirlərin ilkin emalı effektivliyin əldə edilməsində mühüm rol oynayır. Bu mərhələdə, təsvirin əvvəlcə ölçüləri böyüdülmür və filtrləmə cihazı ilə kənar təsirlər aradan qaldırılır. Bununla yanaşı, dumanlı və ya zəif işıqlı şəraitdə qeydə alınmış təsvirlərdə effektivliyi artırmaq üçün müvafiq alqoritmlərdən istifadə edilə bilər. İkinci mərhələdə, avtomobilin dövlət nömrə nişanı ətraf mühitdən “ayrılır” və yalnız nömrə nişanında olan simvollar ayrı-ayrı seqmentlərə bölünür. Bu seqmentləşdirmə düzgün aparılmazsa, üçüncü (eyniləşdirilmə) mərhələdə ciddi xətlər baş verə bilər. Eyniləşdirilməyə təsir edən mühüm amillər, nömrə nişanında olan simvolların kiçik ölçüdə olması və bəzən də aşağı keyfiyyətli təsvirin qeydə alınmasıdır. Eyniləşdirilmə prosesindən sonra dərhal avtomobilin əraziyə daxil olub-olmaması ilə bağlı müvafiq qərar qəbul edilir və bütün təsvirlər arxivləşdirilir [35].

Avtomobilin aeroportun ərazisinə daxil olmasına icazəsi olarsa, nəzarət buraxılış məntəqələrində quraşdırılmış şlaqbaum avtomatik olaraq açılır. Əgər dövlət nömrə nişanı eyniləşdirilən həmin avtomobilin aeroportun ərazisinə daxil olmasına icazəsi yoxdursa və ya müvafiq dövlət qurumları tərəfindən axtarısa verilibsə, bu zaman avtomatik olaraq müvafiq xəbərdaredici siqnallarla mühafizə qrupunun əməkdaşları məlumatlandırılır və lazımi tədbirlər görülür.

Dron əleyhinə müdafiə sistemi (Drone Guard). Preventiv tədbirlərə baxmayaraq, aeroportlara qarşı yönəldilən yeni hədələrlə terror və qanunsuz müdaxilə aktları baş verə bilər (şəkil 5). Bunlardan biri dron hədəsidir ki, hava gəmiləri ilə onların toqquşma riski və aeroport ərazisinə keçməklə infrastrukturun dağıdılması ümumilikdə, kütləvi insan tələfatına və böyük həcmdə maddi itkilərə səbəb olur [36].



Şəkil 5. Dron əleyhinə müdafiə sistemi

Dron hədəsinin sürətlə genişlənməsi pilotsuz uçan aparatların təhlükəsiz istismar qaydalarından kənara çıxaraq, onları terror və qanunsuz müdaxilə aktlarında istifadə edilən təhlükəli vasitələrə çevirdi.

Belə olan halda, aeroportların təhlükəsizliyi üçün dron əleyhinə müdafiə sisteminin tətbiq edilməsinə zərurət yaranmışdır. Hal-hazırda, bu müdafiə sistemlərinin əksəriyyəti zərərli dronların məhv edilməsinə nail olmaq üçün müvafiq komponentlərlə təchiz edilmişdir. Amma mülki aviasiyada bu cür sistemlərin quraşdırılması təhlükə riskini artırmış olur. Çünki bu sistemlərdən istifadə edərək silahlandırılmış dronun aeroport ərazisində məhv edilməsi zamanı partlayıcı vasitələr aeroportun strateji əhəmiyyət kəsb edən obyektlərinin sıradan çıxmasına səbəb ola bilər [1, 37]. Bunu nəzərə alaraq, silahlandırılmış dronların məhv edilməsi yox, onların müvafiq üsullarla “canlı” formada təhlükəsiz ərazilərə endirilməsinə ehtiyac duyulur.

Dron əleyhinə müdafiə sisteminin iş prinsipi, radar və elektrooptik texnologiyalara əsaslanır. O, aşağı hündürlükdə və kiçik sürətlərlə uçan hədəfləri aşkar etmək və zərərsizləşdirmək imkanlarına malikdir. Sistem həm dronların məhv edilməsi, həm də onların “canlı” olaraq endirilməsi üçün istifadə edilə bilər. Təkmilləşdirilmiş bu sistem, fırlanan radar, kiçik elektro-optik qüllə və asan daşına bilən jammer (siqnalın tezliyini dəyişən) kimi üç əsas avadanlıqdan ibarətdir [37].

Sistemin fırlanan radar avadanlığı vasitəsilə ərazinin hava məkanını 360° bucaq altında və eyni vaxta 200-ə yaxın hədəfi tam nəzarətdə saxlamaq mümkündür. Onun 3D fırlanan radarları (ELM-2026D, ELM-2026B və ELM-2026BF) müvafiq olaraq, yaxın (10 km), orta (15 km) və uzaq (20 km) məsafələrdə hədəfləri aşkar edə bilər. Kiçik elektro-optik qüllə vasitəsilə aşkar edilmiş hədəflərin eyniləşdirilməsi və izlənilməsi yerinə yetirilir. Jammer avadanlığının funksiyası eyni vaxtda 10-a yaxın hədəfin GPS-ini bloklamaq, aşkar edilmiş dronların idarəetmə və rabitə siqnallarına təsir edərək, onların idarəedilməsini ələ keçirməkdir [1, 37].

Deməli, dron əleyhinə müdafiə sistemini tətbiq etməklə, hava məkanından yönələn qanunsuz müdaxilələrin qarşısını almaq, bununla da aeroportun mühafizəsini təmin etmək mümkündür. Odur ki, bu sistemlərin bütün aeroportlarda tətbiq edilməsi zəruri hesab edilir.

Beləliklə, müasir sistemlərin tətbiqinə qoyulan tələblərə və onların xarakterik xüsusiyyətlərinin təhlilinə əsasən qeyd etmək olar ki, aeroportun perimetrində aşağıdakı optimal texniki şərtlərə malik mühafizə kompleksinin hazırlanması məqsədəuyğundur:

- 1) Aeroportun preventiv fəaliyyət zamanı və fəvqəladə hallarda effektiv vasitələrlə işıqlandırılması;
- 2) Mühafizə çəpərinin hündürlüyünün 2,44 m-dən çox olması;
- 3) Perimetr ətrafı ərazinin hər iki tərəfində ən azı 3 m məsafədə pozucunun gizlənməsinə şərait yaradan vasitələrin aradan qaldırılması;
- 4) İllik iqlim şəraitində baş verə bilən qanunsuz müdaxilə aktlarının aşkarlanması ehtimalının çox olması;
- 5) İstifadə edilən duyğacaların daha böyük etibarlılıq göstərilərinə malik olması;
- 6) Duyğacaların lazımı şəkildə maskalanması və lağımatmanın qarşısının alınması;
- 7) Ehtiyac duyulan ərazilərdə pozucuların aşkar edilməsi məsafəsinin artırılması;
- 8) Mühafizə kompleksini təşkil edən sistemlərin asan quraşdırılması və təmirə yararlı olması;
- 9) Qanunsuz müdaxilə aktları ilə əlaqədar məlumatların daha uzaq məsafələrə ötürülməsi;
- 10) Ərazinin gecə-gündüz keyfiyyətli şəkildə izlənilməsi;
- 11) Ərazinin yaxınlığında hərəkət edən pozucuların insan və ya digər canlı olmasının müəyyən edilməsi;
- 12) Aeroportun ərazisinə daxil olan şəxslərin və nəqliyyat vasitələrinin eyniləşdirilməsi;
- 13) Hava məkanından istifadə edərək aeroportun ərazisinə yönələn müdaxilələrin qarşısının alınması;
- 14) Ərazidə baş verən şübhəli halların təsvirlərinin müəyyənləşdirilməsi və bütün növ hərəkətlərin avtomatik olaraq arxivləşdirilməsi və s.

Nəticə

Göründüyü kimi, aviasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsinin əsas istiqamətlərindən biri aeroportların perimetr üzrə qorunması zəruriliyidir. Bunun üçün Beynəlxalq Mülki Aviasiya Təşkilatı

tərəfindən tətbiqi vacib olan çox saylı tələblər qoyulmuşdur. Tələblər, aeroportların effektiv mühafizə kompleksinin yaradılmasını şərtləndirir.

Mühafizə kompleksinin yaradılması üçün optimal texniki şərtlər müəyyənləşdirilmiş və onu təşkil edən sistemlərin iş prinsipləri, funksional imkanları üstünlük və çatışmazlıqları təhlil edilmişdir. Təhlillər nəticəsində məlum olmuşdur ki, mühafizə kompleksinin yuxarıda qeyd edilən optimal texniki şərtlərin nəzərə alınaraq hazırlanması məqsədəuyğundur.

Beləliklə, yuxarıda təhlil edilmiş duyğac və sistemlərin integrasiyası ilə yaradılacaq mühafizə kompleksi vasitəsilə aeroportun ərazisində terror və qanunsuz müdaxilə aktlarının baş vermə ehtimalını məqbul səviyyədə saxlamaqla, itkilərin minimuma endirilməsinə nail olmaq və aviasiya təhlükəsizliyini təkmilləşdirmək mümkündür.

ƏDƏBİYYAT

1. Пашаев А.М., Набиев Р.Н., Нагиев Н.Т., Велиева Г.Дж., Рустамов Р.Р. (2018) Особенности проектирования автоматизированного диспетчерского охранного комплекса. *Вопросы безопасности*, Москва. 1, 32-51. DOI: 10.25136/2409-7543.2018.1.24602.
2. Rüstəmov R.R. (2019) Məsafədən idarə edilən integrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi imkanları. *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri*, 4(21), 31-39. DOI 10.34826/NAA.2020.21.4.003.
3. Mendala O., Mendala J.(2023) Accidents, aviation incidents, acts of terror and other dangers in aviation: Security procedures and entities implementing them in international, EU and national laws. *Safety & Defense*. 9(2), 34-39. DOI: <https://doi.org/10.37105/sd.204>.
4. Doc 10118. Global aviation security plan of ICAO. (2024) Montreal, 2. 34. Available at: <https://www.icao.int/Security/Documents/GLOBAL%20AVIATION%20SECURITY%20PLAN%202nd%20Ed.EN.pdf>
5. Göçmen F.D. (2024). Hava limanlarında inovasyon uygulamalarının karşılaştırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 7(2). 127-145. DOI: <https://doi.org/10.51513/jitsa.1436536>.
6. Nəbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R. (2019) Təkmilləşdirilmiş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin riyazi modelinin qurulması. *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri*, 1(21), 132-140. DOI: 10.30546/EMNAA.2019.21.1.132
7. Nəbiyev R.N., Ramazanov K.Ş., Rüstəmov R.R. (2020) Avtomatlaşdırılmış mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin effektivliyinin qiymətləndirilməsi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 1(12), 84-91. Available at: <https://www.ama.com.az/VOLUME12-N1.pdf>
8. Doc. 8973 - Restricted. Aviation Security Manual of ICAO. (2022) Montreal, 13. 946. Available at: <https://store.icao.int/en/aviation-security-manual-doc-8973>
9. Крылов В. (2023) Защита периметра: важны своевременно обнаружение и высокая вероятность нейтрализации нарушителя. *Системы безопасности*. 6. 166. 80. Available at: https://cs.groteck.ru/SS_6_2023/84/#zoom=z
10. Di Mascio, P., Dinu, R., Loprencipe, G., Moretti, L. (2024) Land Use Around Airports: Policies and Methods for Third-Party Risk Assessment - A Review. *Future Transportation*, 4, 1501-1519. <https://doi.org/10.3390/futuretransp4040072>.
11. Sugih Arti E., Praptiningsih N., Ari Widagdo R., Wagini D. (2023) Airport Perimeter Security System Readiness Analysis (Case Study At Budiarto Curug-Tangerang Airport). *Siber Journal of Transportation and Logistics*, 1(2), 64–71. <https://doi.org/10.38035/sjtl.v1i2.42>
12. Чинякова Е.В. (2020) Анализ и разработка технологий в системе предупреждения актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации Российской Федерации. *Вестник науки и образования*. 9(87), 1, 27-31. Available at:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-razrabotka-tehnologiy-v-sisteme-preduprezhdeniya-aktov-nezakonnogo-vmeshatelstva-v-deyatelnost-grazhdanskoy-aviatsii>
13. Medawar R. (2022) Security Lighting: A Guideline Report For Practitioners. United Nations Development Programme Reproduction. 44. Available at:
<https://www.cedro-undp.org/Library/Assets//Gallery/Publications/Security%20Lighting.pdf>
 14. Финаев В.И., Скубилин М.Д., Набиев Р.Н. (2010) Синтез и оптимизация систем управления. ТТИ ЮФУ. Таганрог. 358 с.
 15. Набиев Р.Н., Гараев Г.И., Рустамов Р.Р. (2022) Дифференциально-емкостное устройство с двумя автогене-раторами. *Известия ЮФУ. Технические науки*, Таганрог. 2(226), 145-153. DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-145-153.
 16. Paşayev A.M., Nəbiyev R.N., Qarayev Q.İ., Rüstəmov (2022) Diferensial tutum duyğacı, Patent (İxtira) İ 2022 0033, Azərbaycan Respublikası Əqli Mülkiyyət Agentliyi Patent və Əmtəə Nişanlarının Ekspertizası Mərkəzi. Bülleten № 8; 31.08.2022. Available at:
<https://patent.copat.gov.az/files//21292216552597822637ixтира%2008.2022.pdf>
 17. Nəbiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R. (2021) The study of dependence of the resonance frequencies of differential sensor on the intruder's approaching. International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology. Warsaw, Poland. 28, 3-8. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_conf/30042021/7526.
 18. Aravindaguru I, Abishek A., Prasanna T., Tamilselvan N. (2021) Sensor system for intruder detection based on ground vibration. *International Journal of Aquatic Science*. 3(12), 744-750. Available at: https://www.journal-aquaticscience.com/issue_17705_18219.html
 19. Xing K., Wang N., Wang W. (2022) A ground moving target detection method for seismic and sound sensor based on evolutionary neural networks. *Applied Sciences*, 12(18) , 9343. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189343>.
 20. Sardey M.P., Shah T., Joshi P., Shah K. (2023) Vibershield: An intrusion detection system. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 11(1), 1046–1052. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.48727>.
 21. Yu Y., Qin X., Hussain S., Hou W., Weis T. (2022) Pedestrian counting based on piezoelectric vibration sensor. *Applied Science*. 12, 1920. <https://doi.org/10.3390/app12041920>
 22. Dean T., Grant M. (2024) A beginner's guide to seismic sensors. *Preview*, 2024(230), 38-44. <https://doi.org/10.1080/14432471.2024.2395647>
 23. Wilde-Piórko M., Maj K., Kozłowska M. (2022) Sensitivity, Accuracy and Limits of the Lightweight Three-Component SmartSolo Geophone Sensor (5 Hz) for Seismological Applications. About EarthArXiv. DOI:10.31223/X5F073
 24. Kanyi P.M., Kamau P.K., Mireri C. (2016) Assessment Of The Security Preparedness And Adherence To International Civil Aviation Standards At Wilson Airport, Kenya. *IOSR Journal Of Humanities And Social Science*. 6(21), 3, 23-41. DOI: 10.9790/0837-2106032341
 25. Elharrouss O., Almaadeed N., Al-Maadeed S. (2021) A review of video surveillance systems. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 77, 103116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2021.103116>.
 26. Sujkowski M., Kozuba J., Uchroński P., Banaś A., Pulit P., Gryżewska, L. (2023). Artificial Intelligence Systems for Supporting Video Surveillance in Critical Infrastructure. *TRANSCOM 2023: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. 74(2023), 1284-1291. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.273>
 27. Dmochowska A. (2019) Threat Prevention at the Airports Using Detection Systems. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 4(72), 17-31. Available at:
https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=Threat+Prevention+at+the+Airports+Using+Detection+Systems&btnG=

28. Lohani D., Crispim-Junior C. F., Barthélemy Q., Bertrand S., Robinault, L., Tougne Rodet L. (2022) Perimeter Intrusion Detection by Video Surveillance: A Survey. *Sensors*. 22(9), 3601. <https://doi.org/10.3390/s22093601>
29. Gade R., Moeslund T. B., Nielsen S. Z., Skov-Petersen H., Andersen H. J., Basselbjerg K., Dam H. T., Jensen O. B., Jørgensen A., Lahrmann H., Madsen T. K. O., Skouboe E. B., Povey B. (2016). Thermal Imaging Systems for Real-Time Applications in Smart Cities. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 53(4), 289-308. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2016.076790>
30. Toth C., Jozkow G., Koppányi Z., Young S., Grejner-Brzezinska D. (2016) Monitoring aircraft motion at airports by LIDAR. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III-1, 159–165, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-1-159-2016>
31. Lohani B., Ghosh S. (2017) Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems. *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci.* 87, 567–579. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0435-9>
32. Nzioka T.N., Ochieng D.O. (2023). Innovative use of emerging biometric technology in enhancing airport security at Jomo Kenyatta International Airport in Nairobi, Kenya. *Reviewed Journal of Social Science & Humanities*, 4(1), 611–638. Available at: <https://www.reviewedjournals.com/index.php/RJSSH/article/view/145/126>
33. Khan N., Efthymiou M. (2021) The use of biometric technology at airports: The case of customs and border protection. *International Journal of Information Management Data*. 1 (2021) 100049, 1-14. Insights <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2021.100049>
34. Jawale M.A., William P., Pawar A. B., Marriwala N.K. (2023) Implementation of number plate detection system for vehicle registration using IoT and recognition using CNN. *Measurement: Sensors*. 27, 100761. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100761>
35. Joshi S., Jejure P., Jadhav C., Jankar, V. (2024) Automatic Number Plate Recognition. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 11(5), 439-448. <https://doi.org/10.32628/IJSRST2411476>
36. Vozella A., Muñoz Sanz F., Solazzo M. A., Martinavarro Armengol E., Bieber P., Ferrara G. (2020) Solution Set-up for Airport Protection from Intruder Drones. Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference. *Research Publishing*. 4469-4476. Available at: <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/4189.pdf>
37. Ihekoronye V.U., Ajakwe S.O., Lee J.M., Kim D.-S. (2025) DroneGuard: An Explainable and Efficient Machine Learning Framework for Intrusion Detection in Drone Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 12(7), 7708-7722. doi: 10.1109/JIOT.2024.3519633.

REFERENCES

1. Pashayev A.M., Nabiyeu R.N., Nagiyev N.T., Veliyeva G.C., Rustamov R.R. (2018) Osobennosti proyektirovaniya avtomatizirovannogo distantionnogo okhrannogo kompleksa. *Voprosy bezopasnosti*, Moskva. 1, 32-51. DOI: 10.25136/2409-7543.2018.1.24602.
2. Rüstəmov R.R. (2019) Məsafədən idarə edilən integrasiya olunmuş mühafizə-xəbərdarlıq sisteminin tətbiqi imkanları. *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri*, 4(21), 31-39. DOI 10.34826/NAA.2020.21.4.003.
3. Mendala O., Mendala J.(2023) Accidents, aviation incidents, acts of terror and other dangers in aviation: Security procedures and entities implementing them in international, EU and national laws. *Safety & Defense*. 9(2), 34-39. DOI: <https://doi.org/10.37105/sd.204>.
4. Doc 10118. Global aviation security plan of ICAO. (2024) Montreal, 2. 34. Available at: <https://www.icao.int/Security/Documents/GLOBAL%20AVIATION%20SECURITY%20PLAN%202nd%20Ed.EN.pdf>

5. Göçmen F.D. (2024). Hava limanlarında inovasyon uygulamalarının karşılaştırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 7(2). 127-145. DOI: <https://doi.org/10.51513/jitsa.1436536>.
6. Nabiyev R.N., Ramazanov K.Sh., Rustamov R.R. (2019) Tekmilleshdirlmiş muhafize-kheberdarlyg sisteminin riyazi modelinin gurulmasy. *Milli Aviasiya Akademiyasynyn Elmi Mejmueleri*, 1(21), 132-140. DOI: 10.30546/EMNAA.2019.21.1.132
7. Nabiyev R.N., Ramazanov K.Sh., Rustamov R.R. (2020) Avtomatlashdyrylmysh muhafize-kheberdarlyg sisteminin effektivliyinin giymetlendirilmesi. *Azerbayjan Muhendislik Akademiyasynyn Kheberleri*, 1(12), 84-91. Available at: <https://www.ama.com.az/VOLUME12-N1.pdf>
8. Doc. 8973 - Restricted. Aviation Security Manual of ICAO. (2022) Montreal, 13. 946. Available at: <https://store.icao.int/en/aviation-security-manual-doc-8973>
9. Krylov V. (2023) Zashchita perimetra: vazhny svoeyevremenno obnaruzheniye i vysokaya veroyatnost' neytralizatsii narushitelya. *Sistemy bezopasnosti*. 6. 166. 80. Available at: https://cs.groteck.ru/SS_6_2023/84/#zoom=z
10. Di Mascio, P., Dinu, R., Loprencipe, G., Moretti, L. (2024) Land Use Around Airports: Policies and Methods for Third-Party Risk Assessment - A Review. *Future Transportation*, 4, 1501-1519. <https://doi.org/10.3390/futuretransp4040072>.
11. Sugih Arti E., Praptiningsih N., Ari Widagdo R., Wagini D. (2023) Airport Perimeter Security System Readiness Analysis (Case Study At Budiarto Curug-Tangerang Airport). *Siber Journal of Transportation and Logistics*, 1(2), 64–71. <https://doi.org/10.38035/sjtl.v1i2.42>
12. Chinyakova Ye.V. (2020) Analiz i razrabotka tekhnologiy v sisteme preduprezhdeniya aktov nezakonnogo vmeshatel'stva v deyatel'nost' grazhdanskoy aviatsii Rossiyskoy Federatsii. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 9(87), 1, 27-31. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-razrabotka-tehnologiy-v-sisteme-preduprezhdeniya-aktov-nezakonnogo-vmeshatelstva-v-deyatelnost-grazhdanskoy-aviatsii>
13. Medawar R. (2022) Security Lighting: A Guideline Report For Practitioners. United Nations Development Programme Reproduction. 44. Available at: <https://www.cedro-undp.org/Library/Assets//Gallery/Publications/Security%20Lighting.pdf>
14. Finayev V.I, Skubilin M.D, Nabiyev R.N. (2010) Sintez i optimizatsiya sistem upravleniya. TTI YUFU. Taganrog. 358.
15. Nabiyev R.N., Garayev G.I., Rustamov R.R. (2022) Differentsial'no-yemkostnoye ustroystvo s dvumya avtogene-ratorami. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki*, Taganrog. 2(226), 145-153. DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-145-153.
16. Paşayev A.M., Nəbiyev R.N., Qarayev Q.İ., Rüstəmov (2022) Diferensial tutum duyğacı, Patent (İxtira) İ 2022 0033, Azərbaycan Respublikası Əqli Mülkiyyət Agentliyi Patent və Əmtəə Nişanlarının Ekspertizası Mərkəzi. Bülleten № 8; 31.08.2022. Available at: <https://patent.copat.gov.az/files//21292216552597822637ixтира%2008.2022.pdf>
17. Nabiyev R.N., Garaev G.I., Rustamov R.R. (2021) The study of dependence of the resonance frequencies of differential sensor on the intruder's approaching. *International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology*. Warsaw, Poland. 28, 3-8. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_conf/30042021/7526.
18. Aravindaguru I, Abishek A., Prasanna T., Tamilselvan N. (2021) Sensor system for intruder detection based on ground vibration. *International Journal of Aquatic Science*. 3(12), 744-750. Available at: https://www.journal-aquaticscience.com/issue_17705_18219.html
19. Xing K., Wang N., Wang W. (2022) A ground moving target detection method for seismic and sound sensor based on evolutionary neural networks. *Applied Sciences*, 12(18) , 9343. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189343>.

20. Sardey M.P., Shah T., Joshi P., Shah K. (2023) Vibershield: An intrusion detection system. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 11(1), 1046–1052. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.48727>.
21. Yu Y., Qin X., Hussain S., Hou W., Weis T. (2022) Pedestrian counting based on piezoelectric vibration sensor. *Applied Science*. 12, 1920. <https://doi.org/10.3390/app12041920>
22. Dean T., Grant M. (2024) A beginner's guide to seismic sensors. *Preview*, 2024(230), 38-44. <https://doi.org/10.1080/14432471.2024.2395647>
23. Wilde-Piórko M., Maj K., Kozłowska M. (2022) Sensitivity, Accuracy and Limits of the Lightweight Three-Component SmartSolo Geophone Sensor (5 Hz) for Seismological Applications. About EarthArXiv. DOI:10.31223/X5F073
24. Kanyi P.M., Kamau P.K., Mireri C. (2016) Assessment Of The Security Preparedness And Adherence To International Civil Aviation Standards At Wilson Airport, Kenya. *IOSR Journal Of Humanities And Social Science*. 6(21), 3, 23-41. DOI: 10.9790/0837-2106032341
25. Elharrouss O., Almaadeed N., Al-Maadeed S. (2021) A review of video surveillance systems. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 77, 103116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2021.103116>.
26. Sujkowski M., Kozuba J., Uchroński P., Banaś A., Pulit P., Gryżewska, L. (2023). Artificial Intelligence Systems for Supporting Video Surveillance in Critical Infrastructure. *TRANSCOM 2023: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. 74(2023), 1284-1291. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.273>
27. Dmochowska A. (2019) Threat Prevention at the Airports Using Detection Systems. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 4(72), 17-31. Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=Threat+Prevention+at+the+Air+ports+Using+Detection+Systems&btnG=
28. Lohani D., Crispim-Junior C. F., Barthélemy Q., Bertrand S., Robinault, L., Tougne Rodet L. (2022) Perimeter Intrusion Detection by Video Surveillance: A Survey. *Sensors*. 22(9), 3601. <https://doi.org/10.3390/s22093601>
29. Gade R., Moeslund T. B., Nielsen S. Z., Skov-Petersen H., Andersen H. J., Basselbjerg K., Dam H. T., Jensen O. B., Jørgensen A., Lahrmann H., Madsen T. K. O., Skouboe E. B., Povey B. (2016). Thermal Imaging Systems for Real-Time Applications in Smart Cities. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 53(4), 289-308. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2016.076790>
30. Toth C., Jozkow G., Koppanyi Z., Young S., Grejner-Brzezinska D. (2016) Monitoring aircraft motion at airports by LIDAR. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III-1, 159–165, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-1-159-2016>
31. Lohani B., Ghosh S. (2017) Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems. *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci.* 87, 567–579. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0435-9>
32. Nzioka T.N., Ochieng D.O. (2023). Innovative use of emerging biometric technology in enhancing airport security at Jomo Kenyatta International Airport in Nairobi, Kenya. *Reviewed Journal of Social Science & Humanities*, 4(1), 611–638. Available at: <https://www.reviewedjournals.com/index.php/RJSSH/article/view/145/126>
33. Khan N., Efthymiou M. (2021) The use of biometric technology at airports: The case of customs and border protection. *International Journal of Information Management Data*. 1 (2021) 100049, 1-14. Insights <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2021.100049>
34. Jawale M.A., William P., Pawar A. B., Marriwala N.K. (2023) Implementation of number plate detection system for vehicle registration using IoT and recognition using CNN. *Measurement: Sensors*. 27, 100761. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100761>

35. Joshi S., Jejure P., Jadhav C., Jankar, V. (2024) Automatic Number Plate Recognition. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 11(5), 439-448. <https://doi.org/10.32628/IJSRST2411476>
36. Vozella A., Muñoz Sanz F., Solazzo M. A., Martinavarro Armengol E., Bieber P., Ferrara G. (2020) Solution Set-up for Airport Protection from Intruder Drones. Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference. *Research Publishing*. 4469-4476. Available at: <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/4189.pdf>
37. Ihekoronye V.U., Ajakwe S.O., Lee J.M., Kim D.-S. (2025) DroneGuard: An Explainable and Efficient Machine Learning Framework for Intrusion Detection in Drone Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 12(7), 7708-7722. doi: 10.1109/JIOT.2024.3519633.

DETERMINATION OF OPTIMAL TECHNICAL CONDITIONS FOR CREATING AN AIRPORT GUARDING COMPLEX

Nabiyev R.N., Rustamov R.R., Movsumzade U.F.
National Aviation Academy

The article noted that civil aviation is an attractive target for terrorists, and that acts of terrorism and unlawful interference have resulted in numerous casualties. Based on this, the importance of improving aviation security was emphasized. Improving aviation security in all areas, especially airport perimeter guarding, allows for the reduction of damage caused by acts of terrorism and unlawful interference.

Taking this into account, the article states that the goal is to determine the optimal technical conditions for creating an airport guarding complex by examining the requirements for modern systems applied in the perimeter. For this purpose, the necessary regulatory and legal requirements for airport perimeter guarding were noted, and the working principles, functional capabilities, advantages and disadvantages of the sensors, video surveillance and anti-drone defense systems, as well as personal and vehicle identification systems, which are more widely used in perimeter guarding systems of strategic facilities in modern times, were analyzed.

As a result of the analysis, it was found that since the necessary regulatory and legal requirements set by the International Civil Aviation Organization require the creation of an effective airport guarding complex, it is advisable to create a guarding complex that organically combines systems based on modern technologies, taking into account the above-mentioned optimal technical conditions.

The proposed optimal technical conditions for the creation of a guarding complex managed from a single center are considered a necessary step towards increasing the effectiveness of the aviation security system at airports. Because through the guarding complex created by integrating the intended sensors and systems, it is possible to minimize losses and improve aviation security by keeping the probability of acts of terrorism and unlawful in the territory of airports at an acceptable level.

Key words: *civil aviation, aviation security, perimeter guarding system, guarding complex, sensor, intruder, object, video surveillance, biometric identification.*

Rəyçilər: f.-r.e.d., professor Əsgərov K.Ə.
t.f.d., dosent Muxtarov R.M.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Nəbiyev Rasim Nəsib oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	ETİ-nin “Aviasiya elektronikasi” şöbəsinin rəisi, t.e.d., professor	nabiyevrasim@gmail.com mob: (+994) 55 754-76-46
Rüstəmov Ruslan Rüstəm oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Aviasiya təhlükəsizliyi kafedrasının baş müəllimi, t.f.d	ruslanrustamov433@gmail.com mob: (+994) 70 586-46-16
Mövsümzadə Ümüd Firuz oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Magistrant	umud.movsumzade@gmail.com mob: (+994) 55 387-37-91

UOT: 004

DOI: 10.30546/EMNAA.2025.25.03.108

TƏHLÜKƏSİZLİK SİSTEMİNİN TƏKMİLLƏŞDİRİLMƏSİ ÜÇÜN MODİFİKASIYA EDİLMİŞ VERNAM ŞİFRLƏMƏ ALQORİTMİ

***İbrahimova S.R., Hüseynzadə İ.M.
Milli Aviasiya Akademiyası***

Bu məqalə müasir informasiya təhlükəsizliyi sistemlərinin artan tələblərinə cavab vermək üçün bio-əsaslı texnologiyaların tətbiqi yolu ilə innovativ bir yanaşmanı tədqiq edir. Əsas diqqət klassik Vernam şifrləmə alqoritmının genetik alqoritmlərin prinsipləri əsasında modifikasiyasına və bu modifikasiyanın yüksək təhlükəsizlik tələbləri olan sistemlərdə praktiki tətbiq imkanlarına yönəldilib. Təklif olunan yanaşmanın özəyində birdəfəlik açar populyasiyasından optimal açarların seçilməsi prosesi dayanır. Bu seçmə prosesi təkcə təsadüfilik deyil, həm də Şennon entropiyası, minimal periodiklik və maksimal Hemminq məsafəsi kimi kriteriyaların məqsədyönlü optimallaşdırılması ilə həyata keçirilir.

Genetik modellərdən götürülmüş bircins çarpazlaşma və maskalama mexanizmləri açarların dinamik transformasiyasını təmin edərək təhlükəsiz açar mübadiləsi və itirilən açarların etibarlı bərpası kimi kritik problemlərin effektiv həllinə imkan yaradır. Məqalədə modifikasiya edilmiş alqoritmın riyazi təhlili verilir, onun funksional prototipi proqramlaşdırma dilləri ilə həyata keçirilir və vizual interfeys vasitəsilə mərhələli tətbiqi əyani şəkildə nümayiş etdirilir. Aparılan eksperimentlərin nəticələri açıq şəkildə göstərir ki, təkmilləşdirilmiş alqoritm, klassik Vernam metodunun dayanıqlılığı kimi nəzəri üstünlüklərini tam qoruyur, eyni zamanda onun praktikada rast gəlinən əsas çətinlikləri əhəmiyyətli dərəcədə minimallaşdırılır.

Nəticə etibarilə bu araşdırma xüsusilə dinamik və yüksək təhdid mühitində olan müasir sistemlər üçün genetik optimallaşdırma ilə gücləndirilmiş Vernam şifrləməsini əsas götürən etibarlı, adaptiv və asanlıqla genişləndirilə bilən bir təhlükəsizlik həllini irəli sürür. Təklif olunan sistem təkcə hazırkı təhlükəsizlik çağırışlarına cavab verməklə kifayətlənmir, həm də gələcəkdə bio-əsaslı kriptografiya və açar idarəetməsi üzrə aparılacaq tədqiqatlar üçün mühüm bir baza təşkil edir.

Açar sözlər: Vernam şifrləməsi, genetik alqoritm, OTP, Şennon entropiyası, Hemminq məsafəsi, periodiklik, informasiya təhlükəsizliyi, şifrləmə alqoritmləri

Giriş

Müasir dövrdə informasiya təhlükəsizliyi qlobal cəmiyyətin tərəqqisində mühüm rol oynayır və gündəlik olaraq milyardlarla informasiya vahidinin müxtəlif rabitə kanalları üzərindən mübadiləsi aparılır [1]. İnformasiyanın konfidensiallığı, bütövlüyü və autentifikasiyası kimi təhlükəsizlik prinsiplərinin təmin edilməsi üçün kriptografik metod və alqoritmlərin inkişafı xüsusi zəruriliyə malikdir. Kriptografiyanın başlıca məqsədi informasiyanın icazəsiz əldə olunması, dəyişdirilməsi və ya saxtalaşdırılmasının qarşısını almaqdır [2].

XX əsrin əvvəllərindən etibarən müxtəlif simmetrik və assimmetrik şifrləmə metodları təklif olunmuş və onların tətbiq sahələri daim genişləndirilmişdir. Xüsusilə, Vernam şifrləmə alqoritmı informasiyanın nəzəri baxımdan ən yüksək təhlükəsizlik səviyyəsini təmin edən metodlardan biri hesab edilir. Bununla belə, klassik Vernam şifrləməsinin bir sıra praktik məhdudiyyətləri (böyük həcmli açarların yaradılması, ötürülməsi və saxlanması) onun tətbiqinin genişlənməsi qarşısında

manea təşkil edir. Bu məhdudiyyətlər müasir dövrdə, ələlxüsüs bulud texnologiyaları və böyük verilənlər mühitində, informasiya təhlükəsizliyi üçün yeni və daha səmərəli həll üsullarına ehtiyac yaradır [2].

Son illərdə bir sıra təbiət proseslərinə əsaslanan və onları təqlid edən alqoritmlər, o cümlədən genetik alqoritmlər, kriptografiyada və şifrələmə alqoritmlərində innovativ yanaşmalar üçün geniş perspektivlər və tətbiq imkanları açmışdır. Genetik alqoritmlər kompleks optimallaşdırma məsələlərinin həlli, təsadüfi strukturların generasiyası və xaoslu ardıcılıqların yaradılmasında effektiv vasitə qismində özünü təsdiqləmişdir. Şifrələmə sistemlərinə bu metodların integrasiyası açarların və şifrəmətlərin proqnozlaşdırılması çətin olan daha mürəkkəb strukturlarla təmin olunmasına zəmin yaradır.

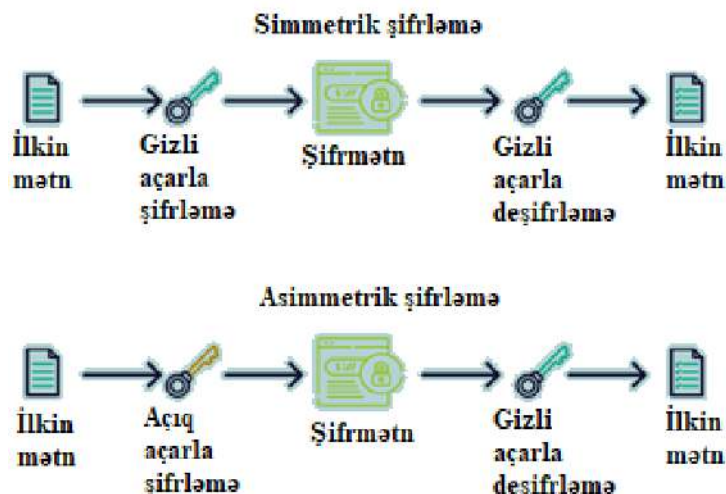
Bu məqalədə klassik Vernam şifrələmə alqoritmının təkmilləşdirilməsi məqsədilə yeni, modifikasiya olunmuş yanaşma təklif edilir. Təklif edilən metodda birdəfəlik açarın (OTP – One-Time Pad) generasiyası və istifadəsi mərhələlərində genetik alqoritm, entropiya, periodiklik və Hemminq məsafəsi kimi kriteriyalar əsas götürülməklə və bircins çarpazlaşma operatorunun tətbiqi ilə şifrələmə prosesinin təhlükəsizliyi və dayanıqlılığı artırılır. Məqalədə modifikasiya olunmuş alqoritmın klassik Vernam şifrələməsi ilə müqayisəli şəkildə üstünlüklərinin təhlili və alınan nəticələr öz əksini tapır.

İşin məqsədi – klassik Vernam şifrələmə alqoritmının təhlükəsizlik və kommunikasiya effektivliyini artırmaq məqsədilə, birdəfəlik açarın optimallaşdırılmış seçimi və əlavə genetik operatorların tətbiqi ilə açarın bərpası ehtimalını minimuma endirən və ötürülən məlumat həcmi azaldan yeni bir şifrələmə metodu təklif edərək onun üstünlüklərini müqayisəli şəkildə sübut etməkdir.

Şifrələmə və informasiyanın qorunmasında əhəmiyyəti. Müasir informasiya cəmiyyətində məlumatların qorunması və məxfiliyin təmin edilməsi istər fərdi, istərsə də təşkilati və dövlət səviyyəsində mühüm strateji əhəmiyyət kəsb edir [3]. Elektron hökumət sistemlərinin, bankçılıq əməliyyatlarının, tibbi və təhsil məlumatlarının rəqəmsallaşdırılması, o cümlədən sosial şəbəkələrdə informasiya mübadiləsinin sürətli artımı, informasiya təhlükəsizliyinin prioritet məsələ kimi ön plana çıxmasına səbəb olmuşdur. İxtiyari informasiya mənbəyi, məlumatın ötürülmə və ya saxlanma mərhələsində müxtəlif növ kənar müdaxilələrə və sızmalara qarşı həssasdır. Bu isə həm məxfi informasiyanın sızmasına, həm də məlumatın dəyişdirilməsi, itirilməsi və ya təhrif edilməsinə gətirib çıxara bilər [2].

Şifrələmə metodları bu risklərin minimuma endirilməsi və informasiyanın konfidensiallığının təmin olunması üçün əsas mexanizmlərdən biri hesab olunur. Şifrələmə açıq mətni xüsusi riyazi əməliyyatların icrası nəticəsində dəyişdirilmiş mətnə (şifrəmətnə) çevirir və yalnız xüsusi açara malik tərəf bu məlumatı yenidən oxunaqlı vəziyyətə qaytarar. Bu yanaşma həm lokal, həm də global şəbəkələrdə ötürülən və saxlanılan verilənlərin mühafizəsində effektiv vasitədir.

Ənənəvi şifrələmə üsulları əsasən iki kateqoriyaya bölünür: simmetrik və assimetrik şifrələmə. Simmetrik şifrələmə alqoritmlərində eyni açar həm şifrələmə, həm də deşifrələmə mərhələsində istifadə edilir, assimetrik şifrələmədə isə biri məxfi, digəri açıq olmaqla iki fərqli, lakin riyazi cəhətdən bir-biri ilə əlaqələndirilmiş açarlardan istifadə edilir (şəkil 1) Hər iki yanaşmanın özünəməxsus üstünlükləri və məhdudiyyətləri vardır. Simmetrik şifrələmə alqoritmləri sürət və sadəlik baxımından, assimetrik üsullar isə açarların ötürülməsi və idarə olunması nöqteyi-nəzərindən fərqlənir [2].



Şəkil 1. Simmetrik və asimmetrik şifrləmənin strukturunun müqayisəli təsviri

Şifrləmə texnologiyalarının aktuallığı və inkişafı bir neçə əsas amillə şərtlənir:

Məlumatın məxfiliyi: Şifrləmə, informasiyanın yalnız icazəli şəxslər tərəfindən oxuna bilməsini təmin edir və üçüncü şəxsin müdaxiləsinə qarşı qoruyur.

Bütövlük və dəyişməzlik: Şifrləmə və əlavə kriptografik metodlar (məsələn, elektron imza, heş funksiyaları) informasiyanın ötürülmə və saxlanması mərhələlərində dəyişdirilməsinin və ya saxtalaşdırılmasının qarşısını alır.

İdentifikasiya və autentifikasiya: Kriptografik alqoritmlər istifadəçilərin və sistemlərin identifikasiyası və autentifikasiyası üçün də geniş surətdə tətbiqini tapır.

Bütün bu aspektlər informasiya təhlükəsizliyinin fundamental prinsipləri olan konfidensiallıq, bütövlük və əlçatanlıq (CIA üçlüyü) ilə birbaşa bağlıdır. Şifrləmə üsullarının inkişafı və tətbiqi istər ənənəvi sahələrdə, istərsə də yeni yaranan texnologiyalarda (bulud xidmətləri, əşyaların interneti, süni intellekt və s.) aktuallığını davamlı şəkildə qorumaqdadır [2].

Buna görə də yeni və daha dayanıqlı kriptografik metodlarının işlənilib hazırlanması, o cümlədən mövcud metodların optimallaşdırılması informasiya təhlükəsizliyinin təminatı xüsusunda əsas tədqiqat istiqamətlərindən biri olaraq qalır. Xüsusilə statistik və riyazi cəhətdən daha güclü, hibrid və ya modifikasiya edilmiş alqoritmlərin tərtibi, praktikada informasiya təhlükəsizliyi səviyyəsinin artırılmasına imkan verir [4].

Vernam şifrləmə alqoritm. Vernam şifrləmə alqoritmı ilk dəfə amerikalı telemexanik Gilbert Vernam tərəfindən 1917-ci ildə təklif edilmişdir. Teleqraf sistemlərində istifadə üçün o, ilk dəfə birdəfəlik açar prinsipinə söykənən şifrləmə üsulunu işləyib hazırlamışdır. 1919-cu ildə amerikalı rabitəçi Cozef Moborn tərəfindən təkmilləşdirilən bu alqoritm təsadüfi açarların hər bir mesajın şifrlənməsində yalnız bir dəfə istifadə edilməsini nəzərdə tuturdu. 1949-cu ildə Klaud Şennon tərəfindən riyazi cəhətdən isbat edilmişdir ki, OTP istifadəsi şərtlə bu metod yüksək təhlükəsizliyə malikdir və heç bir kriptanalitik hücum vasitəsilə deşifrlənə bilməz. Bu, kriptografiya tarixində nəzəri cəhətdən maksimum təhlükəsizlik təmin edən ilk və yeganə şifrləmə üsullarından biri hesab edilir [4,5].

Vernam şifrləməsinin iş prinsipi aşağıdakı mərhələlərdən təşkil olunmuşdur:

1. Orijinal mətn (M) ikilik formata (bit sətrinə) çevrilir.
2. Mesajın uzunluğuna bərabər birdəfəlik açar (K) təsadüfi şəkildə generasiya olunur.

3. Orijinal mətnin hər bir biti və açarın müvafiq bitinə XOR (istisnaedici OR) operatoru tətbiq edilir və nəticədə şifrmətn (C) alınır:

$$C = M \oplus K$$

4. Orijinal mətnin bərpası üçün şifrmətn və açar üzərində yenidən XOR əməliyyatı aparılır:

$$M = C \oplus K$$

5. Açar bir dəfə istifadə edildikdən sonra sıradan çıxarılır.

Alqoritmin əsas tələbi budur ki, birdəfəlik açar tam təsadüfi olmalı, mətnin uzunluğuna bərabər olmalı və sadəcə bir dəfə istifadə edilməlidir. Bu şərtlər pozulduğu təqdirdə, alqoritmin etibarlılığı azalır [4].

Birdəfəlik açara əsaslanan şifrləmə nəzəri baxımdan maksimal təhlükəsizlik təmin edən nadir üsullardan biridir. Tam təsadüfi və yalnız bir dəfə istifadə olunan açar vasitəsilə şifrlənmiş mətnin kriptanalitik metodlarla deşifrlənməsi mümkün deyil. Bu zaman həm açar, həm də mesaj tam təsadüfi olduğundan, çıxış nəticəsinin də təsadüfi düzülüşdə görünməsi kriptanalitik dayanıqlılıq yaradır. Alqoritmin əsas üstünlüklərindən biri də onun sadə riyazi əməliyyat olan, həm proqram, həm də aparat mühitində yüksək sürətlə həyata keçirilə bilən XOR əməliyyatı üzərində qurulmasıdır.

Lakin birdəfəlik açarın praktik istifadəsi ciddi çətinliklərlə müşayiət olunur. Açarın uzunluğu mətnin uzunluğuna bərabər olduğu üçün irihəcmli verilənlərin şifrlənməsi zamanı açarların yaradılması, saxlanması və ötürülməsi ciddi resurs tələb edir. Açar yalnız bir dəfə istifadə olunmalı və qarşı tərəfə tam məxfi şəkildə ötürülməlidir, əks halda sistemin təhlükəsizliyi pozulur. Eyni zamanda, keyfiyyətli təsadüfi ədəd generatorlarının çatışmazlığı və açarların təhlükəsiz idarə olunması alqoritmin real sistemlərdə tətbiqini məhdudlaşdırır. Xüsusilə çoxistifadəçili və genişmiqyaslı şəbəkələrdə açarların paylanması və idarəsi əlavə risk və mürəkkəblilik yaradır.

Vernam şifrləməsinin nəzəri baxımdan üstünlükləri olmasına rəğmən, qeyd edilən praktik məhdudiyyətlərə görə müasir rəqəmsal kommunikasiya sistemlərində geniş tətbiq edilmir. Bununla belə, birdəfəlik açara əsaslanan şifrləmə hələ də ən yüksək məxfi informasiyanın ötürülməsi, diplomatik və hərbi rabitə kanalları, xüsusi məxfi sənədlərin saxlanması kimi sahələrdə tətbiqini tapır. Bu tətbiqlərdə açar ötürülməsi və generasiyası üçün fiziki daşıyıcılar və ya xüsusi təhlükəsiz qurğulardan istifadə olunur.

Hazırkı dövrdə simmetrik və assimetrik şifrləmə alqoritmləri praktik üstünlüklərinə görə daha geniş yayılmışdır. Bununla yanaşı, OTP prinsiplərinin bir sıra yeni və hibrid kriptografik metodların əsasını təşkil etməsi üçün davamlı tədqiqatlar aparılır. Xüsusilə OTP-nin təsadüfi və xaoslu açarlarının yaradılması üçün kvant generatorları, təbiətə əsaslanan alqoritmlər, o cümlədən genetik metodlar kimi yanaşmalar aktual tədqiqat istiqamətlərindən biridir.

Genetik alqoritmlər. Genetik alqoritmlər təbiətdə təkamül prosesini, genetik irsiyyət və mutasiyaları imitasiya edən ehtimal əsaslı optimallaşdırma və axtarış üsuludur. İlk dəfə 1975-ci ildə Con Holland tərəfindən təsvir edilmiş, daha sonra Devid Quldbərq tərəfindən genişləndirilmişdir. Genetik alqoritmlər populyasiya əsaslı olub çoxsaylı “namizəd həllər” (xromosomlar) üzərində paralel sürətdə işləyir və ən uyğun olanların növbəti nəsllə keçməsinə təmin edir [6]. Kriptografiyada genetik alqoritmlər son illərdə açar generasiyası və şifrləmə mexanizmlərinin daha dinamik, təkrarolunmaz və xaoslu olmasına nail olmaq üçün aktual tədqiqat mövzudur.

Genetik alqoritmin mərkəzi komponenti uyğunlaşma funksiyasıdır. Bu funksiya hər bir xromosomun “keyfiyyətini” ölçür və seleksiya mərhələsində ən yaxşı fərdlərin seçilməsinə əsas verir.

Bir fərd üçün F uyğunlaşma funksiyası aşağıdakı formada ifadə edilə bilər:

$$F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_n f_n(x)$$

Burada x populyasiyadakı ixtiyari fərd, $f_i(x)$ i -ci kriteriya üzrə uyğunlaşma dəyəri, w_i i -ci kriteriyanın çəkisidir (prioritetlik) [6].

Seleksiya operatoru. Seleksiya yeni nəslin yaradılması üçün populyasiyadan ən uyğun fərdlərin seçilməsi prosesidir. Seleksiya operatorunun seçilməsi alqoritmin konvergensiya sürətini, müxtəlifliyini və nəticənin keyfiyyətini birbaşa müəyyən edir. Seleksiyanın tətbiq edilən bir neçə növü mövcuddur:

Ruletka metodu. Hər fərdin seçilmə ehtimalı onun uyğunlaşma dəyəri ilə düz mütənasibdir. Populyasiyada uyğunlaşma dəyəri daha yüksək olan fərdlərin növbəti nəslə keçmək şansı artır. Seçilmə ehtimalı aşağıdakı düstura əsasən hesablanır:

$$p_i = \frac{F_i(x)}{\sum_{j=1}^N F_j(x)}$$

Burada $F_i(x)$ i -ci fərdin uyğunlaşma dəyəri, N populyasiyanın ölçüsüdür.

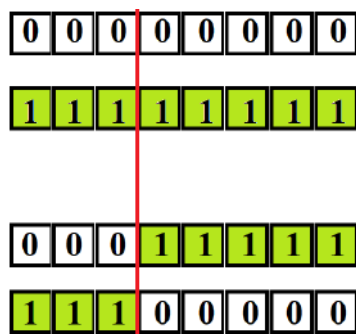
Turnir seleksiyası. Populyasiyadan təsadüfi şəkildə götürülmüş bir neçə fərd arasında “mini turnir” keçirilir və ən uyğun fərd seçilir. Turnir ölçüsünün (rəqiblərin sayı) artırılması seleksiyanın sərtliliyini yüksəldə, müxtəlifliyi isə azalda bilər.

Elitizm. Ən yaxşı uyğunlaşma dəyərinə malik fərdlər heç bir mutasiya və ya çarpazlaşma olmadan növbəti nəslə birbaşa keçir. Bu üsul ən yaxşı həllin nəzərdən kənarda qalmasının qarşısını alır.

Reytinqə əsaslanan seleksiya. Uyğunlaşma dəyərlərinə görə bütün fərdlər sıralanır və seçilmə ehtimalı bu sıralamadan asılı olur. Bu metoda uyğunlaşma dəyərlərinin diapazonunun çox geniş olduğu hallarda üstünlük verilir.

Çarpazlaşma operatoru. Çarpazlaşma iki valideyn fərdin genetik materialının qarışdırılması nəticəsində yeni fərdlərin (övladlar) generasiyası üçün istifadə edilən əsas operatorlardan biridir. Məqsəd populyasiyada genetik müxtəlifliyi və yeni potensial həllərin yaranmasını təmin etməkdir [2]. Çarpazlaşma operatorunun aşağıdakı növləri genetik alqoritmlərin tərtibində tətbiq edilir:

Birnöqtəli çarpazlaşma. Valideynlərin genetik strukturu boyunca yerləşən təsadüfi bir nöqtə seçilir və bu nöqtədən sonra gələn bütün genlər valideynlər arasında dəyişdirməklə iki yeni kombinasiya yaradılır (şəkil 2).



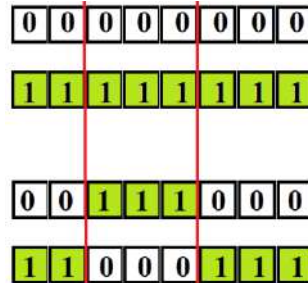
Şəkil 2. Birnöqtəli çarpazlaşmanın sxemi

İkinöqtəli çarpazlaşma. Valideyn xromosomları təmsil edən bit sətirləri üçün iki fərqli qırılma nöqtəsi seçilməklə bu aralqlara düşən genlər valideyn xromosomları arasında dəyişdirilərək iki yeni kombinasiya yaradılır (şəkil 3).

Bircins çarpazlaşma. Yeni nəsil xromosomların gen tərkibinin təşkili təsadüfi şəkildə yaradılmış maskalama sətirindəki 0 və 1-lərin növbələşməsindən asılı olur [6]:

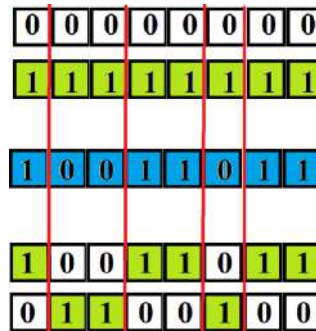
$$O_j = \begin{cases} P_{1,j}, & M_j = 0 \\ P_{2,j}, & M_j = 1 \end{cases}$$

Burada O_j övlad xromosomun j -ci biti, $P_{1,j}$ və $P_{2,j}$ müvafiq valideynlərin j -ci bitləri, M_j maskalama sətrinin j -ci bitidir.



Şəkil 3. İkinoqtəli çarpazlaşmanın sxemi

Bu tip çarpazlaşmada bütün genlər (bitlər) maskalama sətrinin tərkibindən asılı olaraq fərdi və müstəqil dəyişə bilər, bu da yüksək müxtəliflik və adaptivlik təmin edir (şəkil 4).



Şəkil 4. Bircins çarpazlaşmanın sxemi

Şennon entropiyası. Entropiya informasiyanın və ya verilmiş ardıcılığın təsadüfiliyini və qeyri-müəyyənlik səviyyəsini ölçən fundamental bir göstəricidir. Kriptografiyada entropiya şifrələmə açarlarının və ya şifrənin güclü və ya zəif olmasını obyektiv surətdə qiymətləndirməyə imkan verir. Yüksək entropiyaya malik açar və ya şifrənlər proqnozlaşdırılması və kriptanalizi baxımından daha dayanıqlı hesab edilir.

Şennon entropiyası amerikalı mühəndis Klod Şennon tərəfindən 1948-ci ildə təklif edilmiş və informasiya nəzəriyyəsində əsas riyazi kəmiyyət kimi qəbul olunmuşdur [5]. Diskret təsadüfi dəyişən üçün entropiya aşağıdakı kimi müəyyən olunur:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i$$

Burada x təsadüfi dəyişən, p_i i -ci simvolum ehtimalı, n mümkün simvolların sayıdır.

İkilik bit sətirində 0 və 1-lərin ehtimalları bərabər olduqda ($p_0 = p_1 = 0,5$) entropiya maksimum qiymətini alır: $H_{max} = 1$.

Açarların və ya şifrənin entropiyasının yüksək olması kriptanalitik hücumlara qarşı sistemin davamlılığını artırır. Əgər açar və ya şifrənin entropiyası aşağıdırsa, deməli, burada

statistik analiz ilə sındırıla biləcək müəyyən ardıcılıq, qayda və ya təkrarlanan struktur vardır. Kriptografik sistemlərin məqsədi entropiyanı maksimal saxlayaraq təsadüfiliyi təmin etməkdir.

Ardıcıl təkrarlanan simvollar yığınının uzunluğu. Bit sətirlərinin təsadüfiliyini və təhlükəsizliyini qiymətləndirən mühüm parametrlərdən biri də periodiklikdir. Periodiklik ardıcıl olaraq eyni bitin (0 və ya 1) neçə dəfə davamlı şəkildə təkrarlanmasının göstəricisidir. Kriptografiyada şifrəmətin və ya açarın periodikliyi nə qədər az olarsa, təsadüfiliyi və kriptanalitik davamlılığı bir o qədər yüksək olar.

Periodikliyin kriptografik nöqteyi-nəzərdən əhəmiyyətini aşağıdakı formada xarakterizə etmək olar:

- *Təsadüfilik.* Periodikliyin aşağı olduğu sətirlərdə təkrarlanan ardıcılıqlar olmadığından proqnozlaşdırılması və modelləşdirilməsi çətinləşir.

- *Korrelyasiya və analiz riskinin azaldılması.* Uzun periodik bloklar məlumatın daxilində qanunauyğunluq və beləliklə, potensial zəiflik göstəricisi hesab edilir. Bu, kriptanalitik hücumların uğur ehtimalını yüksəldir.

- *Kriptografik dayanıqlılıq.* Minimum periodikliyə malik açar və şifrəmətlər hücumlara qarşı daha dayanıqlı olur.

Hemming məsafəsi. Hemming məsafəsi iki bərabər uzunluqlu bit sətiri arasında fərqli bitlərin sayını ölçən riyazi göstəricidir. Bu parametr informasiyanın, kodların və xüsusilə də şifrəmə açarlarının təsadüfiliyi və fərqlilik dərəcəsini müəyyənləşdirmək üçün geniş tətbiq edilir.

İki bit sətirini $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ və $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ kimi işarə etsək, onda Hemming məsafəsi

$$d_H(X, Y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

Burada $|x_i - y_i|$ i -ci mövqedə yerləşən bitlərin fərqidir (bitlər bərabər olduqda 0, fərqli olduqda 1 qiymətini verir) [6].

Kriptografik sistemlərdə açarın və ya şifrəmətin yüksək dayanıqlılığı üçün istifadə olunan birdəfəlik açar və ya şifrəmə nəticəsi orijinal məlumatdan mümkün qədər fərqli olmalıdır. Hemming məsafəsinin yüksək olması iki sətir (məsələn, orijinal mesaj və açar) arasında maksimum fərqlilik yaratmaqla, sistemin statistik və struktur analizlərə qarşı davamlılığını artırır. Bu səbəbdən, şifrəmə prosesində birdəfəlik açar və ya şifrələnmiş ardıcılıq ilə orijinal mesaj arasında mümkün qədər yüksək Hemming məsafəsi təmin etmək əsas məqsədlərdən biri olmalıdır.

Təklif olunan şifrəmə alqoritmi. Kriptografiyanın müasir çağırışları ənənəvi yanaşmaların təkmilləşdirilməsini və dinamik yanaşmaların tətbiqini zəruri edir. Bu məqsədlə klassik Vernam şifrəmə alqoritminin məhdudiyyətlərini aradan qaldıran və təhlükəsizlik səviyyəsini artıran yeni modifikasiyalı şifrəmə alqoritmi təklif edilir. Bu alqoritmin əsas mərhələləri aşağıda təqdim edilir.

1. Orijinal mətn məlumatı olan M ASCII kodlaşdırması vasitəsilə ikilik formatına çevrilir:

$$M \rightarrow M_{bin}$$

2. Mesajın ikilik formatına bərabər uzunluqda (d) n sayda birdəfəlik açar təsadüfi şəkildə yaradılır:

$$OTP_1, OTP_2, \dots, OTP_n; \quad |OTP_i| = d, 1 \leq i \leq n$$

Çoxsaylı birdəfəlik açarın yaradılması açar fəzasının genişlənməsi və optimallaşdırılmış açar seçimi üçün zəmin yaradır.

3. Genetik alqortimə söykənən seleksiya operatoru tətbiq edilir. Hər birdəfəlik açar aşağıdakı kriteriyalar üzrə qiymətləndirilir:

a) *Şennon entropiyası*. Yüksək entropiyalı birdəfəlik açar təsadüfi və proqnozlaşdırılması çətin olan açar seçimini təmin edir:

$$H(OTP) = - \sum_{k=0}^1 p_k \cdot \log_2 p_k$$

b) *Periodiklik*. Birdəfəlik açarın ardıcıl olaraq maksimal təkrarlanan eyni bitlərinin uzunluğu ölçülür. Kiçik periodikliyə malik sətirlər daha təsadüfi və dayanıqlı hesab edilir:

$$RL_{max}(OTP) = \max\{l_j \mid 1 \leq j \leq m\}$$

Burada m sətirdəki bütün təkrarlanmaların sayı, l_j j -ci təkrarlanmanın uzunluğudur.

c) *Hemming məsafəsi*. OTP və M_{bin} arasında fərqlənən bit sayının maksimal olmasına üstünlük verir:

$$d_H(OTP, M_{bin}) = \sum_{j=1}^d |otp_j - m_j|$$

Bu seçim kriteriyaları kriptografik dayanıqlılığı və açarın unikal təsadüfililiyini optimallaşdırır. Bu məqsədlə aşağıdakı formada kombinasiyalı uyğunlaşma funksiyası tərtib edilir və elitisk seleksiya ilə ən yüksək ümumi qiymətə malik birdəfəlik açar seçilir:

$$F(OTP_i) = \alpha \cdot H(OTP_i) - \beta \cdot RL_{max}(OTP_i) + \gamma \cdot d_H(OTP_i, M_{bin})$$

$$OTP^* = \arg \max_i F(OTP_i)$$

Burada α, β, γ sistemin prioritetlərinə uyğun olaraq seçilən müsbət ədədlər olub çəki əmsallarını təmsil edir.

4. Seçilmiş OTP^* və ikilik orijinal mesajla XOR operatoru tətbiq edilməklə şifrələmə aparılır:

$$C = M_{bin} \oplus OTP^*$$

5. Uzunluğu $d/2$ olan, maksimum xaos quruluşu malik maskalama sətiri yaradılır:

$$MS = (ms_1, ms_2, \dots, ms_{d/2}), ms_i \in \{0, 1\}$$

MS sətiri açarın transformasiyası və bölüşdürülməsi üçün istifadə edilir və təhlükəsizlik yükünü azaldır.

6. OTP iki bərabər hissəyə bölünür:

$$P_1 = (otp_1^*, \dots, otp_{\frac{d}{2}}^*); P_2 = (otp_{\frac{d}{2}+1}^*, \dots, otp_d^*)$$

Bircins çarpazlaşma üçün yeni sətirlər yaradılır:

$$ch_i = \begin{cases} P_{1,i}, ms_i = 0 \\ P_{2,i}, ms_i = 1 \end{cases}$$

Alınan iki yeni övlad xromosom birləşdirilərək transformasiya edilmiş açar OTP_{CR} alınır:

$$OTP_{CR} = CH_1 \parallel CH_2$$

7. $OTP = OTP_{CR}$ olarsa, 5-ci addıma qayıdılır. Bu şərt transformasiyanın proqnozlaşdırılmasını və açarın təkrarlanmasını istisna edir.

8. Şifrəmətn (C) və OTP_{CR} açıq kanalla, MS isə təhlükəsiz kanalla ötürülür.

9. Hər iki kanaldan göndərilmiş verilənləri qəbul edən tərəf MS vasitəsilə OTP_{CR} üzərində bircins çarpazlaşmanın tərs əməliyyatını apararaq OTP^* açarını bərpa edir.

10. Bərpa edilmiş OTP^* ilə şifrəmətn üzərində (C) XOR əməliyyatı icra edilir. Nəticədə orijinal mesajın ikilik kodu bərpa olunur:

$$M_{bin} = C \oplus OTP^*$$

11. İkilik kod ASCII üzərindən ilkin mətnə çevrilir.

Təklif olunan alqoritmin blok-sxemi şəkil 5-də təsvir edilmişdir.

Alqoritmın proqramlaşdırma dilində icrası və qiymətləndirilməsi. Təklif olunan modifikasiyalı Vernam şifrləmə alqoritmının Python proqramlaşdırma dilində icrası həm nəzəri konsepsiyanın praktik tətbiqini nümayiş etdirir, həm də alqoritmın səmərəliliyinin və effektivliyinin təcrübi şəkildə sınaqdan keçirilməsini təmin edir. Python-un geniş standart kitabxanası, massivlər və mətn sətirləri üzərində çevik əməliyyat imkanları, eləcə də **Tkinter** kimi interaktiv qrafik istifadəçi interfeysi vasitələri bu tip kriptografik modellərin vizual və funksional şəkildə reallaşdırılması üçün əlverişlidir.

Alqoritmın əsas mərhələlərinin proqram təminatında implementasiyası aşağıdakı ardıcılıqla reallaşdırılır:

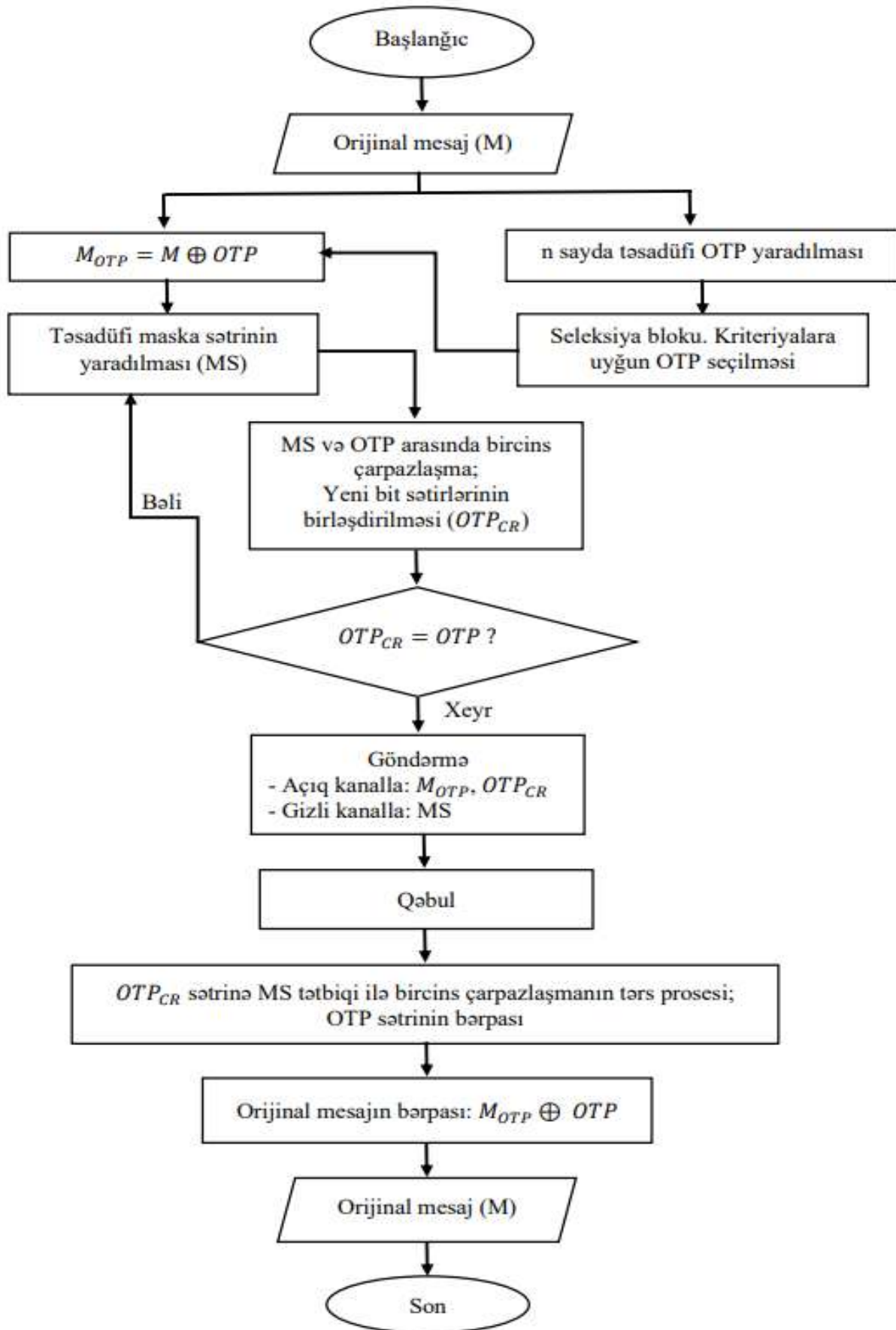
- Python-un daxili **ord()** və **format()** funksiyaları vasitəsilə simvollardan ibarət mesaj 8 bitlik ikilik sətirə çevrilir. Bu mərhələ orijinal informasiyanı şifrləmə üçün riyazi cəhətdən uyğun vəziyyətə gətirir.

- İstifadəçi tərəfindən təyin edilmiş sayda təsadüfi birdəfəlik açarın bit sətiri **random.choice()** funksiyası vasitəsilə formalaşdırılır. Hər açar üçün Şennon entropiyası, minimum periodiklik və Hemminq məsafəsi ayrıca funksiyalar vasitəsilə hesablanmaqla yanaşı, seleksiya üçün kombinasiyalı uyğunlaşma funksiyası tətbiq edilir və ən optimal açar seçilir [7].

- Birdəfəlik açarların vizual təqdimatı üçün hər bit yığınca yırca sətirdə göstərilir və seleksiyadan uğurla keçmiş populyasiya üzvü yaşıl rənglə fərqləndirilir. Təsadüfi şəkildə yeni populyasiyanın formalaşdırılması üçün yerləşdirilmiş "Regenerasiya" düyməsi vasitəsilə proses təkrarlandıqda seleksiya nəticələri və əsas kriteriya dəyərləri interaktiv şəkildə yenilənir.

- Mesajın və seçilmiş birdəfəlik açarın XOR əməliyyatı Python dilində **zip()** və **int()** funksiyaları vasitəsilə icra olunur. Bircins çarpazlaşma əməliyyatı üçün birdəfəlik açar iki bərabər hissəyə bölünür, maskalama sətirinin ədədlərinə müvafiq olaraq rekombinasiya edilir və nəticədə **otp_cr** bit sətiri əldə olunur [7].

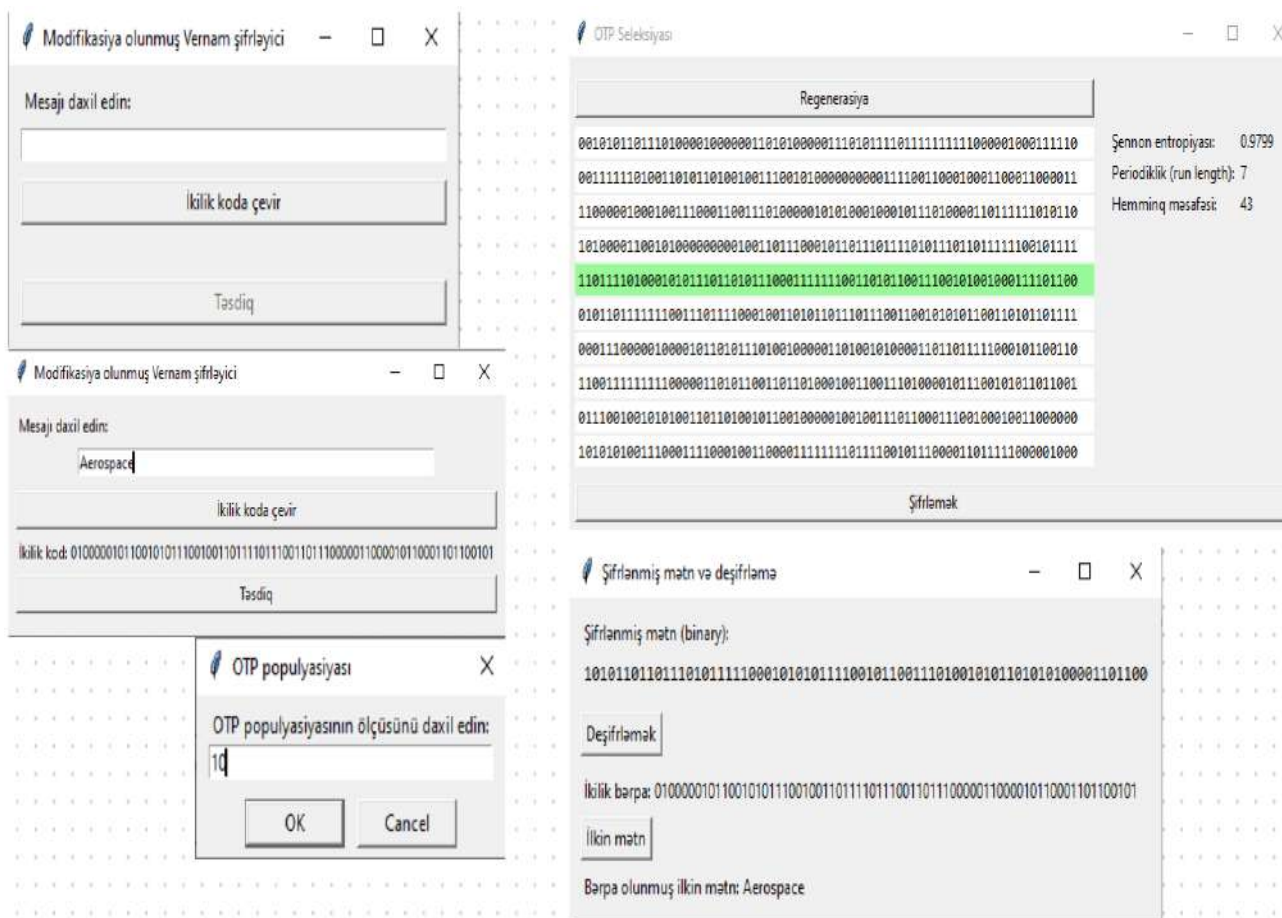
- Maskalama sətiri və **otp_cr** köməyi çarpazlaşma prosesinin tərsi nəticəsində orijinal birdəfəlik açar bərpa edilir və onunla şifrəmətn XOR operatoru tətbiq etdikdə ilkin mesajın ikilik kodu alınır. Son mərhələdə ikilik koddan ASCII mətnə çevrilmə prosesi tamamlanır.



Şəkil 5. Təklif edilən şifrələmə alqoritminin blok-sxemi

Təklif edilən alqoritmin klassik Vernam şifrələməsi ilə etibarlılıq və gizli kanala düşən yük nöqteyi-nəzərindən müqayisəli təhlili iki parametrlə əsasən aparılmış və nəticələr vizuallaşdırılmışdır.

Tərtib edilən bu proqram alqoritmin bütün mərhələlərinin funksional və yoxlanıla bilən şəkildə istifadəçiyə açıq təqdim edilməsini təmin edir. İstifadəçi hər bir addımı izləyə, kriteriya dəyərlərini qiymətləndirə və şifrələmə-deşifrələmə prosesini əyani şəkildə yoxlaya bilər. Bu yanaşma yalnız alqoritmin nəzəri əsaslarını deyil, həm də onun praktik tətbiq imkanlarını və təhlükəsizlik səviyyəsini obyektiv şəkildə nümayiş etdirir (şəkil 6).



Şəkil 6. Təklif edilən alqoritm əsasında qurulan proqramın qrafik istifadəçi interfeysi

Klassik Vernam (OTP) və təklif etdiyimiz modifikasiyalı Vernam alqoritm arasında açar bərpası ehtimalının müqayisəsini həyata keçirmək üçün aşağıdakı yolla sınaq keçirilmişdir. Hər iki sxemdə $N = 16$ uzunluğunda təsadüfi ikilik vektor ("mətn" və "açar") seçilmiş və $C = M \oplus \text{OTP}$ formuluna əsasən şifrələmə aparılmışdır. Klassik Vernam üçün açarın bərpası sadəcə C və M -dən $\text{OTP} = C \oplus M$ şəkildə birbaşa hesablanır və buna görə bütün nəzərdən keçirilən 1000 ədəd cəhdin yekun nəticəsi olaraq açarın bərpası ehtimalı 100% kimi hesablanmışdır. Modifikasiya olunmuş alqoritmə isə ilkin birdəfəlik açar maskalama sətri əsasında bircins çarpazlaşma mərhələsindən keçərək OTP_{CR} formasına çevrilmişdir. Hücumçunun əlində yalnız şifrəmətn və OTP_{CR} olduğundan, orijinal OTP-yə çatmaq məqsədilə 1000 müxtəlif təsadüfi ehtimal ("brute-force") sınaqdan keçirilir. Simulyasiya nümunəsində 1000 sınaq üçün modifikasiya olunmuş sxemdə açarın bərpa ehtimalı yalnız təxminən 1,5 % hallarda (uğur nisbəti ≈ 0.015) mümkün oldu. Real sistemdə $N \geq 128$

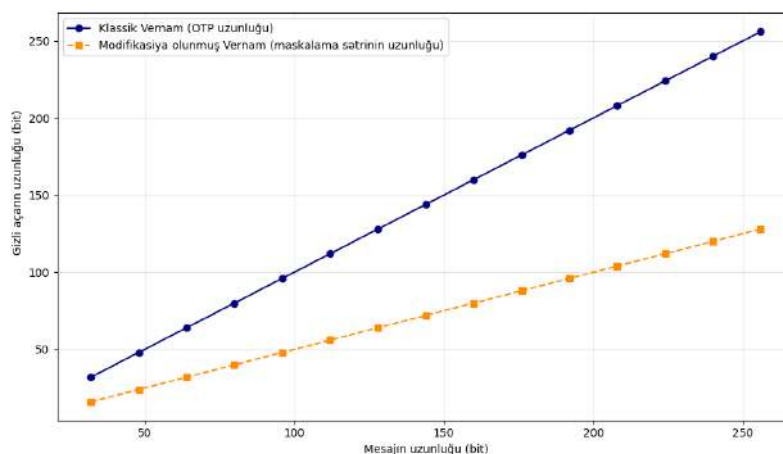
götürüldükdə və “brute-force” cəhdləri eyni məhdud sayda qaldıqda, bu ehtimal praktik olaraq sıfıra yaxınlaşır (şəkil 7).

İki alqoritm arasında bir digər parameter kimi məxfi açarın uzunluğu baxımından aparılan müqayisənin aparılmışdır. Klassik Vernamda təhlükəsizliyin əsas şərti məxfi açar kimi iştirak edən birdəfəlik açarın uzunluğunun dəqiq şəkildə mesajın uzunluğuna bərabər olmasıdır ($OTP = d$). Bu səbəbdən, OX oxunda mesajın uzunluğu artırdıqca, OY oxunda OTP-nin uzunluğu eyni tempdə artır və bu asılılıq vizual olaraq tən ortadan keçən diaqonal xətt kimi görünür.

Təklif olunan modifikasiya olunmuş alqoritmə məxfi açar kimi ötürülən maskalama sətrinin uzunluğu mesajdan təxminən iki dəfə qısa seçilir ($d/2$). Yəni maskalama sətrinin uzunluğu $d/2$ olduğu üçün vizual qrafikdə bu xətt klassik Vernam şifrini təmsil edən xətdən aşağı hissədə yerləşir (şəkil 8). Burada OTP-nin real strukturu açıq kanalla ötürülmədiyindən, hücumçunun məlumatı bərpa etməsi çətinləşir və kommunikasiya zamanı ötürülən məxfi məlumatın həcmi optimallaşdırılır.



Şəkil 7. Açar bərpası ehtimalı əsasında aparılan müqayisəli analiz nəticəsinin diaqramı



Şəkil 8. Məxfi açar uzunluğu əsasında iki alqoritmin müqayisəsinin vizual nəticəsi

Nəticədə, bu vizual təsvir göstərir ki, klassik Vernamla müqayisədə modifikasiya olunmuş alqoritmə eyni uzunluqlu mesaj üçün məxfi kanalla ötürülən əlavə informasiyanın həcmi azaldılır. Bu isə həm praktik effektivlik, həm də əlavə təhlükəsizlik təbəqəsi yaradır. Beləliklə, üçüncü tərəf

üçün sadəcə OTP-nin dəyişdirilmiş versiyası və şifrəməni aşkar olur, lakin onlar arasında korrelyasiya quraraq orijinal informasiyaya giriş ehtimalı nəzərəcarpacaq dərəcədə azalır.

Nəticə. Bu məqalədə klassik Vernam şifrələmə alqoritminin praktiki zəiflikləri təhlil edilmiş və onların aradan qaldırılması üçün genetik seleksiyaya əsaslanan modifikasiyalı Vernam şifrələmə metodu işlənmişdir. Təklif edilən alqoritm birdəfəlik açarları yüksək entropiya, minimal periodiklik və maksimal Hemming məsafəsi əsasında seçir, bu da təhlükəsizliyi və dayanıqlılığını artırır.

Proqramlaşdırılmış model və vizual interfeys əsasında aparılmış sınaqlar alqoritmin nəzəri və praktiki üstünlüklərini təsdiqləmişdir. Maskalama sətrinə əsaslanan transformasiya vasitəsilə açarın təhlükəsiz ötürülməsi və birdəfəlik açar paylanması nəticəsində infrastruktur yükü azalmışdır.

Nəticə etibarilə, modifikasiyalı Vernam alqoritmi klassik birdəfəlik açar şifrələməsinin mükəmməlliyini qorumaqla onu müasir təhlükəsizlik və tətbiq tələblərinə uyğunlaşdırır və informasiya təhlükəsizliyi üçün səmərəli alternativ kimi çıxış edir.

ƏDƏBİYYAT

1. Ələkbərova T.Ş. Kiber-fiziki sistemlərdə autentifikasiya metodlarının analizi. //– Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası. Elmi Məcmuə. – 2024, №3, cild 26, – s. 25-35. DOI: 10.30546/EMNAA.2024.03.007.
2. Le, D.-N., Kumar, R., Mishra, B. K., Chatterjee, J. M., & Khari, M. (Eds.). (2019). Cyber security in Parallel and distributed computing: Concepts, techniques, applications and case studies. Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119488330>
3. B.G. Tagiyev, N.H. Khalilova. Security requirements and behavior detection of IoT. //–Bakı: National Aviation Academy. -Elmi Mejmue, -2019, 21(№2), -pp.76-79. DOI: 10.30546/EMNAA.2019.21.2.76.
4. Jamil, S., Hiramony, N. T., Tanisha, T. T., & Chakraborty, R. (2022). Circuit implementation of Vernam cipher-based data encryption using cellular automata. In 2022 25th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (pp. 763–767). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIT57492.2022.10055452>
5. Cincotta, P. M., Giordano, C. M., Silva, R. A., & Beaugé, C. (2021). The Shannon entropy: An efficient indicator of dynamical stability. Physica D: Nonlinear Phenomena, 417, 132816. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132816>
6. Yang, X.-S. (2021). Genetic Algorithms. In X.-S. Yang (Ed.), Nature-Inspired Optimization Algorithms (2nd ed., pp. 91–100). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821986-7.00013-5>
7. Kim, J., & Yoo, S. (2019). Software review: DEAP (Distributed Evolutionary Algorithm in Python) library. Genetic Programming and Evolvable Machines, 20(1), 139-142. <https://doi.org/10.1007/s10710-018-9341-4>

REFERENCES

1. Alakbarova T.Sh. Analysis of authentication methods in cyberphysical systems. //–Bakı: National Aviation Academy. -Elmi Mejmue, -2024, 26(№3), -pp. 25-35. DOI: 10.30546/EMNAA. 2024.03.007.

2. Le, D.-N., Kumar, R., Mishra, B. K., Chatterjee, J. M., & Khari, M. (Eds.). (2019). Cyber security in Parallel and distributed computing: Concepts, techniques, applications and case studies. Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119488330>
3. B.G. Tagiyev, N.H. Khalilova. Security requirements and behavior detection of IoT. //Bakı: National Aviation Academy. -Elmi Məcmuə, -2019, 21(№2), -pp.76-79. DOI: 10.30546/EMNAA.2019.21.2.76.
4. Jamil, S., Hiramony, N. T., Tanisha, T. T., & Chakraborty, R. (2022). Circuit implementation of Vernam cipher-based data encryption using cellular automata. In 2022 25th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (pp. 763–767). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIT57492.2022.10055452>
5. Cincotta, P. M., Giordano, C. M., Silva, R. A., & Beaugé, C. (2021). The Shannon entropy: An efficient indicator of dynamical stability. Physica D: Nonlinear Phenomena, 417, 132816. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132816>
6. Yang, X.-S. (2021). Genetic Algorithms. In X.-S. Yang (Ed.), Nature-Inspired Optimization Algorithms (2nd ed., pp. 91–100). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821986-7.00013-5>
7. Kim, J., & Yoo, S. (2019). Software review: DEAP (Distributed Evolutionary Algorithm in Python) library. Genetic Programming and Evolvable Machines, 20(1), 139-142. <https://doi.org/10.1007/s10710-018-9341-4>

A MODIFIED VERNAM CIPHER ALGORITHM FOR THE ENHANCEMENT OF SECURITY SYSTEMS

Ibrahimova S.R., Huseynzade I.M.
National Aviation Academy

This paper investigates an innovative approach aimed at addressing the escalating demands of modern information security systems through the integration of bio-inspired technologies. The core focus is the modification of the classical Vernam cipher algorithm using the principles of genetic algorithms, and the practical applicability of this modification in high-security environments. At the heart of the proposed method lies the process of selecting optimal keys from a one-time pad population. This selection is driven not merely by randomness, but by the purposeful optimization of criteria such as Shannon entropy, minimal periodicity, and maximal Hamming distance.

Mechanisms inspired by genetic models — particularly uniform crossover and masking — enable the dynamic transformation of keys, thereby offering effective solutions to critical challenges such as secure key exchange and reliable recovery of lost keys. The paper provides a rigorous mathematical analysis of the modified algorithm, its implementation using contemporary programming languages, and its step-by-step deployment via a visual interface. Experimental results clearly demonstrate that the enhanced algorithm preserves the theoretical robustness of the classical Vernam method while significantly mitigating its practical limitations.

Ultimately, this research proposes a reliable, adaptive, and easily scalable security solution based on genetically optimized Vernam encryption, tailored for modern systems operating in dynamic

and high-threat environments. Beyond addressing current security challenges, the proposed framework lays a foundational groundwork for future studies in bio-inspired cryptography and key management.

Key words: Vernam cipher, genetic algorithm, one-time pad (OTP), Shannon entropy, Hamming distance, run length, information security, encryption algorithms.

Rəyçilər: *t.e.d., prof., AMEA-nın müxbir üzvü İsmayilov İ.M.*
t.f.d. Rüstəmov R.R.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
İbrahimova Sevdə Rafiq qızı	Milli Aviasiya Akademiyası	Milli Aviasiya Akademiyası, “İnformasiya sistemləri” kafedrasının dosenti, f-r.f.d.	sibrahimova@naa.edu.az mob: +994 50 791-89-84
Hüseynzadə İsa Məmmədli oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Milli Aviasiya Akademiyasının doktorantı	hzadeh.isa.naa@gmail.com mob: +994 70 256-92-82

УДК 621.397.23

DOI: 10.30546/EMNAA.2025.25.03.110

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ ТВ ВЕЩАНИЯ ПО
СТАНДАРТУ DVB-T2 НА ТЕРРИТОРИИ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

¹Мамедов И.Р., ²Шарифов А.М.

¹Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности

²“ATV+” ООО, советник директора по техническим вопросам

В настоящее время подавляющее большинство стран Европы ведут ТВ вещание в стандарте DVB-T2, используя все преимущества данного стандарта, однако основная часть ТВ передатчиков в сети цифрового ТВ вещания нашей республики была установлена до 2010 г. и поэтому поддерживался только стандарт DVB-T.

В статье рассмотрены различные способы построения одночастотной сети ТВ вещания по стандарту DVB-T2, показаны основные параметры стандартов DVB-T и DVB-T2, а также расширение параметров DVB-T2 по сравнению с параметрами DVB-T. Путём сравнения показателей этих двух стандартов, выявлены преимущества стандарта DVB-T2.

В работе проведен анализ достижения положительных эффектов в стандарте DVB-T2 за счёт расширения параметров по сравнению с DVB-T. Показаны преимущества стандарта DVB-T2 по сравнению со стандартом DVB-T при построении одночастотной сети ТВ вещания. Определены возможности построения одночастотной сети на основе стандарта DVB-T2 с использованием спутника, построена структура такой сети. Изучены способы создания идентичного эфирного сигнала каждым модулятором передатчика, помехоустойчивого кодирования, построения кадра и модуляции для формирования радиочастотного сигнала и определения точного времени излучения сигнала сети SFN.

Рассмотрены принципы построения одночастотной сети на основе DVB-T2 при эфирном приеме сигнала от головного передатчика, построена схема такой сети, описаны основные принципы работы сети и обработки входящего сигнала DVB-T2 в приёмнике ретрансляционной станции для создания идентичного эфира на каждой станции в сети SFN, определены типы и особенности используемых ретрансляторов.

Ключевые слова: Стандарт DVB-T2, одночастотная сеть, ретрансляционная станция, головной передатчик, идентичный эфир.

Состояние проблемы. Пробное цифровое телевизионное (ТВ) вещание в Баку было начато в 2004 г., в период, когда было организовано ТВ вещание на новой бакинской телебашне передатчиком DVB-T (Digital Video Broadcasting- Terrestrial) мощностью 300 Вт. Результаты были положительными, что впоследствии помогло в построении существующей сети DVB-T в республике. Переход на цифровое ТВ вещание по стандарту DVB-T в Азербайджане завершился в 2016 г. и было достигнуто надёжное, качественное цифровое вещание ТВ пакетов на более чем 99% территории республики [1].

Переход на цифровое ТВ вещание начали и другие постсоветские республики. При этом в некоторых из них был сделан выбор в пользу DVB-T2, поскольку тогда уже началось массовое производство этих передатчиков. Напомним, что основная часть передатчиков DVB-

Т, сети цифрового ТВ вещания республики, была установлена до 2010 г. (стандарт DVB-T2 тогда ещё прорабатывался). Этим и объясняется выбор стандарта DVB-T в нашей стране. На данный момент подавляющее большинство стран Европы ведут вещание в стандарте DVB-T2, используя все преимущества данного стандарта [2]. По состоянию на 2022 г., количество зрителей, использующих DVB-T2, достигло отметки в 91 млн.

Платформы, использующие стандарт технологии DVB-T2, являются надёжным и широкодоступным способом бесплатного доступа к телевизионным программам. Переход на DVB-T2 позволяет в два раза уменьшить количество работающих передатчиков по сравнению с DVB-T [2, 3]. Уменьшение количества передатчиков даёт дополнительную экономию электроэнергии. Они надолго останутся важной опцией дистрибуции телеконтента в европейских странах.

Постановка задачи. Учитывая опыт использования стандарта DVB-T2 европейскими странами, можно предположить, что переход на DVB-T2 в республике будет разумным решением, в результате чего появится более устойчивая, надёжная, гибкая и ёмкая сеть ТВ вещания. На основе этого стандарта можно создать производительную одночастотную DVB-T2 сеть, обладающую многими преимуществами по сравнению с одночастотной сетью DVB-T стандарта [2, 4, 5].

Переход с DVB-T на DVB-T2 также мотивирован повышением спектральной эффективности ТВ вещания. Повышение спектральной эффективности означает, что с той же шириной спектра можно транслировать большее количество программ или то же число программ с более высоким качеством, или более высоким качеством зоны покрытия. Спектральная эффективность становится все более важной для наземного цифрового телевидения, поскольку спектр, ранее выделенный для ТВ вещания, теперь перераспределяется в пользу систем мобильной связи, в частности 4G LTE (Generation – поколение, Long Term Evolution – долгосрочная эволюция) и т.д.

Следует отметить, что в нынешнем парке ТВ передатчиков ПО «Телерадио» некоторая часть передатчиков может осуществлять ТВ вещание в обоих стандартах – в DVB-T и DVB-T2, что является положительным моментом при переходе на DVB-T2 [6].

Преимущества стандарта DVB-T2 перед DVB-T широко освещены в различной литературе. Расширенный диапазон параметров COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex – ортогональное частотное разделение каналов с кодированием) позволяет значительно уменьшить объём служебных данных в DVB-T2 по сравнению с DVB-T, что в совокупности с улучшенным кодированием и исправлением ошибок позволяет увеличить пропускную способность почти на 50% для MFN (Multi-Frequency Network – многочастотная сеть) и даже больше для SFN (Single Frequency Network – одночастотная сеть) [2, 7, 8]. Пропускная способность сети может достигать значений близких к 50 Мбит/сек.

Появляется возможность использования на передатчиках, входящих в сеть SFN, узкополосных усилителей мощности по схеме Догерти с более высоким промышленным КПД по сравнению с широкополосными усилителями мощности.

Таким образом, внедрение стандарта DVB-T2 в ТВ вещании наряду с другими преимуществами открывает новые возможности построения одночастотной наземной сети ТВ вещания.

Целью настоящей статьи является исследование возможности построения одночастотной наземной сети ТВ вещания по стандарту DVB-T2 на территории нашей страны.

Решение задачи. Существуют различные способы построения одночастотной сети ТВ вещания. Построение этой сети по стандарту DVB-T2 позволяет достичь ряда преимуществ. Параметры DVB-T2 были расширены по сравнению с параметрами DVB-T. Поэтому внедрение стандарта DVB-T2 в сети ТВ вещания дает значительное преимущество по сравнению со стандартом DVB-T. Проанализируем положительные эффекты, полученные в стандарте DVB-T2 путем расширения параметров по сравнению с DVB-T. В таблице 1 показаны основные параметры стандартов DVB-T и DVB-T2 [4, 8].

Таблица 1

Основные параметры стандартов DVB-T и DVB-T2

№	Название параметра	Стандарт DVB-T	Стандарт DVB-T2
1	FEC	CC+RS	LDPC+BCH
2	Скорость кодирования	1/2; 2/3; 3/4; 5/6	1/2; 3/5 ; 2/3; 3/4; 4/5 ; 5/6
3	Созвездие	QPSK; 16-QAM; 64-QAM	QPSK; 16-QAM; 64-QAM; 256-QAM
4	Защитный интервал	1/4; 1/8; 1/16; 1/32	1/4; 19/256 ; 1/8; 19/128 ; 1/16; 1/32; 1/128
5	Размер FFT	2K; 8K	1K ; 2K; 4K ; 8K; 8K ext. ; 16K ; 16K ext. ; 32K ; 32K ext.
6	Распределенные пилот сигналы	8% от общего количества несущих	1% ; 2% ; 4% ; 8% от общего количества несущих
7	Непрерывные пилот сигналы	2,6% от общего количества несущих	0,35% от общего количества несущих
8	Занимаемая полоса частот	5; 6; 7; 8 МГц	1,7 ; 5; 6; 7; 8; 10 МГц
9	Минимальная скорость	31,66 Мбит/сек	50,34 Мбит/сек

Для сравнения отличительные показатели стандарта DVB-T2 приведены в таблице жирным шрифтом. Сравнивая показатели этих двух стандартов, мы можем определить преимущества стандарта DVB-T2. Некоторые из них преимуществ следующие:

- FEC (Forward Error Correction – упреждающая коррекция ошибок) нового поколения и более высокая конфигурация созвездий QAM (Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция), например, 256-QAM, приводят к увеличению пропускной способности на 25-30%, приближаясь к пределу Шеннона;

- увеличение несущих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) с 8K до 32K. Применение в SFN защитного интервала 1/16 вместо 1/4 дает дополнительный выигрыш примерно на 18%;

- оптимизация распределенных пилот-сигналов в соответствии с защитным интервалом (GI – Guard Interval) и минимизация непрерывных пилот-сигналов приводят к уменьшению служебной информации, т.е. избыточных данных примерно на 10%;

- расширение полосы пропускания, например, для ширины канала 8 МГц ширина спектра сигнала увеличивается до 7,77 МГц вместо 7,61 МГц (при этом выигрыш составляет 2%);

- расширенное перемежение включающее чередование битов, ячеек, времени и частоты, позволяет повысить помехоустойчивость системы;

- транзисторы в усилителях мощности по схеме Догерти работают в более оптимальных режимах, что повышает надёжность передатчика. Это позволяет достичь экономии электроэнергии 1,5 раза;
- в DVB-T2 для защиты от ошибок используется LDPC (Low Density Parity Check – проверка на чётность с низкой плотностью) и кодирование БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хоквингема), что также повышает помехоустойчивость систем [9].

Рассмотрим различные варианты построения одночастотной сети на основе DVB-T2 стандарта.

1. Построение одночастотной сети на основе DVB-T2 стандарта с использованием спутника. На рис. 1 изображена возможная конфигурация одночастотной сети, использующей шлюз DVB-T2 и спутник для передачи необходимых сигналов.

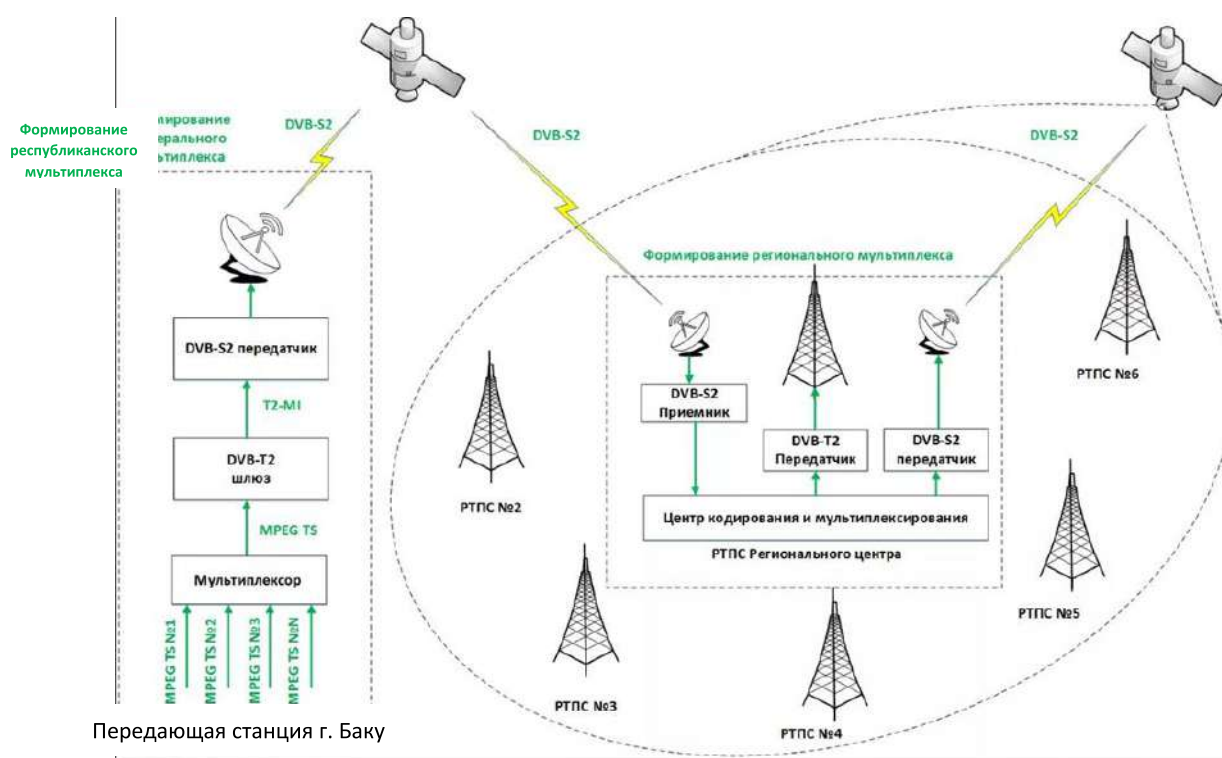


Рисунок 1. Одночастотная сеть DVB-T2, использующей шлюз DVB-T2

Для обеспечения работы одночастотной сети решение о распределении ресурсов и планировании работы принимается один раз в шлюз DVB-T2, в результате чего, передаваемые по интерфейсу T2-MI (Modulator Interface – интерфейс модулятора) сигналы распространяются в таком формате, чтобы каждый модулятор в сети SFN мог однозначно создать идентичный эфирный сигнал [4, 5]. Пакеты T2-MI используются только модуляторами и не транслируются передатчиками.

Шлюз DVB-T2 принимает один или несколько входных потоков для системы DVB-T2, преобразует их в некодированный формат модулирующего цифрового сигнала и генерирует соответствующую сигнальную информацию L1 для отправки по T2-MI. Все управляющие сигналы и контент распространяются через спутник. DVB-T2 модуляторы на каждой из РТПС (радио телевизионная передающая станция) используют эти данные из T2-MI и выполняют необходимое кодирование от ошибок, построение кадра и модуляцию для формирования

радиочастотного сигнала системы DVB-T2. Интерфейс модулятора DVB-T2 передаёт системные данные DVB-T2, MPEG-2 (Moving Picture Experts Group – Экспертная группа подвижных изображений) TS (Transport stream – Транспортный поток) и/или общие потоки, инкапсулированные в кадры DVB-T2.

Кроме того, T2-MI также передает другие данные DVB-T2, включая [4]:

- данные сигнализации L1, позволяющие модулятору создавать кадры DVB-T2;
- I/Q векторные данные для любых вспомогательных потоков;
- временные метки DVB-T2 (для синхронизации);
- данные кадра будущего расширения.

За исключением временной метки DVB-T2 вся эта информация излучается передатчиками как часть эфирного сигнала DVB-T2. Данные временной метки синхронизации не передаются по эфиру, а используются модуляторами для определения точного времени излучения сигнала DVB-T2.

2. Построение одночастотной сети на основе DVB-T2 при эфирном приеме сигнала от головного передатчика. Когда несколько ретрансляторов, входящих в SFN, принимают входной сигнал DVB-T2 по эфиру от головного передатчика, работающего на частоте f_1 и повторно передают его на общей частоте f_2 , необходимо выполнить эту повторную передачу от ретрансляторов синхронизированным по времени способом. Для синхронизации ретрансляторов используется T2-MIP (Modulator Information Packet – информационный пакет модулятора) [2, 4, 5].

Существует два типа ретранслятора:

- регенеративные ретрансляторы, т.е. демодулирующие сигнал DVB-T2 и перенастраивающие демодулированные транспортные потоки для формирования регенерированного сигнала DVB-T2, который затем повторно передается;
- транспозеры, т.е. приемопередатчики, получающие входной сигнал вне эфира. Они будут усиливать, задерживать и передавать принятый сигнал DVB-T2 на другой частоте без проведения полного процесса демодуляции.

В этой ситуации ретрансляционные передатчики не имеют доступа к пакетам T2-MI, которые использовались модулятором головного передатчика для генерации эфирного сигнала DVB-T2.

Поскольку сигнал физического уровня был определен на головном передатчике, единственными данными, необходимыми для синхронизации ретрансляторов, является время излучения. Время излучения находится в специальном пакете транспортного потока.

Информационный пакет модулятора передается в эфирном сигнале головного передатчика DVB-T2. Этот пакет TS декодируется демодулятором в каждом ретрансляторе для извлечения времени излучения конкретного суперкадра сигнала DVB-T2. Основываясь на этой информации и знании времени, принимаемого в данный момент суперкадра, каждый ретранслятор может применить соответствующую временную задержку, чтобы обеспечить передачу суперкадра в требуемое время [2].

Эта версия спецификации T2-MI определяется только T2-MIP для передачи по транспортным потокам, который является производным от эквивалентного пакета, используемого в сетях DVB-T. Следует отметить, что T2-MIP отличается от MIP DVB-T.

Устройство ввода T2-MIP находится в шлюзе T2, поскольку именно это устройство определяет конструкцию DVB-T2 кадра и суперкадра, следовательно, временную зависимость

пакетов TS от модуляции. Приемник на ретрансляционной станции будет обрабатывать входящий сигнал DVB-T2 таким образом, чтобы он мог эффективно передавать эквивалент сигнала T2-MI на модулятор ретранслятора [2, 4, 5]. Это необходимо для обеспечения того, чтобы модулятор каждого ретранслятора создавал идентичный эфир на каждой станции в SFN. Там, где сеть транслирует несколько профилей DVB-T2 (например, комбинацию профилей T2-Base и T2-Lite), необходимо будет поддерживать точную реконструкцию сигнала физического уровня для всех профилей.

Выводы. 1. Создание одночастотной сети SFN на основе стандарта DVB-T2 для ТВ вещания на территории Азербайджанской Республики высвобождает множество частот, уменьшает уровень внутрисистемных помех.

2. Использование на передатчиках, входящих в сеть SFN узкополосных усилителей мощности по схеме Догерти, позволяет достичь экономии электроэнергии 1,5 раза.

3. Переход на стандарт DVB-T2 позволяет уменьшить количество работающих передатчиков по сети SFN по сравнению с количеством передатчиков в сети SFN по стандарту DVB-T в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамедов, И.Р., Шарифов, А.М., Аббасов, М.Г. Расчет напряженности поля ТВ станции при действии внутрисистемных помех // – Баку: Ученые записки АзТУ, – 2011, №2, – с. 108-114.
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second- generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)//– DVB Document A122. – 2010, June.
3. Digital Video Broadcasting (DVB)// – ETSI Std. EN 302 755. – 2012, v. 1.3.1, April.
4. Modulator Interface (T2-MI) for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)// – DVB Document A136. – 2016, January.
5. Modulator Interface (T2-MI) for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)// – ETSI Technical Specification TS 102 773. – 2012, v.1.3.1, January.
6. Рекомендация МСЭ-R ВТ.2033 Критерии планирования, включая защитные отношения, для систем цифрового наземного телевизионного вещания второго поколения в диапазонах ОВЧ/УВЧ// – 2013, январь.
7. Chen, H., Chen, W., Chung, C. Spectrally Precoded OFDM and OFDMA with Cyclic Prefix and Unconstrained Guard Ratios // – New York: IEEE Transactions on Wireless Communications, – 2011, v. 10, May, N0 5, – pp. 1211-1215.
8. Серов, А.В. Эфирное цифровое телевидение DVB-T/H // – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, – 2010, – 464 с.
9. Məmmədov, İ.R., Əfəndiyev, İ.D. LMDS sisteminin “enmə xətti” üzrə modulyasiya üsulunun dəyişdirilməsi zamanı energetiki effektivliyin artırılması// –Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri, – 2017, cild 19, № 3, – s.20-24.
10. Məmmədov İ.R., Muradzadə E.İ. İnteraktiv yerüstü televiziya yayım sisteminin əks kanalında baza stansiyasının radiovericisinin kanallar üzrə gücünün seçilməsi və tənzim olunması.

//-Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası. Elmi Məcmuə, – 2023, №2, cild 25, – s. 1-7. DOI: 10.34826/EMNAA.2023.25.2.002.

REFERENCES

1. Mamedov, I.R., Sharifov, A.M., Abbasov, M.G. Raschet napryajennosti polya TV stantsii pri deystvii vnutrisistemnykh pomekh // – Baky: Uchenye zapiski AzTU, – 2011, №2, – s. 108-114.
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second- generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)//– DVB Document A122. – 2010, June.
3. Digital Video Broadcasting (DVB)// – ETSI Std. EN 302 755. – 2012, v. 1.3.1, April.
4. Modulator Interface (T2-MI) for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)// – DVB Document A136. – 2016, January.
5. Modulator Interface (T2-MI) for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)// – ETSI Technical Specification TS 102 773. – 2012, v.1.3.1, January.
6. Rekomendatsiya MSE-R VT.2033 Kriterii planirovaniya, vklyuchaya zashitnye otnosheniya, dlya system tsifrovogo nazemnogo televizionnogo veshaniya vtorogo pokoleniya v diapazonakh OVCh/UVCh//–2013, yanvar.
7. Chen, H., Chen, W., Chung, C. Spectrally Precoded OFDM and OFDMA with Cyclic Prefix and Unconstrained Guard Ratios // – New York: IEEE Transactions on Wireless Communications, – 2011, v. 10, May, N0 5, – pp. 1211-1215.
8. Serov, A.V. Efirnoe tsifrovoe televidenie DVB-T/H//– Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg,- 2010,-464s.
9. Mammadov, İ.R., Efendiyev, İ.D. LMDS sisteminin “enmə khetti” uzre modulyasiya usulunun deyishdirilmesi zamany energetiki effektivliyin artyrylmasy// –Azerbaijan Milli Aviasiya Akademiyasynyn Elmi Mejmueleri, – 2017, jild 19, № 3, – s.20-24.
10. Mammadov İ.R., Muradzade E.İ. Selection and adjustment of power on the channels of the radio transmitter of the base station in the reverse channel of the interactive terrestrial television broadcast system. //-Baky: National Aviation Academy. -Elmi Mejmue, -2023, 25(№2), -pp. 1-7. DOI: 10.34826/EMNAA.2023.25.2.002.

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI ƏRAZİSİNDƏ DVB-T2 STANDARTI ÜZRƏ TƏKTEZLİKLİ TELEVİZİYA YAYIM ŞƏBƏKƏSİNİN YARADILMASI PERSPEKTİVLƏRİ

¹Məmmədov İ.R., ²Şərifov Ə.M.

¹Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, ²“ATV+” MMC

Hazırda Avropa ölkələrinin böyük əksəriyyəti DVB-T2 standartın bütün üstünlüklərini əsas tutaraq televiziya yayımını bu standart üzrə həyata keçirirlər. Lakin respublikamızın rəqəmsal

televiziya yayımı şəbəkəsində istifadə olunan televiziya ötürücülərinin əksəriyyəti 2010-cu ildən əvvəl quraşdırılmışdır və buna görə də yalnız DVB-T standartını dəstəkləyirlər.

Məqalədə DVB-T2 standartına uyğun birtezlilikli televiziya yayım şəbəkəsinin qurulmasının müxtəlif üsulları və DVB-T və DVB-T2 standartlarının əsas parametrləri verilmiş, DVB-T parametrləri ilə müqayisədə DVB-T2 parametrlərinin genişləndirilməsi göstərilmişdir. Bu iki standartın göstəricilərini müqayisə etməklə DVB-T2 standartının üstünlükləri müəyyən edilmişdir.

Məqalədə DVB-T ilə müqayisədə DVB-T2 standartında parametrlərin genişləndirilməsi hesabına müsbət effektlərin əldə edilməsi təhlil edilmiş, təktezlilikli TV yayım şəbəkəsinin qurulmasında DVB-T2 standartının DVB-T standartı ilə müqayisədə üstünlüklərə malik olması göstərilmişdir. Peykdən istifadə etməklə DVB-T2 standartı əsasında təktezlilikli şəbəkənin qurulması imkanları öyrənilmiş, belə şəbəkənin strukturu qurulmuş və hər bir ötürücü modulyatoru ilə eyni yerüstü signalın yaradılması, maneədayanıqlı kodlama, kadrın strukturunun formalaşdırılması və radiotezlilik signalının yaradılması üçün modulyasiya və SFN signalının şüalandırılmasının dəqiq vaxtının müəyyən edilməsi üsulları öyrənilmişdir.

Baş stansiyanın signalı efirdən qəbul olunduqda DVB-T2 əsasında birtezlilikli şəbəkənin qurulması nəzərdən keçirilmiş, belə şəbəkənin strukturu qurulmuş, onun iş prinsipi izah edilmiş, SFN şəbəkəsində identik yayım yaratmaq üçün retranslyasiya stansiyasının qəbuledicisində daxil olan DVB-T2 signalının işlənməsi prinsipləri tədqiq olunmuş, istifadə olunan retranslyatorların tipləri və xüsusiyyətləri müəyyən olunmuşdur.

Açar sözlər: DVB-T2 standartı, birtezlilikli şəbəkə, retranslyasiya stansiyası, baş stansiyanın radiovericisi, identik yayım.

PROSPECTS FOR CREATING A SINGLE-FREQUENCY TV BROADCASTING NETWORK BASED ON DVB-T2 STANDARD IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Mammadov I.R., Sharifov A.M.

¹Azerbaijan State Oil and Industry University, ²“ATV+” LLC

Currently, the vast majority of European countries broadcast TV in the DVB-T2 standard, using all the advantages of this standard. But the main part of TV transmitters in the digital TV broadcasting network of our republic was installed before 2010 and therefore support only the DVB-T standard.

The article considers various methods of constructing a single-frequency TV broadcasting network according to the DVB-T2 standard, shows the main parameters of the DVB-T and DVB-T2 standards, as well as the expansion of the DVB-T2 parameters compared to the DVB-T parameters. By comparing the parameters of these two standards, the advantages of the DVB-T2 standard are revealed.

The paper analyzes the achievement of positive effects in the DVB-T2 standard due to the expansion of parameters compared to DVB-T. The advantages of the DVB-T2 standard compared to the DVB-T standard in the construction of a single-frequency TV broadcasting network are shown. The possibilities of constructing a single-frequency network based on the DVB-T2 standard using a satellite were studied, the structure of such a network was constructed, and methods for creating an identical terrestrial signal by each transmitter modulator, noise-immunity coding, frame construction

and modulation for forming a radio signal and determining the exact time of emission of the SFN network signal were studied.

The principles of constructing a single-frequency network based on DVB-T2 for over-the-air reception of a signal from a main transmitter are considered, a scheme of such a network is constructed, the basic principles of network operation and processing of the input DVB-T2 signal in the receiver of a relay station to create an identical broadcast at each station in the SFN network are described, and the types and features of used repeaters are determined.

Key words: DVB-T2 standard, single-frequency network, retranslation station, head transmitter, identical broadcast.

Рецензент: д.т.н., профессор Абдуллаев Х.И.

д.т.н., профессор Мансуров Х.М.

Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество	Место работы	Должность, научная степень, научное звание	Контакты
Мамедов Иса Рахман оглы	Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности	Профессор кафедры «Электроника и автоматика», д.т.н., профессор	isamamedov@bk.ru mob: (+994) 50 353 45 87
Шарифов Афлатун Мустафа оглы	“ATV+” ООО	Советник директора по техническим вопросам	aflatun.sharifov@gmail.com mob: (+994) 50 225 - 98 - 95

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TWIN IN AIRPORT OPERATIONS

¹Hajiyev Y.M., ²Dadashov F.H.

¹Azerbaijan State Oil and Industry University

²National Aviation Academy of Azerbaijan

As airports undergo digital transformation, i.e. a paradigmatic shift in the way digital technologies are adopted and used, there is a need for actionable insights to ensure that airport digital maturity is achieved. These incredible changes, made possible by advanced technologies and the latest automation techniques.

Using an integrative review of literature, this paper develops a transformation model of modern airport cyber-physical system incorporating artificial intelligence and digital twin techniques to improve the management of airport services and operations.

The model is then detailed to pinpoint important elements that airports must take into account while revamping their airport management system in order to enhance the caliber and effectiveness of the wide range of services provided and streamline intricate work procedures.

Both practitioners and researchers interested in carrying out more study in this field can benefit from the insights provided by the model.

Airport management is undergoing a digital transformation, i.e. a paradigm shift in the way digital technologies are adopted and used. Effective approaches are needed to ensure that airports achieve digital maturity.

Critical elements that must be considered when modernizing the entire airport management system are identified to improve the level and efficiency of a wide range of services provided and to optimize complex service procedures.

Key words: *Airport managing, digital transformation, artificial intelligence, digital twin, intelligent automation, air transport operations.*

Introduction. Airports are always at the forefront of technological innovation [1], and they always strive to adapt to continuous transformation, in line with the development of modern and advanced information technologies such as big data, artificial intelligence, Internet of Things, edge computing, etc.

In a fairly short time, airports have gone through at least four stages of transformation in the methods of providing traditional services. These stages are illustrated in the diagram below.

As shown in the figure, the final (4th) stage of airport digital transformation is the full integration of big data (BD), Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI) and other digital technologies into airport management services and systems. Airports are rapidly using digital twins (DT) combined with artificial intelligence (AI) to improve the efficiency, safety and comfort of their passenger-oriented operations and services [2].

At its core, an airport is a complex cyber-physical [3,4] system — a system that integrates sensors, computing, networking, and control into actual infrastructure and objects to connect them to the Internet and each other.

By the way of combination of artificial intelligence with digital twin technology, airports can automate a variety of routine operations like tracking passenger movements, check luggage for

security threats, optimizing up the check-in and boarding processes, and providing personalized assistance and information. Airports nowadays are intricate cyber-physical systems that combine technical and physical infrastructure, service infrastructure, and instruments for computer monitoring of processes in airport (figure 1).

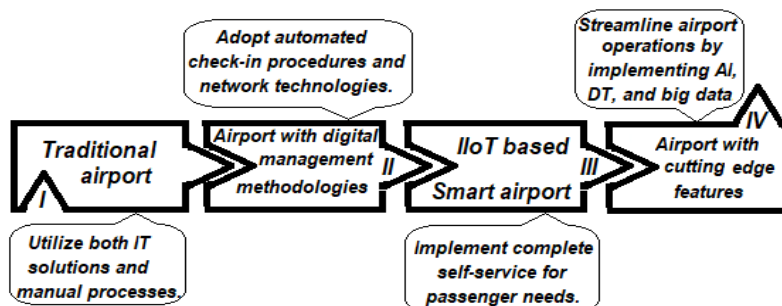


Figure 1. Stages of IT integration into airport operations

The digital chain for collecting, storing and systematizing primary data, as well as developing solutions for managing operations and monitoring services based on artificial intelligence, are part of the complete digital transformation of airport services and operations [5].

The generalized architecture of a modern AI-driven airport's cyber-physical system is depicted in the figure below (figure 2).

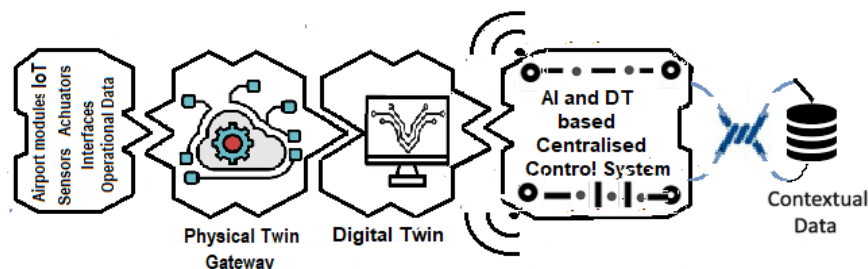


Figure 2. Modern airport cyber-physical system incorporates physical and technical structures, service infrastructure, computer and software monitoring and control tools

The figure illustrates how the cyber-physical system of the airport collects operational data from several airport modules to create a Physical Twin (PT) displaying the operational procedures flow charts taking place in these modules. Based on PT the Digital Twin (DT) is formed, which is a virtual prototype of the processes in the modules. The DT, accumulating contextual data from all airport modules, sends them to the Central Control System (CCS). The CCS system, when equipped with artificial intelligence applications, will manage and regulate the operating modes of each module in accordance with the requirements of passenger services.

Digital and virtual representations of real service-oriented processes are incorporated into airport modules to make it easier to gather crucial data for operational optimization.

Key Features and Capabilities of a Digital Twin

DT is a dynamic virtual copy of real operational systems, with imitation of key functions and procedures implemented in all airport complexes. The DT–PT tandem allows, based on incoming dynamic data, to perform digital tracking of services, as well as to model potential scenarios of work at airports.

DT, being coupled with an AI-based management system, can provide unlimited possibilities for oversight and control of many aspects of airport operations. The DT architecture consists of three layers:

- a) *soft-layer incorporates* — IoT actuators/sensors, servers, routers [6];
- b) *middle-ware* — connectivity, control, data handling, processing, modelling, visualization;
- c) *hard-ware layer* — data dashboard, analytics engines, ML models, simulation and modelling software.

DT solutions [2] are tailored to the specific operational needs of each airport module, its operational procedures and the service requirements it provides. The configuration of the DT and its adaptation to the specifics of airport processes and service operations is a complex and labor-intensive process that occurs through several stages from assessing process opportunities to monitoring progress and return on investment.

The basic building blocks of the DT architecture are common components that need to be adjusted to meet the unique requirements of each airport module (figure 3). The image below shows how the DT architecture is configured from five fairly versatile blocks:



Figure 3. Schema of acquisition, transfer, and processing of service data required to build a distributed airport management platform based on combination of AI and DT components

1. To create a pertinent DT version, evaluate the process capabilities and specify the size and scope of the associated DT solution:

2. Is a piece of equipment or a system completely duplicated, or just a part of it?

-which tasks must be performed again?

-the DT platform's capabilities and desired results?

3. Crucial components of the DT architecture.

The creation of a minimal viable product (MVP) requires features.

4. Along the way, it is necessary to maintain the DT MVP.

To stabilize and get a mature version, the DT solution needs to be modified.

Hold onto the DT MVP while you develop.

Include Extra Steps and Sections.

5. A set of precise DT criteria are selected, as well as procedures that need to be reproduced in the final product. Monitor Development and make ensure the DT platform is operational.

Keep an eye on business needs so you can replicate them dynamically.

The resulting digital twin is integrated with an artificial intelligence (AI) analytics node that can analyze all aspects of airport services and provide useful recommendations for identifying system defects, optimizing workflows, and anticipating future improvements to airport service conditions, among other things. Using this DT development guide, airport employees may create an optimum DT and ensure its smooth integration into the controlling system of airport service operations and procedures.

3. Factors that facilitate or impede the use of AI and DT in airport management

The process of implementing AI with DT may encounter various organizational barriers [7] that could affect its efficacy and productiveness.

The efficacy and productivity of the AI with DT implementation process may be impacted by a number of organizational obstacles. The creation and implementation of the AI and DT tandem are predicted to lead to a management structure restructuring both within the airport's modules and throughout the entire airport. The configuration of the set of techniques utilized for the DT and AI tandem must take into account the types and features of probable concerns in order to address these problems. The latter is depicted in the diagram below (figure 4).

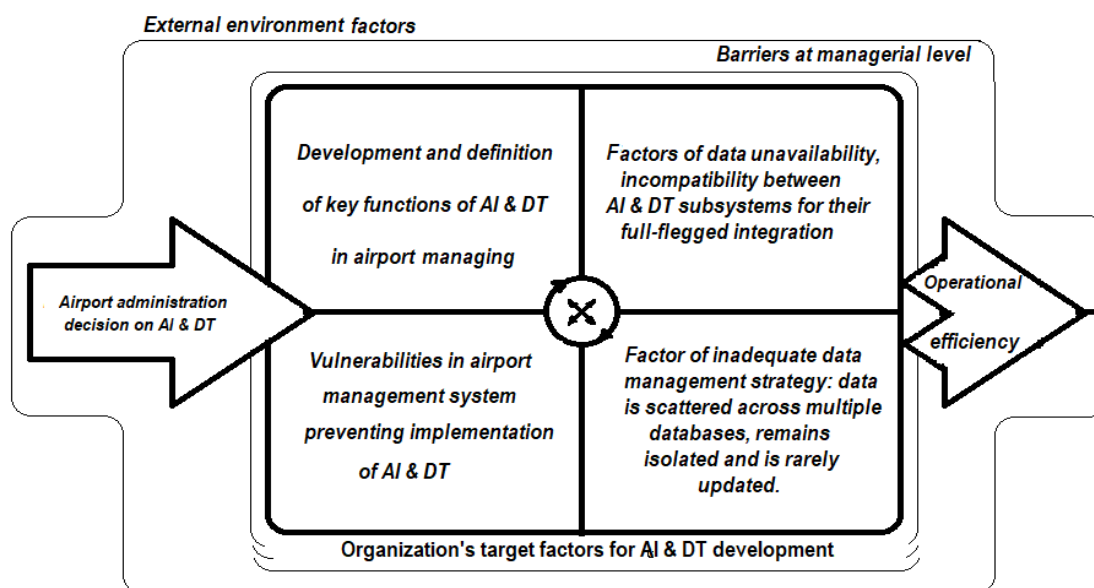


Figure 4. External and internal organizational factors influencing the formation of a platform for distributed management of airport services

The *organizational factors* depicted in the above diagram address the difficulties faced by airport management firms in integrating emerging technology like AI, digital technologies, and IoT. The difficulties in creating accurate and trustworthy digital representations of the procedures that support airport management are among the development obstacles.

The category of *external environmental factors* includes outer, non-technical barriers and those factors are not necessarily inherent to the organization.

The ability of airport managers to make suitable organizational decisions on the usage of AI & DT is influenced by external technological and cultural trends.

The inability of companies to make the proper decisions regarding the implementation of digital transformation is negatively affected by the lack of standardization, methodologies and tools for making appropriate investments in supporting technologies, which can be compromised by external factors.

At the *development level* the IT components are often built by DT projects through iterations and their interactions with each other. Among the challenges and obstacles that AI and DT implementation projects face are the difficult compatibility of system service functions and the arranging the effective processing, storing, and analysis of large-scale of operational data on current services.

The level of *operational efficiency*. By seamlessly integrating the management of airport modules and harmonizing the vast amount of data that AI requires with the number of variables that

DT can provide. DT and AI can strengthen [8] the dynamic performance of airport services. Along with adhering to safety rules and security measures, this will also strengthen safety precautions and processes.

Integrating AI into airport systems is not straightforward, there are technical challenges to be overcome. Ensuring it works well with different hardware and software across various aircraft models and manufacturers can be difficult.

Innovative AI Capabilities to Optimize Airport Operations

In essence, DTs produce huge amounts of data that flow back and forth between the DT and the physical elements that are connected to it. This data is continuously fed to AI, which processes and evaluates every aspect of airport operations that requires oversight, management, analysis, and control. Also, AI applications [9] perform deep analytics to model processes and predict operational behavior of the system. Currently, AI applications are widely adopted in the service segments of airports.

Airports are utilizing AI's cutting-edge technologies [1] to expedite processes like real-time flight data analysis, predictive maintenance, and personalized passenger services. By predicting passenger flow and managing baggage handling operations, AI is improving the seamless and effective functioning of airports.

As a computer system, airport AI is intended to resolve management issues at airports autonomously, with no human involvement. The AI system can achieve this by searching for the best solution to the current issue, learning from past experiences, and adapting to new circumstances.

Airport AI systems come in a wide range of varieties [10], but they all share the same conceptual structure, as seen in the image below (figure 5).

To ensure that the control of service control modes can be performed autonomously without operator intervention, a number of critical components [10] must be carefully orchestrated when building the most complex AI system.

The airport services for which the AI application can be developed mainly include both *core* and *ancillary* service categories.

Airport *core* services: airport operations, streamlining passenger services, IT services, transit services, security control, check-in/boarding operations, baggage handling, logistic etc.

Airport *ancillary* services: engineering services, streamlining airport parking, commercial services, corporate communication, procurement, legal and secretarial services, finance services, ground handling operations, etc.

The five primary functional blocks of an AI-embedded system are schematically illustrated in above figure:

a) *Domain-specific problems.* AI-driven solutions are being used to dynamically address current problems in critical areas of airport services management.

b) *Data Acquisition.* Gathering and acquiring airport operations and service data for training and testing AI models. To meet concrete operational and management needs at airports, this data is normalized and pre-processed based on the current task.

c) *Technological Infrastructure.* The framework enables the creation of AI models and their implementation by combining software and hardware. As components of the framework, the GPU and CPU are cooperated to accomplish AI- defined tasks. The AI's program is compiled using concrete operating systems and frameworks.

d) *Foundation of Algorithms.* Algorithms that are used as a structured approach to building AI systems. Training an AI model to understand contextual data allows airport operations to be optimized so that the software can evaluate the behavior of airport procedures.

e) *AI models.* Artificial intelligence models are a set of specialized tools, algorithms and programs that use various sets of operational data to take appropriate actions on critical airport operations and critical aspects of airport services.

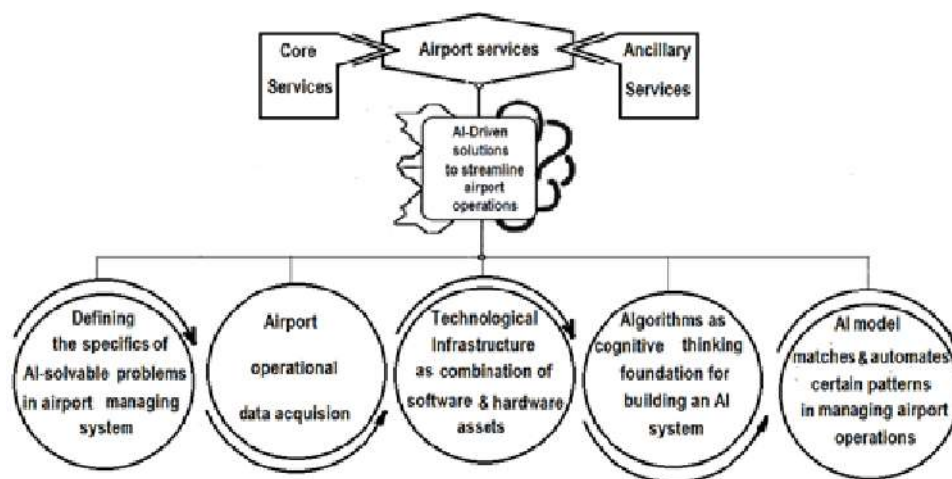


Figure 5. Conceptual schema for implementation of AI applications for transforming today's airports operations managing system

The aforementioned study findings demonstrate that AI-applications have made significant progress [2, 6, 7] toward enhancing airport management effectiveness.

Airport operations need collaboration between several service blocks or modules, which may be viewed as key units of an integrated service system. To guarantee that passengers have the greatest possible overall service experience, the AI application must thus closely monitor and control their performance.

As operations in airports require collaborative actions from different service blocks, every collaborating party could be jointly considered as a team. Therefore, their performance must be well managed by AI-dedicated to ensure the team's ability to protect the well-being of passengers.

AI applications used in airport management [9] have a wide range of varied purposes and objectives. It is challenging to think of a single AI application with the capacity to oversee multiple essential airport services at the same time. Consequently, the most prevalent choices are those where a particular airport uses a symbiosis of multiple AI systems, each of which is concentrated on management scenarios for one or more connected services.

It is imperative to meticulously plan the deployment and amalgamation of diverse specialized AI applications, keeping in mind their operational conformity with the protocols and guidelines created at a certain airport. The development of a single, efficient system for the thorough administration of all crucial operations driven by AI would be made possible by the harmonious integration of AI applications.

Conclusion. Using a holistic review of the literature presented paper applies the concept of combination of AI and DT to the digital transformation of airport management. The paper examines the benefits and challenges associated with putting into practice a developed conceptual framework for integrating AI and DT to fundamentally alter airport administration by boosting operational effectiveness, enhancing security and streamlining passenger flow.

This paper observes the role that the idea of AI and DT tandem can play in the digital transformation of airports from the perspective of 4IR technological transformation. This involves using and processing current data captured from digitally enabled airport operations and services.

The paper recognizes that digital transformation facilitates both the organizational transformation of the airport's adaptive management structure and the transformation of the ways in which the latest technologies might be integrated to further automate airport processes and services.

ƏDƏBİYYAT

1. Abdullah Alghadeir, Hasan Al-Sakran. "Smart Airport Architecture Using Internet of Things" International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology (IJIRCST) ISSN: 2347-5552, Volume-4, Issue-5, September 2016
2. F. Saifutdinov, I. Jackson, J. Tolujevs., T. Zmanovska, J. Tolujevs . "Digital Twin as a Decision Support Tool for Airport Traffic Control ". Conference: 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS). Riga, Latvia. November 2020.
3. Alam, K.M., Saddik, A.El, 2017. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. IEEE Access 5, 2050–2062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
4. B.A. Kərimov, İ.R. Mailova. Heydər Əliyev aeroportunda mobil tətbiqdən istifadə ilə logistic proseslərin optimallaşdırılması. Elmi məcmuə. Cild 26. №4. 2024. səh.65-75.
5. Arthur D. Little. "Airport digital transformation. From operational performance to strategic opportunity".<https://amadeus.com/documents/en/airports/research-report/airports-digital-transformation.pdf>.
6. M. Suresh, P. S. Kumar, and T. V. P. Sundararajan, "IoT Based Airport Parking System", IEEE Int. Conf. on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems, 2015, pp.1 – 5. [4] Li, "The applications of wifi-based wireless sensor network in internet of things and smart grid", 6th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, 2011, pp. 789 – 793. [5] D. Bartlet, GE, 2015, GE website.
7. M. Perno, L. Hvam, A. Haug, "Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers". Computers in Industry. 134 (2021), 103558 January 2022. 1-16 pp. www.elsevier.com/locate/compind
8. Yu Lu, Xudong Gao. "The Impact of Artificial Intelligence Technology on Market Public Administration in a Complex Market Environment". Hindawi. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2022, Article ID 5646234, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2022/5646234>
9. J.F. Yao, Yang, X.C. Wang, X.P. Zhang. "Systematic review of digital twin technology and applications". Visual Computing for Industry, 30 May. 2023 <https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-023-00137-4>
10. "Airport Technology Management: Operations, Software Solutions and Vendors". <https://www.altexsoft.com/blog/airport-technology-management-operations-software-solutions-and-vendors/>

REFERENCES

1. Abdullah Alghadeir, Hasan Al-Sakran. "Smart Airport Architecture Using Internet of Things" International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology (IJIRCST) ISSN: 2347-5552, Volume-4, Issue-5, September 2016
2. F. Saifutdinov, I. Jackson, J. Tolujevs., T. Zmanovska, J. Tolujevs . "Digital Twin as a Decision Support Tool for Airport Traffic Control ". Conference: 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS). Riga, Latvia. November 2020.
3. Alam, K.M., Saddik, A.El, 2017. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. IEEE Access 5, 2050–2062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
4. B.A. Kerimov, İ.R. Mailova. Heydər Aliyev aeroportunda mobil tətbiqdən istifadə ilə logistic proseslərin optimallaşdırılması. Elmi məcmuə. Jild 26. №4. 2024. səh.65-75.

5. Arthur D. Little. "Airport digital transformation. From operational performance to strategic opportunity". <https://amadeus.com/documents/en/airports/research-report/airports-digital-transformation.pdf>.
6. M. Suresh, P. S. Kumar, and T. V. P. Sundararajan, "IoT Based Airport Parking System", IEEE Int. Conf. on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems, 2015, pp.1-5.
7. M. Perno, L. Hvam, A. Haug, "Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers". Computers in Industry. 134 (2021), 103558 January 2022. 1-16 pp. www.elsevier.com/locate/compeind
8. Yu Lu, Xudong Gao. "The Impact of Artificial Intelligence Technology on Market Public Administration in a Complex Market Environment". Hindawi. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2022, Article ID 5646234, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2022/5646234>
9. J.F. Yao, Yang, X.C. Wang, X.P. Zhang. "Systematic review of digital twin technology and applications". Visual Computing for Industry, 30 May. 2023 <https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-023-00137-4>
10. "Airport Technology Management: Operations, Software Solutions and Vendors". <https://www.altexsoft.com/blog/airport-technology-management-operations-software-solutions-and-vendors/>

HAVA LİMANI ƏMƏLİYYATLARINDA SİNİ İNTELLEKT VƏ RƏQƏMSAL ƏKİZLƏR

¹Hacıyev Y.M., ²Dadashov F.H.

¹Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

² Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası

Hava limanının idarə edilməsi rəqəmsal transformasiyadan keçir, yəni rəqəmsal texnologiyaların qəbulu və istifadəsi ilə bağlı paradigma dəyişikliyi baş verir. Hava limanlarının rəqəmsal yetkinliyə nail olmasını təmin etmək üçün effektiv yanaşmalar lazımdır. Bu inanılmaz dəyişikliklər qabaqcıl texnologiyalar və ən son avtomatlaşdırma üsulları sayəsində mümkün olur.

Hərtərəfli ədəbiyyat təhlilindən istifadə edərək, bu sənəd hava limanında xidmət və əməliyyatların idarə edilməsini təkmilləşdirmək üçün süni intellekt və rəqəmsal əkiz üsulları özündə birləşdirən müasir hava limanının kiberfiziki sistemi üçün transformasiya modelini hazırlayır.

Bütün hava limanının idarəetmə sistemini modernləşdirərkən nəzərə alınmalı olan kritik elementlər təqdim olunan xidmətlərin geniş spektrinin səviyyəsini və səmərəliliyini yaxşılaşdırmaq və sona qədər xidmət prosedurlarını optimallaşdırmaq üçün müəyyən edilmişdir.

Bu sahədə əlavə tədqiqat aparmaqda maraqlı olan həm praktiki, həm də tədqiqatçılar modelin təqdim etdiyi fikirlərdən faydalana bilərlər.

Hava limanı idarəçiliyi rəqəmsal transformasiya mərhələsindən keçir, yəni rəqəmsal texnologiyaların tətbiqi və istifadəsi üsullarında paradigma dəyişikliyi baş verir. Hava limanlarının rəqəmsal yetkinlik səviyyəsinə çatmasını təmin etmək üçün səmərəli yanaşmalara ehtiyac vardır.

Təqdim olunan xidmətlərin geniş spektrinin səviyyəsini və səmərəliliyini artırmaq və mürəkkəb xidmət prosedurlarını optimallaşdırmaq üçün bütün hava limanının idarəetmə sisteminin modernləşdirilməsi zamanı nəzərə alınmalı olan kritik elementlər müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: *hava limanının idarə edilməsi, rəqəmsal transformasiya, süni intellekt, rəqəmsal əkizlər, ağıllı avtomatlaşdırma, hava nəqliyyatında əməliyyatlar*

Reviewer: Prof., Corresponding Member of ANAS Ismailov I.M.

Prof. dr.Ing. Gis/Car Pal Nikolli

Information about the authors

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Hajiyev Yashar Mirzahuseyn	Azerbaijan State Oil and Industry University	ITIF department, Computer Engineering chair, candidate of physical-mathematical science, associated professor	yasharhm@gmail.com phone: (+994) 50-347-99-38
Dadashov Fuad Hasan	National Aviation Academy	AI-based technology systems department doctor of technical philosophy, associated professor	fdadashev@naa.edu.az phone: (+994) 55-868-51-62

MATERIALŞÜNASLIQ

UOT 661.74:621.892.1:665.7.035.5

DOI: 10.30546/EMNAA.2025.25.03.119

SİNTETİK SÜRTKÜ BAZA YAĞLARI, MÜRƏKKƏB EFİRLƏR VƏ ONLARIN AVIASİYADA İSTİFADƏSİ

Qədirov Ə.Ə., Nağıyeva E.Ə., Fərzəliyev V.M.
Akademik Ə.M. Quliyev adına Aşqarlar Kimyası İnstitutu

Məqalədə qısa olaraq sintetik yağların alınması, növləri və praktikada tətbiqi barədə ədəbiyyat materiallarının təhlili verilir. Onların çatışmazlıqları və üstünlükləri göstərilir. Dünyada istismar xüsusiyyətlərinə görə daha çox əhəmiyyət kəsb edən, xüsusilə aviasiyada tətbiq edilən sintetik sürtkü yağların – mürəkkəb diefir və poliollar əsasında hazırlanan mürəkkəb efir yağlarının müqayisəli şəkildə inkişaf mərhələlərindən bəhs edilir. Sürtkü yağlarının təkmilləşdirilməsi bilavasitə motor sənayesinin inkişafı ilə bağlı olduğu göstərilir.

İlk tətbiqini ciddi olaraq keçən əsrin əvvəllərindən xarici dövlətlərdə başlayan sintetik aviasiya yağları yuxarı temperaturda işləmə qabiliyyətinə görə 3 əsas qrupa bölündüyü qeyd olunur. Birinci qrupa baza yağı kimi ikiəsaslı turşulardan dioktil-, di-2-etilheksil sebasinat efirləri olmuşdur ki, oksidləşmə və yeyilmə əleyhinə aşqarlar əlavə edilməklə əsasən 150-170°C temperaturlarda istifadə olunmuşdur. 2-ci nəsil baza yağı kimi pentaeritritin mürəkkəb efiri öz fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərini dəyişmədən müvəffəqiyyətlə 250°C-yə qədər davam gətirdiyi qeyd olunur.

Elmi araşdırmalarla II qrup sintetik yağlara poliolikol efirlər və III qrup yağların isə çoxnüvəli polifenil efirlər aid edilir ki, onların da yüksək temperaturlarda (260°C-dən yuxarı) termooksidləşdirici stabilliyinə görə fərqləndiyi ədəbiyyatda əsaslandırılır.

Daha sonra keçmiş Sovet Sosialist Respublikaları İttifaqında(SSRİ-də) XX-əsrin 60-cı illərindən başlayaraq ən çox pentaeritrit mürəkkəb efiri əsasında hazırlanan aviasiya yağları və müasir tələblərə uyğun onların yeni yaradılan modifikasiyaları barədə mətnə məlumatlar təsvir edilir, onların texniki adları və xarakteristikası verilir. Eləcə də qısa məzmunlu icmalda Azərbaycan Respublikasının aparıcı elmi-tədqiqat institutlarında sintetik yağlar sahəsində yaradıcılıqla yerinə yetirilən işlərdən bəhs edilir və hal-hazırda da davam etdirildiyi diqqətə çatdırılmışdır.

Məqalədə həmçinin aviasiya sənayesində qazturbini mühərriklərdə hazırda tətbiq edilən sintetik sürtkü yağların işlədiyi şərt şəraitində (yüksək temperatur və ağır yük) dünyada mövcud olan vahid yağ təsnifatına uyğun onların stabilləşdirilməsi, təkmilləşdirilməsi və beləliklə də istismar müddətinin artırılması məqsədilə aparılan elmi tədqiqat işləri mühüm yer tutur. Habelə sənayenin aparıcı müəssisələri tərəfindən hazırlanmış yeni perspektivli əmtəə yağlarının yerli və xarici analoqları ilə müqayisəsi əks olunur.

Açar sözlər: *sürtkü baza yağı, sintez, mürəkkəb efir, temperatur, aviasiya, stabilləşdirmə, sintetik, polimer.*

Sürtkü yağları istehsal üsulundan asılı olaraq mineral, sintetik və ya qatı plastik yağlara bölünürlər. Heç bir əlavə qatqısı olmayan istər mineral, istərsə də sintetik təmiz yağlar – baza (əsas yağ) yağları adlanır və sürtkü yağı kimi müxtəlif funksional mayelərin əsas komponenti hesab edirlər. Baza sürtkü yağları mənşəyinə görə üzvi və qeyri-üzvi olub müxtəlif funksiyaları yerinə yetirməklə bərabər onların əsas vəzifəsi maşın və mexanizmlərin hərəkət edən səthləri arasında sürtünməni azaltmaqdır. Baza yağları tərkibi və digər istismar xüsusiyyətlərinə görə 5 əsas qrupa bölündüyünü nəzərə alsaq, onlardan I- III qrupa aid olanları xam neftdən alınan mineral yağlardır. IV qrup baza yağları sintetik yağlara aid olub polialfaolefinlər əsasında yaradılır. Mineral yağlara

oxşar olsa da bu yağlar kimyəvi sintez yolu ilə alındığı üçün I-III qrup yağlardan daha yüksək təmizliyə malikdirlər. Molekul quruluşu kimyəvi cəhətdən tamamilə doymuş hesab olunur ki, bu səbəbdən də oksigen molekulu ilə birləşə bilmir, yəni sürətli oksidləşməsinin qarşısı alınır və mineral yağla müqayisədə tətbiqi zamanı xidmət müddəti uzun olur [1, 2].

V qrupa isə digər I - IV qrupa daxil olmayan baza yağları daxildir. V qrup baza yağlarına polialkilen qlikollar (PAG), diefirlər, fosfortərkibli efirlər və s. daxildirlər.

Ümumiyyətlə, baza sürtkü yağlarına olan tələblərdən əsas aşağıdakıları göstərmək olar:

- maksimum temperaturalarda yağlamayı yaxşı təmin edə bilən mümkün özlülüyün olması;
- təzyiqin qalxması ilə özlülüyün kəskin qalxması;
- aşağı donma temperaturuna malik olması;
- temperatur-özlülük xarakteristikası;
- yaxşı yağlayıcı qabiliyyətinin və ağır yük zamanı işlək səthlərdə davamlı və qoruyucu örtüyün (təbəqənin) olması;
- mühərrikdə çöküntü verə biləcək yağın davamsız komponentlərinin olmaması;
- korroziya törədən fəal komponentlərin olmaması;
- mühərrik işləyən zaman yağın yanması və buxarlanmasına qarşı alışma temperaturunun yüksək olması, əksinə tez alışan yağın olmaması;
- fiziki cəhətdən bircinsli (su və mexaniki qarışıqlardan təmizlənmiş) olmalıdır [2].

Hər şeydən əvvəl sürtkü yağları istənilən iş şəraitində belə soyuq mühərrik, aqreqat, cihaz və işlək detalların yaxşı yağlanmasını təmin etməlidir. Yağ uzun müddət istifadə edildikdə öz xassələrini saxlamalı, çöküntü verməməlidir, əks halda mühərrik, cihaz və ya aqreqatın qızmasına gətirib çıxarır. Sürtkü yağı konstruksiya ehtiyat hissələrini korroziya yaradan faktorlardan qorunmalıdır. Digər tərəfdən, yağ çox baha olmamalı və mümkün qədər uzun müddət işləməlidir. Vacib tələblərdən biri də yağın yanmaya qarşı davamlı və zəhərli olmamasıdır. Baza sürtkü yağları hər hansı bir seçilən mühərrik və mexanizmlərin tələblərinə cavab verməlidir.

Sürtkü yağlarının əsas keyfiyyət parametrləri istismar zamanı yağ həcmində baş verən dəyişikliklərlə müəyyən edilir. Yağın bu xüsusiyyətləri aşağıdakılardır:

- fiziki və kimyəvi xassələri;
- özlülüyü;
- sürtkü xassələri;
- antioksidant xüsusiyyətləri;
- təmizlənmə xüsusiyyətləri;
- antikorroziya xüsusiyyətləri;
- tərkib göstəriciləri;
- saxlama və daşınma zamanı təhlükəsizliyi, yanğından mühafizə və s. xarakterizə edən xüsusiyyətləri.

Təyinatına görə sürtkü yağları, motor, transmissiya, dişli-ötürmə (reduktor), hidravlik, sənaye, kompressor, turbin, aviasiya, cihaz, enerji (elektrik izolyasiya), qoruyucu (konservasiya), tibb, qida və ətir sənayesində və s. məqsədlər üçün istifadə olunan yağlara bölünürlər.

Əlbəttə, yuxarıda sadalanan bütün tələblərə cavab verən vahid sürtkü yağını praktik olaraq əldə etmək hələ ki, mümkün deyildir. Texnika, xüsusilə motor sənayesi inkişaf etdikcə sürtkü yağlarına olan tələblər də artır.

Mineral yağlar əksər hallarda müasir texnikanın tələblərinə cavab vermədiyindən, daha doğrusu mineral sürtkü yağların yüksək temperaturalarda uçuculuğunun artması və çöküntü əmələ gətirməyə meyilli olması səbəbindən, üzvi maddələrin sintezi üsulu ilə alınan sintetik sürtkü yağlara keçidi labüd etdi. Sintetik yağların mineral yağlarla müqayisədə əsas üstünlüyü az uçucu, yaxşı yağlayıcı xassəsi və habelə yüksək termiki stabil olmasıdır. Digər üstün cəhəti isə sintetik sürtkü yağların istismarı zamanı temperatur diapazonun geniş olmasıdır: - mənfi 60°C –dən müsbət 300°C-yə qədər dəyişə bilir [3-5].

Sintetik sürtkü yağları özülü maye olub müxtəlif monometrlərdən alınan oliqomer və ya polimerlər birləşmələridir. Bu yağlar kimyəvi quruluşlarından asılı olaraq aşağıdakı siniflərə bölünürlər:

-poli- α -olefin (PAO), izoparafin və yaxud alkilbenzol əsasında alınan karbohidrogen yağları (HC yağı);

-fosfat turşusunun efirləri;

-tərkibində flüor olan karbohidrogen yağları;

-silikon yağları;

-poliqlikol (məsələn, polialkilenqlikol efiri) efirləri;

-ikiəsaslı turşu və biratomlu spirtlərdən alınan sintetik dierfir yağları;

-poliol efirləri, polifenil efir sintetik yağları.

Poli-alfa-olefinlər (PAO) karbohidrogen sintetik mayelərdir. Sənaye miqyasında onlar *desen molekullarını* oliqomerlərə və ya qısa zəncirli polimerlərə çevirməklə sintez edilir. PAO yüksək *özlülük indeksinə* malik olmaqla yanaşı *geniş temperatur* intervalında istifadə etmək mümkündür. Tərkibində kükürd və metal birləşmələri olmadığından yüksək antikorroziya xassələri daşıyırlar. Mineral yağlarla yaxşı qarışır. *Çatışmayan cəhətləri*: bəzi aşqarların mineral yağlarla müqayisədə bu yağda nisbətən pis həll olması və elastomerlərlə (kipləşdirici rezin məmulatlar kiçilərək və ya sıxılaraq öz elastikliyi itirir) uyuşmamasıdır. Hər *iki çatışmazlıq* az miqdar *mürəkkəb sintetik efir yağı* əlavə edilməklə aradan qaldırılır. PAO yağları əsasən universal olub, bütün mövsümlər üçün avtomobil motor yağları, hidravlik mayelər, transmissiya və sənaye yağlarının, soyuducu və kompressorlarda, ağır yüklər daşıyan və yüksək temperaturlarda işləyən digər aqreqatlarda, habelə orta sürətli dizel lokomotivlər və gəmilərin güclü mühərrikləri üçün motor yağlarının hazırlanmasında istifadə olunur. PAO ən ucuz yağlardır. Bu məhsullar hazırda əsasən xaricdən idxal olunur [1, 2].

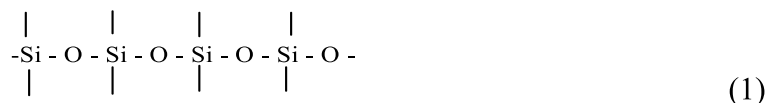
İPM -10 (ИПМ-10) (ТУ(TU) 38.101299-90) yağı yüksək effektiv aşqarlar kompleksi olan *sintetik karbohidrogen(izoparafinli karbohidrogenlər əsasında)* yağıdır. -50°C –dən $+200^{\circ}\text{C}$ -yə qədər temperatur intervalında işləyə bilər. Keçən əsrin 60-cı illərinin axırında işlənib hazırlanmış, o zamana görə xarici analoqu olmayan və müsbət sınaq nəticələri olan sintetik yağıdır. İPM -10 yağının *çatışmayan cəhəti* mühərrikin qızmar hissələrində, yaxud həddən artıq qızma nəticəsində yağ sistemi detallarının üzərində artıq miqdarda çöküntü əmələ gətirməsidir. İPM-10 yağı əsas etibarilə mülki və hərbi aviasiyanın istilikgərginlikli qazturbini mühərriklərində (QTM) geniş tətbiq olunurdu. 1993-cü ildən xammal ehtiyatı lazımı keyfiyyətdə olmadığından istehsalı dayandırılmışdır [6].

Fosfat turşusunun efirləri. Bu birləşmələr fosfor *oksixloridin alifatik spirtlər* və ya fenollarla efirləşməsi nəticəsində əldə edilən sintetik məhsullardır. Fosfat turşusu mürəkkəb efirlərinin ümumi formulu belədir: $\text{O}=\text{P}(\text{OR})_3(\text{R-alkil, aril})$. Onların arasında ən çox istifadə edilən *tributilfosfat (TBF)*, *trikrezilfosfat (TKF)*, *dibutilfenilfosfat (DBFF)*, *difenil-p-tret-butil fenil fosfat (DFTBFF)*, triksilenil fosfat (OMTI turbin yağı, TУ 34 70.11335–97) və s. Fosfatların fərqli xüsusiyyəti onların yanğına qarşı yüksək davamlılığıdır. Bir çox fosfatların alovlanma temperaturu 600°C -dən yuxarıdır, yanmaya kömək etmir və alovu yaymadan yavaş alovla yanırırlar. Fosfatlar termiki və termooksidləşdirici stabilliyə, *yüksək yağlama qabiliyyətinə* və yaxşı özlülük-temperatur xüsusiyyətlərinə malikdirlər. Fosfatlar odadavamlı hidravlik aviasiya mayələrinin, sənaye və turbin yağlarının, polimer plastifikatorlarının əsası və komponentləri, həmçinin də mineral və sintetik sürtkü yağlarında *yeyilməyə qarşı aşqarlar kimi geniş tətbiq* edilirlər. Maye fosfatlar bir çox qeyri-metal materiallar üçün yaxşı həlledicilərdir, ona görə də onlardan istifadə edərkən fosfatlarla təmasda olmaq üçün xüsusi olaraq tövsiyə olunan *rezin məhsullar* tələb olunur. 60-cı illərin sonlarında bu problemi həll etmək üçün turşuların əmələ gəlməsinin qarşısını alan əlavələr (epoksidlər adlanır) hazırlanmışdır. Bu əlavələr hətta normal mühit temperaturunda belə, fosfat turşusu efirlərinin parçalanması nəticəsində əmələ gələn fosfat turşusu törəmələri ilə reaksiyaya girərək onları zərərsiz neytral birləşmələrə çevirir [7].

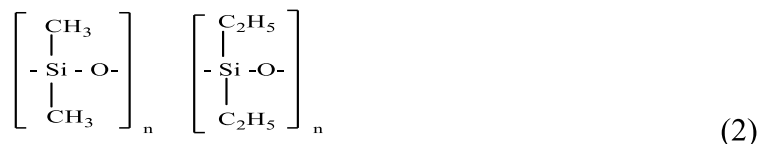
Fosfat turşusu əsasında alınan *poliefirlərin* özlülük indeksi kifayət qədər olmadığından motor yağlarının əsas komponenti kimi tətbiq edilməsinə imkan vermir. Bu mayelərin əsas *çatışmazlığı* onun yüksək toksikliyi və kimyəvi aqressivliyidir.

Alkoksiflüor yağları – istilik və kimyəvi sabillik (dayanıqlıq) baxımından bütün digər sintetik yağlardan üstüdürlər. Onlar çox yaxşı özlülük-temperatur xüsusiyyətlərinə malikdirlər. İşləmə temperatur diapazonu: -30°C ilə $+250^{\circ}\text{C}$ (və daha yüksək) intervalındadır. *Alkoksiflüor yağları* digər yağ növləri ilə qarışmır. Termik cəhətdən sabit olduqları və ağır yüklərə davam gətirdikləri üçün əsasən yüksəktemperaturlu sürtkü yağları üçün *baza yağlar kimi* istifadə olunur. Bu materiallar çox bahadır. Aşqarlar onlarda həll olmur, ona görə də onların yağa əlavə edilməsi prosesi son dərəcə əmək tələb edir. Bu yağlar, əsasən, soyuducu kimi *trixlorfluormetan* (R-11), *dixlorodifluormetan* (R-12) və ya oxşar birləşmələrdən istifadə etməklə soyuducu maşınlarda istifadə olunur. Bununla belə, son vaxtlar atmosfərə buraxılan R-11 və ya R-12 kimi xlorlu, tam halogenləşdirilmiş karbohidrogenlərin *stratosferin ozon təbəqəsini məhv* edəcəyi və bunun da yerin ekosisteminə, o cümlədən insanlara *çox zərərli təsir göstərdiyi* irəli sürülür. Bu səbəbdən də, beynəlxalq müqavilədə R-11 və R-12 kimi müəyyən soyuducu maddələrin istehlakı və istehsalında məhdudiyyətlər nəzərdə tutur. Flüor karbohidrogenlərindən olan yağlar aşağı qaynama temperaturuna və *yaxşı olmayan* temperatur-özlülük xüsusiyyətlərinə malikdirlər [8-11].

Silisiyum-üzvi birləşmələr (silikonlar və ya polimerləşdirilmiş siloksanlar) çox vacib sinif maddələrdən olub son onilliklərdə xüsusi olaraq *sürtkü yağı və mayelər kimi aviatexnikada* geniş tətbiq sahəsi tapan *polimer silisiyum-üzvi birləşmələrdir*. Karbohidrogenlərdən ibarət mineral yağlardan fərqli polisiloksanlarda polimer molekul zənciri bir-birini əvəz edən silisiyum və oksigen atomlarından, başqa sözlə desək *siloksan qruplaşmasından* ibarətdir:



Molekulda silisiyum atomuna yan zəncir kimi müxtəlif quruluşlu karbohidrogen və başqa üzvi radikallar birləşir. Silisiyum-üzvi məhsulların (silikonların) çoxunun fərqləndirici cəhətləri – onların yüksək temperaturlara davamlılığı, rütubətə, nəmə qarşı müqavimətinin və yaxşı temperatur-özlülük xassələrinin olmasıdır. Başqa sintetik mayelər arasında temperatur-özlülük xüsusiyyətlərinə görə *birinci yeri tutur*. Yaxşı termiki davamlılığına görə uzun müddət 350°C –də istismarı zamanı istilik daşıyıcısı kimi istifadə etmək olar. Silisiyum-üzvi birləşmələr (silikonlar) yüksək temperaturlarda işləyən çox güclü reaktiv mühərriklər üçün sintetik yağın əsası ola bilər. Sürtkü yağı və mayelər kimi metil- və etil –radikalları olan polimerlər praktiki əhəmiyyət kəsb edirlər.



Molekulyar zəncirin uzunluğundan asılı olaraq polisiloksanlar müxtəlif fiziki-kimyəvi xassələr daşıyırlar. Həmçinin, *fenilpolisiloksanlar* da məlumdur.

Polisiloksanlar müxtəlif özlülüyə malik rəngsiz şəffaf yağvari mayelərdir. Onlar karbohidrogenlərdə çox yaxşı həll olurlar, su, spirtlər və digər polyar(qütblü) həlledicilərdə isə həll olmurlar.

Polisiloksanlar böyük kimyəvi inertliyi ilə fərqlənilirlər ki, bu da Si – O rabitəsinin möhkəmliyi ilə aydınlaşdırılır. Polisiloksan birləşmələri yüksək termiki sabilliyi ən çox *siloksan qruplaşmasının* – Si – O rabitəsi ilə şərtləndirilir və bu rabitənin *əmələ gəlmə enerjisi 89 kkal/mol-dur*. Halbuki, C – O rabitəsinin enerjisi isə *58,6 kkal/mol-dur*. Si – C (*57 kkal/mol*) rabitəsinin enerjisi isə C – C enerjisinə yaxındır.

Onlara heç bir aqressiv reagentər – nitrat , sulfat turşuları və s. təsir etmirlər. Çuqun, polad, mis, tunc, bürünc, maqnezium, qalay, alüminium və digər metalların iştirakı ilə 150⁰C-yə qədər qızdırdıqda praktiki olaraq korroziya etmirlər.

Catışmayan cəhətləri: polisiloksanların kimyəvi inert olması və zəif polyarlığı səthlərin sürtünməsi zamanı pis yeyilmə xassələrinə malik olmasını şərtləndirir.

Silikon yağları mineral yağlarla qarışmayaraq yağlayıcı və yeyilməyə qarşı xassələri qaneedici deyildir.

Çox aşağı donma temperaturunun olması və özlülüyün temperaturdan az asılılığı bu birləşmələrin az polyarlığı və deməli molekullararası təsir qüvvəsinin az olması ilə bağlıdır, hətta bu *poliizobutilendə* olduğundan da azdır.

PES-7 (ΠЭС-7) (ТУ 6-02-1-038-92, ГОСТ(QOST) 25149-82) polietilsiloksan şəffaf və ya açıq sarı rəngli mayedir, əsasən xətti quruluşa malik polidietilsiloksan oliqomerlərinin qarışığıdır, 20⁰C-də kinematik özlülüüyü 50 sSt və qaynama temperaturu +195⁰C, donma temperaturu isə –70⁰C-dən yuxarı deyildir. Bir neçə faydalı xüsusiyyətlərə malik olduğu üçün yüksək temperaturlarda istifadə edilməsinə imkan verir. Aşağı donma temperaturu soyuq havada, özlülüyünün isə geniş diapazonda dəyişməsi müxtəlif iş şəraitlərində istifadə etmək üçün uyğundur. Yaxşı yağlama qabiliyyəti vardır.

Polisiloksanların daha mühüm bir xassəsi onların geniş çeşiddə *köpüklənməyə qarşı* aşqar kimi tətbiqidir. Köpüklənməyə qarşı ПМС-200А(ПМС-200А) ГОСТ 13032-77 dəyiş.1-3) – polimetilsiloksan daha çox geniş tətbiq edilir, hətta olduqca aşağı 0,0001 –dən 0,001%-ə qədər olan qatılıqlarda effektivdir.

Köpüklənməni aradan qaldırmaqla yanaşı, köpük əleyhinə aşqarlar yağların fiziki, kimyəvi və istismar xüsusiyyətlərinə təsir göstərə bilirlər. Yağ nə qədər *ağır olarsa*, onun köpüklənməyə meyli bir o qədər yüksək olur. Bu, *ağır yağların qaz qabarcıqlarını saxlamaq* və bununla da *köpük sabitliyini* qorumaq kimi xüsusiyyətlərə malik olması ilə izah olunur [12, 13].

Bu birləşmələr yüksək temperaturlarda doymuş buxar təzyiqini, eləcə də yağların buxarlanmasını azaltmaqla yanaşı onların termooksidləşdirici stabilliyini (istilik-ooksidləşdirici dayanıqlığını), özlülük və sürtkü xassələrini yaxşılaşdırırlar. Tərkibində *polisiloksan olan yağlar* oksidləşdikdə daha *az qatranlı və turşulu məhsullar* əmələ gəlir, oksidləşmənin induksiya müddəti artır, lak əmələ gəlməsi azalır və beləliklə yağların və mühərrikin xidmət vaxtı uzanır.

Son illərdə polisiloksanlar yalnız *aşqarlar kimi deyil*, həm də əmtəə (ticarət) markasına malik olan 132-20 *seriyalı mayelər kimi* istiliyə davamlı sürtkü yağları kimi tətbiq edilir; 132-21 və digər markalı mayelər, - (65-70) ilə +70⁰C arasında olan temperatur diapazonunda işləyən müxtəlif maşın və sürtünmə qurğularında podşipniklərin yağlanması üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Polisiloksanların termik destruksiyası 250-300⁰C temperaturda başlayır və 350⁰C-də artıq intensiv şəkildə davam edir. Bu proses nəticəsində polisiloksanların özlülüyünün azalması və uçuculuğun artmasına səbəb olur və Si-O rabitəsinin qırılması ilə aşağı molekullu tsiklik məhsulların əmələ gəlməsi baş verir.

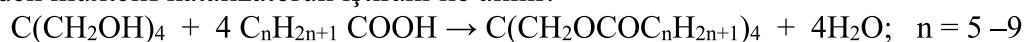
Rusiya Federasiyasında (RF-də) keçən əsrin 80-ci illərində *silisium-üzvi maye əsasında* (siloksan tipli) yağ - VT-301(BT-301) (ТУ 38.101657-85) yağı işlənib hazırlanmışdır. Bu yağ 250⁰C -ə qədər temperaturda işləyə bilən yüksək istilik gərginliyi olan xüsusi *turboreaktiv aviasiya mühərriklərində* tətbiq edilir. BT-301 yağı yüksək termooksidləşdirici stabilliyi (250-280⁰C), aşağı uçuculuğu və nadir (unikal) aşağı temperatur xassələri ilə digər yağlardan fərqlənir. Aviasiya konstruksiya materiallarının əksəriyyətinə qarşı dağıdıcı (aqressiv) təsir göstərmir. Yağın *çatışmayan cəhəti kimi* hazırlanmasının texnoloji cəhətdən mürəkkəb olması ilə əlaqədar olaraq dəyərinin həddən artıq bahalıq və nisbətən yüksək olmayan yeyilməyə qarşı xassələrini qeyd etmək olar. 2011-ci ildə bu yağın tərkibinə yeni nəsil antioksidləşdirici aşqarlar əlavə etməklə digər istismar xassələrini pisləşdirmədən işçi temperaturunu maksimum dərəcədə qaldırılması təmin edilmişdir. Yeniləşdirilmiş bu yağ *IV nəsil yağlara* aid edilir və BT-301M adlanır [14-16].

Poliqlikollar (polialkilen qlikollar, PG (PAG)) yüksək oksidləşmə müqavimətinə, yaxşı özlülük-temperatur xüsusiyyətlərinə (yüksək özlülük indeksinə) və şaxtaya davamlı xassələrə (aşağı donma temperaturuna) malik sürtkü materiallarıdır. Onlar -50°C -dən $+200^{\circ}\text{C}$ -ə qədər olan temperatur aralığında istifadə olunur. Bu materiallar mineral və poli- α -olefin əsaslı yağlarla qarışmır, lakin efirlərlə qarışırlar. Müəyyən şəraitdə *polialkilen qlikollar* möhürləri, boya örtüklərini və hətta metalları (məsələn, alüminium, podşipnik ayrıclarını və s.) korlaya bilər. 180°C -dən yuxarı temperaturda onlar praktiki olaraq çöküntü yaratmadan buxarlanırlar, bununla belə əla sürtkü xassələrinə malikdirlər.

Qeyd etmək lazımdır ki, hal-hazırda sintetik yağlar içərisində ən əhəmiyyətli və praktikada tətbiqinə görə üstünlük təşkil edən *diefir yağları və poliolların (pentaeritrit və trimetilolpropan və s.)* vasitəsilə yaradılan *mürəkkəb efir yağlarıdır*. Bu yağlar xüsusilə aviasiyada geniş istifadə olunurlar [7].

Mürəkkəb efirlər yağlayıcı kompozisiyalar kimi 50 ildən artıqdır ki, istifadə olunur. Mürəkkəb efir yağları buxarlanma, yağlama, aşağı temperatur, temperatur-özlülük və digər mühüm istismar göstəricilərinə görə mineral (neft) yağlarından üstündürlər. Məhz, mürəkkəb efir yağları yüksək keyfiyyətlərinə görə *aviasiya baza sürtkü yağları* və reduktor yağları kimi istifadə edilir. Həmçinin də yerüstü texnika üçün universal və bütün mövsümlər üçün mühərrik baza yağlarının əsasını təşkil edir.

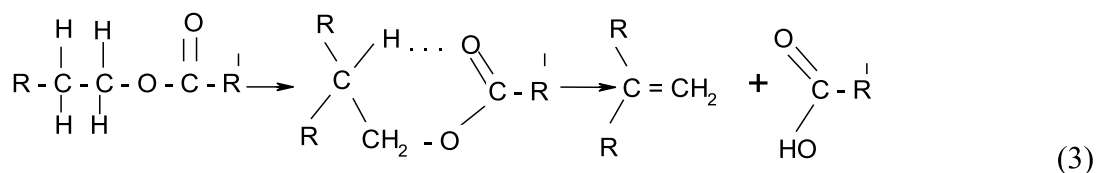
Sintetik aviasiya baza yağlarının alınmasında *pentaeritritin mürəkkəb efiri* (ПЭЭ, PEE) geniş tətbiq edilir və pentaeritrit spirtinin- $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ və C_5 – C_9 sintetik yağ turşularının (SYT) qarşılıqlı təsirindən müxtəlif katalizatorun iştirakı ilə alınır.



Pentaeritrit və sintetik yağ turşularının mürəkkəb efiri SSRİ-də ilk dəfə və yeganə sənaye qurğusu olan, 1961 –ci ildə Ufa şəhərində tikilmiş və zavodda işləyib hazırlanan texnologiya ilə istehsal edilmişdir. Prosesin nöqsanları da olmuşdur.

Daha yaxşı termooksidləşdirici stabilliyə malik sintetik yağları həm də *trimetanolpropanın*, sebasın və azelain turşularının qarışıq efirləri əsasında da hazırlayırlar.

Bir sıra tədqiqatçılar göstərmişdir ki, *neopentilpolispirt efirlərinin* 200°C həddində termiki stabilliyi molekulunun karbon skleti ilə bağlıdır. Müəyyən olunmuşdur ki, əgər efirin spirt fraqmentində β - karbon atomunun yanında *hidrogen atomu olmursa*, onda belə efirin stabilliyi yuxarı olur. Əksinə, β -karbon atomuna bitişik hidrogen varsa, onda daha aşağı temperaturlarda parçalanma baş verir və *altıüzvlü halqa* əmələ gətirir ki, bu da davamsız olduğu üçün alken-1-ə və turşulara parçalanır [17]. Mexanizmi belədir:



Belə ki, sərt temperatur şəraitində işləyən *qazturbinli mühərriklər (QTM)* üçün sintetik əsaslı sürtkü yağlarının yaradılması problemi *neft kimyasının aktual problemlərindən* biri olub daim tədqiqatçıların diqqət mərkəzindədir.

Son onilliklərdə sintetik yağların təkmilləşdirilməsi və yeni növlərinin yaradılması müasir aviasiya texnikasında qısa müddət ərzində aparıcı yer tutan *reaktiv aviasiyanın* sürətli inkişafı ilə bağlıdır.

Ədəbiyyatın yazdığına görə sintetik sürtkü yağlarına maraq Amerika Birləşmiş Ştatlarında (ABŞ-da) hələ 1930-cu illərdən *α -olefinlərin polimerləşdirilməsi* yolu ilə hazırlanmasından başlamışdır.

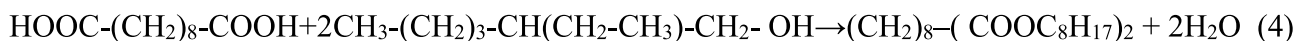
Digər mənbənin yazdığına görə isə Almaniyada *sintetik yağların inkişaf tarixi* 2-ci Dünya müharibəsi zamanı Stalinqrad ətrafında gedən döyüşlərdə sərt qış soyuğunda yağın donması ilə

texnikanın hərəkət edə bilməməsi dövrünə təsadüf edir. Bunun üçün almanlar sintetik yağ almaq üçün *bir neçə min birləşmə* sintez edərək sınaqdan keçirmişlər. Seçim isə *dikarbon turşularının efirləri* (diizooktilsebasinat) olmuşdur. Lakin, o zaman sintetik yağları tətbiq etmək onlara nəsim olamış, amerikanlar tərəfindən Düsseldorf şəhərində tikilmiş zavodu işğal edərək Amerikaya köçürmüşlər [18-20].

Sintetik sürtkü yağlarına olan tələblərə görə və yüksək temperaturalarda işləmə qabiliyyətinə uyğun olaraq onları 3 (üç) əsas qrupa (nəsil, növ) bölürlər:

I qrup yağlara alifatik biratomlu spirtlərlə ikiəsaslı turşulardan alınan *diefir sintetik yağlar* aid edilir. Bu qrupa aid sintetik yağlar ABŞ-da (MİL-L-7808 spesifikasiya) və İngiltərədə (DERD - 2487 spesifikasiyaya) -xüsusi təsnifata aid edirlər. 1952-ci ildən bu yağlar əsasən səsdən aşağı və daha çox səsdən iti sürəti ilə uçan mülkü və hərbi təyyarələrdə tətbiq edirlər. Diefir sintetik yağları baza(əsas)hissəsinə - ən çox di-2-etilheksilsebasinata oksidləşmə və yeyilməyə qarşı aşqarlar əlavə etməklə hazırlanmışdır.

Dioktilsebasinat (DOS-T) (TU 6-0611-88) katalizatorun iştirakı ilə aşağıdakı kimyəvi reaksiya tənliyinə uyğun olaraq yağ turşusunun 2-etilheksanolə efirləşməsi yolu ilə alınır:



Son vaxtlar geniş tətbiq edilən *sebasin turşusunun efirini* (diizooktilsebasinatı), termiki və termooksidləşdirici sabilliyinin zəif olmasına baxmayaraq *daha ucuz olan* azelain, pelarqon və hətta adipin turşuları ilə əvəz edirlər. Qeyd olunur ki, azelain *turşusunun oktil efirləri* MİL-L-7808D spesifikasiyası, trimetilolpropanın pelarqon efirləri isə MİL-L-7808 E spesifikasiyasına aid tələbləri tamamilən ödəyirlər [7, 21].

Diefir əsasında alınan sintetik yağlar mühərrikdə 150-175°C və qısa müddət ərzində 240°C temperatur qədər işləyə bilirlər. Lakin bu yağlar 2M ($1\text{Max}(M) = \text{Max} \text{ ədədi } 0^\circ\text{C} \text{ və atmosfer təzyiqində uçuş sürətinin səs sürətinə olan nisbətidir, } 1194,5 \text{ km/s-dır}$) sürətilə uçan, temperaturu 200°C və ondan yuxarı olan gücləndirilmiş turboreaktiv mühərriklərin işini təmin edə bilmirlər.

Diefir yağları *poli-α-olefin* (PAO) yağlarından fərqli müxtəlif quruluşa malikdirlər. Mineral yağlardan fərqi isə *yüksək özlülük indeksi, termostabilliyi*, eləcə də az uçucu, daha aşağı donma temperaturu və yangından az təhlükəli olmasıdır. Yüksək həlledicilik qabiliyyəti olduğundan lak və toz halında olan komürə bənzər maddələri həll edərək mühərrikin ehtiyat hissələrini təmiz saxlayır. *Çatışmayan cəhətləri*: rezin məmulatlarına qarşı aqressiv-dağıdıcı təsiridir; - rezini şişirdir və yumşaldır və s. Bu səbəbdən kipləşdirici materialların kimyəvi inert materiallardan hazırlanması uyğun hesab edilmişdi.

II nəsil (növlər və ya qrup) sintetik yağlara *poliqlikol efirləri* əsasında hazırlanan və quruluşuna görə *ikiəsaslı dikarbon turşuların diefirlərindən* daha termiki möhkəm olan yağlardır. Poliqlikol efirləri az uçuculuğu, üstün temperatur-özlülük xassələrinə malik və mühərrikin hissələrini yeyilmədən qoruya bilməsi ilə xarakterizə olunurlar. Metallara fəal təsir etmirlər və diefir yağlarından ucuzdurlar. Termooksidləşdirici sabilliyi diefir yağlarından 15-20°C yuxarıdır. II qrup sintetik yağlar 200-dən 260°C-yə qədər temperatur intervalında istifadə üçün nəzərdə tutulmuşdur. Ancaq yuxarı temperatur həddinə hələ nail olunmamışdır. Son 50 il ərzində qazturbini mühərriklər üçün sintetik yağların mümkün əsası (bazası) kimi çoxlu sayda neopentil poliol və monokarbon turşuların mürəkkəb efirləri sintez edilmiş və tədqiq edilmişdir. Spirt komponentləri arasında ən çox əhəmiyyət kəsb edən *trimetiletan, trimetilolpropan və pentaeritrit* birləşmələri olmuşdur. *Di-trimetilolpropan və di-pentaeritrit* kimi **dimer neopentil poliolların** mürəkkəb efirləri daha az dərəcədə tədqiq edilmişdir. Karbon turşularından alifatik sıranın normal quruluşlu turşuları *praktiki olaraq tətbiqini* tapmışdır. Pentaeritrit spirtinin C₅ – C₉ sintetik yağ turşuları ilə efirləşmə reaksiyası nəticəsində yaxşı yüksək temperatur xassələrinə malik *pentaeritrit mürəkkəb efiri* alınır. *Pentaeritrit efiri* əsasında alınan sürtkü yağları öz fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərini dəyişmədən müvəffəqiyyətlə 250°C-yə qədər davam gətirirlər.

III qrup sintetik yağlar yeni və perspektivli kimyəvi birləşmələr əsasında alınrlar. Bu yağların əsasını II-qrup yağlardan üstün olan, təxminən 150°C-dən yuxarı temperatura qədər termiki stabilliyə malik *5-nüvəli polifenil efirləri* ola bilirlər. Ancaq *polifenil efirlərinin donma temperaturları* yuxarı (4-5°C) olduğundan başqa birləşmələrlə kombinasiya edilməklə tədqiq edilir [21].

III qrup sintetik yağların ABS, Fransa və İngiltərədə 260°C-dən yuxarı temperaturalarda 3M və yuxarı sürətlə uçan səsdən iti mülkü və hərbi aviasiyaanın turboreaktiv mühərriklərində tətbiqi nəzərdə tutulmuşdur.

Bununla belə, ehtimal olunur ki, gələcəkdə (perspektivdə) turboreaktiv mühərriklər üçün səsdən iti sürətlərdə və yüksək temperaturalarda (400 - 450°C) üzvi mənşəli adi sürtkü yağlarını istifadə etmək mümkün olmayacaqdır. Ədəbiyyatda qeyd olunan məqsəd üçün artıq çoxdandır ki, *bərk sürtkü yağları, qazlar, ərinmiş(maye) metallar* və başqa maddələrin tətbiqinin mümkünlüyü barədə məlumatlara rast gəlinir. Lakin, həmin adı çəkilən maddələrin aviasiya texnikasında tətbiqi ilə bağlı məlumatlar hələ ki, qeydə alınmamışdır.

Aviasiya qazturbini mühərriklər (QTM) üçün yeni sürtkü yağlarının işlənilib hazırlanması və tətbiqi, həmçinin də, mövcud yağların təkmilləşdirilməsi (yerli *motor sənayesinin* inkişafı ilə eyni zamanda baş vermişdir.

XX əsrin 60-70-ci illərində (SSRİ zamanında) ilk aviasiya QTM-də çox da yüksək istismar xassələrinə malik olmayan və digər növ texnikalar üçün də nəzərdə tutulan az özlü mineral yağlar tətbiq edilmişdir. Selektiv təmizlənmə yolu ilə MC-6, MC-8, MC-8П u MC-8PK mineral yağları işlənilib hazırlanmış və tətbiq edilmişdir. Bu yağlar Bakı neftindən hasil olunan neft əsaslı yağlar olmuşdur. Hazırda istehsal olunmur.

VNIİNP(ВНИИ НП)-25 (ГОСТ 11122-84) şarnir yağı antioksidləşdirici və qatılaşdırıcı polimer aşqarı olan aşağıda donan (qış sortu) neft mənşəli yağdır. Hazırda istehsalı yoxdur.

VNIİNP-25 markalı yağı əvəz etmək üçün işlənilib hazırlanan BO-12 (TY PM=80-4-95) yağı helikopterlərin vint vtulkaları (borucuqları) və ox şarnirləri üçün bütün mövsümlərdə işləyə bilən yağdır və -50 –dən +60°C –yə qədər işləmə qabiliyyətinə malikdir. Kompleks aşqarı olan sintetik poli-α-olefin (PAO) və diefirlər əsasında hazırlanmışdır.

Keçən əsrin 60-cı illərindən aviasiya mühərriklərinin istilik gərginliyinin artması ilə daha *termostabil yağların tətbiqinə* ehtiyac yarandı [17, 21].

Pentaeritrit, dietilenqlkol və C₅–C₉ sintetik yağ turşuları (SYT) fraksiyaları əsasında tərkibində anioksidləşdirici aşqar olan 36/1 yağı (TY 38.101384-78) işlənilib hazırlanmışdır. 200°C –yə qədər qazturbini aviasiya mühərriklərində tətbiq edilir. Sonralar bu yağ əsasında bir sıra yaxşılaşdırılmış modifikasiyaları yaradılmışdır: 36/1K, 36/1Ky və 36/1Ky-A. *Çatışmayan cəhəti* yağın çöküntü verməsi olmuşdur. Hal-hazırda istehsal olunmur.

Dioktilsebasinat mürəkkəb efiri əsasında 36/1 –yağından üstün olan VNIİNP-50-1-4f (ВНИИ НП-50-1-4ф) yağı işlənilib hazırlanaraq aviataxnikada tətbiqə buraxılmışdır. 70- ci illərin sonunda da VNIİNP-50-1-4f yağının tərkibinə müasirləşdirilmiş, təkmilləşdirilmiş aşqarlar kompleksi daxil etməklə onun istismar xassələri yaxşılaşdırılaraq VNIİNP-50-1-4u (ВНИИ НП-50-1-4 у) marka adı verilmişdir. Bu yağ 200°C-də işləyə bilən (həm də qısamüddətli 225°C-də işləyən) istilik gərginlikli turboreaktiv mühərriklər (TRM) üçün nəzərdə tutulmuşdur. VNIİNP-50-1-4u yağının tətbiqinə isə bitki mənşəli və xaricdə istehsal olunan *ilkin xammalın-sebasin turşusunun defisit(az) olması mane oldu.*

*Daha sonra pentaeritritdən alınan mürəkkəb efir əsasında müxtəlif aşqarlar kompleksindən istifadə etməklə və üzvi-siloksan mayesi əlavə etməklə PTS-225 (ПТС-225) yağı (TY 38.401-58-1-90) işlənilib hazırlanmışdır. Mənfi 60 -dan +225°C temperatur intervalında işlənilə bilər. İstilik gərginlikli aviasiya texnikasında unifikasiya olunmuş yağ kimi tətbiq edilə bilər. PTS-225 yağı 80-ci illərin sonunda *stend və uçuş sınaqlarından* keçərək aviasiya QTM-lərdə tətbiqə buraxılmışdır (MIL – L – 23699F Amerika sürtkü yağı təsnifatına (spesifikasiyasına) uyğun gəlirdi, bu yağ daha yuxarı termooksidləşdirici stabilliyə, yüksək yağlama və temperatur-özlülük xassələrinə malik olmuşdur. 2003-cü ildə xarici xammal əsasında hazırlanan PTS-225 yağı öz fiziki-kimyəvi və istismar*

xassələrinə görə *P.İ.Baranov adına Mərkəzi Aviamaşınqayırma İnstitutunda (ЦИАМ)* sınaqdan keçmədiyindən hazırda istehsal olunmur.

Pentaeritritlə C₅–C₉ SYT-nin əmələ gətirdiyi mürəkkəb efir (PEE,ΠЭЭ) əsasında 200⁰C-də işləyən B-3V(B-3B) (TY 38.101295-85) yağı da yaradılmışdır. *Çatışmazlığı*: xüsusilə, qış vaxtlarında istismar zamanı 36/1 KuA yağında olduğu kimi oksidləşmə nəticəsində yeyilməyə qarşı aşqarın aşağı temperaturda çökməsidir. LZ (ЛЗ-240) (TY 301-04-010-92) yağı pentaeritritlə SYT-dan alınan mürəkkəb efir olub, kompleks (tam şəkildə) aşqarı olan sintetik yağdır. B- 3V yağının tətbiq olunduğu mühərriklərdə tətbiq olunur.

Daha sonra, keçən əsrin 70-ci illərinin ortalarında RF-də aparıcı aviasiya müəssisəsi olan SİAM (ЦИАМ) tərəfindən QTM üçün termooksidləşdirici kimi mühüm göstəricisi daxil, yağın işləmə temperaturu və digər vacib göstəriciləri ilə bağlı aviasiya yağlarının klassifikasiyası (təsnifatı) təklif edilmişdir (cədvəl 1). Aviasiya sənayesi üçün əsas texniki material olan “PTM 1585-78”-də QTM yağların klassifikasiyası göstərilir ki, burada nəinki yağ nümunələrinin hazırlanmasına olan texniki tələblər, hətta onların *qruplara bölünməsinə* kimi məlumatları özündə ehtiva edən ilkin sənəddir [22].

Cədvəl 1

Qazturbini mühərriklər üçün yağların təsnifat qrupları

Göstəriciləri	Yağ qrupları				
	I	II	III	IV	V
Yağın maksimum işləmə temperaturu, mühərrik çıxışında °C - boşluqların divarlarında nazik bir təbəqədə		200 300	250 350	300 400	350- 450
Yağın həcmdə termooksidləşdirici sabilliyi (ГОСТ 23797-79*) temperaturda °C	50	200	250	300	350

*)100 ml yağ, 170 ml/dəq hava, katalizator lövhələri: ІІХ-15, AK-4, M -2 50 saat.

Hər bir *grup yağlar* üçün vahid metodla laboratoriya tədqiqatları əsasında, mühərriklərin stend yoxlamalarının nəticələrinə görə onların fiziki-kimyəvi xassələri, istismar göstəriciləri, hətta yağın istismara tətbiqi üçün təcrübələr və normalar göstərilmişdir.

Bundan başqa, Azərbaycan Respublikasında keçən əsrin 60-cı illərin sonlarından akademik Y.H.Məmmədəliyev adına Neft-Kimya Prosesləri İnstitutunda da sintetik yağların yeni növlərinin alınması istiqamətində elmi –tədqiqat işləri yerinə yetirilmişdir: 1. Visinal dikarbon turşularının efirləri (alkenil kəhrəba turşuları (AKT); 2. Tsiklik poliolların mürəkkəb efirləri; 3. Norbornen karbon turşularının efirləridir. Alınan sintetik yağlar müəlliflərin qeyd etdiklərinə görə yüksək termiki, termooksidləşdirici və yağlayıcı xüsusiyyətlərə malikdirlər. Bu efirlər sürtkü yağları kimi, həm baza əsası və həm də onların komponentləri kimi təklif olunmuşdur. Təqdim olunan efir tipli sintetik yağlar müxtəlif təşkilatlarda VNINP (Moskva), Çasprom Elmi-Tədqiqat İnstitutu (Moskva), AMEA Aşqarlar Kimyası İnstitutu və s.) sınaqdan keçirilmişdir [19, 23–25]. Yuxarıda qeyd edildiyi kimi, mono- və dikarbon turşularının mürəkkəb efirləri sintetik sürtkü materialları kimi xaricdə ətraflı öyrənilmişdir [21, 26].

İnkişaf etmiş xarici ölkələrdə (ABŞ, İngiltərə) sənaye miqyasında müasir tələblərə cavab verən neopentil quruluşlu poliol efirləri - əmtəə yağları kimi buraxılır (istehsal edilir).

Hal-hazırda xaricdə və Müstəqil Dövlətlər Birliyi(MDB) ölkələrində tətbiqi cəhətdən *poliol spirtlərin mürəkkəb* efirləri – sintetik sürtkü yağları üstünlük təşkil edirlər.

Mürəkkəb efir yağlarının *ümumi çatışmamazlığı* yüksək temperaturlarda atmosfer oksigeni və mühərrik konstruksiya metallarının iştirakı ilə oksidləşməyə məruz qalması, beləliklə də istismar xassələrinin pisləşməsi, eləcə də davamlılığının aşağı düşməsidir.

Belə ki, sürtkü yağlarının keyfiyyətini xarakterizə edən və əsas xassələrdən sayılan *yüksək temperaturlarda oksidləşməyə qarşı stabilliyi* mühərrikin uzun müddət işləməsinə təmin edən faktorlardandır.

MDB məkanında poliol efirlərinin həm baza hissəsinin təkmilləşdirilməsi, həm də bu yağların termooksidləşdirici stabilliyinin (TOS) artırılması istiqamətində aparılan elmi-tədqiqat işləri birincilik təşkil etmişdir [27-30].

Sürtkü yağlarının ən çox yüksək temperaturlarda istifadəsi zamanı oksidləşməsi baş verir ki, nəticədə onların quruluşu dəyişilərək materialın bərpa olunmaz itkisinə gətirib çıxarır. Məhz, bu səbəbdən perspektiv və kifayət qədər stabilliyə malik sürtkü yağlarının yaradılması aktual olaraq qalır [11, 31].

Sintetik sürtkü yağlarının keyfiyyətini 2 üsulla - baza yağının (yağ əsasının) alınması zamanı onun xassələrini yaxşılaşdırmaq və yağlara aşqarlar əlavə etməklə mükəmməlləşdirmək mümkündür.

İstismar xüsusiyyətlərini müsbət mənada dəyişdirmək məqsədilə sürtkü yağlarına əlavə edilən fəal aşqarlar əsasən tərkibində kükürd, fosfor, xlor, bor, silisium, azot olan üzvi birləşmələrdir.

Xüsusilə, sintetik sürtkü yağlarının istismar xassələrinin korlanmasında onun oksidləşməsi əsas rol oynadığı üçün aşqarların düzgün seçilməsi vacibdir.

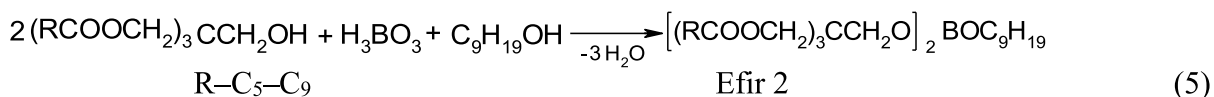
Aparılan təcrübələrlə sübut edilmişdir ki, poliol mürəkkəb efirlərinin termooksidləşdirici stabilliyi hər şeydən əvvəl baza yağının tərkibindəki *hidroksil qruplarının tam əvəz olunması* və sintez zamanı reaksiya katalizatorunun seçimindən çox aslıdır. Məsələn, RF-nin Ufa şəhərində alınan PEE ilə Moskva şəhərində yerləşən Ümumrusiya Neft Emalı Elmi-tədqiqat İnstitutunda (VNİİNP) pentaeritrit və C₅-C₉ sintetik yağ turşuları fraksiyasından istehsal olunan pentaeritrit *mürəkkəb efiri* stabillik nöqteyi-nəzərindən bir-birindən fərqlənilir. VNİİNP-də alınan PEE oksidləşməyə qarşı daha dayanıqlı sayılır. Belə ki, Ufada istehsal zamanı katalizator kimi *sink oksidi*, Moskvada isə *tributilfosfatdan* istifadə edilmişdir.

Aşağıdakı cədvəl 2-dən göründüyü kimi PEE-nin istehsalında efirləşmə prosesində *tributilfosfat katalizatorunun* iştirakı daha çox məqsədəuyğundur. Efirləşmə dərəcəsinin yüksək olması *sərbəst hidroksil qruplarının* kimyəvi reaksiya zamanı tam efirləşməsi ilə müəyyən edilir [32].

Digər tərəfdən, Azərbaycan Respublikası akad. Ə.M. Quliyev adına Aşqarlar Kimyası İnstitutunda (AKİ) keçən əsrin 60-cı illərin sonu 70-ci illərin əvvəlindən başlayaraq *bir qrup elmi əməkdaşlar* indiyə qədər sintetik mürəkkəb efir yağlarının (PEE) iş-temperatur diapazonunun artırılması (200-250°C) istiqamətində elmi-tədqiqat işləri ilə məşğul olmuşlar [33-41].

Qeyd etmək lazımdır ki, AKİ-də aparılan elmi tədqiqatlarla *PEE-nin termooksidləşmə stabilliyinin yüksəldilməsinə* kimyəvi üsulla, yağ əsasını dəyişdirməklə onun yeni modifikasiyasının işlənilib hazırlanmasına nail olunmuşdur. Bu üsulla Ufa sənaye istehsalı olan pentaeritrit və C₅-C₉ sintetik yağ turşularından alınan PEE-nin molekuluna borat turşusu və nonil spirti ilə birləşdirilməklə bor atomu daxil edilmişdir (efir-2) [34].

Reaksiyanın sxemi belədir:



Efir-2 adlanan Bis-[tri (alkoksikarbonilmetilen) etoksi]nonoksiborat birləşməsi alınmışdır.

Sonra isə VNİİNP efirinin (*efir 1*) və AKİ-də sintez edilən tərkibində bor saxlayan efirin (efir 2) TOS-u öyrənilmişdir.

Təcrübə sınaqların standart ГОСТ 23797-79 üsulla 225°C-də TOS-u yoxlandıqda məlum olmuşdur ki, bor saxlayan efirin keyfiyyət göstəriciləri və TOS-u daha yüksəkdir (cədvəl 3).

Təklif edilən *borsaxlayan pentaeritrit efirinin* TOS-unun yüksəldilməsi üsulu texnoloji cəhətdən sadəliyi və xammalların asan əldə edilməsi ilə fərqlənir.

AKİ-də yaradılan bortərkibli “efir-2” –yağı Moskva şəhəri P.I. Baranov adına Mərkəzi Aviasiya Mühərrik İstehsalı İnstitutunda (SIAM) sınaqdan keçirilərək *akt alınmışdır ki*, bu da yağın xarici əmtəə ПТС-225 və «Турбойль» yağlarından geri qalmadığını təsdiqləmişdir [35, 36].

Sintetik yağların xassələrinin yaxşılaşdırılmasının perspektiv üsullarından biri də mürəkkəb efir yağlarının qarışığının istifadə edilməsidir. [42, 43].

Tədqiqatçılar bunu belə əsaslandırırlar ki, fərdi mürəkkəb efirlərlə müqayisədə efir qarışıqları daha yüksək termooksidləşdirici stabilliyə və yüksək özlülük indeksinə malik olurlar. İstifadə edilən efirlərin xassələri nəzərə alınmaqla yağların tərkibi eksperiment yolu ilə kombinasiya edilir və lazım olan istismar xassələrinə malik yağ alırlar.

Sintetik sürtkü yağlarının *aşağı temperatur xassələrinin tələblərə uyğun qənaətbəxş olması* QTM-in etibarlı işləməsi və işə salınmasını təmin edir. Bu cəhətdən AKİ-də pentaeritrit efirinin xassələrinin yaxşılaşdırılması(təkmilləşdirilməsi) istiqamətində çox səmərəli elmi araşdırmalar yerinə yetirilmişdir.

Sonda iddia etmək doğru olardı ki, *baza yağları* keyfiyyətindən asılı olmayaraq istismar zamanı mövcud olan sərt iş şəraitini (artan temperatur, ağır yük, hərəkət sürəti, xidmət müddəti və s.) özü –özlüyündə təmin edə bilməz.

Buradan belə nəticəyə gəlmək olar ki, *mürəkkəb efir tipli sintetik baza yağlarının* istehsal texnologiyasında dəyişikliklər olsa da, hal-hazırda onların TOS-unun, eləcədə işçi temperatur həddinin yüksəldilməsinin ən əsas üsullarından biri oksidləşməyə qarşı effektiv *aşqarların əlavə edilməsi* daha çox məqsədəuyğun olub, hətta indiki halda yeganə mümkün üsuldur.

Bütün qeyd olunanlarla yanaşı, sintetik sürtkü yağların *istismar(xidmət) müddətinin artırılması üçün* onun digər keyfiyyət göstəricilərini də yaxşılaşdırmaq mütləqdir. Başqa sözlə desək, sintetik *baza sürtkü yağların* müasir tələblərə uyğun keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün oksidləşməyə qarşı effektiv aşqarlarla yanaşı həm sənaye aşqarı, həm də sintez edilən və müvafiq funksiya daşıyan yeni aşqarlar vasitəsilə *yağ kompozisiyalarının yaradılması* ilə mümkündür.

Cədvəl 2

Efirlərin fiziki-kimyəvi xassələri

Göstəricilərin adları	Efir-1 VNİİNP istehsalı	PEE Ufa istehsalı MPTY 38-1-157-67
Efir ədədi, mq KOH/q	397	395
Hidroksil ədədi, mqKOH/q	7.5	30-40
Turşuluq ədədi, mqKOH/q	0.02	0.25
Kinematik özlülük, mm ² /s 100°C-də	4.5	4.7-4.9
–40°C-də	5700	7880-10950
Temperatur, °C donma	-62	–58
alışma	246	246

Efirlərin fiziki-kimyəvi və funksional xassələri

Cədvəl 3

Efirlər	Oksidləşmədən əvvəl										Oksidləşmədən sonra				
	Kinematik özlülük, mm ² /s		Hidroksil ədədi, mqKOH/q	Özlü- lük əmsalı	Turşuluq ədədi, mqKOH/ q	Temperatur, °C		Yeyilmə diametri , mm	Turşuluq ədədi, mqKOH/q	Kinematik özlülük, mm ² /s		225°C, 10 saat		225°C, 20 saat	
						Don- ma, °C	Alış- ma, °C			100°C	-40°C	100°C	-40°C		
VNIINP efiri (efir 1)	4.90	10950	40.8	140	0.26	-58	246	0.95	3.50	5.90	22050		7.05	7.10	28045
Modifikasi- ya olunmuş efir (efir 2)	6.0	16249	10.2	145	0.19	-57	264	0.55	1.95	6.38	28230		3.48	6.5	30150

Qeyd: Mis, polad və alüminium lövhəciklərin korroziyası praktiki olaraq yoxdur.

ƏDƏBİYYAT

1. Смазочные материалы: классификация и терминология/Ю. Ищук, М. Гинзбург, Е.И. Кобылянский, С. Коваленко, Б. Ярмолук // Катализ и нефтехимия–2005.–№13.–С.9-19(укр) <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/3737>
2. Электронный ресурс: сайт содержит информацию о свойствах масел.–Режим доступа: <http://rumataoil.ru/index.php?page=catalog&pid>.
3. В. А. Балясников Метод контроля температурных пределов работоспособности синтетических моторных масел / В.А. Балясников, Б.И. Ковальский, Е.А. Ермилов, Н. С. Батов, Ю.Н. Безбородов // Известия Тул ГУ. – 2017. №4. С. 123 – 131.
4. Е.Н. Калайтан Смазочные масла для реактивных двигателей/ Е.Н. Калайтан. – М.: Химия, 1968. – 196 с.
5. Яновский, Л.С. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей / Л.С. Яновский, Н.Ф. Дубовкин и др. – Казань, 2002. 399 с.
6. Горюче, смазочные материалы: Энциклопедический толковый словарь-справочник. Изд.2-ое./Под ред. В.М. Школьников. – М.:ООО «Издательский центр «Техинформ» Межд-ой Акад-и Информтиз-и», 2010. -756с.
7. Дрозд Г. И. Фосфаты органические // Химическая энциклопедия, т-5
8. Глинка Н.Л. Общая химия: Учебное пособие для ВУЗов.- М.: Химия 2004.
9. Пат. 2145592 РФ. Оп. 20.02.2000.
10. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. 2-е изд.- Баку, Химия, 1985.
11. Moretto H., Schulze M., Wagner G. Silicones // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. P. 2–22.
12. Yilgor E., Yilgor I. Silicone containing copolymers: Synthesis, properties and applications // Prog. Polym. Sci. 2014. Vol. 39, № 6. P. 1165–1195.
13. Харитонов Н.П., Островский В.В. Термическая и термоокислительная деструкция полиорганосилоксанов.- Л.: Наука, 1982. -208 с.
14. Соболевский М.В., Скороходов И.И., Гриневич К.П. Органосилоксаны. Свойства, получение, применение. - М.: Химия, 1985. - 264 с.
15. В.И. Бабкин, А.А.Алексашин, Л.С. Яновский и др. Отечественные смазочные масла для авиационных газотурбинных двигателей: проблемы и перспективы / Журнал «Двигатель», 2012, №5(83), с. 6-9.
16. Харт А.В., Гундерсон Р.С. Синтетические смазочные материалы и жидкости. -Л.: Химия, 1965. - 385 с.
17. Динцес А.И., Дружинина А.В. Синтетические смазочные масла. - М.:Гостоптехиздат, 1958. - 350с.
18. Мамедьяров М.А. Синтетические эфирные смазочные масла. «Эльм, Баку – 2017.-396 стр.
19. Чэнхун Ху, Цзя Ай, Линь Ма, и др. Эфирные масла, полученные из полностью возобновляемых ресурсов, и их свойства базовых масел для смазочных материалов. *ACS Omega* 2021, 6 (25), 16343-16355. doi:10.1021/acsomega.1c00808
20. G.J. Bishop. Aviation turbine lubricant development. *Journal of Synthetic Lubrication* 1987, 4 (1), 25-40. <https://doi.org/10.1002/jsl.3000040103>.

21. Коняев Е.А., Немчиков М.Л. Химмотология авиационных масел и гидравлических жидкостей. -М. 2008. - 81с.
22. А. с. 1334648, СССР . Эфиры 2-этилгексилантарной кислоты в качестве дисперсионной среды для плоастичных смазок / Мамедьяров М.А., Сейидов Ф.Т., Алекперов С.К.
23. Алиева Ф.Х. Эфиры и гетероатомные производные (C₆–C₁₀) вицинальных дикарбоновых кислот в качестве основ и компонентов смазочных масел. 2012, С.295.
24. Гурбанов Г.Н. Сложные эфиры циклических многоатомных спиртов – новые основы и компоненты синтетических смазочных масел (синтез, свойства, применение). Дис. докт. хим. наук, Баку, 2007, 305.
25. В. Н. Shoemaker Introduction - Synthetic Lubricating Oils Industrial & Engineering Chemistry / 1950, 42, 12, 2414.
26. Патент РФ № 2001124383/04, 04.09.2001. Эрнст Уве, Губиш Дитмар, Бюшкен Вильфрид. Способ получения сложных эфиров карбоновых кислот//Патент России № 2283299. 2006.
27. Патент РФ № 2008110661/04, 19.03.2008. Мамарасулова З.В., Громова В.В. Основа синтетического смазочного масла//Патент России № 2361904. 2009.
28. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. и др. Смазочные материалы и проблемы экологии. М.,: Нефть и газ, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. — 424 с.
29. М.М. Куковицкий, Р.Н. Хайрулин, Н.И. Сизов, Т.А. Ибрагимов Совершенствование технологии производства сложноэфирных синтетических масел // Нефтепереработка и нефтехимия, 1990, №2, с.8
30. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение под ред. А.М. Данилова. - М.: Профессия, 2013. – 646 с.
31. Т. М. Ициксон, Л. Х.Каган, Е. Я. Жарова, Т. И. Сударикова и др. Влияние катализатора на способ получения и свойства эфиров пентаэритрита // Химия и технология топлив и масел, 1975. № 8, с.10-12.
32. А.с. 1822157 СССР, 1982. Способ получения синтетического смазочного масла / А.М. Кулиев, Г.А. Зейналова , Н.С. Кязимова, Э.А. Нагиева.
33. Нагиева Э.А. Малоазольные и безазольные присадки к минеральным и синтетическим маслам на основе алкилфенолов и аминов/ Диссерт.докт.техн.наук. Баку. 2001. 274с.
34. А.с. 230609 СССР, 1984. Смазочная композиция / Кулиев А.М., Зейналова Г.А., Кязимова Н.С, Нагиева Э.А., Запорожская О.А., Горячев В.В.
35. А.с. 803458 СССР, 1979. Смазочная композиция / Зейналова Г.А., Кязимова Н.С., Нагиева Э.А.
36. Н.С. Кязимова, В.С. Смоленкова Компаундированные основы синтетических масел // Химия и технология топлив и масел, 1986. № 6, с. 42-44.
37. Pat. 5994278 US. Blends of lubricant base stocks with high viscosity complex alcohol esters|Carolyn Boggas Duncan, David Wayne Turner, Exxon Chemical Patents Inc., Houston, Tex., nov.30, 1999.
38. А.Е. Ешин, В.Н. Бакунин, Т.Н. Таранникова. Вязкостные характеристики синтетических авиационных масел при низких температурах // Химия и технология топлив и масел, 1992, №6, С.23-25.

39. А.С. 801522 СССР, 1979. Смазочная композиция / Зейналова Г.А., Кязимова Н.С., Нагиева Э.А.
40. А.с. 228122 СССР, 1984. Смазочная композиция / Зейналова Г.А., Насирова Я.Р., Кязимзаде А.К.
41. А.К.Кязим-заде, А.А.Гадиров «Ингибиторы высокотемпературного окисления синтетических сложноэфирных масел».- Нефтехимия. 1998, Т-38, №2, с.83-89.
42. А.А. Гадиров, Э.А. Нагиева, С.И. Насирова «Некоторые борсодержащие производные азометина в качестве антиоксидантов к синтетическим маслам» -Материалы IX международной научно-технической конференции альтернативные источники сырья и топлива. АИСТ-2023, Минск, 17–20 октября 2023 г., с. 178 – 179.
43. Məmmədova S.İ., Ladoxina N.R., Əsgərova K.T., Abbasova Ş.B., Məmmədova G.H., Yüzbaşova L.N. 1-fenilsulfamid-n-2-yod-3-xlorpropanın rodanid və tiokarbonil törəmələrinin sintezi. //– Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası. Elmi Məcmuə, – 2023, №3, cild 25, – s. 9-15. DOI: 10.34826/EMNAA.2023.25.3.003.

REFERENCES

1. Smazochnyye materialy: klassifikatsiya i terminologiya/YU. Ishchuk, M. Ginzburg, E.I. Kobylanskiy, S. Kovalenko, B. Yarmolyuk // Kataliz i neftekhimiya–2005.–№13.–S.9-19(ukr) <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/3737>
2. Elektronnyy resurs: sayt soderzhit informatsiyu o svoystvakh masel.–Rezhim dostupa: <http://rumataoil.ru/index.php?page=catalog&pid>.
3. V. A. Balyasnikov Metod kontrolya temperaturnykh predelov rabotosposobnosti sinteticheskikh motornykh masel / V.A. Balyasnikov, B. I. Koval'skiy, E.A. Ermilov, N. S. Batov, YU. N. Bezborodov // Izvestiya Tul GU. – 2017. №4. S. 123 – 131.
4. E.N. Kalaytan Smazochnyye masla dlya reaktivnykh dvigateley/ Ye.N. Kalaytan. – M.: Khimiya,1968. – 196 s.
5. Yanovskiy, L.S. Goryuche-smazochnyye materialy dlya aviatsionnykh dvigateley / L.S. Yanovskiy, N.F. Dubovkin i dr. – Kazan, 2002. 399 s.
6. Goryuche, smazochnyye materialy: Entsiklopedicheskiy tolkovyy slovar-spravochnik. Izd.2-oye./Pod red. V.M.Shkol'nikova. – M.:OOO «Izdatelskiy tsentr «Tekhinform» Mezhd-oy Akad-i Informtiz-i», 2010. -756s.
7. Drozd G. I. Fosfaty organicheskiye // Khimicheskaya entsiklopediya, t-5
8. Glinka N.L. Obshaya khimiya: Uchebnoe posobie dlya VUZ-ov.- M.: Khimiya 2004.
9. Pat. 2145592 RF. Op. 20.02.2000
10. Kuliyevev A.M. Khimiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam. 2-e izd.- Baku, :Khimiya, 1985.
11. Moretto H., Schulze M., Wagner G. Silicones // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. P. 2–22.
12. Yilgor E., Yilgor I. Silicone containing copolymers: Synthesis, properties and applications // Prog. Polym. Sci. 2014. Vol. 39, № 6. P. 1165–1195.
13. Kharitonov N.P., Ostrovskiy V.V. Termicheskaya i termookislitel'naya destruktziya poliorganosiloksanov.- L.: Nauka, 1982. -208 s.

14. Sobolevskiy M.V., Skorokhodov I.I., Grinevich K.P. Organosiloksany. Svoystva, poluchenie, primeneniye. - M.: Khimiya, 1985. - 264 s.
15. V.I. Babkin, A.A. Aleksashin, L.S. Yanovskiy i dr. Otechestvennyye smazochnye masla dlya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley: problemy i perspektivy/Zhurnal «Dvigatel'», 2012, №5 (83), s. 6-9.
16. Khart A.V., Gunderson R.S. Sinteticheskie smazochnye materialy i zhidkosti. -L.: Khimiya, 1965. - 385 s.
17. Dintses A.I., Druzhinina A.V. Sinteticheskie smazochnye masla. - M.: Gostoptekhizdat, 1958. - 350s.
18. Mamedyarov M.A. Sinteticheskiye efirnye smazochnye masla. «Elm, Baku – 2017.-396 str.
19. Chenchun Khu, TSzya Ay, Lin Ma, i dr. Efirnye masla, poluchennyye iz polnostyu vozobnovlyayemykh resursov, i ikh svoystva bazovykh masel dlya smazochnykh materialov. ACS Omega 2021, 6 (25), 16343-16355. doi:10.1021/acsomega.1c00808;
20. G.J. Bishop. Aviation turbine lubricant development. Journal of Synthetic Lubrication 1987, 4 (1), 25-40. <https://doi.org/10.1002/jsl.3000040103>.
21. Konyaev E.A., Nemchikov M.L. Khimmotologiya aviatsionnykh 93 d r 93 em gidravlicheskiykh zhidkostey.-M. 2008.- 81s.
22. A. S. 1334648, SSSR . Efiry 2-etilgeksilyantarnoy kisloty v kachestve dispersionnoy sredy dlya ploastichnykh smazok./ Mamedyarov M.A., Seyidov F.T., Alekperov S.K.
23. Aliyeva F.KH. Efiry i geteroatomnyye proizvodnyye (S₆- S₁₀) vitsinalnykh dikarbonovykh kislot v kachestve osnov i komponentov smazochnykh masel.2012, S.295.
24. Gurbanov G.N. Slozhnyye efiry tsiklicheskiykh mnogoatomnykh spirtov – novye osnovy i komponenty sinteticheskikh smazochnykh masel (sintez, svoystva, primeneniye). Diss.dokt.khim.nauk, Baku, 2007, 305.
25. B. H. Shoemaker Introduction – Synthetic Lubricating Oils Industrial & Engineering Chemistry / 1950, 42, 12, 2414.
26. Patent RF № 2001124383/04, 04.09.2001. Ernst Uve, Gubish Ditmar, Byushken Vil'frid. Sposob polucheniya slozhnykh efirov karbonovykh kislot // Patent Rossii № 2283299. 2006.
27. Patent RF № 2008110661/04, 19.03.2008. Mamarasulova Z.V., Gromova V.V. Osnova sinteticheskogo smazochnogo masla//Patent Rossii № 2361904. 2009.
28. Evdokimov A.YU., Fuks I.G., Shabalina T.N. 93d r. Smazochnye materialy i 93d r93em ekologii. M.: Neft i gaz, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2000. – 424 s.
29. M.M. Kukovitskiy, R.N. Khayrulin, N.I. Sizov, T.A. Ibragimov Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva slozhnoefirnykh sinteticheskikh masel // Neftepererabotka i neftekhimiya, 1990, №2, s.8
30. Rudnik, L.R. Prisdki k smazochnym materialam. Svoystva i primeneniye pod red. A.M. Danilova. – M.: Professiya, 2013. – 646 s.
31. T. M. Itsikson, L. KH. Kagan, E. YA. Zharova, T.I. Sudarikova 93d r. Vliyaniye katalizatora na sposob polucheniya i svoystva efirov pentaeritrita // Khimiya i tekhnologiya topliv i masel, 1975. № 8, s.10-12.
32. A.S. 1822157 SSSR, 1982. Sposob polucheniya sinteticheskogo smazochnogo masla / A.M. Kuliyeu, G.A. Zeynalova, N.S. Kyazimova, E.A. Nagiyeva

33. Nagieva E.A. Malozolnye i bezzolnye prisadki k mineralnym i sinteticheskim maslam na osnove alkilfenolov i aminov / Dissert. Dokt. Tekhn.nauk. Baku. 2001. -274s.
34. A.S. 230609 SSSR, 1984. Smazoch'naya kompozitsiya / Kuliye'v A.M., Zeynalova G.A., Kyazimova N.S, Nagiyeva E.A., Zaporozhskaya O.A., Goryachev V.V.
35. A.s. 803458 SSSR, 1979. Smazoch'naya kompozitsiya / Zeynalova G.A., Kyazimova N.S., Nagieva E.A.
36. N.S. Kyazimova, V.S. Smolenkova Kompaundirovannyye osnovyy sinteticheskikh masel.// Khimiya i tekhnologiya topliv i masel, 1986. № 6, s. 42-44.
37. Pat. 5994278 US. Blends of lubricant base stocks with high viscosity complex alcohol esters|Carolyn Boggas Duncan, David Wayne Turner, Exxon Chemical Patents Inc., Houston, Tex., nov.30, 1999.
38. A.E. Eshin, V.N. Bakunin, T.N. Tarannikova. Vyazkostnyye kharakteristiki sinteticheskikh aviatsionnykh masel pri nizkikh temperaturakh // Khimiya i tekhnologiya topliv i masel, 1992, №6, S. 23-25.
39. A.S. 801522 SSSR, 1979. Smazoch'naya kompozitsiya / Zeynalova G.A., Kyazimova N.S., Nagieva E.A.
40. A.S. 228122 SSSR, 1984. Smazoch'naya kompozitsiya / Zeynalova G.A., Nasirova YA.R., Kyazimzade A.K.
41. A.K. Kyazim-zade, A.A. Gadirov «Ingibitory vysokotemperaturnogo okisleniya sinteticheskikh slozhnoefirnykh masel.».- Neftekhimiya. 1998, T-38, №2, S. 83-89.
42. A.A. Gadirov, E.A. Nagiyeva, S.I. Nasirova «Nekotorye borsoderzhashiye proizvodnyye azometina v kachestve antioksidantov k sinteticheskim maslam» -Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno- tekhnicheskoy konferentsii alternativnyye istochniki syrya i topliva. AIST-2023, Minsk, 17–20 oktyabrya 2023 g., s. 178 – 179
43. Mamedova S.I., Ladokhina N.P., Askerova K.T., Abbasova Sh.B., Mamedova G.G., Yuzbasheva L.N. Synthesis of rhodanids and thiocarbonyl derivatives 1-phenylsulfamido-n-2-iodine-3-chloropropane. //-Baky: National Aviation Academy. -Elmi Mejmue, -2023, 25(№3), -pp. 9-15. DOI: 10.34826/EMNAA.2023.25.3.003.

SYNTHETIC LUBRICATING (BASE) OILS, ESTERS AND THEIR USE IN AVIATION

***Gadirov A.A., Naghiyeva E.A., Farzaliev V.M.
Insitute of Chemistry of Additives of after acad. Guliyev A.M.***

The article briefly analyzes literary materials on the production, types and practical application of synthetic oils. Their disadvantages and advantages are indicated. Comparative stages of development of synthetic lubricants, which are of great importance in the world due to their operational properties, especially those used in aviation - complex ester oils based on complex diesters and polyols, are considered. It is shown that the improvement of lubricants is directly related to the development of motor engineering.

It is noted that synthetic aviation oils, the first serious use of which began abroad at the beginning of the last century and by their performance at high temperatures are divided into 3 main groups. The first group included dioctyl-, di-2-ethylhexyl sebacate esters of dibasic acids as base oils,

which were used mainly at temperatures of 150-170°C with the addition of antioxidant and antiwear additives. Pentaerythritol ether, as a 2nd generation base oil, successfully withstands temperatures up to 250°C without changing its physical and chemical properties.

Synthetic oils of group II include polyglycol ethers, and oils of group III include polycyclic polyphenyl ethers, which differ from each other in terms of thermal-oxidative stability and the ability to operate at high temperatures (above 260°C).

The text then presents information about aviation oils, which were mainly produced on the basis of pentaerythritol ether in the former USSR since the 1960s, and their newly created modifications in accordance with modern requirements. Their technical names and characteristics are given. A brief review also discusses the creative work carried out in the field of synthetic oils in the leading research institutes of the Republic of Azerbaijan, which continues to this day.

The article notes that research and development work is important for stabilizing and improving synthetic lubricants used in gas turbine engines of the aviation industry in accordance with the existing unified classification of oils in the world, and, accordingly, increasing their service life in severe temperature and heavy load conditions of their operation. The article compares new promising commercial oils developed by leading enterprises in the industry with domestic and foreign analogues.

Key words: lubricating base oil, synthesis, ester, temperature, aviation, stabilization, synthetic, polymer.

Rəyçilər: t.e.d., dosent Ramazanova Y.B.

t.f.d., dosent Öməröva G.C.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Fərzəliyev Vaqif Məcid oğlu	Akademik Quliyev Ə.M. adına Aşqarlar Kimyası İnstitutu	Direktor, akademik	aki05@mail.ru mob: (+994)50-322-28-96
Nağıyeva Elmira Əli qızı	Akademik Quliyev Ə.M. adına Aşqarlar Kimyası İnstitutu, "Alkilfenol əsasında üzvi birləşmələr" laboratoriyası	Alkilfenol əsasında üzvi birləşmələr" laboratoriyasının müdiri, t.e.d., dosent	nagiyeva.46@mail.ru mob: (+994)55-775-02-80
Qədirov Əli Əşrəf oğlu	Akademik Quliyev adına Aşqarlar Kimyası İnstitutu, "Alkilfenol əsasında üzvi birləşmələr" laboratoriyası	"Alkilfenol əsasında üzvi birləşmələr" laboratoriyasının aparıcı elmi işçisi, k.ü.f.d., dosent	qadirov.58@mail.ru (+994)12 513-82-83 ev(+994)12 514-96-51 iş

MÜNDƏRİCAT

AVİASIYA VƏ RAKET-KOSMİK TEXNİKASI

1. PUA əsaslı hava müşahidəsinin optimallaşdırılması: effektivlik meyarları, imkanların qiymətləndirilməsi və strateji hədəflərin müşahidəsi. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. 1

AVİASIYA TƏHLÜKƏSİZLİYİ

2. Partlayıcıların aşkarlanmasında prompt qamma neytron aktivləşmə analizi və dərin neyron şəbəkələrinin birləşdirilməsi. Əsgərov K.Ə., Əhmədova S.T. 17
3. Aeroportların mühafizə kompleksinin yaradılmasının optimal texniki şərtlərinin müəyyənəşdirilməsi. R.N. Nəbiyev, R.R. Rüstəmov, Ü.F. Mövsümzadə 27
4. Təhlükəsizlik sisteminin təkmilləşdirilməsi üçün modifikasiya edilmiş vernam şifrələmə alqoritmi. İbrahimova S.R., Hüseynzadə İ.M. 45

TELEKOMMUNİKASIYA

5. Azərbaycan Respublikası ərazisində DVB-T2 standartı üzrə təktezlikli televiziya yayım şəbəkəsinin yaradılması perspektivləri. Məmmədov İ.R., Şərifov Ə.M. 60

İNFORMASIYANIN EMALI

6. Hava limanı əməliyyatlarında sini intellekt və rəqəmsal əkizlər. Hacıyev Y.M., Dadashov F.H. 69

MATERIALŞÜNASLIQ

7. Sintetik sürtkü baza yağları, mürəkkəb efirlər və onların aviasiyada istifadəsi. Qədirov Ə.Ə., Nağıyeva E.Ə., Fərzəliyev V.M. 78

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET SPACE TECHNOLOGY

1. Optimizing UAV-based aerial surveillance: effectiveness criteria, capability assessment, and strategic target monitoring. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. 1

AVIATION SECURITY

2. Integration of prompt gamma neutron activation analysis and deep neural networks in explosives detection. Asgarov K.A., Ahmadova S.T. 17
3. Determination of optimal technical conditions for creating an airport guarding complex. Nəbiyev R.N., Rustamov R.R., Movsumzade U.F. 27
4. A modified vernam cipher algorithm for the enhancement of security systems. İbrahimova S.R. Hüseynzadə İ.M. 45

TELECOMMUNICATIONS

5. Prospects for creating a single-frequency tv broadcasting network based on DVB-T2 standard in the territory of the Republic of Azerbaijan. Məmmədov İ.R., Şarifov A.M. 60
(Перспективы создания одночастотной сети ТВ вещания по стандарту DVB-T2 на территории Азербайджанской Республики. Мамедов И.Р., Шарифов А.М.)

INFORMATION PROCESSING

6. Artificial intelligence and digital twin in airport operations. Həjiyev Y.M., Dadaşov F.H. 69

MATERIALS SCIENCE

7. Synthetic lubricating (base) oils, esters and their use in aviation. Gədirov A.A., Nəghiyeva E.A., Fərzaliev V.M. 78

Məqalələrin təqdim olunma qaydaları

Məqalələr Azərbaycan, rus və ingilis dillərində qəbul olunur. Hər bir məqaləyə Azərbaycan, rus və ingilis dillərində xülasə və açar sözlər verilməlidir. Çapa təqdim olunan məqalələr A4 formatda, 12 ölçülü şriftlə (cədvəllər, şəkillər və şəkilaltı yazılar 11 ölçülü şriftlə), ağ kağızda bir intervalla çap olunmalıdır. Boşluqlar: vərəqin bütün kənarlarından 2 sm. Məqalənin həcmi: orijinal məqalələr üçün 10, icmal məqalələr üçün 15 səhifədən artıq olmamalıdır. Məqalələr 2 nüsxədə çap və elektron variantda (WORD) təqdim olunur. Əlyazmalar müəlliflərə qaytarılmır. Digər təşkilatlardan olan müəlliflərin məqalələri onların işlədiyi təşkilatın məktubu ilə birlikdə təqdim olunmalıdır.

Məqalələrə müsbət rəy verildikdən sonra redaksiya heyətinin qərarı ilə çap olunur.

1. Hər bir məqalə onun UOT-u və ya PACS-ı, DOI-si, adı, müəlliflərin adı, ata adı, soyadları, elektron ünvanları, təşkilatın adı, məqalənin yazıldığı dildə bir intervalla çap olunmalı, qısa annotasiya və açar sözlərlə başlanmalıdır.

2. Ədəbiyyata istinad (References):

- ədəbiyyata istinad məqalədə rast gəlinəni ardıcılıqla işlənməlidir.

Sitat gətirmə qaydası:

- dövrü jurnallardakı məqalələr: müəlliflərin A.A. Soyadları, məqalənin adı, dövrü jurnalın adı, çap olunma ili, cildi, nömrəsi, səhifə nömrəsi;

- konfrans materialları və tezislər: müəlliflərin A.A. Soyadları, konfrans materialları və ya tezisnin adı, konfransın adı, keçirildiyi yer və il, çap materialının cildi, nömrəsi və səhifələri;

- kitablar: müəlliflərin soyadları, kitabın adı, çap olunduğu nəşriyyat, il və yer, səhifələrin sayı, təkrar istinadlarda isə səhifə nömrəsi verilir.

References - ədəbiyyatın orijinal dildə ingilis əlifbası ilə verilmiş variantıdır.

3. Annotasiya.

Annotasiya digər iki dildə 200-250 sözdən az olmayaraq, ayrıca vərəqdə çap olunmalıdır.

4. Açar sözlər.

Azərbaycan, rus və ingilis dillərində 8-10 söz.

5. Rəsmlər və şəkillər.

Rəsmlər və şəkillər yazıları və izahatları ilə ayrıca təqdim olunmalıdır. Ölçülər: 6 sm x 6 sm-dən az və 23 sm x 16 sm-dən çox olmayaraq. Qrafiklərin koordinat oxları minimum rəqəm tərkibli olmalıdır. Koordinat oxlarının adları çox aydın yazılmalıdır. Qrafiklərdəki hər bir xətt nömrələnmiş və izahlı şəkildə olan yazılarla verilməlidir.

6. Cədvəllər.

Cədvəllər ayrıca vərəqdə çap olunmalıdır. Onlar nömrələnməli və başlıqla verilməlidir.

7. Məqalənin sonunda müəlliflər haqqında məlumat verilir: adı, soyadı və atasının adı; elmi dərəcəsi və adı; elektron ünvanı; iş yeri və ünvanı; işin icra olunduğu şöbə, laboratoriya və ya kafedra; maraq dairəsi.

Verilmiş tələblərə uyğun gəlməyən məqalələrə baxılmır!!!

Publication guidelines for articles in the Scientific Journal of National Aviation Academy

Articles are accepted in Azerbaijani, Russian or English. Each article should have an abstract and keywords in Azerbaijani, Russian and English. Articles submitted for publication should be printed with one interval on white A4 paper, font size 12 (tables, figures and captions for figures, font size 11). Margins: 2 cm on all edges page. Article length for original articles is no more than 10 pages, and 15 pages for review articles. Both articles should be submitted in 2 copies in printed and electronic version. The copies must be typed in the Microsoft Word text editor. Manuscripts of articles are not returned to the authors. For authors from other organizations, articles are accompanied by a letter and an examination certificate from the organization where they work. Articles are reviewed.

Only the articles received positive review of the Editorial Board are published.

1. Each article begins with UDC or PACS, DOI, title, information about the author(s), email address, name of the organization and a brief annotation in the original language of the article and keywords published in one interval.

2. References to literature (References):

- references should follow the order that are cited in the article

- Citation order:

- articles in periodicals: Author's full name, title of the article, title of the periodical, year of publication, volume and page numbers;

- conference publications and abstracts: Author's full name, title of the conference publication or abstract, conference title, place and year of the conference, volume number, page numbers.

- books: Author's full name, title of the book, publisher, date and place, number of pages; when referring again, the page number is also given.

References – is the referred version of the original literature give with Latin script.

3. Abstract. The abstract of at least 200-250 words in two other languages printed on a separate paper.

4. Key words in Azerbaijani, Russian and English, 8-10 words.

5. Drawings and photographs with inscriptions and explanations are attached separately. Dimensions: not less than 6x6 cm and not more than 23x16 cm. The coordinate axes of the graphs must contain minimum numbers. The names of the coordinate axes must be written very clearly. Each line in the graphs should be given with numbered and well-explained figure captions.

6. Tables should be numbered, titled and printed on a separate sheet.

7. The author(s) information is given at the end of the article: full name; academic degree and academic title; place of work and address; department, laboratory or chair where the work was fulfilled; sphere of scientific interests; email address; contact numbers.

Articles that do not meet these requirements will not be considered!!!

Texniki redaktor

Vəliyeva Q.C.

Korrektorlar

k.f.d. Yüzbaşova L.N., Osmanlı J.R., Zeynalova A.E., Məmmədova Z.A.

Dizayner

Binnətəliyeva T.V.

“Elmi Məcmuə”nin redaksiya heyəti tərəfindən
nəşrə hazırlanmış və çapına icazə verilmişdir.

Technical editor

Valiyeva G.J.

Correctors

Phd (Chem.) Yuzbashova L.N., Osmanlı J.R., Zeynalova A.E., Mammadova Z.A.

Designer

Binnataliyeva T.V.

"Scientific Journal" prepared for publication by the
editorial board and permission to print.

Çapa hazırlanmışdır: 20.11.2025
“Elmi Məcmuə”
“ Raf poliqraf 2017” mətbəəsində
çap olunmuşdur.
Formatı - 60x84 1/8.
Tiraj 50 nüsxə.

Editor-in-chief

DSc (Phys. & Math.), Academician Arif M. Pashayev

Scientific Editor

DSc (Tech.), prof. Rasim N. Nabiyeu

Members of the editorial board (by scientific fields)

Technical sciences

DSc (Tech.), Prof. Afiq R. Hasanov (**editor**)

DSc (Tech.), Prof. Adalat S. Samadov

DSc (Phys. & Math.), Prof. Messoud A. Efendiev, Helmholtz Zentrum München, Germany

DSc (Phys. & Math.), Prof. Ali T. Ismail-Zadeh, Karlsruhe Institute of Technology, Germany

DSc (Tech.), Prof. Alexander A. Igolkin, Samara University, Russia

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Oleg B. Spiridonov, Southern Federal University, Russia

DSc (Tech.), Prof. Ismail M. Ismailov

DSc (Tech.), Prof. Ahad Kh. Janahmadov

DSc (Tech.), Prof. Parviz Sh. Abdullayev

DSc (Phys. & Math.), Prof. Karim R. Allahverdiyev

DSc (Tech.), Prof. Khagani I. Abdullayev

DSc (Phys. & Math.), Prof. Kamal A. Asgarov

DSc (Tech.), Prof. Nazim Sh. Huseynov

DSc (Tech.), Prof. Aytaj N. Badalova

Ph.D (Phys. & Math.), Prof. Islam A. Isgandarov

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Elman M. Najafov

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Fuad H. Dadashov

Legal sciences

DSc (Law), Prof. Aykhan Kh. Rustamzadeh (**editor**)

Prof. Dr. (Law), Javid S. Abdullazadeh, Ankara University, Türkiye

Prof. Dr. (Law), Yener Unver, Özyeğin University, Türkiye

Prof. Dr. (Law), Omer Chinar, İbn Haldun University, Türkiye

DSc (Law), Prof. Nazim H. Jafarli

DSc (Law), Prof. Subhan F. Aliyev

DSc (Law) Fardin Y. Khalilov

DSc (Law), Ass. Prof. Rauf M. Garayev

Economic sciences

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Gulnara T. Ahmedova (**editor**)

D.Sc (Econ.), Prof. Heydar S. Hasanov

D.Sc (Econ.), Prof. Rustem T. Yuldashev, Moscow State Institute of International Relations, Russia

D.Sc (Econ.), Prof. Salim Y. Muslumov

D.Sc (Econ.), Prof. Sarvar A. Abbasov

D.Sc (Econ.), Prof. Elnur M. Sadigov

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Farida F. Alakbarova

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Vafa G. Najafova

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Fuad M. Mirzayev

Categories of the "Scientific Journal": aviation and rocket space technology, air navigation, aviation security, aviation meteorology, aerospace monitoring and environmental protection, instrumentation, radio electronics, telecommunications, information processing, transport logistics, physics, solid-state electronics, materials science, information technology, system analysis, control systems, law, economics, management, social sciences.

"Scientific Journal" was registered at the Ministry of Press and Information of the Republic of Azerbaijan in 1999 (Reg. № 492).

The journal is included into the recommended list of periodical scientific publications of Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Azerbaijan.

Address: AZ1045, Baku, Mardakan Ave. 30, National Aviation Academy

Tel. (+994) 12 497 28 24. E-mail: em@naa.edu.az Website: <https://scientific-journals.naa.edu.az/>

