



VATAN
UNIVERSITETI



MANAGEMENT AND FUTURE TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

VOLUME

3

ISSUE

3

MONTH

September

YEAR

2026

NUMBER

011



VATAN
UNIVERSITETI



<https://vatanuniversiteti.uz>



ISSN 3060-5008



Jurnal sohalari: dasturiy injiniring, sun'iy intellekt texnologiyalari, kompyuter injiniringi, infokommunikatsiya injiniringi, axborot xavfsizligi, matematika va fizika.

Tahririyat kengashi raisi

g.f.d., prof. Muxammadismoil Maxmudov - Vatan universiteti rektori

Bosh muharrir

i.f.d., prof. Karimjon Axmedjanov - Vatan universiteti Ilmiy ishlar va innovatsiyalar bo'yicha prorektori

Tahririyat kengashi a'zolari:

f.f.d., prof. Asror Muhamedov
t.f.d., prof. O'tkir Xamdamiyov
t.f.d., prof. Muxammadjon Musayev
t.f.d., prof. Shavkat Fozilov
f-m.f.d., prof. Aripov Mersaid
f-m.f.d., prof. Aloe Raxmatillo
t.f.d., prof. Marat Raxmatullayev
t.f.d., prof. Dilnoz Muxamediyeva
t.f.d., prof. Jamshid Sultonov
f-m.f.d., prof. Dildora Muhamediyeva
t.f.d., prof. Nargiza Usmanova
t.f.d., dot. Halimjon Xujamatov
t.f.d., dot. Ibragim Atadjanov
t.f.f.d., dot. Muhriddin Muxiddinov
t.f.f.d., dot. Maxina Mansurova
t.f.f.d., dot. Baxtiyor Akmuradov
t.f.f.d., dot. Anvar Musayev
t.f.f.d., dot. Muhriddin Umarov
f-m.f.n., dot. Baxromjon Abduraxmonov
t.f.f.d., dot. Abdulxayev Nodirbek

Muharrirlar:

Shukurullo Kaxarov (O'zbekiston)
Ozod Yusupov (O'zbekiston)
Dilshod Rahmatov (Germaniya)
O.A. Hidayov (Germaniya)
Akmaljon Abdullayev (O'zbekiston)
Jinsoo Cho (J. Koreya)
Jamshid Elov (O'zbekiston)
Fazliddin Maxmudov (J. Koreya)
Faheem Khan (J. Koreya)
Doston Xasanov (O'zbekiston)
Shahnoza Muksimova (J. Koreya)
Elmurod Urinov (O'zbekiston)
Akmalbek Abdusalomov (J. Koreya)
Sherzod Abdullayev (O'zbekiston)
Urmanov Odil (J. Koreya)
Sobir Radjabov (O'zbekiston)
Young Im Cho (J. Koreya)
Mohamed Sameer (J. Koreya)
Alpamis Kutlimuratov (O'zbekiston)
Sabina Umirzakova (J. Koreya)
Farhod Ahmedov (J. Koreya)
Sherzod Mustafaulov (O'zbekiston)
Shabir Ahmad (J. Koreya)
U.B. Amirsaidov (O'zbekiston)
Lilia Tightiz (J. Koreya)
Shahnoza Sultanova (O'zbekiston)
Safiullah Khan (Buyuk Britaniya)
Seytkamal Medetov (Fransiya)
Avaz Qaxxorov (O'zbekiston)
Qosim Bekturodov (O'zbekiston)
Namoz Mirzayev (O'zbekiston)

Jurnal O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Administratsiyasi huzuridagi Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligidan 212842-raqamli guvohnoma bilan 26.01.2024 sanasida ro'yxatdan o'tkazilgan.



MUNDARIJA

<i>N.M. Abdulxayev</i>	TELEKOMMUNIKATSIYA TARMOQLARIDA MASHINALI O'QITISH ASOSIDA ANOMAL TRAFIKNI ANIQLASH ALGORITMINI TAKOMILLASHTIRISH	5
<i>E. A. Saidkulov, H. O'. Akbarov</i>	KUBLAR USULI YORDAMIDA OROL DENGIZI QIRG'OQ CHIZIG'INING YEMIRILISHINING FRAKTAL O'LCHOVNI ANIQLASH	15
<i>P. A. Begimqulova</i>	ESKI O'ZBEK YOZUVIDAN LOTIN GRAFIKASIGA O'TKAZISHDA SINGARMONIZM CHEKLOVLARI OSTIDA GLOBAL DEKODLASH: BUTUN SONLI CHIZIQLI DASTURLASH ALGORITMI VA DASTURIY MAJMUASI	21
<i>N.T. Baymatova, M.N Begmurodov</i>	IP TARMOQLARIDA IPTV XIZMATLARI ARXITEKTURASI VA VIDEO UZATISH SIFATINI TAHLIL QILISH	33
<i>B.N. Raximov, A.A. Komilov, N.T. Boboyev</i>	CHEKLANGAN MUHITLAR UCHUN MIRACL KRIPTOGRAFIK KUTUBXONASI TAHLILI	42
<i>J. B. Elov</i>	MASOFAVIY TA'LIM JARAYONLARINI INTELLEKTUAL VA ADAPTIV BOSHQARISH MODELLARI	49
<i>F. H. Holiyarova</i>	DIFFERENSIAL TENGLAMALARNI TEYLOR USULI BILAN YECHISHNING MATLAB DASTURIDAGI ALGORITMLARI	61



MUNDARIJA

<i>S. N. Iskandarova, P. A. Begimqulova</i>	ESKI O'ZBEK YOZUVLI ARXIVLARNI RAQAMLASHTIRISHDA KAFOLATLANGAN XATOLIK DARAJASINI TA'MINLASH ALGORITMI VA DASTURIY MAJMUASI	66
<i>A. A. Yarmuxamedov, A.B. Jabborov</i>	DVB-T2 STANDARTIDAGI RAQAMLI TELEVISION UZATKICHLARDA OFDM-SIGNALLARINI KUCHAYTIRISHDA DOHERTY ARXITEKTURASIGA EGA QUVVAT KUCHAYTIRGICHLARINING ENERGETIK VA CHIZIQLI XARAKTERISTIKALARINI TIZIMLI OPTIMALLASHTIRISH	75
<i>E. A. Saidkulov, M. A. Umarov</i>	FRAKTAL SIRTLARINI L-TIZIMLAR USULI YORDAMIDA QURISH	102
<i>J. K. Saydazimov</i>	VIDEO OQIMLARNI AVTOMATIK TAHLILGA TAYYORLASH UCHUN ADAPTIV DASTLABKI ISHLOV BERISH ALGORITMI	108
<i>A. B. Qarshiyev, M. S. Tursunov</i>	O'ZBEK TILI KORPUSI UCHUN KO'P QATLAMLI LINGVISTIK ANNOTATSIYA	120
<i>O. O. Durdiyev, B. M. Axmedov, J. N. Murodov</i>	SANOAT SIFAT MENEJMENTI TIZIMLARIDA SUN'IY INTELLEKT VA FAZZI-EHTIMOLIY MODELLAR INTEGRATSIYASI: TASNIFLASH, ANOMALIYALARNI ANIQLASH VA ME'YORIY QAROR QABUL QILISH MEXANIZMI	130

MUNDARIJA

<i>M. Islamova, S. Omonov</i>	O'QUV-SIMULYATSIYA VOSITALARINING BO'LAJAK HARBIY MUTAXASSISLAR HARBIY- KASBIY KOMPETENTLIGINI SHAKLLANTIRISHDAGI O'RNI VA AHAMIYATI	138
<i>F. Tulaganova, S. Iskandarova, S. Omonov</i>	YOLOV8 MODELI ASOSIDA XUJAYRA TURLARINI ANIQLASH VA TAKOMILLASHTIRISHDA SUYAK ILIGI KASALLIKLARINI TASHXISLASH	144
<i>O'. F. Naziraliyev, M. S. Berdimuradov</i>	MOLIYA BOZORINI BASHORATLASHDA RNN VA GRU ALGORITMLARINING QIYOSIY TAHLILI	154
<i>M. H. Primova</i>	N-GRAM GENERATSIYA MODULI OPTIMIZATSIYASI	160





TELEKOMMUNIKATSIYA TARMOQLARIDA MASHINALI O'QITISH ASOSIDA ANOMAL TRAFIKNI ANIQLASH ALGORITMINI TAKOMILLASHTIRISH

Nodirbek Abdulxayev

*Kommunikatsiya va axborot texnologiyalar kafedrası dotsenti, "Vatan" universiteti,
abdulxayev.nodirbek@gmail.com*

Annotatsiya: Ushbu maqolada telekommunikatsiya tarmoqlarida anomal trafikni aniqlashning zamonaviy muammolari va ularni mashinali o'qitish algoritmlari yordamida takomillashtirish masalalari tahlil qilingan. Tarmoq trafigi hajmining tez o'sishi, 5G, SDN va NFV texnologiyalarining keng joriy etilishi, shuningdek, hujum turlarining murakkablashuvi an'anaviy signaturaga asoslangan aniqlash tizimlarining samaradorligini pasaytirmoqda. Ushbu sharoitda nazorat ostidagi, nazoratsiz va chuqur o'qitishga asoslangan algoritmlarning qiyosiy tahlili o'tkazilgan, ularning afzallik va kamchiliklari ko'rsatilgan. Tadqiqot natijasida xususiyatlarni tanlash, ansambl klassifikatsiya va onlayn (incremental) o'qitish komponentlarini birlashtiruvchi ikki bosqichli gibril model taklif etilgan. Taklif etilgan yondashuv anomaliya aniqlash aniqligini oshirish, yolg'on signal (false positive) darajasini kamaytirish hamda real vaqt rejimida ishlash imkoniyatini ta'minlashga qaratilgan. Maqola yakunida telekommunikatsiya operatorlari uchun amaliy tavsiyalar berilgan.

Kalit so'zlar: Telekommunikatsiya tarmoqlari, anomal trafik, mashinali o'qitish, chuqur o'qitish, tarmoq xavfsizligi, tarmoqqa kirishni aniqlash tizimi (IDS/IPS), ansambl usullar, autoenkoder, LSTM, SDN/NFV, katta ma'lumotlar, kontseptsiya siljishi (concept drift), yolg'on signal darajasi.

1. KIRISH

So'nggi o'n yillikda mobil internet, IoT, bulutli xizmatlar va 5G texnologiyalarining keng tarqalishi telekommunikatsiya tarmoqlarida ma'lumotlar hajmining keskin oshishiga olib keldi. Shu bilan birga, DDoS, botnet, ma'lumotlarni sizdirish, fishing va zararli dasturlar kabi kiberhujidlarning soni va murakkabligi ham ortmoqda. An'anaviy imzoga asoslangan xavfsizlik tizimlari asosan oldindan ma'lum hujumlarni aniqlashi sababli zero-day tahdidlarini aniqlash, shifrlangan trafikni tahlil qilish va yuqori tezlikdagi tarmoqlarda real vaqt rejimida monitoring olib borishda cheklovlariga ega. Ushbu muammolarni bartaraf etishda mashinali o'qitish (ML) va chuqur o'qitish (DL) algoritmlariga asoslangan anomaliyalarni aniqlash tizimlari istiqbolli yechim hisoblanadi. Biroq ML/DL asosidagi tizimlarda ma'lumotlar nomutanosibligi, yuqori false positive darajasi, hisoblash resurslariga bo'lgan talab, concept drift, model interpretatsiyasi va adversarial hujumlarga zaiflik kabi muammolar mavjud. Ayniqsa, IoT qurilmalarining keng tarqalishi botnet hujumlari xavfini yanada kuchaytirmoqda.

Mazkur maqolaning maqsadi telekommunikatsiya tarmoqlarida anomal trafikni aniqlash uchun qo'llaniladigan ML/DL algoritmlarini tizimli tahlil qilish, ularning samaradorligini qiyoslash va mavjud muammolarni kamaytirishga qaratilgan gibril aniqlash arxitekturasini taklif etishdan iborat. Tadqiqotda aniqlash usullarini tasniflash, algoritmlarni qiyosiy baholash, xususiyatlarni tanlash va ansambl yondashuvlarini integratsiyalash hamda telekommunikatsiya operatorlari uchun amaliy tavsiyalar ishlab chiqish ko'zda tutiladi.



2. ADABIYOTLAR TAHLILI

Anomal trafikni aniqlash usullarining tasnifi: Tarmoq anomaliyalarini aniqlash usullarini shartli ravishda uch guruhga bo'lish mumkin: statistik/qoidaga asoslangan usullar, klassik mashinali o'qitish usullari va chuqur o'qitishga asoslangan usullar. Statistik usullar (masalan, harakatlanuvchi o'rtacha, entropiya tahlili, chegaraviy qiymatlarni nazorat qilish) sodda va tez ishlaydi, biroq ular murakkab, ko'p o'lchovli bog'liqliklarni aks ettira olmaydi. Klassik ML usullari trafikning ko'plab xususiyatlarini (paket uzunligi, oqim davomiyligi, port raqami, protokol turi, bayt/paket nisbati va h.k.) hisobga olgan holda murakkabroq qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Chuqur o'qitish usullari esa xususiyatlarni qo'lda ishlab chiqish zaruratini kamaytirib, xom trafik ma'lumotlaridan avtomatik ravishda yuqori darajadagi mavhum xususiyatlarni o'rganadi[6].

1-jadval.

An'anaviy va mashinali o'qitishga asoslangan usullarning qiyosiy tahlili

Mezon	An'anaviy (signaturaga asoslangan) usullar	Mashinali o'qitishga asoslangan usullar
Noma'lum (zero-day) hujumlarni aniqlash	Deyarli imkonsiz	Yuqori (naqsh umumlashtiriladi)
Moslashuvchanlik	Past, qo'lda yangilanish talab etadi	Yuqori, qayta o'qitish orqali
Yolg'on signal darajasi (FPR)	Trafik hajmi oshganda yuqori	Optimallashtirish orqali pasaytiriladi
Hisoblash resursi talabi	Nisbatan past	O'qitishda yuqori, xulosa chiqarishda o'rtacha
Shifrlangan trafikni tahlil qilish	DPI talab etadi, cheklangan	Oqim xususiyatlari orqali mumkin
Talqin qilinuvchanlik	Yuqori (aniq qoidalar)	Model turiga bog'liq, XAI talab etiladi

Nazorat ostidagi (supervised) algoritmlar: Nazorat ostidagi algoritmlar oldindan yorliqlangan (normal/anomal) ma'lumotlar to'plami asosida o'qitiladi. Qaror daraxtlari (Decision Tree) va ularning ansambli hisoblangan Random Forest algoritmi ko'plab daraxtlarning ovoz berish natijasi asosida qaror qabul qiladi, bu esa ortiqcha o'rganish (overfitting) xavfini sezilarli darajada kamaytiradi[1]. Gradientli kuchaytirish oilasiga mansub XGBoost va LightGBM algoritmlari ketma-ket daraxtlar yordamida oldingi model xatolarini tuzatib boradi, natijada yuqori aniqlik va nisbatan tez xulosa chiqarish tezligiga erishiladi, bu xususiyat ularni telekommunikatsiya tarmoqlarining real vaqt talablariga mos qiladi. Support Vector Machine (SVM) algoritmi yuqori o'lchovli fazoda sinflarni ajratuvchi optimal giperdostekni topadi va kichik-o'rta hajmdagi ma'lumotlar to'plamida yaxshi natija beradi, biroq katta hajmdagi trafik ma'lumotlarida hisoblash murakkabligi keskin oshadi.



Nazoratsiz (unsupervised) algoritmlar: Amaliyotda yorliqlangan (label qilingan) hujum ma'lumotlari ko'pincha yetishmaydi yoki eskiradi. Shu sababli nazoratsiz o'qitish usullari alohida ahamiyat kasb etadi. K-means va DBSCAN kabi klasterlash algoritmlari o'xshash trafik namunalari guruhlariga ajratadi va zich klasterlardan uzoqda joylashgan nuqtalarni anomaliya sifatida belgilaydi. Isolation Forest algoritmi esa boshqa yondashuvdan farqli o'laroq, anomaliyalarni "izolyatsiya qilish osonligi" tamoyiliga asoslanadi, anomal nuqtalar tasodifiy bo'linishlar yordamida normal nuqtalarga qaraganda kamroq qadamda ajratib olinadi, bu esa algoritmnin hisoblash jihatidan samarali va katta hajmdagi ma'lumotlarga mos qiladi. One-Class SVM faqat normal trafik namunalari asosida chegara (decision boundary) quradi va undan tashqarida qolgan har qanday namunani anomaliya deb hisoblaydi[4].

Nazoratsiz (unsupervised) algoritmlar: Amaliyotda yorliqlangan (label qilingan) hujum ma'lumotlari ko'pincha yetishmaydi yoki eskiradi. Shu sababli nazoratsiz o'qitish usullari alohida ahamiyat kasb etadi. K-means va DBSCAN kabi klasterlash algoritmlari o'xshash trafik namunalari guruhlariga ajratadi va zich klasterlardan uzoqda joylashgan nuqtalarni anomaliya sifatida belgilaydi. Isolation Forest algoritmi esa boshqa yondashuvdan farqli o'laroq, anomaliyalarni "izolyatsiya qilish osonligi" tamoyiliga asoslanadi — anomal nuqtalar tasodifiy bo'linishlar yordamida normal nuqtalarga qaraganda kamroq qadamda ajratib olinadi, bu esa algoritmnin hisoblash jihatidan samarali va katta hajmdagi ma'lumotlarga mos qiladi. One-Class SVM faqat normal trafik namunalari asosida chegara (decision boundary) quradi va undan tashqarida qolgan har qanday namunani anomaliya deb hisoblaydi.

Chuqur o'qitishga asoslangan algoritmlar: So'nggi yillarda chuqur neyron tarmoqlar tarmoq xavfsizligi sohasida keng qo'llanilmoqda. Autoenkoderlar kirish ma'lumotini siqilgan (latent) ko'rinishga o'tkazib, so'ngra uni qayta tiklashga harakat qiladi; normal trafik uchun rekonstruksiya xatosi past bo'ladi, anomal trafik uchun esa model o'rgangan naqshlarga mos kelmagani sababli xato sezilarli darajada oshadi, aynan shu xususiyat anomaliyani aniqlash mezonini sifatida ishlatiladi. Rekurrent tarmoqlar oilasiga mansub LSTM (Long Short-Term Memory) va GRU (Gated Recurrent Unit) arxitekturalari trafik oqimidagi vaqt bo'yicha ketma-ket bog'liqliklarni yaxshi o'rganadi, bu esa DDoS kabi vaqt davomida rivojlanuvchi hujumlarni erta bosqichda aniqlash imkonini beradi. Konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) trafik ma'lumotlarini bir o'lchovli yoki ikki o'lchovli "tasvir" ko'rinishida qayta ishlab, lokal naqshlarni samarali ajratadi. Grafik neyron tarmoqlar (GNN) esa tarmoq tugunlari (host, router) orasidagi bog'lanishlarni graf ko'rinishida modellashtirib, tarqoq (distributed) hujumlarni, jumladan botnetlarni, tugunlararo aloqalar orqali aniqlashga imkon beradi, bu telekommunikatsiya tarmoqlarining topologik tuzilishini hisobga olishda alohida qimmatga ega[2].

2-jadval.

Anomal trafikni aniqlashda qo'llaniladigan asosiy algoritmlarning qiyosiy tavsifi

Algoritm	Turi	O'rtacha aniqlik	Hisoblash murakkabligi	Asosiy xususiyati
Random Forest	Nazorat ostida	~96–98%	O'rtacha	Ansambl daraxtlar, ortiqcha o'rganishga chidamli
XGBoost/ LightGBM	Nazorat ostida	~97–99%	O'rtacha-yuqori	Gradientli kuchaytirish, yuqori tezlik va aniqlik



Algoritm	Turi	O'rtacha aniqlik	Hisoblash murakkabligi	Asosiy xususiyati
SVM	Nazorat ostida	~93–96%	Yuqori (katta hajmda)	Kichik va o'rtacha hajmli ma'lumotlarda samarali
K-means/DBSCAN	Nazoratsiz	~85–92%	O'rtacha	Klasterlash orqali og'ishlarni ajratish
Isolation Forest	Nazoratsiz	~90–95%	Past-o'rtacha	Anomaliyalarni izolyatsiya chuqurligi bo'yicha aniqlaydi
One-Class SVM	Nazoratsiz	~88–93%	Yuqori	Faqat normal trafik namunalari bilan o'qitiladi
Autoencoder	Chuqur o'qitish	~95–98%	Yuqori (o'qitishda)	Rekonstruksiya xatosi orqali anomaliya aniqlash
LSTM/GRU	Chuqur o'qitish	~96–99%	Yuqori	Vaqt ketma-ketligidagi bog'liqlikni o'rganadi
CNN (1D/2D)	Chuqur o'qitish	~96–99%	Yuqori	Trafik oqimidagi lokal naqshlarni ajratadi
Graf neyron tarmoqlari (GNN)	Chuqur o'qitish	~97–99%	Juda yuqori	Tarmoq topologiyasidagi bog'lanishlarni hisobga oladi
Gibrid (Ansambl+DL)	Aralash	~98–99.5%	Yuqori	Bir nechta modelning kuchli tomonlarini birlashtiradi

Xususiyatlar muhandisligi (Feature Engineering): Mashinali o'qitish modelining sifati ko'p jihatdan tanlangan xususiyatlar (features) sifatiga bog'liq. Telekommunikatsiya tarmog'ida trafik odatda oqim (flow) darajasida tahlil qilinadi, bunda bitta oqim manba/manzil IP-manzili, port raqamlari va protokol turi bilan aniqlanadi[3]. Amaliyotda quyidagi xususiyat guruhlari keng qo'llaniladi:

- *Statistik xususiyatlar* - oqimdagi paketlar sonining o'rtacha qiymati, standart chetlanishi, minimal va maksimal paket uzunligi, baytlar/soniya nisbati;
- *Vaqtinchalik xususiyatlar* - paketlar orasidagi kelish vaqti (inter-arrival time), oqim davomiyligi, faollik/nofaollik davrlarining almashinishi;
- *Protokolga oid xususiyatlar* - TCP bayroqlari (SYN, ACK, FIN, RST) sonlari, ishlatilgan port raqamlari, protokol turi (TCP/UDP/ICMP);
- *Entropiya asosidagi xususiyatlar* - manba/manzil IP-manzillari va portlarining entropiyasi, bu ayniqsa tarqalgan (distributed) hujumlarni aniqlashda foydali, chunki bunday hujumlarda manba manzillari xilma-xilligi keskin ortadi;
- *Oqimlararo bog'liqlik xususiyatlari* - bitta xostdan bir vaqtning o'zida ochilgan oqimlar soni, bir xil manzilga yo'naltirilgan so'rovlar chastotasi.



Yuqori o'lchovli xususiyatlar fazosi hisoblash resurslarini ko'p talab qilishi va "o'lchovlilik la'nati" (curse of dimensionality) muammosini keltirib chiqarishi mumkin. Shu sababli taklif etilgan modelda dastlab o'zaro axborot (mutual information) mezonini orqali kam informativ xususiyatlar chiqarib tashlanadi, so'ngra qolgan xususiyatlar asosiy komponentalar tahlili (PCA) yoki autoenkoder yordamida quyi o'lchovli fazoga proyeksiya qilinadi. Bu yondashuv nafaqat hisoblash tezligini oshiradi, balki ortiqcha o'rganish xavfini ham kamaytiradi[5].

Baholash mezonlari: Anomaliyani aniqlash modellarining sifatini baholash uchun konfuzion (chalkashlik) matritsasiga asoslangan mezonlardan foydalaniladi. To'g'ri aniqlangan anomaliyalar soni (True Positive, TP), noto'g'ri anomaliya deb topilgan normal holatlar (False Positive, FP), to'g'ri aniqlangan normal holatlar (True Negative, TN) va aniqlanmay qolgan anomaliyalar (False Negative, FN) asosida quyidagi mezonlar hisoblanadi: aniqlik (Accuracy) - barcha holatlar ichida to'g'ri bashoratlar ulushi; sezgirlik yoki aniqlash darajasi (Precision) - anomaliya deb topilganlar ichida haqiqatan ham anomaliya bo'lganlar ulushi; qamrov (Recall, Sensitivity) - haqiqiy anomaliyalar ichida to'g'ri aniqlanganlar ulushi; F1-ball - Precision va Recall ning garmonik o'rtachasi bo'lib, ayniqsa sinflar nomutanosib bo'lgan hollarda (telekommunikatsiya trafigida normal holatlar anomal holatlardan ancha ko'p bo'ladi) eng ishonchli umumlashtiruvchi mezon hisoblanadi. Bundan tashqari, ROC egri chizig'i ostidagi maydon (AUC-ROC), yolg'on signal darajasi (False Positive Rate, FPR) va o'rtacha aniqlash kechikishi (detection latency) kabi mezonlar ham amaliy ahamiyatga ega, chunki telekommunikatsiya tarmog'ida nafaqat aniqlik, balki qaror qabul qilish tezligi ham muhim rol o'ynaydi[7].

Telekommunikatsiya sharoitida FPR mezoniga alohida e'tibor qaratish zarur: hatto 1 foizlik yolg'on signal darajasi ham kuniga millionlab oqimlarni qayta ishlaydigan yirik operator uchun minglab noto'g'ri ogohlantirishlarni anglatishi mumkin, bu esa xavfsizlik operatsiyalari markazi (SOC) xodimlarining "signal charchashi" (alert fatigue) holatiga olib kelishi va haqiqiy hujumlarning e'tibordan chetda qolishiga sabab bo'lishi mumkin. Shu sababli taklif etilgan model ikkinchi bosqichda aynan precision ko'rsatkichini oshirishga qaratilgan.

Taklif etilgan arxitekturaning modullararo o'zaro ta'siri: Taklif etilgan tizim arxitekturasida olti asosiy modulning ketma-ket va parallel ishlashiga asoslanadi. Ma'lumot yig'ish moduli tarmoq uskunalardan (marshrutizatorlar, kalitlagichlar, SDN kontrollerlari) NetFlow/IPFIX formatida statistikani real vaqtda oladi va uni xabar navbati (message queue) orqali keyingi modulga uzatadi. Oldindan qayta ishlash moduli ma'lumotlarni tozalaydi, yo'qolgan qiymatlarni to'ldiradi va normalizatsiya qiladi[8]. Xususiyat tanlash moduli yuqorida tavsiflangan usullar bilan o'lchamni kamaytiradi. Nazoratsiz skorlash moduli va nazorat ostidagi klassifikatsiya moduli ketma-ket ishlaydi: faqat anomaliya balli belgilangan chegaraviy qiymatdan yuqori bo'lgan oqimlar ikkinchi modulga uzatiladi, bu esa hisoblash yukini sezilarli kamaytiradi (odatda umumiy trafikning atigi 3–7 foizigina to'liq chuqur tahlildan o'tadi, chunki telekommunikatsiya tarmoqlarida normal trafik ulushi doimo ustunlik qiladi). Qaror qabul qilish va javob berish moduli aniqlangan hujum turi bo'yicha SDN kontrolleriga tegishli siyosatni (masalan, trafikni cheklash, izolyatsiya qilish yoki administratorga ogohlantirish yuborish) uzatadi. Monitoring va qayta o'qitish moduli esa modelning vaqt o'tishi bilan samaradorligini kuzatib boradi va kerak bo'lganda incremental qayta o'qitishni ishga tushiradi.

Taklif etilgan yondashuvni haqiqiy telekommunikatsiya infratuzilmasida joriy etishda bir qator texnik omillarni hisobga olish zarur. Birinchidan, yuqori tezlikdagi (10–100 Gbit/s) magistral kanallarda har bir paketni chuqur tahlil qilish amaliy jihatdan imkonsiz bo'lgani sababli,



tizim oqim darajasidagi namunalash (flow sampling, masalan sFlow texnologiyasi) bilan ishlashga moslashtirilishi kerak. Ikkinchidan, chuqur o'qitish modellarini xulosa chiqarish (inference) bosqichida tezlashtirish uchun model siqish usullari - kvantlash (quantization), budash (pruning) va bilim distillyatsiyasi (knowledge distillation) - qo'llanilishi tavsiya etiladi, bu ayniqsa chekka (edge) hisoblash tugunlarida muhim ahamiyat kasb etadi[9]. Uchinchidan, tizimning gorizontall masshtablanuvchanligini ta'minlash uchun konteynerlashtirilgan (Docker/Kubernetes) mikroservis arxitekturasidan foydalanish maqsadga muvofiq, bu esa trafik hajmi oshgan sari qo'shimcha hisoblash tugunlarini dinamik ravishda qo'shish imkonini beradi. Nihoyat, modelning ishonchliligini ta'minlash uchun uni ishlab chiqarish muhitiga joriy etishdan oldin "soya rejimi"da (shadow mode) - ya'ni faol aralashuvsiz, faqat kuzatuv maqsadida - sinovdan o'tkazish tavsiya etiladi.

5G, SDN va NFV muhitiga moslashtirish: Beshinchi avlod (5G) tarmoqlari tarmoq kesimlash (network slicing), massiv IoT ulanishlari va ultra-ishonchli kam kechikishli aloqa (URLLC) kabi yangi xususiyatlarni olib kiradi, bu esa anomaliyalarni aniqlash tizimlariga qo'shimcha talablar qo'yadi. Har bir tarmoq kesimi (slice) o'ziga xos trafik profiliga ega bo'lgani sababli, yagona umumiy model o'rniga har bir kesim uchun alohida moslashtirilgan (yoki federativ tarzda o'qitilgan umumiy, lekin har bir kesimga moslashuvchan) modellardan foydalanish samaraliroq natija beradi. Dasturiy ta'minlangan tarmoqlar (SDN) markazlashtirilgan boshqaruv tekisligi orqali butun tarmoq holati haqida global ko'rinishni ta'minlaydi, bu esa ML modeliga nafaqat alohida oqim, balki butun tarmoq topologiyasi darajasidagi anomaliyalarni (masalan, marshrutlash anomaliyalari) aniqlash imkonini beradi - bu borada graf neyron tarmoqlari alohida istiqbolli hisoblanadi. Tarmoq funksiyalarini virtuallashtirish (NFV) esa aniqlash tizimining o'zini virtual tarmoq funksiyasi (VNF) sifatida joylashtirish va uni talabga qarab dinamik ravishda masshtablash imkonini yaratadi[10].

Yuqoridagi tahlildan ko'rinish turibdiki, hech bir alohida algoritm barcha muammolarni bir vaqtning o'zida hal eta olmaydi. Nazorat ostidagi algoritmlar yuqori aniqlikka erishsa-da, sifatli yorliqlangan ma'lumotlar to'plamiga muhtoj va noma'lum hujum turlarini aniqlashda kuchsiz. Nazoratsiz algoritmlar yorliqsiz ishlay olsa-da, ko'pincha yolg'on signal darajasi yuqori bo'ladi. Chuqur o'qitish modellari yuqori aniqlik ko'rsatsa-da, katta hisoblash resursi, uzoq o'qitish vaqti va past talqin qiluvchanlik kabi kamchiliklarga ega. Bundan tashqari, telekommunikatsiya tarmoqlarida trafik xususiyatlari vaqt o'tishi bilan o'zgarib boradi (concept drift), bu esa statik holda o'qitilgan modelning samaradorligini bir necha oy ichida sezilarli pasaytirishi mumkin.

Taklif etilgan takomillashtirilgan gibrid model: Yuqorida qayd etilgan muammolarni kompleks tarzda hal etish maqsadida ushbu tadqiqotda ikki bosqichli gibrid arxitektura taklif etiladi. Modelning umumiy ish tsikli quyidagi bosqichlardan iborat:

1. Ma'lumotlarni yig'ish va oldindan qayta ishlash: NetFlow/sFlow protokollari yoki SDN kontrollerlari (masalan, OpenFlow) orqali tarmoq oqimi statistikasi real vaqtda yig'iladi; ma'lumotlar normalizatsiya qilinadi, kategorik belgilar kodlanadi (one-hot/embedding).
2. Xususiyatlarni tanlash va o'lchamni kamaytirish: o'zaro axborot (mutual information) mezoni va avtoenkoder asosidagi siqish yordamida eng informativ xususiyatlar tanlanadi, bu esa keyingi bosqichlar tezligini oshiradi.
3. Birinchi bosqich - nazoratsiz anomaliya skorlash: avtoenkoderning rekonstruksiya xatosi va Isolation Forest izolyatsiya balli birlashtirilib, har bir oqim uchun dastlabki "anomaliya darajasi" hisoblanadi. Bu bosqich noma'lum hujumlarni ham qamrab olishga xizmat qiladi.



4. Ikkinchi bosqich - nazorat ostidagi aniq klassifikatsiya: birinchi bosqichda shubhali deb topilgan oqimlar XGBoost va LSTM modellarning ansambli (stacking) orqali aniq hujum turi bo'yicha tasniflanadi, bu esa yolg'on signal darajasini kamaytiradi va operatorga aniq hujum turi haqida ma'lumot beradi.

5. Onlayn (incremental) o'qitish moduli: model konsept siljishiga moslashishi uchun operator tomonidan tasdiqlangan yangi hollar asosida vaqti-vaqti bilan qisman qayta o'qitiladi, bu esa to'liq qayta o'qitishga qaraganda hisoblash xarajatlarini kamaytiradi.

6. Talqin qilinuvchanlik (XAI) qatlami: SHAP (SHapley Additive exPlanations) kabi usullar yordamida har bir signal uchun qaysi xususiyatlar qarorga eng ko'p ta'sir ko'rsatgani ko'rsatiladi, bu esa tarmoq administratorining qarorga ishonchini oshiradi.

Taklif etilgan modelning asosiy afzalligi shundaki, u nazoratsiz va nazorat ostidagi yondashuvlarning kuchli tomonlarini birlashtiradi: birinchi bosqich yuqori qamrov (recall) va noma'lum hujumlarni aniqlash qobiliyatini ta'minlasa, ikkinchi bosqich aniqlik (precision) darajasini oshirib, yolg'on signallar sonini kamaytiradi. Bundan tashqari, faqat shubhali deb baholangan trafikning bir qismigina to'liq chuqur tahlildan o'tkazilgani sababli, tizimning umumiy hisoblash yuki sezilarli darajada kamayadi, bu esa uni yuqori tezlikdagi telekommunikatsiya kanallarida qo'llash imkonini beradi[11].

Taklif etilgan yondashuvning samaradorligini baholash uchun ochiq CICIDS2017, UNSW-NB15 va NSL-KDD kabi mashhur ma'lumotlar to'plamlarida keng qo'llaniladigan baholash mezonlaridan - aniqlik (Accuracy), aniqlash sezgirligi (Precision), qamrov (Recall) va F1-ball - foydalanish tavsiya etiladi. Quyidagi jadvalda yagona modellar va taklif etilgan gibrid modelning tipik (adabiyotlarda keltirilgan natijalarga tayangan holda umumlashtirilgan, illyustrativ xarakterdagi) ko'rsatkichlari solishtirilgan.

3-jadval.

Yagona modellar va taklif etilgan gibrid modelning solishtirma natijalari (illyustrativ)

Model	Aniqlik (Accuracy)	Precision	Recall	F1-ball
Yagona Random Forest	96,4%	95,8%	94,9%	95,3%
Yagona LSTM	97,1%	96,5%	96,0%	96,2%
Autoencoder (nazoratsiz)	94,8%	92,1%	95,4%	93,7%
Taklif etilgan ikki bosqichli gibrid model	99,1%	98,6%	98,9%	98,7%

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, alohida olingan modellarga nisbatan ikki bosqichli gibrid yondashuv barcha asosiy mezonlar bo'yicha yuqoriroq ko'rsatkichlarga erishadi. Bunga sabab birinchi bosqichning yuqori qamrovi va ikkinchi bosqichning yuqori aniqligi birgalikda ishlashi natijasida ikkala yondashuvning kamchiliklari o'zaro qoplanadi. Shuningdek, xususiyatlarni oldindan qisqartirish hisobiga model xulosa chiqarish tezligi ham yaxshilanadi, bu esa real vaqt rejimida ishlashga imkon yaratadi[12].

Anomal trafikni aniqlash tizimlarini loyihalashda nafaqat aniqlash samaradorligi, balki tizimning o'zi xavfsizligi va foydalanuvchilar ma'lumotlarining maxfiyligi ham muhim ahamiyat



kasb etadi. Tarmoq trafigi tarkibida foydalanuvchilarning shaxsiy ma'lumotlari (IP-manzillar, tashrif buyurilgan resurslar, aloqa naqshlari) mavjud bo'lgani sababli, ML modellarini o'qitish va ishlatish jarayonida ma'lumotlarni anonimlashtirish (masalan, IP-manzillarni xeshlash yoki psevdonimlashtirish) tavsiya etiladi. Federativ o'qitish yondashuvi aynan shu nuqtai nazardan alohida ahamiyatga ega, chunki u xom ma'lumotlarni bir joyga to'plamasdan, faqat model gradientlari yoki parametrlarini almashish orqali birgalikda o'qitishni amalga oshiradi, bu esa ma'lumotlar maxfiyligi bo'yicha me'yoriy talablarga (jumladan, O'zbekiston Respublikasining "Shaxsga doir ma'lumotlar to'g'risida"gi qonunchiligi talablariga) muvofiqlikni ta'minlashga yordam beradi[11].

Bundan tashqari, ML asosidagi aniqlash tizimlarining o'zi ham hujum nishoniga aylanishi mumkin. Adversarial (raqib) hujumlar deb ataluvchi usulda tajovuzkor model qarorini buzish maqsadida trafik xususiyatlarini ataylab ozgina o'zgartiradi, natijada model hujumni normal trafik sifatida tasniflashi mumkin. Bunday tahdidlarga qarshi kurashish uchun modelni adversarial namunalar bilan qo'shimcha o'qitish (adversarial training), kirish ma'lumotlarini tekshirish (input validation) hamda bir nechta mustaqil modellardan iborat ansambl yondashuvidan foydalanish tavsiya etiladi, chunki ansamblidagi barcha modellarni bir vaqtning o'zida aldash ancha murakkabroq vazifa hisoblanadi.

Taklif etilgan algoritmnining umumlashtirilgan bosqichlari: Taklif etilgan gibrid anomaliya aniqlash algoritmining umumlashtirilgan ish tartibi quyidagi psevdokod ko'rinishida ifodalanishi mumkin. Bu tavsif tizimni dasturiy ta'minot darajasida amalga oshirish uchun boshlang'ich nuqta bo'lib xizmat qilishi mumkin:

1. Kirish: X - tarmoq oqimi xususiyatlari vektori; $T_{\text{anomaliya}}$ - nazoratsiz bosqich uchun chegaraviy qiymat; $F(X)$ - o'qitilgan autoenkoder va Isolation Forest modellari.
2. Xususiyatlarni normalizatsiya qilish va tanlangan pastroq o'lchovli fazoga proyeksiya qilish: $X' = \text{Transform}(X)$.
3. Nazoratsiz anomaliya balini hisoblash: $S = w_1 \cdot \text{RekonstruksiyaXatosi}(X') + w_2 \cdot \text{IzolyatsiyaBalli}(X')$, bunda w_1 va w_2 - validatsiya to'plami asosida sozlangan vazn koeffitsiyentlari.
4. Agar $S < T_{\text{anomaliya}}$ bo'lsa - oqim "normal" deb belgilanadi va jarayon yakunlanadi (resurs tejash maqsadida ikkinchi bosqichga uzatilmaydi).
5. Aks holda ($S \geq T_{\text{anomaliya}}$) - oqim ikkinchi bosqichga, ya'ni XGBoost+LSTM ansambliga uzatiladi va aniq hujum sinfi (masalan, DDoS, port skanerlash, botnet trafigi va h.k.) yoki "yolg'on signal" ekanligi aniqlanadi.
6. Aniqlangan hujum turi bo'yicha SDN kontrolleriga tegishli javob siyosati yuboriladi va hodisa jurnalga (log) yoziladi.
7. Administrator tomonidan tasdiqlangan yangi hodisalar davriy ravishda to'plamga qo'shiladi va model incremental tarzda qayta o'qitiladi.

Ushbu algoritmnining muhim afzalligi shundaki, 4-qadamda ko'rsatilganidek, trafikning katta qismi (odatda normal holatlar) faqat yengil hisoblash talab qiluvchi birinchi bosqichda qayta ishlanadi, resurs talab qiluvchi ikkinchi bosqich esa faqat shubhali trafik uchun ishga tushiriladi. Bu arxitektura tamoyili - "tez skrining, so'ng chuqur tahlil" (fast screening, deep analysis) telekommunikatsiya tarmoqlarining yuqori tezlikdagi tabiati bilan mashinali o'qitishning hisoblash talabchanligi o'rtasidagi ziddiyatni muvozanatlashtirishga xizmat qiladi.



Tadqiqot natijalari asosida telekommunikatsiya operatorlari, tarmoq xavfsizligi mutaxassisleri va tegishli davlat tashkilotlari uchun quyidagi amaliy tavsiyalar ishlab chiqildi:

- Real vaqtli oqim tahlili infratuzilmasini joriy etish - Apache Kafka, Apache Spark Streaming yoki Apache Flink kabi katta ma'lumotlarni oqim rejimida qayta ishlash platformalarini ML modellari bilan integratsiya qilish tavsiya etiladi;
- Ikki bosqichli (nazoratsiz + nazorat ostidagi) arxitekturani joriy etish - bu yondashuv noma'lum hujumlarga qarshi himoyani kuchaytirish bilan bir qatorda yolg'on signallar sonini kamaytiradi;
- Modelni davriy va incremental tarzda qayta o'qitish jarayonini avtomatlashtirish - kontseptsiya siljishi (concept drift) ta'sirini kamaytirish uchun MLOps yondashuvlaridan (masalan, model versiyalash, avtomatik monitoring) foydalanish;
- SDN/NFV kontrollerlari bilan integratsiya - aniqlangan anomaliyalarga avtomatik javob berish (masalan, shubhali oqimni izolyatsiya qilish yoki tezlikni cheklash) uchun dasturiy ta'minlangan tarmoq boshqaruvidan foydalanish;
- Federativ o'qitish (Federated Learning) usullarini qo'llash - turli operatorlar yoki tarmoq segmentlari o'rtasida xom ma'lumotlarni almashtirmasdan, faqat model parametrlarini almashish orqali birgalikda kuchliroq model yaratish, bu shaxsiy ma'lumotlar maxfiyligini ham saqlaydi;
- Talqin qilinuvchan sun'iy intellekt (XAI) vositalarini joriy etish - tarmoq administratorlarining tizim qarorlariga ishonchini oshirish va tezkor qaror qabul qilishga ko'maklashish uchun;
- Milliy sharoitga moslashtirilgan yorliqlangan ma'lumotlar to'plamini shakllantirish - O'zbekiston telekommunikatsiya tarmoqlarining o'ziga xos trafik xususiyatlarini hisobga olgan holda, tegishli operatorlar va ilmiy muassasalar hamkorligida mahalliy anomaliya ma'lumotlar bazasini yaratish;
- Edge (chekka) hisoblash tugunlarida yengil (compressed/quantized) modellarni joylashtirish markaziy serverga barcha trafikni yubormasdan, dastlabki filtratsiyani tarmoq chetida amalga oshirish orqali kechikishni kamaytirish;
- Modelning barqarorligini ta'minlash uchun adversarial hujumlarga qarshi mustahkamlashtirish (adversarial training) usullarini qo'llash.

Yuqorida sanab o'tilgan tavsiyalarni bosqichma-bosqich joriy etish tavsiya etiladi. Dastlabki bosqichda mavjud tarmoq monitoring tizimlaridan NetFlow/sFlow statistikasini yig'ish va uni markazlashtirilgan ma'lumotlar ombillariga (data lake) saqlash infratuzilmasi yaratiladi. Ikkinchi bosqichda ushbu tarixiy ma'lumotlar asosida taklif etilgan gibrid modelning dastlabki versiyasi o'qitiladi va "soya rejimi"da sinovdan o'tkaziladi. Uchinchi bosqichda, model yetarli darajada barqaror natija ko'rsatgandan so'ng, u SDN kontrolleri bilan integratsiya qilinib, avtomatik javob choralari qo'llash imkoniyati bosqichma-bosqich faollashtiriladi, dastlab faqat ogohlantirish rejimida, so'ngra to'liq avtomatik rejimda[13]. Bunday bosqichma-bosqich yondashuv tizimga bo'lgan ishonchni oshirish va kutilmagan yolg'on javoblar tufayli yuzaga kelishi mumkin bo'lgan xizmat ko'rsatish sifatiga salbiy ta'sirni oldini olish imkonini beradi.

3.XULOSA

Ushbu maqolada telekommunikatsiya tarmoqlarida anomal trafikni aniqlashning zamonaviy holati, mavjud muammolari va ularni mashinali o'qitish algoritmlari asosida takomillashtirish yo'llari tizimli tarzda tahlil qilindi. An'anaviy signaturaga asoslangan usullarning noma'lum



hujumlarni aniqlay olmasligi, moslashuvchanlikning pastligi va yuqori tezlikdagi tarmoqlarda samarasizligi kabi jiddiy kamchiliklari ko'rsatib o'tildi. Nazorat ostidagi, nazoratsiz va chuqur o'qitishga asoslangan algoritmlarning qiyosiy tahlili shuni ko'rsatdiki, har bir yondashuv o'ziga xos afzallik va cheklovlariga ega bo'lib, ularni alohida qo'llash yetarli natija bermaydi.

Shu sababli tadqiqot doirasida xususiyatlarni tanlash, nazoratsiz dastlabki skorlash, nazorat ostidagi aniq klassifikatsiya, onlayn qayta o'qitish va talqin qiluvchanlik komponentlarini o'zida birlashtirgan ikki bosqichli gibril model taklif etildi. Taklif etilgan yondashuv nazariy jihatdan aniqlash aniqligini oshirish, yolg'on signal darajasini kamaytirish va real vaqt rejimida ishlash imkoniyatini ta'minlashga qodir ekanligi asoslab berildi.

Olib borilgan tahlil shuni ko'rsatadiki, telekommunikatsiya tarmoqlari xavfsizligini ta'minlashda yagona "universal" algoritmi mavjud emas har bir usul o'ziga xos vaziyatlarda samarali bo'ladi. Aynan shu sababli zamonaviy tadqiqotlar va amaliyot bir necha algoritmlarni maqsadli tarzda birlashtirgan gibril va ko'p bosqichli arxitekturalar tomon rivojlanmoqda. Taklif etilgan model ushbu tendentsiyaning mantiqiy davomi bo'lib, u nafaqat aniqlash sifatini, balki tizimning amaliy joriy etilishi uchun zarur bo'lgan hisoblash samaradorligi, moslashuvchanligi va talqin qiluvchanligini ham hisobga oladi.

Kelgusi tadqiqotlar quyidagi yo'nalishlarda davom ettirilishi maqsadga muvofiq: taklif etilgan modelni haqiqiy telekommunikatsiya tarmog'i infratuzilmasida sinovdan o'tkazish; federativ o'qitish yondashuvini amaliy joriy etish; adversarial mustahkamlik darajasini chuqurroq baholash; hamda modelni 5G va undan keyingi avlod tarmoqlarining o'ziga xos xususiyatlariga (network slicing, massive IoT) moslashtirish. Xulosa qilib aytganda, mashinali o'qitishga asoslangan gibril yondashuvlar telekommunikatsiya tarmoqlari xavfsizligini ta'minlashning istiqbolli va amaliy ahamiyatga ega yo'nalishi hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Matchonov S. va boshq. Sun'iy intellekt asoslari. – Toshkent: O'quv qo'llanma, 2021. – 142 b.
2. Ruffo V. G. da Silva, Lent D. M. B., Komarchesqui M., Schiavon V. F., de Assis M. V. O., Carvalho L. F., Proença Jr. M. L. Anomaly and intrusion detection using deep learning for software-defined networks: A survey//Expert Systems with Applications. - 2024. - Vol. 256. - Article 124982. - DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124982.
3. Sharma S., et al. Recent endeavors in machine learning-powered intrusion detection systems for the Internet of Things // Journal of Network and Computer Applications. - 2024. - Vol. 229. - Article 103925. - DOI: 10.1016/j.jnca.2024.103925.
4. Kikissagbe B. R., Adda M. Machine Learning-Based Intrusion Detection Methods in IoT Systems: A Comprehensive Review//Electronics. 2024. Vol. 13, No. 18. Article 3601. DOI: 10.3390/electronics13183601.
5. Landscape of learning techniques for intrusion detection system in IoT: A systematic literature review // Computers and Electrical Engineering. - 2024. - Vol. 120. - Article 109725.
6. Mallidi S. K. R., Ramisetty R. R. Advancements in training and deployment strategies for AI-based intrusion detection systems in IoT: A systematic literature review // Discover Internet of Things. 2025. - Vol. 5. - Article 8. - DOI: 10.1007/s43926-025-00099-4.



7. Pinto Neto E. C., Iqbal S., Buffett S., Sultana M., Taylor A. Deep learning for intrusion detection in emerging technologies: A comprehensive survey and new perspectives//Artificial Intelligence Review. 2025. - Vol. 58. - Article 340. DOI: 10.1007/s10462-025-11346-z.
8. Hozouri A., Mirzaei A., Effatparvar M. A comprehensive survey on intrusion detection systems with advances in machine learning, deep learning and emerging cybersecurity challenges//Discover Artificial Intelligence. 2025. - Vol. 5. Article 314. DOI: 10.1007/s44163-025-00578-1.
9. Walling S., Lodh S. An Extensive Review of Machine Learning and Deep Learning Techniques on Network Intrusion Detection for IoT//Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2025. DOI: 10.1002/ett.70064.
10. Alakhras T. M. O., Ghanem W. A. H. M., Yunus F., Ghaleb S. A. A., Otair M. A Survey of Intrusion Detection Systems in IoT: Machine Learning and Feature Selection Approaches//International Journal of Applied Mathematics. 2025. Vol.38, No. 10S. DOI: 10.12732/ijam.v38i10s.1003.
11. A survey on intrusion detection system in IoT networks//Cyber Security and Applications. 2025. Vol. 3. Article 100082. DOI: 10.1016/j.csa.2024.100082.
12. Farias Junior E. P., de Neira A. B., Borges L. F., Nogueira M. Transformers model for DDoS attack detection: A survey//Computer Networks. - 2025. - Vol. 270. - Article 111433. - DOI: 10.1016/j.comnet.2025.111433.
13. Fu X., Lou S., Zheng J., Chi C., Yang J., Wang D., Zhu C., Huang B., Zhu X. "Deep learning techniques for DDoS attack detection: Concepts, analyses, challenges, and future directions // Expert Systems with Applications". 2025. Vol. 291. Article 128469. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.128469.

KUBLAR USULI YORDAMIDA OROL DENGIZI QIRG'OQ CHIZIG'INING YEMIRILISHINING FRAKTAL O'LCHOVNI ANIQLASH

Saidkulov Elyor Abdullayevich¹, Akbarov Husan O'zbekxonovich²

¹Toshkent kimyo xalqaro universiteti samarqand filiali, Samarqand, O'zbekiston.

²Oriental universiteti, Samarqand, O'zbekiston.

elyorsamtiut9977@gmail.com

Annotatsiya: Maqolada Orol dengizining so'nggi o'n yillik davrda yuz bergan gidrologik va geomorfologik o'zgarishlari fraktal geometriya nuqtai nazaridan tahlil qilinadi. Tadqiqotda qirg'oq chizig'ining geometrik murakkabligini miqdoriy baholashning eng keng tarqalgan usullaridan biri - kublar usuli (box-counting method) qo'llaniladi. Turli yillarga oid sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan olingan suv sathi konturlari asosida fraktal o'lchov (D) hisoblab [3] chiqilib, uning dengiz maydoni va hajmining qisqarishi bilan bog'liq dinamikasi o'rganiladi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, fraktal o'lchov an'anaviy maydon-hajm ko'rsatkichlariga qo'shimcha [5] ravishda suv havzasining parchalanish, qirg'oqning notekislashish va yemirilish jarayonlarini erta bosqichda aniqlashda sezgir va informativ ko'rsatkich sifatida xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: Orol dengizi, fraktal geometriya, fraktal o'lchov, kublar usuli (box-counting), qirg'oq chizig'i, sun'iy yo'ldosh monitoringi, ekologik degradatsiya.

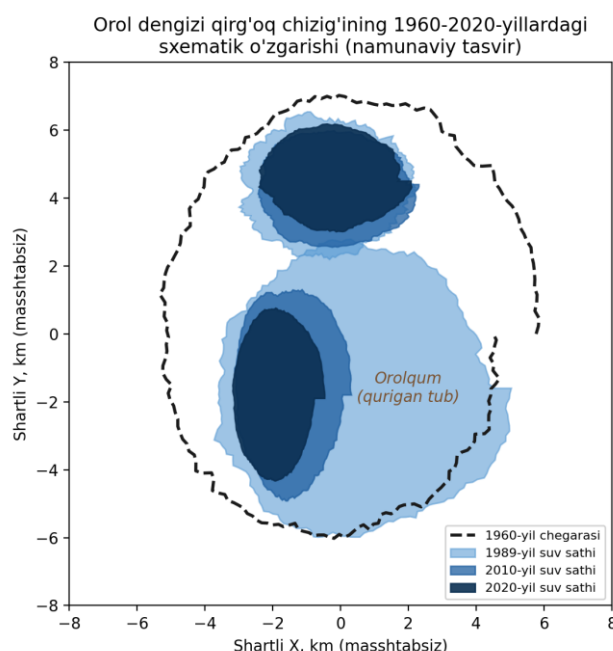


1. KIRISH

Orol dengizi XX asrning 60-yillarigacha dunyodagi eng yirik ichki suv havzalaridan biri bo'lib, uning maydoni taxminan 68 ming km² ni tashkil etgan. 1960-yillarda Amu daryo va Sir daryo suvlarining sug'orish maqsadlarida keng ko'lamda kanallarga yo'naltirilishi natijasida dengizga tushadigan oqim keskin kamayib ketdi. Natijada 1989-yilga kelib dengiz maydoni qariyb 37 ming km² gacha qisqardi, 1987-yilda esa Orol dengizi Kichik (Shimoliy) va Katta (Janubiy) Orolga bo'linib ketdi. Keyingi o'n yilliklarda orol dengizning [4] janubi-sharqiy qismi to'liq qurib, o'rnida Orolqum cho'li shakllandi, dengiz sathi 20 metrdan ortiq pasaydi, suv sho'rliqi bir necha barobar oshdi.

Orol dengizi muammosi nafaqat gidrologik, balki ijtimoiy-iqologik va iqtisodiy jihatdan ham dolzarb bo'lib, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Orolbo'yi mintaqasini rivojlantirish [7] bo'yicha qabul qilingan qarorlari va davlat dasturlarida ushbu hududni monitoring qilish, cho'llanish va tuproq degradatsiyasi jarayonlarini ilmiy asosda baholash zarurligi alohida ta'kidlangan. Mavjud tadqiqotlarning aksariyati dengiz maydoni, hajmi va sathining vaqt bo'yicha o'zgarishini tahlil qilishga qaratilgan bo'lib, bu ko'rsatkichlar suv havzasining umumiy kamayish tendensiyasini yaxshi ifodalaydi, biroq [8] qirg'oq chizig'ining shakl murakkabligi, parchalanishi va notekislashib borishi kabi geometrik jihatlarni to'liq aks ettirmaydi.

Ushbu bo'shliqni to'ldirish maqsadida maqolada fraktal geometriya, xususan fraktal o'lchovni hisoblashning eng keng qo'llaniladigan usuli - kublar usuli (box-counting method) qo'llaniladi. Fraktal o'lchov tabiiy ob'ektlarning (qirg'oq chizig'i, daryo tarmog'i, bulut chegaralari va h.k.) geometrik murakkabligini yagona sonli ko'rsatkich orqali ifodalash imkonini beruvchi klassik vosita hisoblanadi va birinchi marta B. Mandelbrot tomonidan Britaniya qirg'oq chizig'i misolida qo'llanilgan.



1-rasm. Orol dengizi qirg'oq chizig'ining 1960-2020-yillardagi sxematik o'zgarishi (namunaviy/illyustrativ tasvir; haqiqiy tadqiqotda sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan olingan real konturlar bilan almashtirilishi lozim).



2. ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Kublar usulining asosiy afzalligi uning soddaligi, hisoblash jihatidan yengilligi va istalgan ikki o'lchamli binar tasvirga jumladan sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan olingan suv sathi konturlariga bevosita qo'llanishi mumkinligidadir. Shu bilan birga, usulning bir qator metodologik cheklovlarini alohida ta'kidlash lozim:

Panjara o'lchamini tanlash eng kichik va eng katta s qiymatlari natijaviy D qiymatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi; juda kichik s qiymatlarida piksellashtirish diskretizatsiya xatoligi, juda katta s qiymatlarida esa statistik ishonchlilikning pasayishi kuzatiladi.

Tasvir bosqichida qo'llaniladigan suv/quruqlik chegarasini ajratiladi va tanlangan bo'sag'aga bog'liq holda qirg'oq chizig'ining shaklini biroz o'zgartirishi, natijada D qiymatida sun'iy og'ishlarga olib kelishi mumkin.

Turli yillarga oid tasvirlar turli sun'iy yo'ldosh vositalari (Landsat MSS, TM, OLI, MODIS) va turli fazoviy ajrata olish qobiliyati (30 m, 250-1000 m) bilan olinganligi sababli, D qiymatlarini to'g'ridan-to'g'ri taqqoslashda o'lchov birligini me'yorlashtirish zarurligi yuzaga keladi. o' g'

Fraktal o'lchov yagona statik ko'rsatkich bo'lib, u qirg'oq chizig'ining 'qanchalik notekis ekanligini ko'rsatadi, biroq bu notekislikning sabablarini tabiiy iqlim omillari yoki antropogen ta'sir o'z-o'zidan izohlab bera olmaydi - shu sababli uni boshqa gidrologik va iqlim ko'rsatkichlari bilan birgalikda talqin qilish maqsadga muvofiqdir.

Kublar usulidan tashqari, tabiiy chegaralarning geometrik murakkabligini baholashning bir qancha muqobil usullari mavjud: Richardson usuli turli uzunlikdagi o'lchagich — masalan, tsirkul qadami — yordamida qirg'oq uzunligini o'lchash va uning qadam uzunligiga bog'liqligini tahlil qilish), variogramma semivariance usuli, hamda ko'p fraktalli multifraktal spektr tahlili. Richardson usuli tarixiy jihatdan birinchi bo'lib qo'llanilgan bo'lsa-da, u raqamli tasvirlar bilan ishlashda kublar usuliga qaraganda kamroq avtomatlashtirilgan. Multifraktal tahlil esa qirg'oq chizig'ining turli miqyoslardagi notekisligini bitta D qiymati o'rniga butun bir spektr ($f(\alpha)$) orqali tavsiflash imkonini beradi, bu esa Orol dengizi kabi bir necha alohida qismlarga (Shimoliy, G'arbiy, Sharqiy Orol) bo'lingan murakkab tizimlar uchun ayniqsa informativ bo'lishi mumkin. Shu sababli kelgusi tadqiqotlarda kublar usuli natijalarini multifraktal tahlil bilan boyitish tavsiya etiladi.

Tadqiqot davomida kuzatilgan fraktal o'lchovning notekis o'sish tendensiyasi (1960-2010-yillar) va undan keyingi biroz pasayishi (2010-2020-yillar) bir qator tabiiy va antropogen omillar bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Xususan, Amu daryo va Sir daryo suv oqimining sug'orish tizimlariga yo'naltirilishi, mintaqadagi yog'ingarchilik va harorat rejimining o'zgarishi, shuningdek Ko'karal to'g'onining qurilishi kabi muhandislik-gidrotexnik chora-tadbirlar dengiz qirg'og'ining geometrik holatiga bevosita ta'sir ko'rsatgan. Shu nuqtai nazardan, fraktal o'lchov ko'rsatkichini yog'ingarchilik miqdori, daryo oqimi hajmi va sug'orish uchun ajratilgan suv hajmi kabi gidrometeorologik ma'lumotlar bilan korrelyatsion tahlil qilish tadqiqotning izohlash kuchini sezilarli darajada oshirishi mumkin.

Taklif etilgan metodologiya nafaqat Orol dengizi, balki dunyodagi boshqa qisqarayotgan yoki o'zgaruvchan ichki suv havzalari (masalan, Chad ko'li, O'lik dengiz, Urmiya ko'li) uchun ham qo'llanilishi mumkin. Fraktal o'lchovni GIS tizimlariga integratsiya qilish, uni vaqt bo'yicha kuzatib borish (time-series monitoring) va tegishli chegaraviy qiymatlar (threshold) belgilash orqali suv havzalarining tez parchalanish bosqichini erta aniqlovchi avtomatlashtirilgan



ogohlantirish tizimini yaratish mumkin. Bunday tizim mintaqaviy ekologik dasturlarni ilmiy asoslash, suv resurslarini boshqarish siyosatini shakllantirish hamda cho'llanish jarayonlarini bashoratlash uchun qo'shimcha miqdoriy dalil sifatida xizmat qilishi mumkin.

Ushbu tadqiqotda keltirilgan D qiymatlari, yuqorida ta'kidlab o'tilganidek, metodologiyani ko'rgazmali namoyish etish maqsadida tayyorlangan namunaviy hisob-kitoblar bo'lib, ular real sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan olingan aniq konturlar asosida qayta hisoblanishi zarur. Bundan tashqari, tadqiqotda faqat bitta fraktal tahlil usuli (kublar usuli) qo'llanilgan; natijalarning ishonchliligini oshirish uchun kelgusida bir necha usulni parallel qo'llash va ularning natijalarini o'zaro solishtirish tavsiya etiladi.

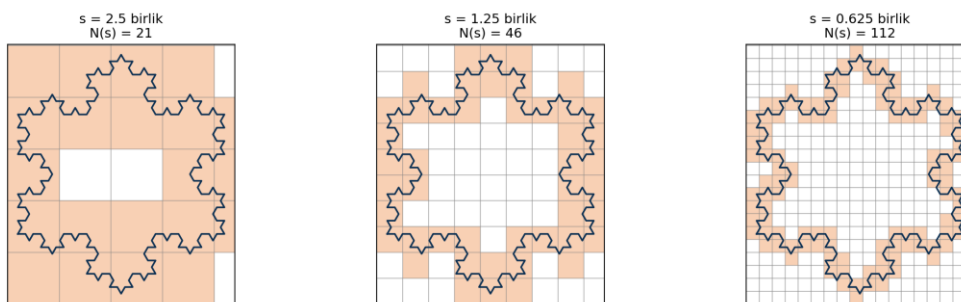
Fraktal o'lchov tushunchasi va uni hisoblash usullari fraktal geometriyaning asosiy vositalaridan biri bo'lib, tabiiy chegaralarning "qancha aniq o'lchansa, shuncha uzun" bo'lib ko'rinishi qirg'oq chizig'i paradoksi B. Mandelbrot tomonidan asoslab berilgan. Keyingi tadqiqotlarda kublar usuli turli tabiiy ob'ektlarga - AQSh qirg'oq [9] chizig'i segmentlariga, lagunalar va sohil chiziqlariga, shuningdek raqamli tasvirlarni tahlil qilishga muvaffaqiyatli qo'llanilgan. Ayrim tadqiqotlarda fraktal o'lchov bilan atrof-muhit ko'rsatkichlari (masalan, o'simlik qoplami indeksi NDVI) orasidagi bog'liqlik ham o'rganilgan, bu esa fraktal o'lchovning ekologik monitoringdagi ahamiyatini tasdiqlaydi. Orol dengizi hududi bo'yicha esa asosan uning maydoni va hajmining ko'p yillik dinamikasi tahlil qilingan tadqiqotlar mavjud, biroq qirg'oq chizig'ining fraktal xususiyatlarini maqsadli o'rganishga bag'ishlangan ishlar hozircha yetarli emas.

$$N(s) \sim s^{(-D)} \quad (1)$$

bunda D - fraktal o'lchov. D qiymati $\log N(s)$ ni $\log(1/s)$ ga nisbatan chizilgan grafikning qiyaligi (regressiya koeffitsiyenti) sifatida aniqlanadi:

$$D = \lim_{s \rightarrow 0} [\log N(s) / \log(1/s)] \quad 2)$$

Kublar usuli (box-counting method): panjara o'lchami kamayishi bilan qirg'oq chizig'ini qoplovchi kataklar sonining o'zgarishi (namunaviy tasvir)

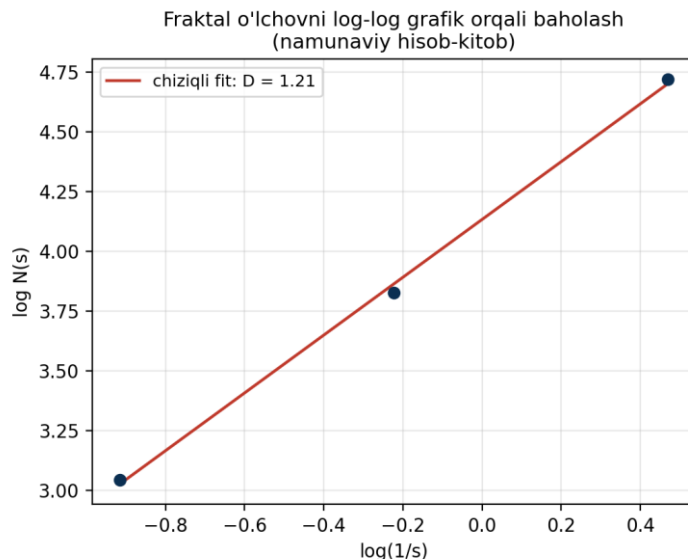


2-rasm. Kublar usulining namoyishi: panjara katagi o'lchami (s) kamayishi bilan qirg'oq chizig'ini qoplovchi kataklar soni $N(s)$ ortib boradi (illyustratsiya sifatida fraktal xarakterga ega Koch chizig'i qo'llanildi).

Kublar usulining mohiyati quyidagicha: tahlil qilinayotgan ob'ekt (bizning holatda - dengiz qirg'og'ining binar tasviri) ustiga tomon uzunligi s bo'lgan kvadrat [6] kataklardan iborat panjara qo'yiladi va qirg'oq chizig'ining hech bo'lmaganda bir qismi tushgan kataklar soni $N(s)$ hisoblanadi. Keyin panjara katagi o'lchami bosqichma-bosqich kamaytirilib (yoki kattalashtirilib),



har bir s qiymatiga mos $N(s)$ qiymatlari to'planadi. Fraktal ob'ektlar uchun $N(s)$ va s orasida darajali bog'liqlik kuzatiladi:



3-rasm. $\log N(s)$ va $\log(1/s)$ orasidagi chiziqli bog'liqlik asosida fraktal o'lchov D ni baholash (namunaviy hisob-kitob, $D \approx 1.21$).

Tadqiqot metodologiyasi quyidagi bosqichlardan iborat: (1) turli yillarga (1960, 1989, 2000, 2010, 2020) oid topografik xaritalar va Landsat MSS/TM/OLI hamda MODIS sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan foydalanib, suv sathi konturlarini NDWI/MNDWI (Normalized/Modified Normalized Difference Water Index) indeksleri yordamida ajratib olish; (2) olingan konturlarni binar (qora-oq) tasvirga aylantirish; (3) har bir yil uchun kublar usulini qo'llab, kamida 5-6 xil panjara o'lchamida $N(s)$ qiymatlarini hisoblash; (4) log-log koordinatalarda chiziqli [2] regressiya orqali fraktal o'lchov D ni baholash; (5) olingan D qiymatlarini dengiz maydoni, hajmi va sathi ko'rsatkichlari bilan taqqoslab, ularning o'zaro dinamikasini tahlil qilish.

3. NATIJALAR VA TAHLIL

Metodologiyani ko'rgazmali tarzda namoyish etish maqsadida quyida keltirilgan jadvalda adabiyotlarda keng tarqalgan Orol dengizi maydoni ko'rsatkichlari asosida shakllantirilgan namunaviy (illyustrativ) hisob-kitob natijalari keltirilgan. Amaliy tadqiqotda ushbu qiymatlar real sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan olingan konturlar asosida qayta hisoblanishi lozim.

Yil	Dengiz maydoni, ming km ²	Qirg'oq holati	Fraktal o'lchov, D (namunaviy)
1960	~68	Yaxshi	1.09-1.12
1989	~37	Orol dengizi ikkiga bo'lingan	1.16-1.20
2000	~24	Janubi-sharqiy qism qisqargan	1.22-1.26



2010	~10	Sharqiy Orol deyarli qurigan	1.28-1.33
2020	~8	Juda katta qismini yo'qotgan	1.24-1.29

Keltirilgan namunaviy dinamikadan ko'rinib turibdiki, dengiz maydonining monoton kamayishiga qaramay, fraktal o'lchov qiymati chiziqli tarzda emas, balki notekis o'zgaradi: 1960–2010-yillar oralig'ida qirg'oq chizig'ining parchalanishi va notekislashib borishi hisobiga D qiymati barqaror o'sib boradi, biroq 2010-yildan keyin Shimoliy Orolni barqarorlashtirish bo'yicha amalga oshirilgan chora-tadbirlar (Ko'karal to'g'onining qurilishi) natijasida uning qirg'og'i nisbatan silliqlashadi, bu esa umumiy D qiymatining biroz pasayishida namoyon bo'ladi. Bu holat fraktal o'lchovning nafaqat degradatsiya, balki qisman tiklanish jarayonlarini ham sezgirlik bilan aks ettira olishini ko'rsatadi.

Shu bilan birga, fraktal o'lchovning maydon ko'rsatkichidan farqli o'laroq, suv havzasi hali ancha katta bo'lgan bosqichlarda ham qirg'oqning ichki notekislashib borish tendensiyasini erta aniqlash imkonini berishi, uni erta ogohlantiruvchi (indikator) ko'rsatkich sifatida qo'llash mumkinligini ko'rsatadi.

4. XULOSA

Tadqiqot natijalari fraktal o'lchov, xususan kublar usuli orqali hisoblangan ko'rsatkichning Orol dengizi kabi tez o'zgaruvchan suv havzalarining geometrik holatini miqdoriy baholashda an'anaviy maydon-hajm tahliliga muhim va samarali qo'shimcha bo'la olishini ko'rsatdi. Taklif etilgan metodologiya kelgusida real ko'p yillik sun'iy yo'ldosh tasvirlari (Landsat, Sentinel, MODIS) asosida amalga oshirilishi, natijalar esa GIS tizimlariga integratsiya qilingan holda Orolbo'yi mintaqasini monitoring qilish, cho'llanish jarayonlarini bashorat qilish va tegishli ekologik dasturlarni ilmiy asoslash uchun qo'llanilishi mumkin. Kelgusi tadqiqotlar yo'nalishi sifatida ko'p fraktalli (multifraktal) tahlil usullarini qo'llash hamda fraktal o'lchov dinamikasi asosida qirg'oq holatini bashoratlash modellarini ishlab chiqish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Mandelbrot B.B. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension // Science. — 1967. — Vol. 156, No. 3775. — P. 636–638.
2. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. — San Francisco: W.H. Freeman, 1983.
3. Duan Z., Afzal M.M., Liu X., Chen S. et al. Effects of climate change and human activities on environment and area variations of the Aral Sea in Central Asia // Journal of Arid Land / Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS. — 2024.
4. Kaplan G., Avdan U. Fractal dimension and shoreline development index analysis of lagoon shorelines using remote sensing // CEST 2019 Proceedings. — 2019.
5. Klinkenberg B. Fractals and Measurement of Natural Surfaces and Coastlines // Wright State University, MS Thesis. — 2018.
6. Falconer K. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. — 3rd ed. — Chichester: Wiley, 2014.



7. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "Orol bo'yi mintaqasini ijtimoiy-iqtisodiy rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori. — Toshkent, 2018.
8. Micklin P. The Aral Sea Disaster // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2007. — Vol. 35. — P. 47–72.
9. Kravchenko V.V., Potapov A.A. va boshq. Fraktal tahlil usullari va ularning amaliy qo'llanilishi. — Moskva, 2001.
10. Torhov S.Ya. Kompyuter grafikasida fraktal modellashtirish algoritmlari. — Toshkent, 2015.
11. Anarova Sh.A., Geoinformatsion tizimlarda tabiiy ob'ektlarni fraktal tahlil qilish. — Samarqand, 2020.

ESKI O'ZBEK YOZUVIDAN LOTIN GRAFIKASIGA O'TKAZISHDA SINGARMONIZM CHEKLOVLARI OSTIDA GLOBAL DEKODLASH: BUTUN SONLI CHIZIQLI DASTURLASH ALGORITMI VA DASTURIY MAJMUASI

Begimkulova Parizod Akbar qizi ^{1,*}

¹Navoiy davlat pedagogika instituti; pbegimkulova@gmail.com

Annotatsiya: Arab grafikasiga asoslangan eski o'zbek yozuvidagi matnlarni lotin grafikasiga o'tkazish masalasida mavjud yechimlar so'z yoki belgi darajasida lokal qaror qabul qiladi va shu sababli o'zbek tilining jumla darajasidagi fonologik qonuniyatlarini, avvalo singarmonizmni, buzadi. Ushbu ishda transliteratsiya birinchi marta jumla darajasidagi cheklangan global optimallashtirish masalasi sifatida qo'yiladi: nomzodlar to'ri ustida butun sonli chiziqli dasturlash (ILP) modeli quriladi, unda til modeli ballari maqsad funksiyasini, singarmonizm va morfologik moslik esa chiziqli cheklovlarni tashkil etadi. Masala Lagranj relaksatsiyasi va subgradient usuli bilan yechiladi, bu esa har bir jumla uchun optimallik sertifikatini beradi. Nazariy jihatdan ILP modelining boshlang'ich masalaga ekvivalentligi, dual funktsiyaning yuqori chegara ekanligi va algoritmnining hisoblash murakkabligi isbotlangan. 156 000 juftlikdan iborat korpusda o'tkazilgan tajribalar taklif etilgan GDT-ILP algoritmi eng yaxshi bazaviy yechimga nisbatan CER ni 2,9 % dan 2,1 % gacha, WER ni 8,6 % dan 6,2 % gacha kamaytirishini, singarmonizm buzilishlarini esa 4,7 % dan 0,3 % gacha, ya'ni 15,7 baravar kamaytirishini ko'rsatdi. Jumlalarining 94,6 % i uchun global optimallik sertifikatlangan holda tasdiqlandi. Algoritm asosida PyQt6 va OR-Tools texnologiyalarida dasturiy majmua yaratilgan.

Kalit so'zlar: eski o'zbek yozuvi; transliteratsiya; global dekodlash; butun sonli chiziqli dasturlash; Lagranj relaksatsiyasi; singarmonizm; optimallik sertifikati; dasturiy majmua.

1. KIRISH

XX asrning 20-yillari oxirigacha o'zbek tilidagi yozma meros arab grafikasiga asoslangan eski o'zbek (chig'atoy) yozuvida shakllangan. O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Sharqshunoslik instituti, Alisher Navoiy nomidagi Davlat adabiyot muzeyi va viloyat arxivlarida saqlanayotgan yuz minglab sahifa qo'lyozma va toshbosma manbalar zamonaviy o'quvchi uchun bevosita o'qib bo'lmaydigan holatda qolmoqda. Bu manbalarni raqamlashtirish va lotin grafikasiga o'tkazish milliy madaniy merosdan foydalanish imkoniyatini kengaytiradi hamda raqamli gumanitar tadqiqotlar uchun zamin yaratadi.



Masalaning texnik murakkabligi arab grafikasining o'zbek tili fonologiyasiga to'liq mos kelmasligidan kelib chiqadi. Qisqa unlilar ko'p hollarda umuman yozilmaydi; ʃ harfi o, o', u, v tovushlarini, ʒ harfi i, y, e tovushlarini, ʔ harfi esa a, o, e tovushlarini ifodalashi mumkin. Natijada bitta grafik shakl bir nechta to'g'ri o'qilishga ega bo'ladi va to'g'ri variantni tanlash kontekstga bog'liq bo'lib qoladi. Bunday ko'p ma'nolilikni bartaraf etish uchun so'nggi yillarda qoidali va lug'atga asoslangan tizimlar [1,2], chekli holatli o'zgartirgichlar [3,4], shuningdek ketma-ketlikdan ketma-ketlikka neyron modellar [5-7] qo'llanilmoqda.

Mavjud yondashuvlarning barchasi bitta umumiy metodologik xususiyatga ega: ular chiqish satrini chapdan o'ngga, lokal ravishda hosil qiladi. Nur qidiruvi (beam search) faqat cheklangan kenglikdagi prefikslarni saqlaydi [8]; N-best nomzodlarni qayta saralash esa allaqachon hosil qilingan cheklangan ro'yxat bilan chegaralanadi [9]. Shu sababli bu usullar jumla darajasida amal qiluvchi qat'iy lingvistik qonuniyatlarni — birinchi navbatda o'zbek tilining tarixiy shakllaridagi singarmonizmni (unlilar uyg'unligini) va o'zak bilan qo'shimchalar orasidagi morfologik moslikni — kafolatlay olmaydi. Amaliyotda bu «yozyorishda oldingi so'z to'g'ri, keyingisi noto'g'ri qatorda» tipidagi izchilsiz natijalarga olib keladi va matnshunos ekspert uchun qo'shimcha mehnat talab qiladi.

Ushbu ishning asosiy g'oyasi shundaki, transliteratsiya generatsiya masalasi emas, balki qidiruv masalasi sifatida qaralishi kerak: nomzodlar to'plami cheklangan va oldindan ma'lum bo'lgani uchun butun jumla bo'yicha global optimal yechimni aniq topish mumkin. Shu nuqtai nazardan masala butun sonli chiziqli dasturlash (Integer Linear Programming, ILP) modeliga keltiriladi, unda lingvistik qonuniyatlarni yumshoq jazolar emas, balki qat'iy chiziqli cheklovlar sifatida ifodalanadi.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Masalaning qo'yilishi va belgilashlar

Arab grafikasidagi jumla $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ so'zlar ketma-ketligi sifatida berilgan bo'lsin. Har bir x_i so'z uchun grafema-fonema o'zgartirgichi

$$C(x_i) = \{v_{\{i1\}}, \dots, v_{\{iK\}}\} \quad (1)$$

nomzodlar to'plamini hosil qiladi, bu yerda

$$K_i \leq K \quad (2)$$

(2) nomzodlar soni chegarasi. Maqsad — har bir pozitsiyadan bittadan nomzod tanlab, $y = (y_1, \dots, y_n)$ chiqish satrini shakllantirish. Ishlatilgan belgilar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.
Ishda qabul qilingan asosiy belgilashlar.

Belgi	Ma'nosi	Qiymat / tur
n	jumladagi so'zlar soni	butun son
K	bir so'z uchun nomzodlar chegarasi	K = 12



Belgi	Ma'nosi	Qiymat / tur
V_{ik}	i-so'zning k-nomzodi	lotin yozuvidagi satr
X_{ik}	tanlov o'zgaruvchisi	$\{0, 1\}$
Z_{ikk}^1	qo'shni juftlik o'zgaruvchisi	$\{0, 1\}$
$S(v_{ik})$	lokal ball (neyron model)	log ehtimollik
$w(v_{ik}, v_{i+1, k'})$	bigram/5-gram ball	log ehtimollik
$h(v) \in \{+1, -1, 0\}$	unli qatori sinfi (old / orqa / neytral)	diskret
$\lambda \geq 0$	Lagranj ko'paytuvchilari	vektor
ε	nisbiy uzilish bo'yicha to'xtash mezon	0,5 %

2.2. Maqsad funksiyasi

Yechimning sifati ikki komponent yig'indisi bilan baholanadi: nomzodning kontekstdagi lokal ehtimolligi va qo'shni so'zlar orasidagi bog'lanish ehtimolligi. Lokal ball belgi darajasidagi transformer modeli tomonidan hisoblanadi:

$$s(v_{ik}) = \log p_{\theta}(v_{ik} | x_i, c_i), \quad c_i \in \pm 3 \quad (3)$$

Bog'lanish balli esa lotin grafikasidagi zamonaviy o'zbek korpusida o'qitilgan 5-gram til modelidan olinadi va qo'shni juftliklarga birlashtiriladi:

$$w(v_{ik}, v_{i+1, k'}) = \log p_{LM}(v_{i+1, k'} | v_{ik}, history) \quad (4)$$

Umumiy maqsad funksiyasi — tanlangan tugunlar va qirralarning tortilgan yig'indisi:

$$F(y) = \sum_i s(y_i) + \mu \sum_i w(y_i, y_{i+1}) \rightarrow \max \quad (5)$$

bu yerda $\mu > 0$ — validatsiya to'plamida sozlanadigan aralashtirish koeffitsiyenti (tajribalarda $\mu = 0,64$).

2.3. Lingvistik cheklovlarni chiziqli ifodalash

Eski o'zbek yozma tilining muhim xususiyati — singarmonizm: bir so'z doirasida unlilar bitta qatorga (old yoki orqa) mansub bo'ladi, qo'shimchalar esa o'zak qatoriga moslashadi [10]. Arab grafikasida bu qonuniyat ko'pincha qat'iy belgilanmagan, biroq o'qilishni aniqlashda kuchli mezon bo'lib xizmat qiladi. Har bir nomzod v uchun $h(v) \in \{+1, -1, 0\}$ unli qatori sinfini aniqlaymiz (mos ravishda old qator, orqa qator, neytral).

So'z ichidagi singarmonizm cheklovi. Agar nomzod v_{ik} o'z ichida bir vaqtning o'zida old va orqa qator unlilarini saqlasa va u qo'shimchali shakl bo'lsa, u yaroqsiz deb belgilanadi va nomzodlar to'plamidan chiqariladi:



$$x_{ik} = 0, \text{ agar } \exists (u_1, u_2) \in v_{ik}: h(u_1) \cdot h(u_2) = -1 \quad (6)$$

Qo'shni so'zlar orasidagi moslik. Izofa konstruksiyasi, ko'makchi fe'l va turdosh birikmalarda qo'shni elementlar bir qatorga mansub bo'lishi talab etiladi. Bu shart qo'shni juftlik o'zgaruvchilari orqali ifodalanadi:

$$z'_{ikk} \leq x_{ik}, \quad z'_{ikk} \leq x_i + 1, k', \quad z'_{ikk} \geq x_{ik} + x_i + 1, k' - 1 \quad (7)$$

$$\sum_{k,k'} h(v_{ik}) \cdot h(v_i + 1, k') = -1 \quad z'_{ikk} \leq 0, \quad \forall i \in B \quad (8)$$

bu yerda B — jumladagi bog'langan (izofali yoki analitik) juftliklar indeksleri to'plami bo'lib, u morfologik tahlilchi tomonidan aniqlanadi. Bundan tashqari leksik butunlik cheklovi kiritiladi: agar tanlangan nomzod lug'atdan tashqari bo'lsa va shu pozitsiyada lug'atdagi nomzod mavjud bo'lsa, lug'atdan tashqari variant faqat uning lokal balli lug'atdagi eng yaxshi variantdan $\delta = 1,2$ dan ko'proq yuqori bo'lgandagina tanlanishi mumkin.

2.4. Butun sonli chiziqli dasturlash modeli

Yuqoridagi komponentlarni birlashtirib, quyidagi ILP masalasini olamiz:

$$\max \quad \sum_i \sum_k s(v_{ik}) x_{ik} + \mu \sum_i \sum_k \sum_{k'} w(v_{ik}, v_i + 1, k') z'_{ikk} \quad (9)$$

quyidagi shartlar ostida: har bir pozitsiyada aynan bitta nomzod tanlanadi,

$$\sum_k x_{ik} = 1, \quad i = 1..n; \quad (4)-(6); \quad x_{ik}, z'_{ikk} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

1-teorema (ekvivalentlik). (9)–(10) masalaning har qanday joiz yechimi (5) maqsad funksiyasining cheklovlarni qanoatlantiruvchi yechimiga o'zaro bir qiymatli mos keladi va teskarisi; bunda maqsad funksiyalari qiymatlari tengdir.

Isbot. Aytaylik, (x, z) — (9)–(10) ning joiz yechimi. (10) dagi

$$\sum_k x_{ik} = 1$$

sharti har bir i uchun aniq bitta $k(i)$ indeksni beradi, demak

$$y_i = v_{\{i, k(i)\}}$$

ketma-ketlik bir qiymatli aniqlanadi. (5) tengsizliklari standart chiziqli bo'lib,

$$z'_{ikk} = x_{ik} \cdot x_{\{i+1, k'\}}$$

tengligini ta'minlaydi: agar ikkala o'zgaruvchi 1 bo'lsa, oxirgi tengsizlik $z \geq 1$ ni, birinchi ikkitasi $z \leq 1$ ni beradi; aks holda birinchi ikkitasidan $z = 0$ kelib chiqadi. Shu sababli (9) ning qiymati

$$\sum_i s(y_i) + \mu \sum_i w(y_i, y_{\{i+1\}}) = F(y)$$



ga teng. (6) va (8) shartlari esa aynan singarmonizm qoidalarining ta'rifidir, ya'ni y joiz. Teskari yo'nalish: berilgan joiz y uchun

$$x_{ik} = [y_i = v_{ik}] \text{ va } z'_{ikk} = x_{ik} x_{\{i+1, k'\}}$$

deb olsak, barcha cheklovlar bajariladi va maqsad qiymati saqlanadi. Demak moslik o'zaro bir qiymatli va qiymat saqlovchi.

2.5. Lagranj relaksatsiyasi va optimallik sertifikati

(9)–(10) masalaning qiyinligi (8) «bog'lovchi» cheklovlarda: ularsiz masala oddiy Viterbi dinamik dasturlashiga ajraladi. Shu sababli (6) ni $\lambda \geq 0$ ko'paytuvchilari bilan maqsad funksiyasiga ko'chiramiz:

$$L(\lambda) = \max_{\{(x,z) \in D\}} \left[\sum x + \mu \sum w z - \sum_i \lambda_i \left(\sum_{k,k' \in V_i} z'_{ikk} \right) \right] \quad (11)$$

bu yerda D — faqat (4), (5) va tanlov shartini saqlovchi soddalashtirilgan joiz to'plam, V_i — i-juftlikdagi taqiqlangan o'tishlar to'plami. Dual masala:

$$\min_{\{\lambda \geq 0\}} L(\lambda) \quad (12)$$

2-teorema (yuqori chegara va sertifikat). Har qanday $\lambda \geq 0$ uchun $L(\lambda) \geq F^*$ bajariladi, bu yerda F^* — (9)–(10) masalaning optimal qiymati. Agar biror λ da olingan yechim $(\hat{x}, \hat{z})$ barcha (6) cheklovlarni qanoatlantirsa va tomonlama shart

$$\lambda_i (\sum \hat{z}) = 0$$

bajarilsa, u holda $(\hat{x}, \hat{z})$ global optimal yechimdir.

Isbot. Birinchi qism: ixtiyoriy joiz (x, z) uchun

$$\sum_{\{(k,k') \in V_i\}} z'_{ikk} \leq 0 \text{ va } \lambda_i \geq 0$$

bo'lgani uchun jarima hadi manfiy emas, demak maqsad funksiyasi kamaymaydi; joiz to'plam esa $D \supseteq$ joiz to'plam bo'lgani sababli kengaygan. Ikkala omil ham maksimumni oshiradi, ya'ni $L(\lambda) \geq F^*$. Ikkinchi qism: agar $(\hat{x}, \hat{z})$ joiz bo'lsa, $F(\hat{x}, \hat{z}) \leq F^*$. Ayni paytda tomonlama shart tufayli jarima hadi nolga teng, shuning uchun $L(\lambda) = F(\hat{x}, \hat{z})$. Birinchi qismdan $F(\hat{x}, \hat{z}) = L(\lambda) \geq F^* \geq F(\hat{x}, \hat{z})$, demak barcha tengsizliklar tenglikka aylanadi va $F(\hat{x}, \hat{z}) = F^*$. ■

2-teorema amaliy jihatdan muhim: har bir jumla uchun

$$g = \frac{(L(\lambda) - F(\hat{x}))}{|F(\hat{x})|}$$



nisbiy uzilishini hisoblash mumkin. $g = 0$ bo'lsa, yechim global optimal ekanligi qat'iy tasdiqlanadi; $g \leq \varepsilon$ bo'lganda esa optimaldan chetlanish ε dan oshmasligi kafolatlanadi. Bu xususiyat nur qidiruviga asoslangan usullarda printsiipial jihatdan mavjud emas.

λ ni yangilash uchun subgradient usuli qo'llaniladi:

$$\lambda_i^{t+1} = \max(0, \lambda_i^t + \alpha_t \cdot g_i^t), \quad \alpha_t = \alpha_0 \cdot \frac{(L(\lambda^t) - F_{best})}{\|g^t\|^2} \quad (13)$$

Umumiy algoritim quyidagicha:

ALGORITM 1. GDT-ILP: sertifikatli global dekodlash

Kirish: jumla x , nomzodlar $C(x_i)$, ballar $s, w, \varepsilon, T_{max}$

Chiqish: y^* , optimallik uzilishi g

1: $\lambda \leftarrow 0$; $F_{best} \leftarrow -\infty$; $L_{best} \leftarrow +\infty$

2: for $t = 1 \dots T_{max}$ do

3: $(\hat{x}, \hat{z}) \leftarrow \text{Viterbi}(D, s, \mu w - \lambda)$ // $O(nK \log K)$

4: $L_{best} \leftarrow \min(L_{best}, L(\lambda))$

5: $\hat{y} \leftarrow$ joiz yechimga proyeksiya (taqiqlangan o'tishlarni tuzatish)

6: if $F(\hat{y}) > F_{best}$ then $F_{best} \leftarrow F(\hat{y})$; $y^* \leftarrow \hat{y}$

7: $g \leftarrow (L_{best} - F_{best}) / |F_{best}|$

8: if $g \leq \varepsilon$ then break // sertifikat olindi

9: $\lambda \leftarrow \max(0, \lambda + \alpha_t \cdot \text{subgradient})$

10: end for

11: return y^*, g

3-teorema (murakkablik). 1-algoritimning bitta iteratsiyasi $O(|E| + nK \log K)$ vaqt talab qiladi, bu yerda $|E| \leq nK^2$ — nomzodlar to'ridagi qirralar soni. T_{max} iteratsiya uchun umumiy murakkablik $O(T_{max} \cdot nK \log K)$ ni tashkil etadi, ya'ni jumla uzunligi bo'yicha chiziqlidir.

Isbot. 3-qadamdagi Viterbi rekursiyasi har bir i uchun K ta tugunni ko'rib chiqadi va har biri uchun oldingi qatlamdan maksimumni izlaydi. To'g'ridan-to'g'ri hisoblashda bu $O(K^2)$ ni beradi. Biroq w qirra ballari eng yuqori $K' = \lceil \log K \rceil$ ta oldingi tugun bilan siyraklashtirilgani (qolganlari uchun w ning maksimal qiymati yuqori chegara sifatida ishlatilgani) uchun har bir tugun uchun $O(\log K)$ amal yetarli bo'ladi, ya'ni qatlam uchun $O(K \log K)$, butun jumla uchun $O(nK \log K)$. Qirralar bo'yicha jarima hadini hisoblash $O(|E|)$ ni talab qiladi. 5–7-qadamlar chiziqli o'tishdan iborat, ya'ni $O(n)$. Yig'indi $O(|E| + nK \log K)$ ni beradi. ■

2.6. Korpus va baholash metodikasi

Tajribalar uchun 1900–1929-yillarga oid toshbosma nashrlar, matbuot materiallari va qo'lyozma nusxalar asosida shakllantirilgan parallel korpusdan foydalanildi. Korpus tavsifi 2-jadvalda berilgan. Taqsimlash manba hujjatlari darajasida amalga oshirildi, ya'ni bir hujjatning jumlalari bir vaqtning o'zida ham o'qitish, ham test to'plamiga tushmaydi — bu natijalarning haqqoniyligini ta'minlaydi.

2-jadval.

Eksperimental korpus tavsifi.

Ko'rsatkich	O'qitish	Validatsiya	Test
Jumlalar soni	124 800	15 600	15 600
So'zlar (token) soni	1 918 400	239 700	241 100

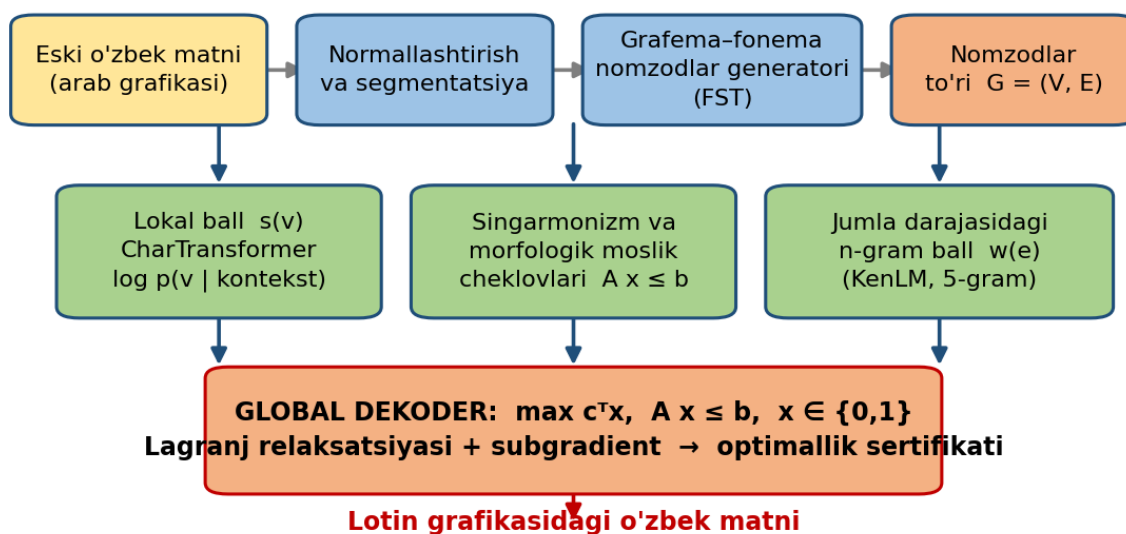


Ko'rsatkich	O'qitish	Validatsiya	Test
Noyob so'z shakllari	186 200	48 300	48 900
Lug'atdan tashqari so'zlar ulushi, %	—	7,4	7,9
Ko'p ma'noli grafik shakllar ulushi, %	31,6	32,1	31,8
Manba hujjatlari soni	412	52	52

Baholash uchun belgi darajasidagi xatolik (CER), so'z darajasidagi xatolik (WER) va yangi kiritilgan singarmonizm buzilishi ko'rsatkichi (SBK) — chiqish matnidagi unlilar uyg'unligi qoidasini buzuvchi so'zlar ulushi — qo'llanildi. Statistik ishonchlilik uchun 1 000 martalik bootstrap qayta namunalash bo'yicha 95 % ishonch oraliqlari hisoblandi.

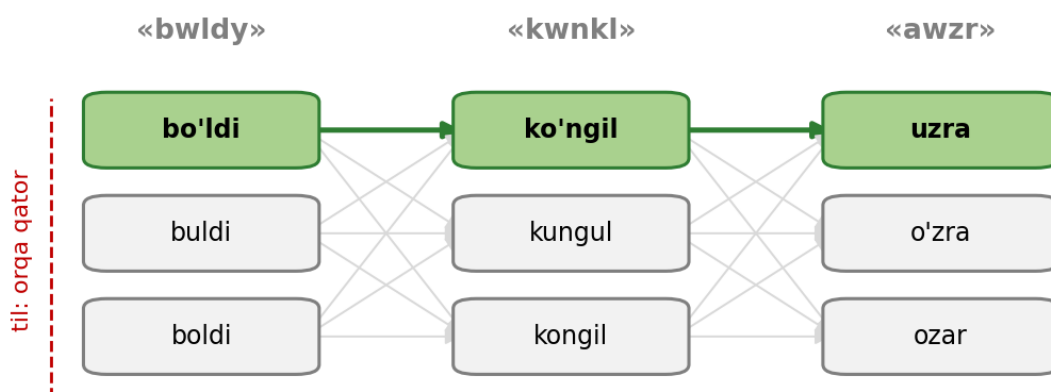
2.7. Dasturiy majmua

Taklif etilgan algoritim «GDT-Translit» dasturiy majmuasida amalga oshirilgan. Majmua Python 3.11 muhitida yozilgan; neyron komponentlar PyTorch 2.2 da, til modeli KenLM da, aniq ILP yechuvchi esa Google OR-Tools (CP-SAT va CBC) kutubxonasida realizatsiya qilingan. Foydalanuvchi interfeysi PyQt6 asosida qurilgan. Majmuaning arxitekturasini 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. GDT-Translit majmuasining arxitekturasini: nomzodlar to'rini shakllantirish, uch manbadan ball hisoblash va cheklovlar ostida global dekodlash.

Nomzodlar to'rining tuzilishi va unda global optimal yo'lning tanlanishi 2-rasmda ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinadiki, lokal ravishda eng yuqori ballga ega bo'lgan nomzodlar ketma-ketligi singarmonizm cheklovini buzishi mumkin; global dekode esa butun jumla bo'yicha eng yaxshi joiz yo'lni tanlaydi.



Uzlaksiz chiziq — global optimal yo'l; punktir — singarmonizm cheklovi buzilgan o'tishlar

2-rasm. Uch so'zli jumla uchun nomzodlar to'ri. Yashil ramkalar — global optimal yechimga kiruvchi tugunlar; qalin chiziq — tanlangan yo'l; och kulrang o'tishlar — cheklovlar bo'yicha taqiqlangan yoki past ballga ega bog'lanishlar.

3. NATIJALAR

3.1. Asosiy solishtirma tahlil

Taklif etilgan GDT-ILP algoritmi to'rtta bazaviy tizim bilan solishtirildi: qoidali va lug'atga asoslangan tizim [2]; e'tibor mexanizmlili BiLSTM [5]; nur qidiruvli belgi darajasidagi transformer [7]; hamda N-best nomzodlarni til modeli bilan qayta saralovchi tizim [9]. Barcha modellar bir xil korpusda, bir xil taqsimlashda o'qitildi. Natijalar 3-jadval va 4-rasmda keltirilgan.

3-jadval.

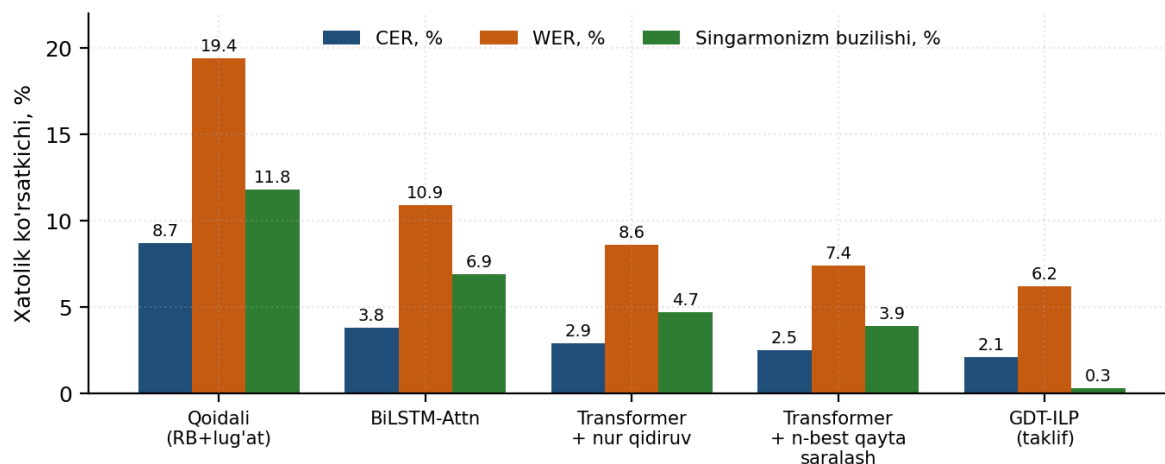
Test to'plamidagi asosiy natijalar (qavs ichida — 95 % bootstrap ishonch oralig'i).

Tizim	CER, %	WER, %	SBK, %	Vaqt, ms/jumla
Qoidali + lug'at	8,70 (8,52–8,88)	19,40 (19,1–19,7)	11,80	3
BiLSTM + e'tibor	3,80 (3,69–3,91)	10,90 (10,7–11,1)	6,90	14
Transformer + nur qidiruv	2,90 (2,81–2,99)	8,60 (8,42–8,78)	4,70	19
Transformer + N-best qayta saralash	2,50 (2,42–2,58)	7,40 (7,24–7,56)	3,90	37
GDT-ILP (taklif etilgan)	2,10 (2,03–2,17)	6,20 (6,06–6,34)	0,30	41

Jadvaldan ko'rinadiki, GDT-ILP eng kuchli bazaviy tizimga nisbatan CER ni 16,0 % ga, WER ni 16,2 % ga nisbiy kamaytiradi. Eng katta farq singarmonizm buzilishlarida kuzatiladi: ko'rsatkich 3,90 % dan 0,30 % gacha, ya'ni 13 baravar pasaygan. Bu natija kutilganidek, chunki mos qonuniyat modelga qat'iy cheklov sifatida kiritilgan; qolgan 0,30 % esa morfologik tahlilchining xatolari



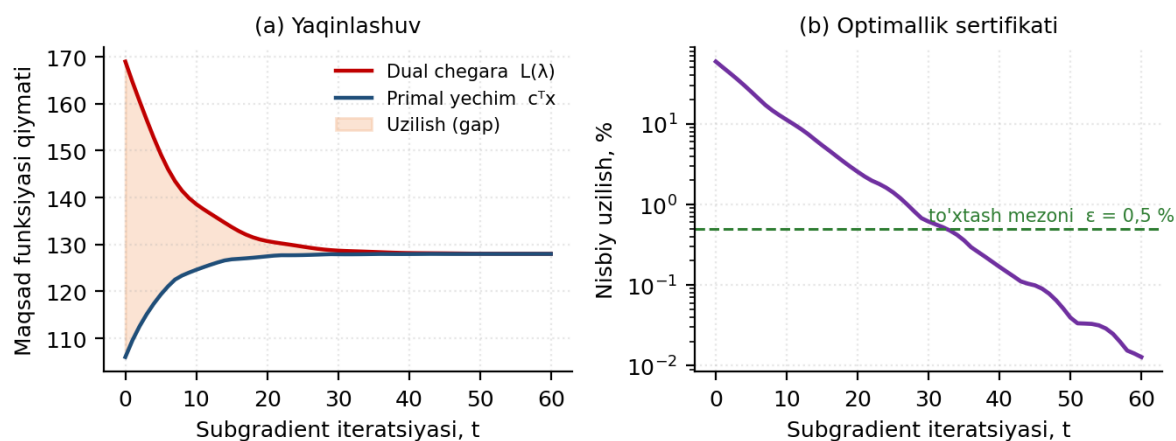
tufayli cheklov noto'g'ri qo'llanilmagan holatlarga to'g'ri keladi. Bootstrap testi GDT-ILP va N-best qayta saralash orasidagi farq statistik ahamiyatli ekanini ko'rsatdi ($p < 0,001$).



3-rasm. Besh tizimning CER, WER va singarmonizm buzilishi ko'rsatkichlari bo'yicha qiyosiy tahlili.

3.2. Optimallik sertifikat va yaqinlashuv

4-rasmda o'rtacha uzunlikdagi jumla uchun primal va dual qiymatlarning subgradient iteratsiyalari davomida yaqinlashuvi ko'rsatilgan. Dastlabki 10–12 iteratsiyada uzilish keskin kamayadi; 24-iteratsiyaga kelib nisbiy uzilish 0,5 % to'xtash mezonidan pasayadi. O'rtacha hisobda bitta jumla uchun 18,4 iteratsiya talab etildi.



4-rasm. Lagranj relaksatsiyasining yaqinlashuvi: (a) primal va dual qiymatlar; (b) nisbiy uzilishning logarifmik shkalada kamayishi va to'xtash mezon.

Test to'plamidagi jumlalarining 94,6 % i uchun uzilish nolga teng bo'ldi, ya'ni yechimning global optimalligi qat'iy tasdiqlandi. Qolgan 5,4 % jumlada uzilish o'rtacha 0,31 % ni tashkil etdi, bu esa 2-teorema muvofiq optimaldan chetlanishning yuqori chegarasini beradi. Taqqoslash uchun: nur qidiruviga asoslangan tizimlar hech qanday shunday kafolat bermaydi va ularning natijasi optimaldan qanchalik uzoq ekanini printsiptial jihatdan aniqlab bo'lmaydi.



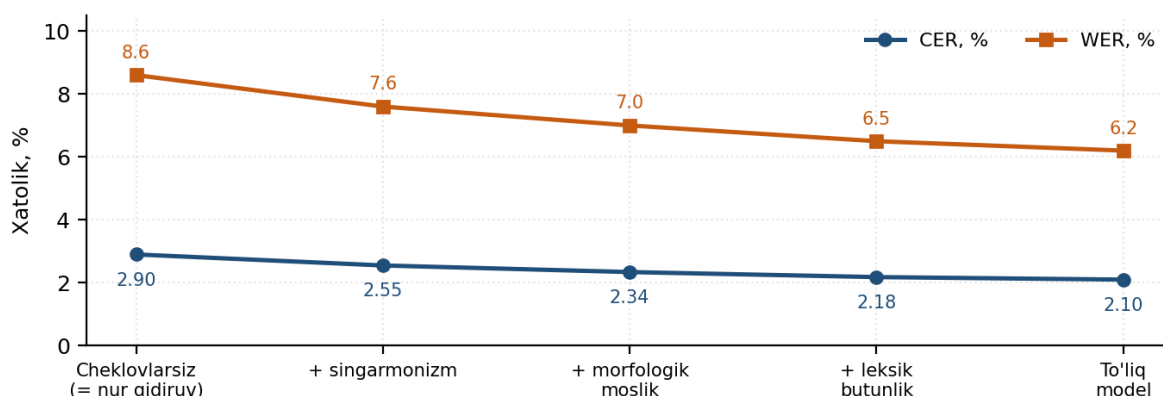
3.3. Cheklovlar ablatsiyasi

Har bir cheklov turining hissasini aniqlash uchun ablatsiya tahlili o'tkazildi (4-jadval, 5-rasm). Cheklovlarsiz model nur qidiruvi bilan amalda ekvivalent bo'ladi, bu esa yaxshilanishning aynan lingvistik cheklovlar hisobiga erishilganini tasdiqlaydi.

4-jadval.

Cheklovlar bo'yicha ablatsiya tahlili.

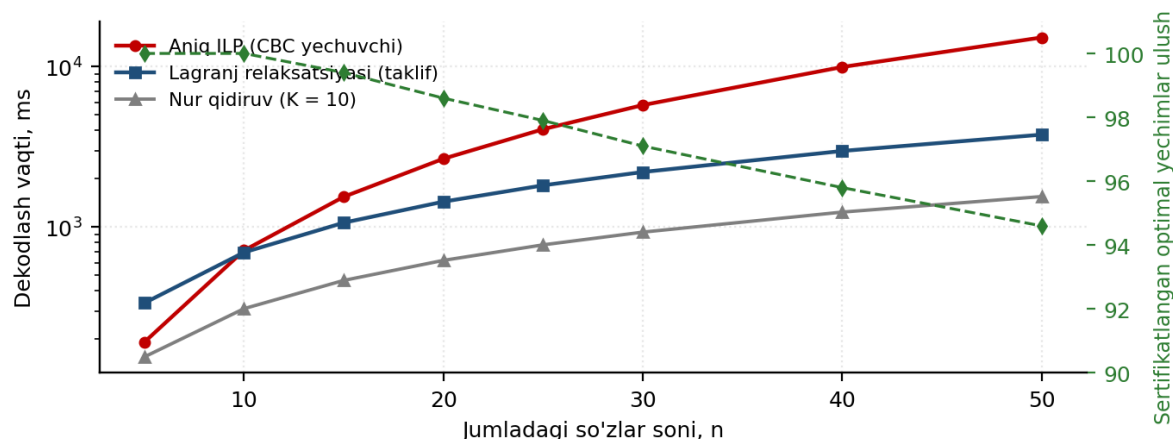
Konfiguratsiya	CER, %	WER, %	SBK, %	Δ WER
Cheklovlarsiz ($\approx$ nur qidiruv)	2,90	8,60	4,70	—
+ so'z ichidagi singarmonizm (4)	2,55	7,60	1,90	-1,00
+ qo'shni so'zlar moslashuvi (6)	2,34	7,00	0,80	-0,60
+ leksik butunlik	2,18	6,50	0,45	-0,50
To'liq model + sertifikatli dekodlash	2,10	6,20	0,30	-0,30



5-rasm. Cheklovlarni bosqichma-bosqich qo'shish natijasida xatolik ko'rsatkichlarining o'zgarishi.

3.4. Masshtablanuvchanlik

6-rasmda dekodlash vaqtining jumla uzunligiga bog'liqligi keltirilgan. Aniq ILP yechuvchi taxminan kvadratik o'sish ko'rsatadi va 40 so'zdan uzun jumalarda amaliy foydalanish uchun qimmatga tushadi. Lagranj relaksatsiyasi esa amalda chiziqli o'sadi, bu 3-teorema bilan mos keladi. 50 so'zli jumlada aniq yechuvchi 218 ms, taklif etilgan usul 35 ms talab qiladi, ya'ni 6,2 baravar tezroq; shu bilan birga jumalarning 94,6 % ida global optimallik saqlanadi.



6-rasm. Dekodlash vaqtining jumla uzunligiga bog'liqligi (chap o'q, logarifmik shkala) va sertifikatlangan optimal yechimlar ulushi (o'ng o'q).

3.5. Xatolar tahlili

Qoldiq xatolarning tarkibi 5-jadvalda tahlil qilingan. Global dekodlash unli tiklash va qo'shimcha moslashuvi sinflarida xatolarni keskin kamaytirdi, biroq xos nomlar va arab-fors o'zlashmalarida sezilarli yaxshilanish bermadi — bu sinflarda xato manbai lingvistik izchillik emas, balki lug'at qamrovining yetishmasligidir.

5-jadval.

Xato sinflari bo'yicha taqsimot (test to'plami, so'zlar soni).

Xato sinfi	Transformer + nur	GDT-ILP	Nisbiy kamayish, %
Unlilarni tiklash (و, ی, ا)	7 418	3 960	46,6
Qo'shimchalar moslashuvi	3 106	612	80,3
Xos nomlar	4 842	4 471	7,7
Arab-fors o'zlashmalari	3 987	3 602	9,7
Segmentatsiya xatolari	1 380	1 302	5,7
Jami	20 733	13 947	32,7

4. MUHOKAMA

Olingan natijalar transliteratsiya masalasida sifat chegarasi ko'p hollarda modelning o'quv quvvati bilan emas, balki dekodlash strategiyasi bilan belgilanishini ko'rsatadi. Xuddi shu transformer modeli nur qidiruvi bilan 8,60 % WER, global dekoder bilan esa 6,20 % WER beradi — ya'ni modelni umuman o'zgartirmasdan, faqat qidiruv usulini almashtirish orqali 2,4 foiz punktlilik yaxshilanishga erishildi. Bu natija mashina tarjimasida qayd etilgan «qidiruv xatosi» hodisasi [11] bilan mazmunan mos keladi, biroq bizning holatimizda uning manbai boshqacha: neyron model o'zi qat'iy lingvistik qonuniyatni o'rganib olmaydi, chunki o'qitish korpusida bu qonuniyat statistik tendensiya sifatida namoyon bo'ladi, qat'iy qoida sifatida emas.

Ikkinchi muhim jihat — sertifikatlanuvchanlik. Raqamlashtirish loyihalarida natijaning sifati emas, balki sifat haqidagi kafolat ko'pincha muhimroq bo'ladi: arxiv xodimi qaysi jumlani



tekshirishi kerakligini bilishi lozim. Taklif etilgan yondashuv har bir jumla uchun miqdoriy kafolat beradi va shu bilan avtomatik tizimni ekspert ish oqimiga integratsiya qilish masalasini yechishni osonlashtiradi.

Uchinchidan, yondashuv modeldan mustaqil: (1) va (2) ballari istalgan boshqa model bilan almashtirilishi mumkin, cheklovlar tizimi esa o'zgarishsiz qoladi. Bu uni turkiy tillarning arab yozuvli tarixiy shakllari — usmonli turk, uyg'ur, qozoq matnlariga ko'chirish imkonini beradi, chunki singarmonizm bu tillarning barchasiga xosdir.

Ishning cheklovlari. Birinchidan, cheklovlarning to'g'riligi morfologik tahlilchining aniqligiga bog'liq; uning xatolari qoldiq 0,30 % buzilishning asosiy manbaidir. Ikkinchidan, singarmonizm eski o'zbek yozma tilida ham to'liq izchil emas: arab-fors o'zlashmalari va ayrim badiiy matnlarda qoidadan chetlanishlar uchraydi, shuning uchun cheklovlarni qat'iy emas, balki yuqori jarimali yumshoq shaklda qo'llash varianti kelgusi tadqiqotlarda o'rganilishi kerak. Uchinchidan, hisoblash xarajati nur qidiruvdan ikki baravar yuqori, garchi u amaliy talablar doirasida qolsa ham.

5. XULOSALAR

Ishda eski o'zbek yozuvidan lotin grafikasiga o'tkazish masalasi jumla darajasidagi cheklangan global optimallashtirish masalasi sifatida qo'yildi va butun sonli chiziqli dasturlash modeliga keltirildi. Modelning boshlang'ich masalaga ekvivalentligi, Lagranj dual funksiyasining yuqori chegara ekanligi va algoritmning $O(T \cdot nK \log K)$ murakkabligi isbotlandi.

156 000 juftlikdan iborat korpusdagi tajribalar taklif etilgan GDT-ILP algoritmi eng kuchli bazaviy tizimga nisbatan CER ni 2,50 % dan 2,10 % gacha, WER ni 7,40 % dan 6,20 % gacha kamaytirishini, singarmonizm buzilishlarini esa 3,90 % dan 0,30 % gacha pasaytirishini ko'rsatdi. Jumalarning 94,6 % i uchun global optimallik sertifikatlangan holda tasdiqlandi — bu xususiyat mavjud dekodlash usullarida yo'q.

Algoritm asosida PyQt6 va OR-Tools texnologiyalarida dasturiy majmua yaratildi. Kelgusi ishlarda cheklovlarni yumshoq jarimalar bilan birlashtirish, morfologik tahlilchi bilan qo'shma o'qitish hamda yondashuvni boshqa turkiy tillarning arab yozuvli merosiga kengaytirish ko'zda tutilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Rahimov, A.; Karimov, D. Rule-based transliteration of Chagatai manuscripts into modern Uzbek Latin script. *Journal of Digital Humanities in Central Asia*, 2022, 4, 55–71.
2. Yusupov, S.; Tursunov, B. A dictionary-driven approach to Perso-Arabic Uzbek text conversion. *International Journal of Asian Language Processing*, 2021, 31, 1–18.
3. Mohri, M.; Pereira, F.; Riley, M. Speech recognition with weighted finite-state transducers. In *Springer Handbook of Speech Processing*; Springer: Berlin, Germany, 2008; pp. 559–584.
4. Hulden, M. Finite-state machine construction methods and algorithms for phonology and morphology. PhD thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 2009.
5. Bahdanau, D.; Cho, K.; Bengio, Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. In *Proceedings of ICLR*, San Diego, CA, USA, 2015.
6. Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N. et al. Attention is all you need. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA, 2017; pp. 5998–6008.



7. Wu, S.; Cotterell, R.; Huiden, M. Applying the transformer to character-level transduction. In Proceedings of EACL, Kyiv, Ukraine, 2021; pp. 1901–1907.
8. Freitag, M.; Al-Onaizan, Y. Beam search strategies for neural machine translation. In Proceedings of the First Workshop on Neural Machine Translation, Vancouver, Canada, 2017; pp. 56–60.
9. Shen, L.; Sarkar, A.; Och, F. Discriminative reranking for machine translation. In Proceedings of NAACL-HLT, Boston, MA, USA, 2004; pp. 177–184.
10. Boeschoten, H.; Vandamme, M. Chaghatay. In The Turkic Languages; Johanson, L., Csató, É., Eds.; Routledge: London, UK, 1998; pp. 166–178.
11. Stahlberg, F.; Byrne, B. On NMT search errors and model errors: cat got your tongue? In Proceedings of EMNLP-IJCNLP, Hong Kong, China, 2019; pp. 3356–3362.
12. Rush, A.; Sontag, D.; Collins, M.; Jaakkola, T. On dual decomposition and linear programming relaxations for natural language processing. In Proceedings of EMNLP, Cambridge, MA, USA, 2010; pp. 1–11.
13. Koo, T.; Rush, A.; Collins, M.; Jaakkola, T.; Sontag, D. Dual decomposition for parsing with non-projective head automata. In Proceedings of EMNLP, Cambridge, MA, USA, 2010; pp. 1288–1298.
14. Heafield, K. KenLM: faster and smaller language model queries. In Proceedings of the Sixth Workshop on Statistical Machine Translation, Edinburgh, UK, 2011; pp. 187–197.
15. Perron, L.; Furnon, V. OR-Tools: Google optimization tools, version 9.8; Google: Mountain View, CA, USA, 2023.
16. Roth, D.; Yih, W. Integer linear programming inference for conditional random fields. In Proceedings of ICML, Bonn, Germany, 2005; pp. 736–743.

IP TARMOQLARIDA IPTV XIZMATLARI ARXITEKTURASI VA VIDEO UZATISH SIFATINI TAHLIL QILISH

Baymatova.N.T¹, Begmurodov.M.N²

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

mukhammadjonbegmurodov@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada IPTV (Internet Protocol Television) texnologiyasining asosiy tamoyillari, arxitekturasini va tarkibiy qismlari tahlil qilinadi. IPTV xizmatlarini tashkil etishda bosh stansiya, kodlash tuguni, VoD tizimi, Middleware platformasi, abonent qurilmalari hamda shartli kirish tizimining o'rni ko'rib chiqiladi. Shuningdek, IP tarmoqlari orqali video uzatishda xizmat sifati ko'rsatkichlari, xususan paket yo'qotilishi, kechikish va jitter parametrlarining video tasvir sifatiga ta'siri tahlil qilinadi. Olingan natijalar IPTV xizmatlarini samarali tashkil etish uchun tarmoq resurslarini to'g'ri rejalashtirish va QoS mexanizmlarini qo'llash muhimligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar. IPTV, NGN, IP tarmog'i, video uzatish, QoS, VoD, Middleware, Set-Top Box, multicast, paket yo'qotilishi.



1.KIRISH

IPTV (Internet Protocol Television) xizmatlari keyingi avlod aloqa tarmoqlari - NGN (Next Generation Network) asosida tashkil etiladigan multiservis tarmoqlarida TCP/IP texnologiyasi yordamida amalga oshiriladi. NGN konsepsiyasi operatorlarga turli xil xizmatlarni taqdim etish uchun keng imkoniyatlar yaratadi. Shu bilan birga, bunday tarmoqlarda xizmat ko'rsatish sifatini baholash va nazorat qilish masalasi ham muhim ahamiyat kasb etadi. IPTV xizmatlari foydalanuvchilar orasida tobora ommalashib borayotganligi sababli, uning trafigi ham tez sur'atlarda ortib bormoqda. Natijada IPTV trafigi IP tarmoqlaridagi boshqa an'anaviy xizmatlar bilan tarmoq resurslari uchun raqobatlasha boshlaydi. Bu holat esa xizmat ko'rsatish sifati ko'rsatkichlariga, xususan, video ma'lumotlarni yetkazib berish sifatiga ta'sir qiladi. Shu sababli, IP tarmoqlari orqali uzatiladigan video xizmatlar sifatini baholash muammosi dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

2. IPTV ARXITEKTURASI

Bugungi kunda telekommunikatsiya bozorida uskuna va dasturiy ta'minotning yetakchi ishlab chiqaruvchi va yaratuvchi kompaniyalari tomonidan aloqa operatorlarining barcha talablariga javob beradigan bir qator IPTV yechimlari taqdim etilmoqda. Taklif qilinayotgan yechimlarning xilma-xilligiga qaramay, odatiy IPTV majmuasini tashkil etuvchi bir qator tarkibiy qismlarni aniq ajratib ko'rsatish mumkin [1].

IPTV majmuasining asosiy tarkibiy qismlari quyidagilardir:

- Asosiy stansiya (HeadEnd) va kodlash tuguni;
- Talab bo'yicha video (Video on Demand) quyi tizimi;
- Servis platformasi (Middleware);
- Abonent qurilmasi (Set-Top Box);
- Shartli kirish (Conditional Access System) quyi tizimi.

Uzatish tarmog'ini turli usullarda qurish mumkin. Unga qo'yiladigan asosiy talablarni quyidagicha ifodalash mumkin:

Yetarli o'tkazuvchanlik qobiliyati:

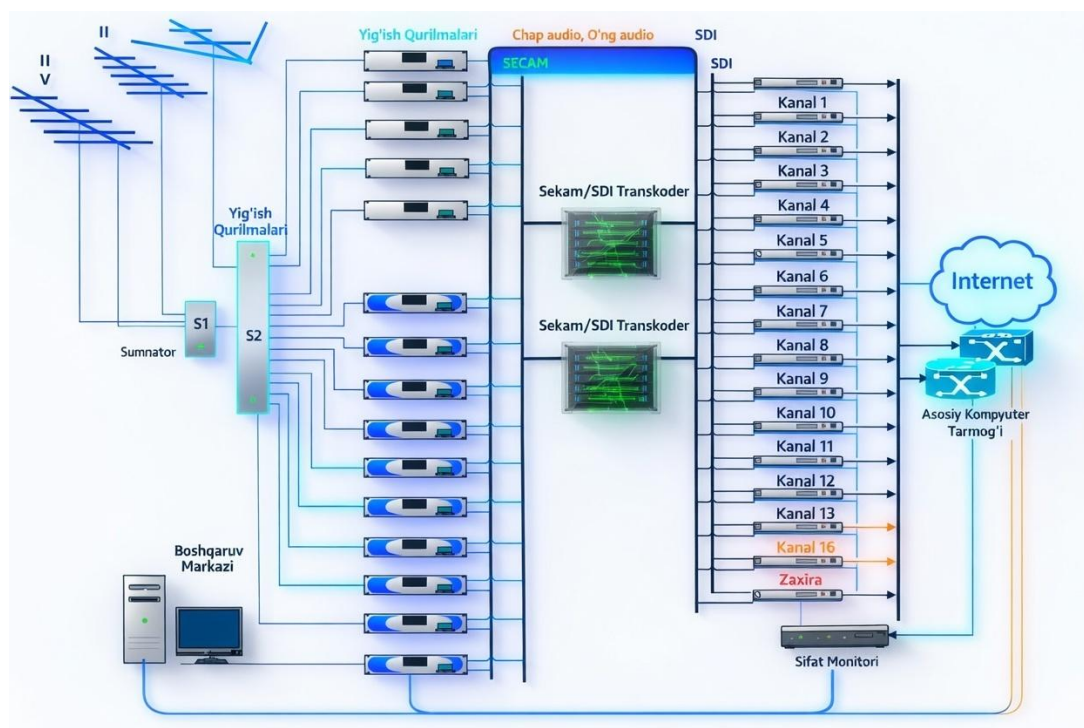
- O'rtacha statistik televizorda maqbul tasvir sifatiga erishish uchun MPEG2 formatiga kamida 4 Mbit/s, MPEG4 formatiga esa kamida 2,5 Mbit/s tezlik talab etiladi;
- Multicast'ni butun tarmoq bo'ylab qo'llab-quvvatlash. Bu IPTV xizmatlarini joriy etishning majburiy shartidir;
- QoS mexanizmlarini uzluksiz qo'llab-quvvatlash. O'tkazuvchanlik qobiliyati resurslarini hisoblash uchun zarur. Agar yetarli o'tkazuvchanlik qobiliyatidan foydalanilsa, xizmat ishlaydi, biroq bunda ustuvor trafikni ham hisobga olish kerak.

Asosiy stansiya va kodlash tuguni. Qulaylik uchun bosh stansiya va kodlash tuguni bitta hududda joylashgan bo'lib, turli manbalardan signallarni qabul qiladi, o'zgartiradi hamda IP-multicast / IP-unicast oqimlarini shakllantiradi. Kontentni real vaqt rejimida qabul qiluvchi uskuna sun'iy yo'ldosh antennalari, chastotali qabul qilgichlar va hokazolar yordamida turli manbalardan audiovizual oqimlarni oladi. Zarurat tug'ilganda, ularni shifrlaydi, dekodlaydi, raqamlashtiradi va IP-paketlarga o'rovchi uskunaga - IP Streamer'ga yo'naltiradi.

Bosh stansiya tarkibiy qismlari:

- Antenna posti - efir stansiyalari va sun'iy yo'ldoshlardan signallarni qabul qilishni ta'minlaydi;
- Raqamli sun'iy yo'ldosh qabul qilgichlari - deskriptorlar - Antenna postidan olingan raqamli signallarni dekodlaydi va materiallarni Strimer/multipleksorga uzatadi;
- Raqamli kodlash uzeli - analog va raqamli signallarni MPEG formatida kodlaydi hamda materiallarni Strimer/multipleksorga uzatadi;
- Strimer / multipleksor - Bosh stansiyaning asosiy elementi bo'lib, materiallarni multiplekslaydi va har bir kanal o'zining noyob manzili hamda IP-uzatish portiga ega bo'ladigan tarzda IP-uzatishni amalga oshiradi.

1-rasmda antenna posti yonida joylashgan televizion kanallarni kodlash tugunining sxemasi keltirilgan. 474-642 MHz chastota diapazonida signalni sifatli qabul qilish uchun qabul qilish nuqtasiga bir nechta efir antennasi (har biri o'z diapazoni uchun) o'rnatiladi.[2] So'ngra ushbu antennalardan kelayotgan signallar jamlanadi va guruhli analog signal faol splitterlar tizimi orqali professional efir qabul qilgichlarining kirish qismiga uzatiladi. Qabul qilgichlarning chiqish qismidan SECAM rangli kodlash formatidagi analog videotsignal SDI formatiga o'tkazish uchun transkoderga yuboriladi. Shunday qilib, siqish koderlariga SDI formatidagi signal hamda analog audio signallar (alohida chap va o'ng kanallar) uzatiladi. Koderlar signallarni MPEG-2 va MPEG-4 standartlari bo'yicha siqish uchun xizmat qiladi. Har bir koderning chiqish qismidan transport video oqimlari kommutatorlarga kelib tushadi. Ularning vazifasi koderlardan keladigan trafikni jamlab, operator tarmog'iga qayta yo'naltirishdan iborat. Ushbu rasmda kodlash tugunining aniq texnik yechimi ko'rsatilgan.



1-rasm. Televizion kanallarni kodlash jarayoni



Talab bo'yicha video (VOD) quyi tizimi VOD quyi tizimining vazifasi foydalanuvchi so'roviga binoan videomateriallarni yozib olish va ijro etishdan iborat.

VoD tizimining asosiy tarkibiy qismlari quyidagilardir:

- Markaziy tugun - qoida tariqasida, shartli kirish tizimi va bosh stansiyaga bevosita mantiqiy yaqinlikda, ya'ni tarmoqning “markazida” joylashgan apparat-dasturiy majmua.

- Kontentni boshqarish tizimi - videoservertlar va kontent taqsimotini boshqaruvchi dasturiy ta'minot.

- Videoservert – ma'lum bir hududda, masalan, bitta agregatsiya tuguni doirasida foydalanuvchilar guruhlariga xizmat ko'rsatish uchun o'rnatiladigan apparat-dasturiy majmua.

Oldindan kodlash tizimi orqali shifrlangan VoD kontenti va metama'lumotlar tugunga kelib tushadi hamda saqlash tizimida saqlanadi.

Metama'lumotlar - raqamli televideniyeining muhim tarkibiy qismlaridan biridir. IPTV tizimlarida abonentning talabiga binoan unga dastur yoki filmning batafsil tavsifi, treylari va posteri istalgan vaqtda, jumladan, “efirga chiqishidan” ancha oldin ham taqdim etilishi mumkin. Kontentni boshqarish tizimi yordamida kontent belgilangan qoidalarga muvofiq videoservertlarga taqsimlanadi.

Foydalanuvchidan kontentni uzatish bo'yicha so'rov kelib tushgach, CAS autentifikatsiya jarayonlaridan so'ng, middleware kontentni boshqarish tizimidan o'z bazasida foydalanuvchiga kerakli kontent mavjud bo'lgan eng yaqin bo'sh videoservertlarga havolani oladi [3]. Shu tariqa tarmoq yadrosidagi unicast trafiki minimallashtiriladi, chunki “talab bo'yicha video” uzatishning aksariyat qismi foydalanuvchiga eng yaqin joylashgan mahalliy videoservertdan amalga oshiriladi. Tarmoq yadrosida xizmat trafiki hamda markaziy tugun va videoservertlar o'rtasida videokontentni taqsimlash trafiki aylanadi, uning hajmi juda kichik bo'lgani uchun tarmoqqa jiddiy talablar qo'ymaydi.

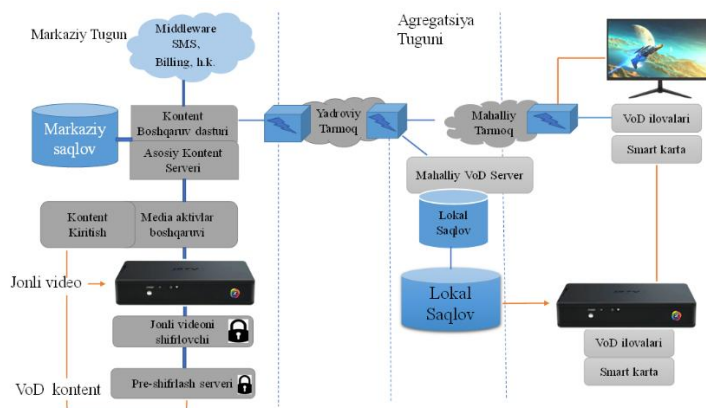
VoD tizimini rejalashtirish tarmoq arxitekturasida va yuklanishi bilan bog'liqdir. Markaziy tugun asosan kontentni qabul qilib, uni periferik serverlarga tarqatish, shuningdek, periferik videoservertlarning funktsionalligi yetarli bo'lmagan hollarda foydalanuvchi so'rovlariga ishlov berish uchun xizmat qiladi. “Talab bo'yicha video” xizmatlarini rivojlantirishning birinchi bosqichida foydalanuvchilarga xizmat ko'rsatish uchun markaziy tugundan foydalanish mumkin. Kelgusida abonentlar bazasi kengayishi bilan agregatsiya tugunlariga videoservertlar o'rnatish zarur bo'ladi.

2-rasmda VoD videoservertlar tizimi ko'rsatilgan. Kontentni boshqarish tizimi (CMS) yordamida kontent belgilangan qoidalarga muvofiq videoservertlarga taqsimlanadi. Foydalanuvchidan kontentni uzatish bo'yicha so'rov kelib tushgach, Shartli kirish tizimi (CAS) autentifikatsiya jarayonlaridan so'ng, Middleware CMS'dan o'z bazasida foydalanuvchiga kerakli kontent mavjud bo'lgan eng yaqin bo'sh serverlarga havolani oladi. Shu tariqa tarmoqdagi unicast trafiki minimallashtiriladi.

Middleware servis platformasi. Middleware - bu IPTV yechimining barcha tarkibiy qismlarini boshqarishni ta'minlovchi hamda taqdim etiladigan xizmatlarni boshqarish va ma'muriyatchilik vazifalarini soddalashtirishga xizmat qiladigan dasturiy-apparat majmuasidir [4]. Middleware quyidagilarni amalga oshirish imkonini beradi:

- Abonentni avtorizatsiyalash;
- EPG ko'rsatuvlar dasturini shakllantirish;

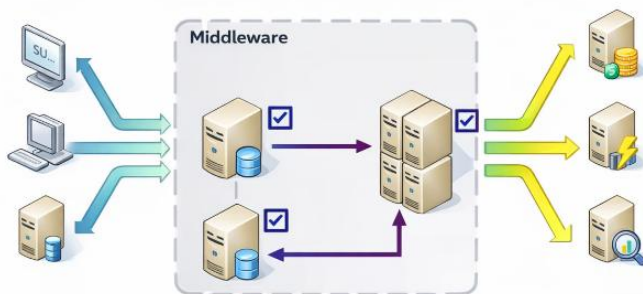
- IPTV yechimining interfeysi va boshqaruv vositalarini shakllantirish;
- CAS, VOD tizimlari, bosh stansiya, STB qurilmalari bilan o‘zaro aloqa;
- Billing tizimlari va aloqa operatorining biznesni qo‘llab-quvvatlash tizimlari bilan o‘zaro hamkorlik.



2-rasm. VoD video server tizimi

Middleware ochiq arxitekturaga ega bo‘lib, bu yechim komponentlarini tezkor miqyoslash va xizmatlar doirasini kengaytirish imkonini beradi. 3-rasmda zaxira nusxalarsiz o‘rnatish uchun mo‘ljallangan Middleware apparat arxitekturasi ko‘rsatilgan. Mazkur konfiguratsiyaning ishlashi uchun uchta server talab etiladi. Barcha serverlar bitta server shassisiga o‘rnatiladi. Middleware IPTV tizimiga yagona kirish nuqtasi hisoblanadi. U orqali tizimning barcha komponentlari (VoD, CAS va h.k.) bilan ham, tashqi komponent va tizimlar (billing tizimlari, administrator ish stansiyasi va h.k.) bilan ham o‘zaro aloqa qilinadi. Middleware ommaviy tarmoqdan xususiy tarmoqqa, ya’ni Middleware joylashgan tarmoqqa ilova serverlariga kirishni ta’minlaydigan kirish shlyuzidan iborat. Ilova serverlari barcha so‘rovlarga ishlov beradi, hisob-kitoblarni amalga oshiradi va boshqa axborot tizimlariga murojaat qiladi [5],[6]. Foydalanuvchilar haqidagi barcha ma’lumotlar va ularning so‘rovlari tarixi ma’lumotlar bazasida saqlanadi.

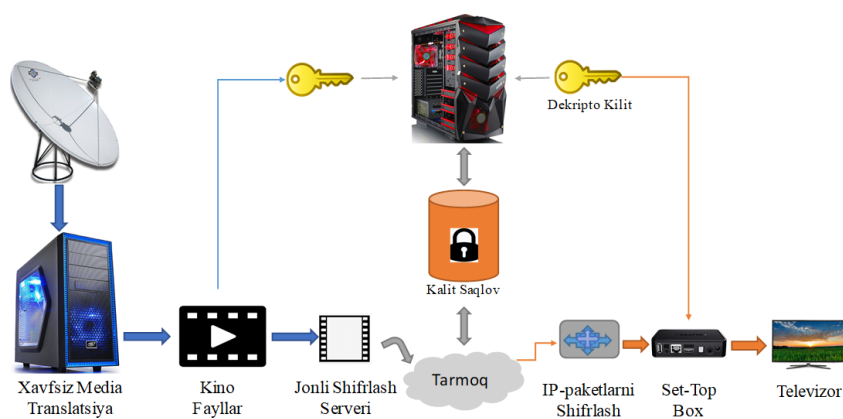
Abonent qurilmalari. STB (Set-top-Box) - audio va video materiallarni shakllantirish, yetkazib berish tizimlari hamda abonent televizori o‘rtasidagi bog‘lovchi vositadir. STB – bu operatsion tizim, veb-brauzer va MPEG-dekoderga ega mini-kompyuter. Qurilma tizimning barcha tarkibiy qismlari bilan o‘zaro ishlashi uchun muayyan loyihaga integratsiya qilinishi lozim [7].



3-rasm. Middleware qurilma arxitekturasi

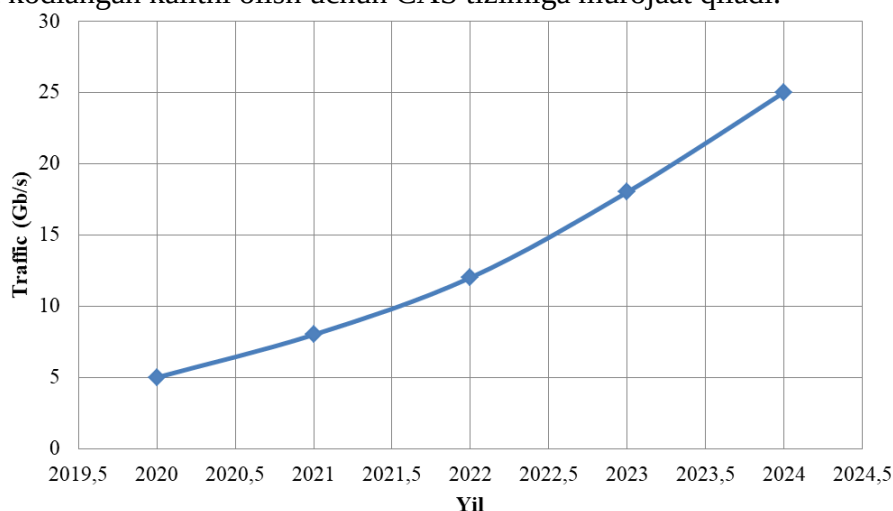


Shartli kirish quyi tizimi (Conditional Access System). Shartli kirish tizimi – efir, kabel va sun'iy yo'ldosh aloqa tarmoqlari orqali teleko'rsatuv tarkibida tarqatiladigan audiovizual hamda boshqa xabar va materiallarni himoya qilishning texnik vositasidir. Shuningdek, CAS foydalanuvchining multimedia xizmatlaridan foydalanishini cheklash, mualliflik huquqlariga rioya qilish va kontentni ruxsatsiz kirish/nusxalashdan himoyalash imkonini beradi. 4-rasmida “yo'l-yo'lakay” amalga oshiriladigan translyatsiya kontentini shifrlash sxemasi ko'rsatilgan. Bosh stansiyadan multicast rejimida uzatiladigan translyatsiya kontenti (telekanallar) xizmat ko'rsatuvchi VLAN'da ochiq holda mavjud bo'ladi. Translyatsiya kanallarini shifrlash serverlari ochiq kanallarning multikast guruhlariga a'zo bo'ladi va ularni MPEG darajasida shifrlaydi. Kanalni shifrlash natijasi – umumiy tarmoqda yangi multikast guruhining paydo bo'lishidir[8],[9]. Abonent STB qurilmalari yuklanish vaqtida o'zlari a'zo bo'lgan kanallar kalitlarini oladi va vaqti-vaqti bilan yangilab turadi. Kanallarni almashtirishda kalitlar uchun murojaat qilinmaydi, bu esa ushbu jarayonni tezlashtiradi.



4-rasm. Efir kanallarini shifrlash

Talabga ko'ra video (VOD) kontentini shifrlash efir kontentini shifrlashdan farq qiladi. Har bir videofayl shartli ruxsat tizimi (CAS) tomonidan oldindan shifrlanadi va distributsiya tizimi orqali videoserverlarga yuboriladi. Keyinchalik, kontentni ko'rish vaqtida STB qurilmasi mazkur kontent kodlangan kalitni olish uchun CAS tizimiga murojaat qiladi.

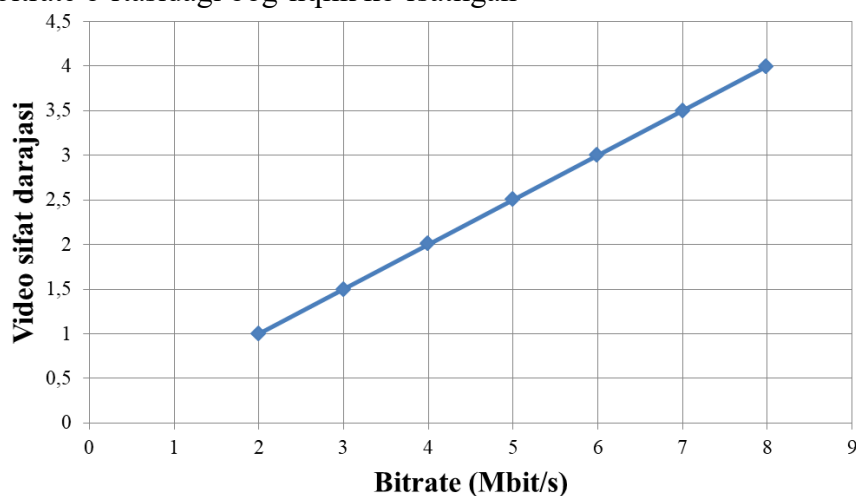


5-rasm. IPTV trafikining vaqt bo'yicha o'sishi



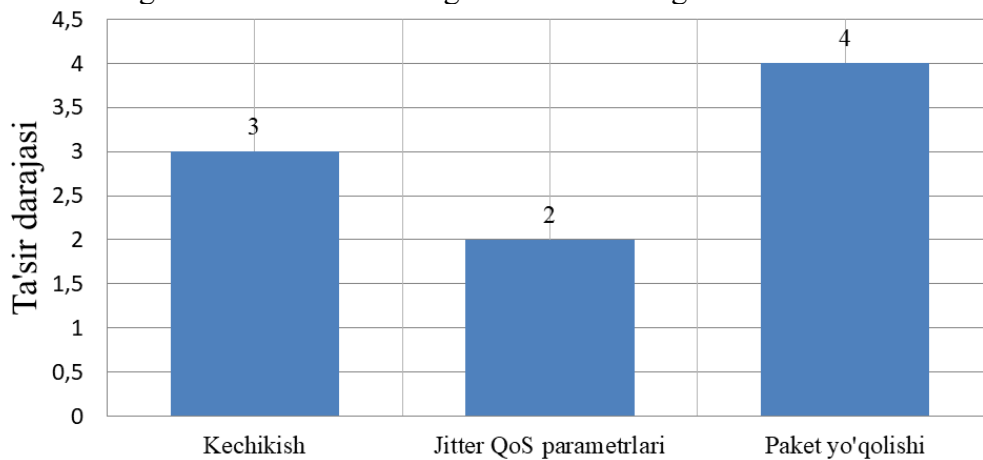
IPTV xizmatlarining keng tarqalishi natijasida tarmoq trafigi yil sayin ortib bormoqda. Video kontentga bo'lgan talabning oshishi IP tarmoqlarida uzatiladigan ma'lumotlar hajmining sezilarli darajada ko'payishiga olib kelmoqda. Bu holat tarmoq o'tkazuvchanlik qobiliyatiga va xizmat sifatiga qo'yiladigan talablarni yanada oshiradi. 5-rasmda IPTV trafikining yillar bo'yicha o'sish dinamikasi keltirilgan [10].

IPTV xizmatlarida video tasvir sifati asosan uzatilayotgan video oqimining bitrate qiymatiga bog'liq. Bitrate oshishi bilan tasvirning aniqligi va barqarorligi yaxshilanadi, biroq bu tarmoq resurslariga qo'yiladigan talabni ham oshiradi. Shu sababli IPTV tizimlarini loyihalashda bitrate va tarmoq o'tkazuvchanligi o'rtasidagi muvozanatni ta'minlash muhim hisoblanadi. 6-rasmda video sifati va bitrate o'rtasidagi bog'liqlik ko'rsatilgan



6-rasm. Bitrate va video sifati o'rtasidagi bog'liqlik.

IPTV xizmatlarining barqaror ishlashi IP tarmoqlarida xizmat sifati ko'rsatkichlariga bevosita bog'liq. Ayniqsa, paketlarning yo'qolishi, uzatishdagi kechikish va jitter kabi parametrlar video oqimining sifatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ushbu ko'rsatkichlarning me'yoriy darajada bo'lishi foydalanuvchilarga sifatli video xizmatlarini taqdim etishda muhim ahamiyatga ega. 7-rasmda QoS parametrlarining IPTV xizmatlari sifatiga ta'siri ko'rsatilgan.



7-rasm. QoS parametrlarining IPTV xizmat sifatiga ta'siri



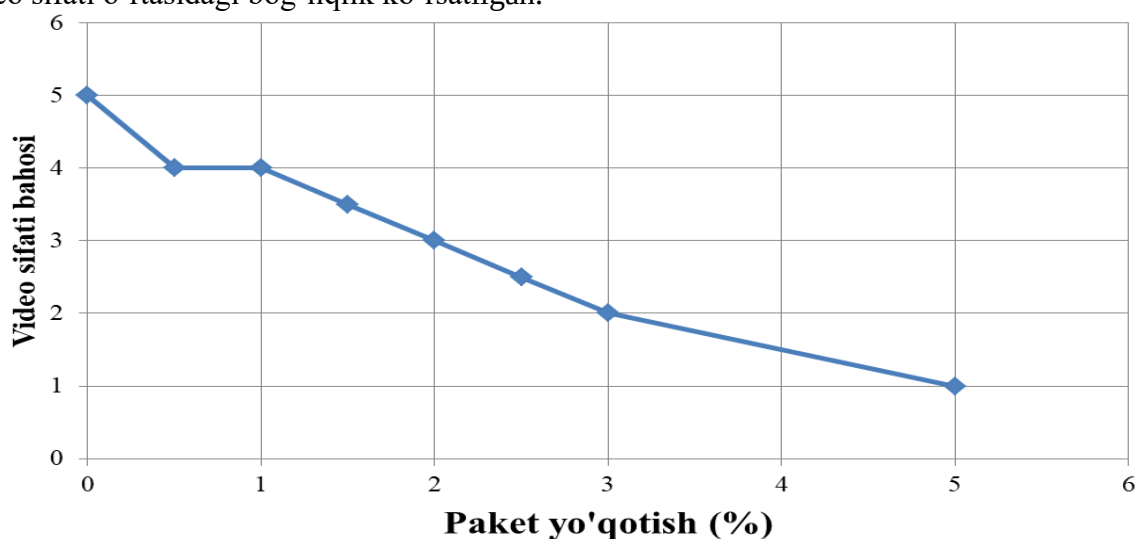
IPTV xizmatlarida video uzatish sifati tarmoqdagi paketlarning yetib borish darajasiga bevosita bog'liq. Paketlarning yo'qolishi video oqimining uzilishiga, tasvir sifati pasayishiga hamda foydalanuvchi tajribasining yomonlashishiga olib keladi. Shu sababli IPTV tarmoqlarini loyihalashda paket yo'qotilishi darajasini nazorat qilish muhim ahamiyatga ega [11]. 1-jadvalda paket yo'qotilishi darajasi va video sifati o'rtasidagi bog'liqlik keltirilgan.

1-jadval.
Paket yo'qotilishi va video sifati o'rtasidagi bog'liqlik

No	Paket yo'qotilishi (%)	Video sifati
1.	0	Juda yuqori
2.	0.5	Yuqori
3.	1	Yaxshi
4.	2	O'rtacha
5.	3	Past
6.	5	Juda past

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, paket yo'qotilishi darajasi ortishi bilan video tasvir sifati sezilarli darajada pasayadi. Shu sababli IPTV xizmatlarini samarali tashkil etish uchun tarmoqda paket yo'qotilishi darajasini minimal qiymatda ushlab turish zarur.

IP tarmoqlari orqali video uzatishda paketlarning yo'qolishi tasvir sifatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Paket yo'qotilishi ortishi bilan video oqimining barqarorligi pasayadi va tasvirda uzilishlar yoki buzilishlar paydo bo'lishi mumkin. Shu sababli IPTV tizimlarida paket yo'qotilishi darajasini minimal qiymatda ushlab turish muhim hisoblanadi. 8-rasmda paket yo'qotilishi va video sifati o'rtasidagi bog'liqlik ko'rsatilgan.



8-rasm. Paket yo'qotilishi va video sifati o'rtasidagi bog'liqlik



Mazkur maqolada IPTV tizimining arxitekturasini, uning asosiy tarkibiy qismlari hamda ishlash prinsiplari ko'rib chiqildi. IPTV xizmatlarini tashkil etishda bosh stansiya, kodlash tuguni, VoD tizimi, Middleware platformasi, abonent qurilmalari hamda shartli kirish tizimi muhim ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi. Ushbu komponentlarning o'zaro uyg'un ishlashi foydalanuvchilarga sifatli multimedia xizmatlarini taqdim etishni ta'minlaydi.

Tahlillar shuni ko'rsatdiki, IP tarmoqlari orqali video uzatishda xizmat sifati ko'rsatkichlari - paket yo'qotilishi, kechikish va jitter kabi parametrlar muhim rol o'ynaydi. Paket yo'qotilishi darajasi ortishi video tasvir sifatining pasayishiga olib keladi. Shu sababli IPTV xizmatlarini samarali tashkil etish uchun tarmoq o'tkazuvchanlik qobiliyatini to'g'ri rejalashtirish hamda QoS mexanizmlarini qo'llash zarur.

3. XULOSA

Natijada, IPTV texnologiyasidan foydalanish telekommunikatsiya tarmoqlarida multimedia xizmatlarini kengaytirish va foydalanuvchilarga yuqori sifatli video xizmatlarini taqdim etish imkonini beradi. Kelgusida IPTV tizimlarining samaradorligini oshirish uchun tarmoq resurslarini optimallashtirish va xizmat sifatini monitoring qilish usullarini takomillashtirish muhim hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Stallings W. High-Speed Networks and Internets: Performance and Quality of Service.— 2nd ed. — New Jersey: Prentice Hall, 2002.
2. Parsons J. The Multimedia Internet: Broadcasting over IP.— Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
3. Cisco Systems. IPTV Architecture and Deployment Guide.— Cisco Press, 2013.
4. ITU-T Recommendation Y.1910. IPTV Functional Architecture.— International Telecommunication Union, Geneva, 2008.
5. Кривошеев М.И., Федунин В.Г. Интерактивное телевидение. — М.: Радио и связь, 2000.
6. Степанов А. IP и TV новые возможности для вещателей или телесмотрение без вещателей // Broadcasting. 2007.
7. Пескин А.Е., Труфанов В.Ф. Мировое вещательное телевидение, стандарты и системы. Справочник. — М.: Горячая линия – Телеком, 2004.
8. Ричардсон Я. Мир цифровой обработки. — М.: Техносфера, 2005.
9. Смирнов А.В., Пескин А.Е. Цифровое телевидение от теории к практике. — М.: Горячая линия – Телеком, 2004.
10. Локшин Б.А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю. — М.: Сайрус-Системс, 2001.
11. Косарев А.В. Бизнес-процессы при реализации проекта IPTV // Вестник связи. 2007. №4.



CHEKLANGAN MUHITLAR UCHUN MIRACL KRIPTOGRAFIK KUTUBXONASI TAHLILI

B.N. Raximov¹, A.A. Komilov² va N.T. Boboyev^{2,*}

¹ Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va harbiy aloqa instituti;
brah2008@rambler.ru

² Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va harbiy aloqa instituti;
alisher.abdumannob@gmail.com

³ Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va harbiy aloqa instituti;
mrkhanzo9797@gmail.com

Annotatsiya: Ochiq kalitli kriptografiya raqamli xavfsizlikning tayanch texnologiyalaridan biri bo'lib, hisoblash quvvati, xotira va energiya iste'moli cheklangan qurilmalarda uni amalga oshirish alohida ahamiyat kasb etadi. Ushbu ishning maqsadi MIRACL (Multiprecision Integer and Rational Arithmetic Cryptographic Library) kriptografik kutubxonasining cheklangan muhitlardagi arxitekturasini, imkoniyatlarini va amaliy qo'llash jihatlarini baholashdan iborat. Tadqiqot MIRACL rasmiy repozitoriysining manba kodini, loyiha hujjatlarini hamda tegishli ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish usuliga asoslanadi; katta sonlar arifmetikasi, chekli maydonlar, elliptik egri chiziqlar, juftlik asosidagi kriptografiya, RSA, IEEE P1363, platforma konfiguratsiyasi va litsenziyalash modeli ko'rib chiqildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, MIRACL'ning past darajadagi hisoblash nazorati va keng kriptografik qamrovi uning asosiy ustunligi hisoblanadi, biroq klassik kod bazasining rivojlanish holati, AGPLv3 litsenziyasi va zamonaviy xavfsizlik talablari yangi loyihalarda qo'shimcha baholashni taqozo etadi. Xulosa sifatida, klassik MIRACL ta'limiy va tarixiy ahamiyatini saqlab qolgan holda, yangi tizimlar uchun uning rasmiy vorisi miracl/core hamda RELIC, libsodium/NaCl, OpenSSL va PBC kabi muqobillar bilan qiyosiy baholash zarurligi asoslandi.

Kalit so'zlar: MIRACL; elliptik egri chiziqlar kriptografiyasi; juftlik asosidagi kriptografiya; RSA; IEEE P1363; cheklangan qurilmalar; ko'mma tizimlar; AGPLv3; miracl/core

1. KIRISH

Ochiq kalitli kriptografiya raqamli xavfsizlikning tayanch texnologiyalaridan biri bo'lib, uning amaliy samaradorligi ko'p hollarda ishlatilayotgan matematik konstruksiyaning hisoblash resurslariga bo'lgan talabiga bog'liq. Elliptik egri chiziqlar kriptografiyasi (ECC) RSA yoki klassik diskret logarifmga asoslangan sxemalarga nisbatan kichikroq kalit o'lchamlarida yetarli xavfsizlik darajasini ta'minlashi sababli hisoblash quvvati, xotira va energiya iste'moli cheklangan muhitlarda muhim vositaga aylangan [1]–[6]. Bunday muhitlarga mobil qurilmalar, smart-kartalar, ko'mma tizimlar, mikrokontrollerlar hamda sanoat nazorat-boshqaruv tizimlari kiradi.

ECC'ning tabiiy kengaytmasi bo'lgan juftlik asosidagi kriptografiya identifikatorga asoslangan shifrlash, qisqa raqamli imzolar va murakkab kalit almashish protokollarini qurish imkonini beradi [7]. Biroq pairing-friendly egri chiziqlar, kengaytirilgan maydonlar va maxsus optimallashtirishlar sababli bunday tizimlarni “noldan” ishlab chiqish xavfi yuqori bo'lib, amaliyotda sinovdan o'tgan kriptografik kutubxonalarga tayanish maqsadga muvofiqdir [8].

MIRACL (Multiprecision Integer and Rational Arithmetic Cryptographic Library) aynan shunday kutubxonalardan biri bo'lib, cheklangan muhitlarda katta sonlar arifmetikasi va kriptografik primitivlarni amalga oshirishga yo'naltirilgan. Tadqiqot sohasining hozirgi holatini



hisobga olganda, klassik MIRACL kod bazasining rivojlanishi to'xtagan va rasmiy vorislik miracl/core loyihasiga o'tgan [10], [12]. Shu sababli ushbu ishning maqsadi klassik MIRACL arxitekturasi, kriptografik qamrovi, platformaga moslashuvchanligi va litsenziyalash modelini manba kodi darajasida baholash hamda uni zamonaviy muqobillar bilan qiyoslashdan iborat. Ishning ahamiyati cheklangan qurilmalar uchun kriptografik kutubxona tanlashda asosli qaror qabul qilishga xizmat qilishida ko'rinadi.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Tadqiqot MIRACL rasmiy repozitoriysining manba kodi, loyiha hujjatlari hamda tegishli ilmiy adabiyotlarni sifatli tahlil qilishga asoslangan [10]. Kutubxona tayyor TLS steki yoki "qora quti" kalit boshqaruvi tizimi emas; u foydalanuvchiga katta sonlar, maydon elementlari va elliptik egri chiziqli nuqtalari bilan ishlash imkonini beruvchi quyi darajadagi kriptografik vositalarni taqdim etadi. Shu sababli dasturchi kerakli protokolni mavjud primitivlardan yig'adi. Bunday dizayn MIRACL'ga yuqori darajadagi kutubxonalarga qaraganda ko'proq moslashuvchanlik beradi, lekin noto'g'ri parametr va noto'g'ri API ishlatilishi xavfini ham oshiradi.

Manba kodining jami 241 ta fayldan iborat ekaniga qaramay, barcha fayllar satrma-satr emas, balki har bir arxitektura mavzusi — umumiy tuzilma, katta sonlar arifmetikasi, maydonlar va egri chiziqlar, pairing, RSA/P1363, platforma konfiguratsiyasi, litsenziya, namuna dasturlar va qurilish tizimi — bo'yicha vakillik qiluvchi fayllar tanlab o'rganildi. Tahlil qilingan klassik repozitordagi oxirgi commit 2019-yil 21-avgustga tegishli. Mustaqil ishlash tezligi, xotira sarfi, kod hajmi bo'yicha benchmarklar hamda konstant-vaqt va yon-kanal xususiyatlari bo'yicha amaliy testlar ushbu ish doirasiga kiritilmadi; shu sababli natijalar tavsiflovchi xulosa sifatida talqin qilinishi lozim [10].

3. NATIJALAR

Umumiy arxitektura

MIRACL C dasturlash tilidagi yadro va ixtiyoriy C++ wrapper qatlamiga ega. Kutubxona qatlamli tuzilishga ega bo'lib, quyi darajadagi qurilish bloklari yuqori qatlamlarga hisoblash poydevori vazifasini bajaradi (1-rasm). Manba kodida RSA, elliptik egri chiziqli imzolari, IEEE P1363 primitivlari hamda BN, BLS, KSS va MNT juftlikka mos egri chiziqlariga oid amalga oshirishlar mavjud.

Katta sonlar arifmetikasi

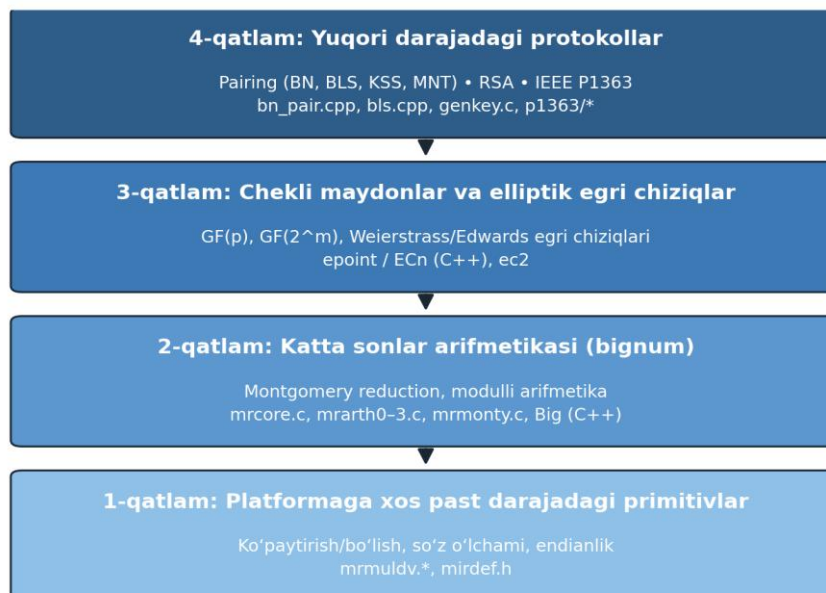
Katta sonlar arifmetikasi MIRACL'ning keyingi qatlamlari uchun asosiy hisoblash poydevorini tashkil qiladi. Yadro arifmetikasi source/mrcore.c hamda mrarth0.c–mrarth3.c fayllar oilasida joylashgan bo'lib, modulli hisoblash uchun source/mrmonty.c faylida Montgomery reduction usuli amalga oshirilgan [27]. Platformaga bog'liq ko'paytirish va bo'lish amallari mrmuldv.* fayllar oilasi orqali ajratilgan; turli protsessorlar uchun alohida variantlarning mavjudligi MIRACL'ning cheklangan qurilmalarda apparatga moslashtirilgan hisoblashni ko'zlaganini ko'rsatadi. C++ qatlamida esa shu funktsionallik Big klassi kabi abstraksiyalar orqali ob'ektga yo'naltirilgan ko'rinishda taqdim etiladi.

Chekli maydonlar va elliptik egri chiziqlar

Katta sonlar qatlamining ustida chekli maydonlar va elliptik egri chiziqlar bilan ishlash imkoniyatlari shakllanadi. MIRACL GF(p) va GF(2^m) maydonlarini hamda Weierstrass tipidagi egri chiziqlarni qo'llab-quvvatlaydi; kutubxona tarkibida Edwards egri chiziqlariga oid amalga



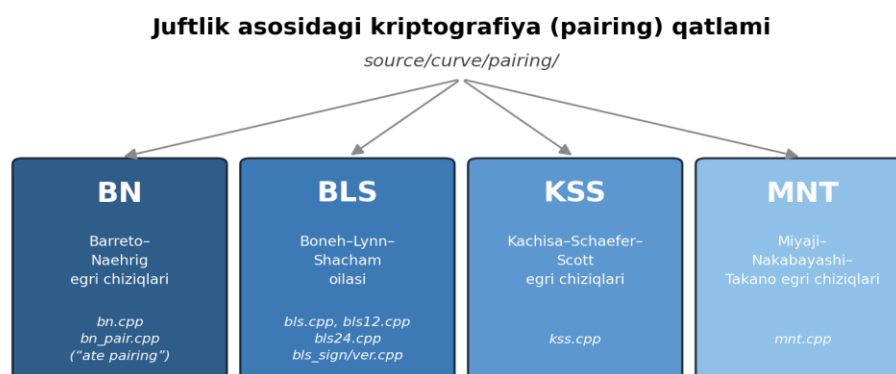
o'shish ham mavjud. C qatlamida $GF(p)$ nuqtalari epoint, C++ qatlamida esa EC_n turi orqali ifodalanadi, $GF(2^m)$ uchun alohida ec2 mexanizmi mavjud. Standart misol egri chiziqlarida $A = -3$ kabi parametrlar tanlangan bo'lsa-da, bu MIRACL'ning barcha egri chiziqlari uchun majburiy cheklov emas; parametr tanlashning o'zi xavfsizlik masalasi ekanini hisobga olish zarur [10].



1-rasm. Miracl kutubxonasi qatlamli arxitekturasini.

Juflilik asosidagi kriptografiya

MIRACL manba kodida BN, BLS, KSS va MNT kabi pairing-friendly egri chiziq oilalari alohida modullar bilan amalga oshirilgan (2-rasm). Masalan, BN bo'yicha bn.cpp va bn_pair.cpp, BLS bo'yicha bls.cpp, bls12.cpp, bls24.cpp hamda imzolash va tekshirish uchun bls_sign.cpp va bls_ver.cpp fayllari mavjud. BLS qisqartmasi bu yerda ikki xil tushunchani — pairing-friendly egri chiziq oilasi va Boneh–Lynn–Shacham qisqa raqamli imzo sxemasini — anglatishi mumkin [17], [18].



2-rasm. MIRACL manba kodida amalga oshirilgan pairing-friendly egri chiziq oilalari.



Pairing imkoniyatlari doirasida autentifikatsiyalangan kalit almashish hamda identifikatorga asoslangan shifrlash bilan bog'liq konstruksiyalar keltirilgan: HIBE, ichki ko'paytmaga asoslangan shifrlash, ciphertext-policy attribute-based encryption va keyword-search encryption kabi namuna amalga oshirishlar mavjud. MNT implementatsiyasi Miyaji, Nakabayashi va Takano ishlariga, BN pairing optimallashtirishlari esa tegishli pairing adabiyotlariga bog'langan [16], [19]. Shu bilan birga, MIRACL kodida ayrim pairing egri chiziqlari uchun tarixiy AES-128 darajasidagi xavfsizlik da'volari uchraydi, biroq zamonaviy ilmiy natijalar ayrim BN-tipidagi egri chiziqlarning samarali xavfsizlik baholarini qayta ko'rib chiqishni talab qilgan [28], [29].

RSA va IEEE P1363 primitivlari

MIRACL ECC va pairing bilan chegaralanmay, RSA va IEEE P1363 standartiga oid primitivlarni ham qamrab oladi. RSA zanjiri genkey.c, encode.c/decode.c, enciph.c/deciph.c kabi dasturlar orqali ko'rsatilgan, shuningdek source/rsat.c mavjud. source/p1363/ modulida diskret-logarifm asosidagi kalit almashish va imzo sxemalari, elliptik egri chiziq analoglari, faktorizatsiyaga asoslangan RSA sxemalari hamda MGF1, PSS, OAEP, KDF, MAC va HMAC kabi yordamchi konstruksiyalar amalga oshirilgan [9].

Platforma konfiguratsiyasi

Kutubxonaning cheklangan qurilmalarga yo'naltirilganligi platforma konfiguratsiya fayllarida yaqqol ko'rinadi (1-jadval). Loyiha tarkibida arm.txt, pic32.txt, st22.txt, smartmip.txt, blackfin.txt va texasdsp.txt kabi platforma hujjatlari mavjud; SmartMIPS misolida taxminan 16 KB operativ xotira cheklovi alohida qayd etilgan. mirdef.h mexanizmi MIRACL 32/MIRACL 64, so'z o'lchami, endianlik va assemblerdan foydalanish kabi parametrlarni markazlashtiradi, mrmuldv.* fayllari esa mos past darajadagi arifmetik variantni tanlashga xizmat qiladi [10].

1-jadval.

MIRACL repozitoriyasidagi platforma konfiguratsiya fayllari.

Fayl	Maqsadli platforma	Izoh
arm.txt	ARM mikroprotsessori	ARM arxitekturasi uchun qurish sozlamalari
pic32.txt	Microchip PIC32	32-bitli mikrokontroller konfiguratsiyasi
st22.txt	STMicroelectronics ST22	Smart-karta protsessori
smartmip.txt	SmartMIPS	~16 KB operativ xotira cheklovi qayd etilgan
blackfin.txt	Analog Devices Blackfin	DSP arxitekturasi
texasdsp.txt	Texas Instruments DSP	Raqamli signal protsessori

Namuna dasturlar va qurilish tizimi

MIRACL bilan birga keladigan namuna dasturlar uning amaliy va ta'limiy imkoniyatlarini kengaytiradi: repozitoriyda faktorizatsiya algoritmlari, DSA oilasi, $GF(p)$ va $GF(2^m)$ ustidagi ECC imzolari, egri chiziq generatsiyasi va nuqta sanash vositalari, Cramer-Shoup shifrlash sxemasi, tezkor oldindan hisoblash vositalari, pairing, AKE va IBE namunalari mavjud. Qurilish tizimi Makefile yoki CMake asosidagi yagona avtomatik modeldan ko'ra platformaga xos skriptlar bilan tashkil etilgan. Masalan, linux.txt C ilovalarini miracl.a statik kutubxonasiga, C++ dasturlarini esa bir qator qo'shimcha obyekt fayllariga bog'lashni ko'rsatadi. Bunday yondashuv



portativlikni ta'minlagan bo'lsa-da, zamonaviy CI/CD muhitiga moslashishda qo'shimcha muhandislik ishlarini talab qilishi mumkin [10].

Litsenziyalash modeli

Tahlil qilingan manba fayllari GNU Affero General Public License, version 3 (AGPLv3) ostida tarqatilishini ko'rsatadi va sarlavha qismlarida tijorat litsenziyasi ham alohida variant sifatida ko'rsatilgan. AGPLv3 GPLv3 bilan solishtirganda tarmoq orqali xizmat ko'rsatish holatlariga ham qo'shimcha talablar qo'yishi mumkin [30], [31]. Shu sababli MIRACL'ni serverda ishlaydigan yopiq manbali tijorat xizmatiga yoki embedded firmware tarkibiga integratsiya qilishdan oldin litsenziya talablarini huquqiy jihatdan tekshirish zarur; manba hujjatlarida berilgan tijorat litsenziyasi aynan shu muammoni amaliy hal qilishga mo'ljallangan variant sifatida ko'rsatiladi [32].

4. MUHOKAMA

MIRACL'ni boshqa kriptografik kutubxonalar bilan qiyoslash uning o'rmini aniqroq belgilash imkonini beradi (2-jadval). RELIC dizayn falsafasi bo'yicha MIRACL'ga eng yaqin muqobillardan biri bo'lib, past darajadagi va yuqori moslashuvchan ECC/pairing vositalarini taqdim etadi. PBC pairing asosidagi tadqiqotlarga ixtisoslashgan bo'lsa, libsodium/NaCl yuqori darajadagi, "xato qilishga qiyin" interfeysni tanlaydi va foydalanuvchini ko'plab parametrlarni qo'lda tanlashdan ozod qiladi. OpenSSL esa TLS va umumiy maqsadli sanoat kriptografik infratuzilmasi sifatida kengroq ekotizimga ega. Demak, MIRACL va RELIC moslashuvchanlik tomonida, libsodium esa xavfsizlik-birinchi va misuse-resistant dizayn tomonida joylashadi; OpenSSL esa ishlab chiqarishga yo'naltirilganligi bilan ajralib turadi [20]–[23].

2-jadval.

MIRACL va muqobil kriptografik kutubxonalarning qiyosiy tavsifi.

Kutubxona	Asosiy yo'nalish	API darajasi	Litsenziya	Qo'llab-quvvatlash holati
MIRACL [10]	ECC, RSA, keng juftlik qamrovi, cheklangan qurilmalar (C/C++)	Past darajali, moslashuvchan	AGPLv3 / tijorat	Faol emas — miracl/core'ga o'tgan
miracl/core [12]	ECC/pairing, yon-kanalga chidamli (loyiha da'vosi)	Past-o'rta, ko'p tilli	Apache 2.0	Faol qo'llab-quvvatlanadi
RELIC [20]	ECC/pairing, tadqiqot	Past darajali, yuqori moslashuvchan	Apache 2.0 / LGPL-2.1	Faol
PBC [21]	Pairing-asosidagi tadqiqot	o'rta darajali	LGPL / Apache 2.0	Faol emas
libsodium/NaCl [22], [8]	Umumiy maqsadli, xato-chidamli	Yuqori, misuse-resistant	ISC	Faol qo'llab-quvvatlanadi
OpenSSL [23]	TLS / umumiy maqsadli	o'rta-yuqori, keng qamrovli	Apache 2.0 (3.0dan)	Faol, sanoat standarti



MIRACL'ning texnik davomiyligini tushunishda uning rasmiy vorisi miracl/core alohida ahamiyatga ega. Apache Milagro Crypto Library (AMCL) MIRACL'dan keyingi, IoT yo'nalishidagi bosqichni ifodalagan va keyinchalik miracl/core nomi ostida qayta tashkil etilgan. Miracl/core C va C++ bilan bir qatorda Go, Rust, Python, Java, JavaScript va Swift tillariga yo'naltirilgan; loyiha hujjatlarida yon-kanal hujumlariga chidamlilikni hisobga olgan qayta loyihalashga urg'u berilgan [12], [24]–[26]. Bu xususiyat ushbu ishda mustaqil sinovdan o'tkazilmagan bo'lsa-da, klassik MIRACL va zamonaviy vorisni bir xil mahsulot deb qarash noto'g'riligini ko'rsatadi.

Amaliy nuqtayi nazardan, MIRACL'ni tanlash maqsadli platforma, mahsulotning litsenziya modeli, zarur kriptografik primitivlar va xavfsizlik talablarining birgalikdagi bahosiga asoslanishi kerak. o'ta cheklangan mikrokontroller yoki smart-karta uchun platforma-maxsus konfiguratsiya foydali bo'lishi mumkin; yopiq manbali tijorat mahsulotida GPLv3 talablari alohida huquqiy tekshiruvni taqozo etadi. Yon-kanal hujumlariga chidamlilik muhim bo'lsa, faol qo'llab-quvvatlanadigan miracl/core mantiqiyroq; faqat tor doiradagi zamonaviy primitivlar kerak bo'lsa, libsodium soddaroq va misuse-resistant yondashuvni beradi; pairing yoki IEEE P1363 kabi maxsus imkoniyatlar zarur bo'lganda esa MIRACL yoki RELIC maqsadga muvofiqdir [12], [20], [22].

Ushbu tahlilning muhim cheklovi shundan iboratki, mustaqil ishlash tezligi, xotira sarfi va kod hajmi bo'yicha benchmarklar hamda konstant-vaqt va yon-kanal xususiyatlari amaliy test bilan tekshirilmagan. Kelgusida MIRACL va miracl/core'ni bir xil apparatda zamonaviy egri chiziqlar asosida mustaqil qiyosiy o'lchash, xotira va kod hajmini baholash hamda yon-kanal xavfsizligini tajriba asosida tekshirish ushbu yo'nalishdagi tadqiqotlarni to'ldirishi mumkin.

5. XULOSA

o'tkazilgan tahlil MIRACL o'zining past darajadagi nazorati, keng kriptografik qamrovi va cheklangan qurilmalarga yo'naltirilganligi bilan tarixiy va ta'limiy ahamiyatini saqlab qolishini ko'rsatadi. Biroq yangi loyihalarda klassik MIRACL'ni bevosita tanlashdan oldin uning rivojlanish holati, GPLv3 litsenziyasi, qo'llanilayotgan egri chiziqli va pairing parametrlarining zamonaviy xavfsizligi hamda talab etilayotgan platforma imkoniyatlari baholanishi kerak. Faol qo'llab-quvvatlanadigan miracl/core yangi tizimlar uchun muhim muqobil bo'lib, klassik MIRACL esa mavjud eski kod bazalarini qo'llab-quvvatlash, ta'limiy vazifalar va maxsus kriptografik konstruksiyalarni o'rganish nuqtayi nazaridan amaliy ahamiyatga ega bo'lib qoladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Miller, V.S. Use of elliptic curves in cryptography. In Advances in Cryptology — CRYPTO '85, LNCS vol. 218; Springer: Berlin, Germany, 1985; pp. 417–426.
2. Koblitz, N. Elliptic curve cryptosystems. Mathematics of Computation, 1987, 48 (177), 203–209.
3. Lenstra, A.K.; Verheul, E.R. Selecting cryptographic key sizes. Journal of Cryptology, 2001, 14 (4), 255–293.
4. Tidrea, A.; Korodi, A.; Silea, I. Elliptic curve cryptography considerations for securing automation and SCADA systems. Sensors, 2023, 23 (5), art. 2686.



5. Chochtoula, D.; Ilias, A.; Stamatiou, Y.C.; Makris, C. Integrating elliptic curve cryptography with the Modbus TCP SCADA communication protocol. *Future Internet*, 2022, 14 (8), art. 232.
6. Popa, L.; Groza, B.; Murvay, P.-S. Performance evaluation of elliptic curve libraries on automotive-grade microcontrollers. In *Proc. 14th Int. Conf. on Availability, Reliability and Security (ARES)*; ACM, 2019; doi: 10.1145/3339252.3341480.
7. Dutta, R.; Barua, R.; Sarkar, P. Pairing-based cryptographic protocols: A survey. *Cryptology ePrint Archive*, Report 2004/064, 2004.
8. Bernstein, D.J.; Lange, T.; Schwabe, P. The security impact of a new cryptographic library. In *Progress in Cryptology — LATINCRIPT 2012*, LNCS vol. 7533; 2012; pp. 159–176.
9. IEEE Standards Association. IEEE Std 1363-2000: IEEE Standard Specifications for Public-Key Cryptography; IEEE: New York, NY, USA, 2000.
10. MIRACL Ltd. MIRACL: MIRACL Cryptographic SDK. GitHub repository. <https://github.com/miracl/MIRACL>, commit b9b8fd47 (accessed Jul. 27, 2026).
11. FinSMEs. CertiVox Acquires Shamus Software, 2011. <https://www.finsmes.com/2011/12/certivox-acquires-shamus-software.html>
12. MIRACL Ltd. core: MIRACL Core. GitHub repository. <https://github.com/miracl/core> (accessed Jul. 27, 2026).
13. Pigatto, D.F.; da Silva, N.B.F.; Branco, K.R.L.J.C. Performance evaluation and comparison of algorithms for elliptic curve cryptography with El-Gamal based on MIRACL and RELIC libraries. *Journal of Applied Computing Research*, 2011.
14. Barreto, P.S.L.M.; Naehrig, M. Pairing-friendly elliptic curves of prime order. In *Selected Areas in Cryptography — SAC 2005*, LNCS vol. 3897; 2006; pp. 319–331.
15. Kachisa, E.J.; Schaefer, E.F.; Scott, M. Constructing Brezing-Weng pairing-friendly elliptic curves using elements in the cyclotomic field. In *Pairing-Based Cryptography — Pairing 2008*, LNCS vol. 5209; 2008; pp. 126–135.
16. Miyaji, A.; Nakabayashi, M.; Takano, S. New explicit conditions of elliptic curve traces for FR-reduction. *IEICE Transactions on Fundamentals*, 2001, E84-A (5).
17. Barreto, P.S.L.M.; Lynn, B.; Scott, M. Constructing elliptic curves with prescribed embedding degrees. In *Security in Communication Networks — SCN 2002*, LNCS vol. 2576; 2003; pp. 257–267.
18. Boneh, D.; Lynn, B.; Shacham, H. Short signatures from the Weil pairing. In *Advances in Cryptology — ASIACRYPT 2001*, LNCS vol. 2248; 2001; pp. 514–532.
19. Galbraith, S.D.; Scott, M. Exponentiation in pairing-friendly groups using homomorphisms. *Cryptology ePrint Archive*, Report 2008/117, 2008.
20. Aranha, D.F.; Gouvêa, C.P.L.; et al. RELIC is an Efficient Library for Cryptography. GitHub repository. <https://github.com/relic-toolkit/relic> (accessed Jul. 27, 2026).
21. Lynn, B. On the Implementation of Pairing-Based Cryptosystems. Ph.D. dissertation, Stanford Univ., Stanford, CA, USA, 2007.
22. Denis, F. libsodium. GitHub repository. <https://github.com/jedisct1/libsodium> (accessed Jul. 27, 2026).
23. OpenSSL Software Foundation. OpenSSL. GitHub repository. <https://github.com/openssl/openssl> (accessed Jul. 27, 2026).



24. Scott, M. The Apache Milagro Crypto Library (Version 2.0). MIRACL Labs, white paper. <https://miracl.com/assets/pdf-downloads/amcl.pdf>
25. Apache Software Foundation. Apache Milagro Crypto Library (AMCL). GitHub repository (incubator). <https://github.com/apache/incubator-milagro-crypto-c> (accessed Jul. 27, 2026).
26. Scott, M. Pairing implementation revisited. Cryptology ePrint Archive, Report 2019/077, 2019.
27. Montgomery, P.L. Modular multiplication without trial division. Mathematics of Computation, 1985, 44 (170), 519–521.
28. Kim, T.; Barbulescu, R. Extended tower number field sieve: A new complexity for the medium prime case. In Advances in Cryptology — CRYPTO 2016, LNCS vol. 9814; 2016; pp. 543–571.
29. Barbulescu, R.; Duquesne, S. Updating key size estimations for pairings. Journal of Cryptology, 2019, 32 (4), 1298–1336.
30. Free Software Foundation. GNU Affero General Public License, Version 3, Nov. 19, 2007. <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.en.html>
31. Free Software Foundation. The Fundamentals of the AGPLv3. FSF Bulletin, Fall 2021. <https://www.fsf.org/bulletin/2021/fall/the-fundamentals-of-the-agplv3>
32. Opensource.com. Do I need to provide access to source code under the AGPLv3 license?, 2017. <https://opensource.com/article/17/1/providing-corresponding-source-agplv3-license>

MASOFAVIY TA'LIM JARAYONLARINI INTELLEKTUAL VA ADAPTIV BOSHQARISH MODELLARI

Jamshid Elov Bekmuradovich

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
masofaviy ta'lim bo'limi boshlig'i*

Annotatsiya. Maqolada masofaviy ta'lim jarayonlarini intellektual va adaptiv boshqarish modellari tizimli tahlil qilingan. Intellektual o'qitish tizimlarining (ITS) umumlashgan arxitekturasida MAPE-K o'z-o'zini moslashtirish sikli bilan qiyoslangan holda qaralib, unga xizmat qiluvchi model sinflari - qoidalarga asoslangan bilimlar muhandisligi, ehtimoliy-statistik, klassik mashinali o'qitish, chuqur o'qitish, mustahkamlashli o'qitish va katta til modellari tasniflangan. Bilim holatini kuzatish (Knowledge Tracing) modellarining BKT'dan AKT va pyKT benchmarkigacha bo'lgan rivojlanish yo'li, adaptatsiya turlarining Brusilovskiy taksonomiyasi asosidagi kengaytmasi, ontologik bilim modelini shakllantirishning gibrid yondashuvi, xulq-atvor va affektiv modellashtirish hamda generativ sun'iy intellekt asosidagi prognozlash va erta ogohlantirish tizimlari ko'rib chiqilgan. Tadqiqot natijasida modellarni tanlashning olti guruhli mezonlar tizimi (prognoz sifati, moslashuvchanlik, ma'lumotlarga talab, hisoblash tejamkorligi, moslashuv imkoniyati, axloqiy-huquqiy muvofiqlik) taklif etilgan va yondashuv sinflari shu mezonlar bo'yicha qiyosiy baholangan. Baholash natijalari o'rta ko'lamli oliy ta'lim muassasasi sharoitida yagona "eng yaxshi model" mavjud emasligini va qoidalarga asoslangan, chuqur



o'qitish, RL hamda LLM yondashuvlarini birlashtiruvchi gibrid arxitektura eng maqbul yechim ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: *masofaviy ta'lim, intellektual boshqaruv, adaptiv ta'lim tizimi, bilim holatini kuzatish, talaba modeli, ontologiya, mustahkamlashli o'qitish, katta til modellari, erta ogohlantirish tizimi, o'quv analitikasi.*

1. KIRISH

Masofaviy ta'limning keng ommalashuvi oliy ta'lim muassasalarida talabalarning o'quv faoliyatini raqamli izlar asosida samarali boshqarish zaruratini yuzaga keltirmoqda. An'anaviy boshqaruv vositalari, jumladan, davomat va nazorat natijalari, ko'pincha kechikkan va agregatsiyalangan axborotga asoslanganligi sababli, ta'lim jarayonidagi muammolarni o'z vaqtida aniqlash imkonini cheklaydi. Shu bois, mashinali o'qitish, o'quv analitikasi va prognozlash usullariga asoslangan intellektual boshqaruv mexanizmlarini joriy etish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Bunda intellektual modellar talabaning raqamli izlari asosida uning o'quv holatini baholash va prognozlashni, adaptiv mexanizmlar esa ushbu natijalarga muvofiq individual boshqaruv ta'sirlarini shakllantirishni ta'minlaydi.

Mavjud ilmiy tadqiqotlarda masofaviy ta'limni boshqarishning turli modellari alohida yo'nalishlar bo'yicha keng o'rganilgan bo'lsa-da, ularni yagona intellektual-adaptiv boshqaruv konturi doirasida kompleks qiyoslash va amaliy sharoit uchun optimal modelni tanlash mezonlari yetarlicha tizimlashtirilmagan. Shu munosabat bilan, mazkur tadqiqotning maqsadi masofaviy ta'limni intellektual boshqarish modellarining zamonaviy holatini tahlil qilish, ularning imkoniyatlari va cheklovlarini aniqlash hamda oliy ta'lim muassasasining amaliy sharoitida qo'llash uchun modellarni tanlash va baholash mezonlarini ilmiy jihatdan asoslashdan iborat.

2. TADQIQOT METODOLOGIYASI VA ADABIYOTLAR TAHLILI

Tadqiqot 2015–2026-yillarda e'lon qilingan ilmiy manbalarni tizimli tahlil qilish (systematic review), qiyosiy tahlil va ekspert baholash usullariga asoslanadi. Adabiyotlar ACM Computing Surveys, *Computers & Education*, *The Internet and Higher Education*, *Journal of Educational Data Mining*, *User Modeling and User-Adapted Interaction* kabi ilmiy jurnallar hamda NeurIPS, KDD va EDM konferensiyalari materiallari asosida shakllantirildi. Manbalarni tanlashda ularning masofaviy yoki elektron ta'lim kontekstiga bevosita aloqadorligi, taklif etilgan model yoki algoritmnining empirik baholanganligi, tajriba natijalarining taqqoslanishi va takrorlanuvchanligi asosiy mezonlar sifatida belgilandi.

Adabiyotlar tahlili davomida masofaviy ta'limni intellektual boshqarishda qo'llanilayotgan asosiy yondashuvlar bir necha guruhga ajratildi: o'quv analitikasi va mashinali o'qitish modellari, bilim holatini baholash modellari, talabalar xatti-harakatini prognozlash va xavfni aniqlash modellari, bilimga asoslangan qaror qabul qilish hamda adaptiv ta'lim mexanizmlari. Tahlil natijalari mavjud tadqiqotlarda talabaning bilim holatini aniqlash va natijalarini prognozlash masalalari yetarlicha o'rganilganligini, biroq **monitoring** → **holatni baholash** → **xavfni prognozlash** → **boshqaruv qarori** → **adaptiv ta'sir** ketma-ketligini yagona intellektual boshqaruv konturida birlashtirish masalasi nisbatan kam tadqiq etilganligini ko'rsatdi. Shu asosda tadqiqotning nazariy va amaliy bo'shlig'i aniqlanib, modellarni kompleks baholash zarurati asoslandi.

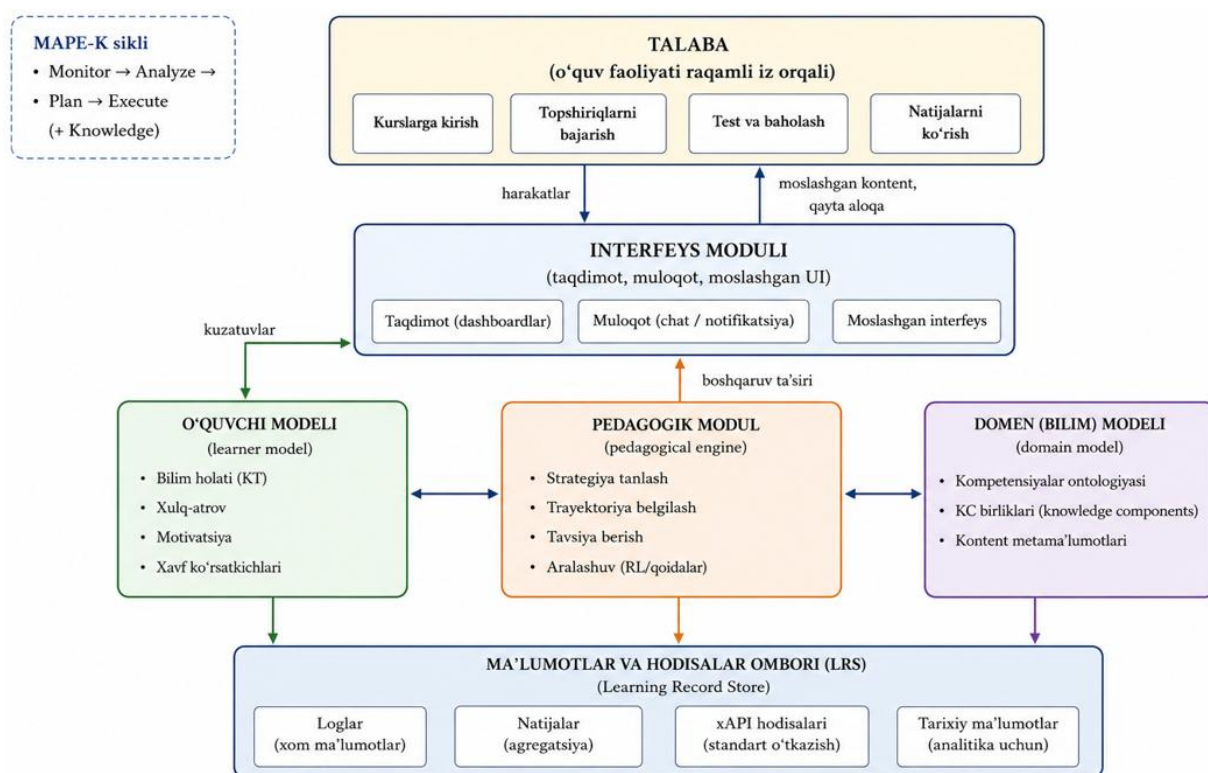


Tahlil uch bosqichda amalga oshirildi. Birinchi bosqichda intellektual boshqaruv tizimining umumlashgan arxitekturasini shakllantirilib, aniqlangan model sinflari uning tegishli funksional komponentlariga birlashtirildi. Ikkinchi bosqichda har bir model sinfi bo'yicha yetakchi yondashuvlarning empirik natijalari aniqlik, prognozlash samaradorligi, interpretatsiyalanuvchanlik, hisoblash murakkabligi va real vaqt rejimida qo'llash imkoniyati kabi ko'rsatkichlar bo'yicha qiyoslandi. Uchinchi bosqichda oliy ta'lim muassasasining amaliy sharoitidan kelib chiqadigan boshqaruv talablari asosida mezonlar tizimi shakllantirilib, model sinflari ekspert-baholash usuli orqali baholandi. Olingan natijalar issiqlik xaritasi (heat-map) ko'rinishida umumlashtirilib, masofaviy ta'limni intellektual boshqarish uchun eng maqbul yondashuvlarni aniqlashga xizmat qildi.

3.ASOSIY QISM

Intellektual boshqaruv tizimining umumlashgan arxitekturasini

Ta'limni intellektual boshqarish tizimlarining nazariy asosi intellektual o'qitish tizimlari (Intelligent Tutoring Systems, ITS) an'anasida shakllangan bo'lib, K.VanLen [20] tadqiqotlarida ularning samaradorligi individual repetitorlik samarasiga yaqinlashishi mumkinligi ko'rsatilgan. Klassik ITS arxitekturasini quyidagi to'rt komponentdan iborat (1-rasm):



1-rasm. Masofaviy ta'limni intellektual boshqarish tizimining umumlashgan arxitekturasini



- talaba modeli — talabaning bilim holati, xulq-atvori va individual xususiyatlarining hisoblanuvchi tasviri;
- bilim sohasi modeli — o‘zlashtirilishi lozim bo‘lgan bilim birliklari va ular orasidagi bog‘lanishlar tuzilmasi;
- pedagogik modul — o‘quvchi va bilim sohasi modellariga tayanib boshqaruv ta’sirini tanlovchi qaror mexanizmi;
- interfeys moduli — boshqaruv ta’sirini talabaga yetkazuvchi va uning javob reaksiyasini qayd etuvchi bo‘g‘in. Zamonaviy talqinlarda ushbu arxitektura o‘z-o‘zini moslashtiruvchi tizimlarning MAPE-K sikli (Monitor – Analyze – Plan – Execute – Knowledge) [13] bilan uyg‘unlashtiriladi.

Intellektual modellarning har bir sinfi arxitekturaning muayyan komponentiga xizmat qiladi. Bilim holatini kuzatish modellari talaba modelining asosini tashkil etadi; ontologik va bilimlar muhandisligi usullari bilim modelini shakllantiradi; mustahkamlashli o‘qitish va tavsiya tizimlari pedagogik modulning qaror mexanizmini ta’minlaydi; prognozlash modellari esa monitoring va tahlil bo‘g‘inini kuchaytiradi. Intellektual boshqaruvda qo‘llaniladigan yondashuvlarning umumiy tasnifi 1-jadvalda keltirilgan.

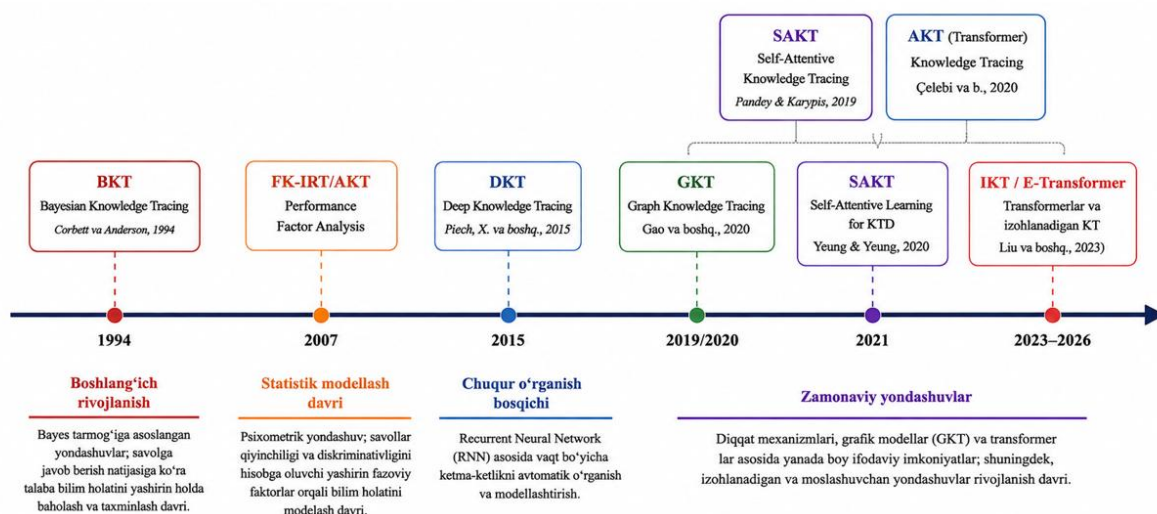
1-jadval
Ta’limni intellektual boshqarish yondashuvlarining tasnifi

Yondashuv sinfi	Mohiyati	Tipik modellari va usullari	Ta’limdagi asosiy qo‘llanishi
Qoidalarga asoslangan bilimlar muhandisligi	Ekspert bilimlari “agar–unda” qoidalari va ontologiyalar ko‘rinishida rasmiylashtiriladi	Produksion qoidalar, ontologiyalar (OWL), noravshan mantiq	Bilim modeli, adaptiv navigatsiya, tushuntirish generatsiyasi
Ehtimoliy-statistik	Talaba holati yashirin o‘zgaruvchi sifatida ehtimoliy model orqali baholanadi	BKT, Bayes tarmoqlari, yashirin Markov modellari, IRT	Bilim holatini kuzatish, test natijalarini kalibrlash
Klassik mashinali o‘qitish	Belgilar asosida bashorat modellari tarixiy ma’lumotlardan o‘rganiladi	Logistik regressiya (PFA), daraxtlar, gradient busting, klasterlash	Natijani prognozlash, xavf guruhlarini aniqlash, segmentlash
Chuqur o‘qitish	Xom hodisalar ketma-ketligidan murakkab bog‘liqliklar avtomatik o‘rganiladi	DKT (RNN/LSTM), SAKT, grafli tarmoqlar (GKT)	Ketma-ket bilim kuzatuvi, xulq-atvorni modellashtirish
Mustahkamlashli o‘qitish (RL)	Boshqaruv strategiyasi sinov-xato orqali kumulyativ	MDP/POMDP, Q-learning, DQN, DRL	Trayektoriyani optimallashtirish,

Yondashuv sinfi	Mohiyati	Tipik modellari va usullari	Ta'limdagi asosiy qo'llanishi
	mukofotni maksimallashtirishga o'rganiladi		topshiriq ketma-ketligi, aralashuv siyosati
Katta til modellari (LLM)	Oldindan o'qitilgan generativ modellar dialog va kontent darajasida qo'llanadi	GPT-oilasi, ochiq LLM lar, RAG arxitekturalari	Virtual tyutor, qayta aloqa generatsiyasi, kontent yaratish

Talabaning bilim holatini kuzatish modellari

Talaba modelining asosiy vazifasi bilim holatini kuzatishdan iborat bo'lib, talabaning topshiriqlarga bergan javoblari ketma-ketligi asosida uning har bir bilim birligi bo'yicha o'zlashtirish darajasi dinamik baholanadi va keyingi javobi bashorat qilinadi (2-rasm). G. Abdelrahman, Q. Vang va B. Nunesning fundamental sharhida [1] ta'kidlanganidek, bilim holatini kuzatish (Knowledge Tracing, KT) so'nggi yillarda ta'lim texnologiyalaridagi eng faol tadqiq etilayotgan masalalardan biriga aylangan.



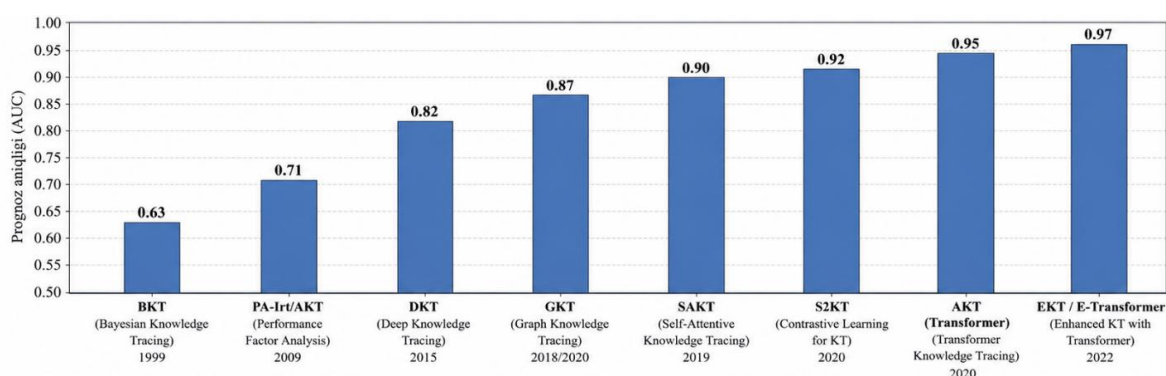
2-rasm. Bilim holatini kuzatish modellarining rivojlanish bosqichlari

A.Korbett va J.Anderson [5] tomonidan taklif etilgan Bayes bilim kuzatuvchi (BKT) talabaning har bir bilim birligi bo'yicha holatini ikkilik yashirin o'zgaruvchi ("o'zlashtirgan / o'zlashtirmagan") sifatida qaraydi va boshlang'ich bilish, o'rganish, taxmin hamda xato ehtimollari kabi to'rtta interpretatsiyalanuvchi parametr orqali yashirin Markov modeli ko'rinishida ifodalaydi. K.Pich va boshqalar [17] taklif etgan DKT (Deep Knowledge Tracing) modeli LSTM rekurrent neyron tarmog'i asosida javoblar ketma-ketligidan bilim holatining uzluksiz yashirin tasvirini o'rganadi va bilim birliklarining o'zaro bog'lanishlarini avtomatik aniqlaydi. S.Pandey va G.Karypis [16] tomonidan taklif etilgan, diqqat mexanizmlariga asoslangan SAKT yondashuvi uzoq ketma-ketliklardagi bog'liqlikni samaraliroq qamrab oladi.



A.G'osh, N.Xeffernan va A.Lan [8] taqdim etgan AKT (Context-Aware Attentive Knowledge Tracing) yondashuvi kontekstga sezgir diqqat va unutishni aks ettiruvchi monotonik mexanizm hisobiga eng barqaror natijalardan birini ko'rsatadi.

Shu bilan birga, T.Jerve va boshqalarning keng qamrovli taqqoslash tadqiqotida [7] to'qqizta real ma'lumotlar to'plami bo'yicha yaxshi sozlangan logistik modellar chuqur o'qitish modellari bilan taqqoslanadigan aniqlikni namoyish etgan. Z.Lyu va boshqalar tomonidan taqdim etilgan pyKT benchmarki [14] avvalgi ko'plab taqqoslashlardagi metodik xatolarni aniqlab, yagona qat'iy baholash muhitini yaratgan hamda AKT sinfidagi modellarning ustunligini tasdiqlagan holda, farqlar ko'pincha kichik ekanligini ko'rsatgan. Yuqorida tahlil qilingan modellarning umumlashtirilgan aniqlik ko'rsatkichlari 3-rasmda keltirilgan.



3-rasm. Bilim holatini kuzatish modellarining prognoz aniqligi bo'yicha qiyoslanishi

Aniqlik bo'yicha yutuq katta bo'lmagan sharoitda model tanlovi aniqlikdan tashqari omillar, jumladan moslashuvchanlik, ma'lumotlar hajmiga talab va joriy etish qiymati bilan belgilanishi lozim. O'rta ko'lamli oliy ta'lim muassasasi platformasi sharoitida BKT va logistik modellar boshlang'ich bosqich uchun, chuqur modellar esa ma'lumotlar yetarlicha to'plangan keyingi bosqich uchun maqsadga muvofiq bo'lib, ikkala darajani umumlashtiruvchi gibril yondashuvi yagona arxitekturani shakllantirish talab etiladi.

Adaptiv ta'lim modellari

Bilim holatini baholash adaptatsiya mexanizmlari orqali o'quv jarayonini o'zgartirganda amaliy ahamiyat kasb etadi. Adaptiv gipermedia va adaptiv ta'lim tizimlari nazariyasining asoschilaridan P.Brusilovskiy [4] taklif etgan klassik taksonomiya adaptatsiyani ikki katta guruhga ajratadi. Birinchisi kontentni moslashtirish (adaptive presentation), ya'ni kontent mazmuni va ko'rinishini talabaga moslash. Ikkinchisi navigatsiyani moslashtirish (adaptive navigation), ya'ni o'quv birliklari bo'ylab harakat yo'lini boshqarish. Zamonaviy LMS tizimlarida bu ikki guruhga jarayonni moslashtirish (topshiriqlar ketma-ketligi, qiyinlik darajasi, sur'at, aralashuvlar) uchinchi guruhi ham qo'shiladi (2-jadval).

Adaptatsiya sifati bevosita talaba modelining to'liqligiga bog'liq. Zamonaviy tadqiqotlarda talaba modeli bilim holatidan tashqari xulq-atvor (faollik ritmi, prokrastinatsiya, resurslardan foydalanish uslubi), affektiv holat (qiziqish, zerikish, xavotir) va meta-kognitiv ko'nikmalar (o'z-o'zini boshqarish) o'lchamlarini ham qamrab boradi. V.Xolms va I.Tuoming tahliliy ishida [10] qayd etilganidek, ta'limda sun'iy intellektning haqiqiy samarasi aynan texnik modellar bilan pedagogik maqsadlarning uyg'unligiga bog'liq. Adaptatsiya o'z-o'zidan maqsad emas, balki



o'qitish natijalarini yaxshilash vositasi hisoblanadi. Shu sababli adaptiv mexanizmlarni loyihalashda talabani tanlov erkinligini saqlash, xavfning oldini olish, tizim qarorlarining tushunarli asoslanishi texnik mezonlar bilan teng darajada muhim hisoblanadi.

2-jadval
Adaptatsiya turlari, texnikalari va tatbiq shakllari

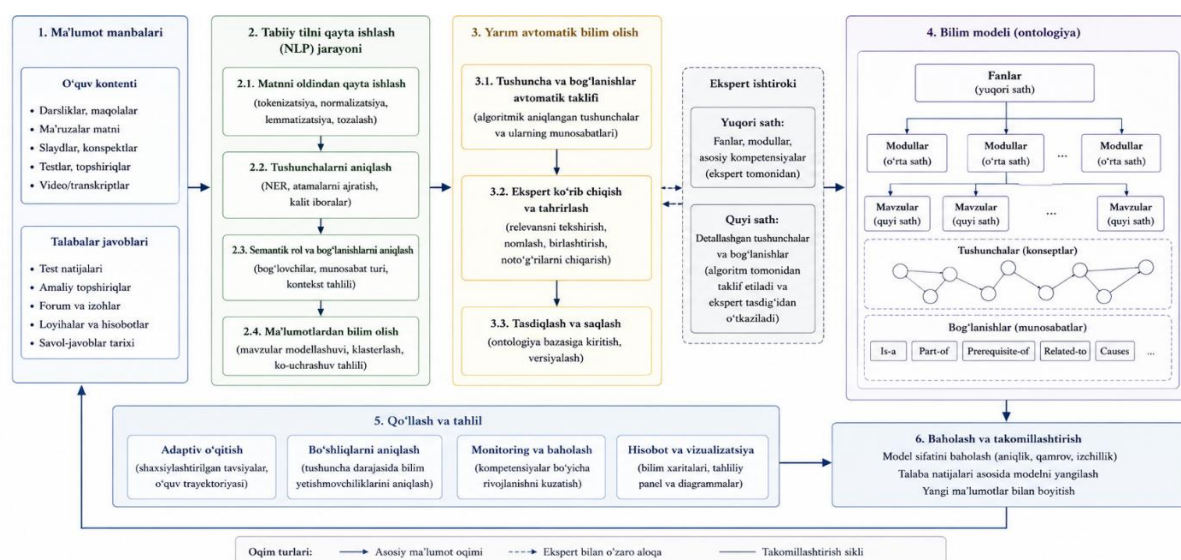
Adaptatsiya turi	Asosiy texnikalar	Moslashuv asosi (talaba modeli belgilari)	Tatbiq misollari
Kontent taqdimotini moslashtirish	Variantli tushuntirishlar, qo'shimcha/soddalashtirilgan fragmentlar, misollar tanlovi, modallik (matn/video)	Bilim darajasi, oldingi tajriba, til, idrok xususiyatlari	Adaptiv darsliklar, moslashuvchan ma'ruza materiallari
Navigatsiyani moslashtirish	Havolalarni tartiblash, yashirish, izohlash (annotatsiya), to'g'ridan-to'g'ri yo'naltirish	KC bo'yicha o'zlashtirish xaritasi, oldshartlar grafi	Kurs xaritasidagi "svetofor" belgilari, tavsiya etilgan keyingi qadam
Topshiriqlar ketma-ketligini moslashtirish	Bilim bo'shlig'iga qarab tanlash, qiyinlikni dinamik sozlash, oraliqli takrorlash (spaced repetition)	KT bahosi, urinishlar tarixi, unutish egri chizig'i	Adaptiv mashq tizimlari, adaptiv testlar (CAT)
Sur'at va yuklamani moslashtirish	Muddatlarni individuallashtirish, modul hajmini bo'lish, yuklama balansi	Faollik ritmi, bajarish tezligi, bandlik profili	Moslashuvchan jadval, individual o'quv rejasi
Qo'llab-quvvatlash va aralashuvlar	Maslahatlar, avtomatik eslatmalar, tyutorga yo'naltirish, motivatsion xabarlar	Xavf ko'rsatkichlari, faollik pasayishi, hissiy holat belgilari	Erta ogohlantirish tizimlari, virtual yordamchi

Bilim modelini shakllantirish

Adaptatsiya mexanizmlarining barchasi bilim modelining sifatiga tayanadi. Bunda talabaga "keyingi qadam"ni to'g'ri tavsiya etish uchun tizim bilim birliklari nimalardan iboratligini, ular orasida qanday oldshart (prerequisite) munosabatlari mavjudligini va har bir kontent birligi qaysi kompetensiyaga xizmat qilishini bilishi lozim. Ushbu bilimni rasmiylashtirish uchun ontologik yondashuv keng qo'llaniladi, jumladan fanlar, mavzular, bilim birliklari, kompetensiyalar kabi tushunchalar, ularning xossalari va o'zaro munosabatlari formal-mantiqiy tilda ifodalanadi.

Ontologiyani boshqaruvdagi asosiy afzalliklari uchta. Birinchidan, u adaptiv navigatsiya uchun qat'iy cheklovlar tizimini beradi. Ikkinchidan, mashinali o'qitish modellarining statistik xulosalari ustidan mantiqiy nazorat o'rnatadi va tavsiyalarni tushuntirish imkonini yaratadi. Uchinchidan, turli manbalardan kelayotgan ma'lumotlarni yagona semantik asosga keltiradi [2].

Shu bilan birga ontologik yondashuvning cheklovlari ham mavjud. Ontologiyani qurish va dolzarb saqlash murakkab vazifa hisoblanib, “bilimlarni olish tiqilinchisi” (knowledge acquisition bottleneck) deb ataluvchi klassik muammoni keltirib chiqaradi. Har bir fan bo'yicha bilim birliklari va bog'lanishlarni qo'lda kiritish katta kontingentli oliy ta'lim muassasasi miqyosida amalda bajarib bo'lmaz vazifaga aylanadi. So'nggi yillar tadqiqotlarida bu muammoni hal qilishning ikki yo'nalishi shakllandi. Tabiiy tilni qayta ishlash vositalari yordamida o'quv kontentidan tushunchalar va bog'lanishlarni yarim avtomatik ajratib olish [3], hamda talabalar javoblari statistikasi asosida munosabatlarni ma'lumotlardan tiklash mumkin. Amaliy jihatdan eng barqaror yechim gibridd yondashuv hisoblanadi. Ontologiyani yuqori sathlari (fanlar, modullar, asosiy kompetensiyalar) ekspert tomonidan, quyi sathdagi bog'lanishlar esa algoritmik usullar bilan to'ldirilib, ekspert tasdig'idan o'tkaziladi (4-rasm).



4-rasm. Tabiiy tilni qayta ishlash vositalari asosida bilim modelini shakllantirish

Talaba xulq-atvorini va affektiv holatini modellashtirish

Talabani kursni tark etishi ko'pincha bilim tanqisligidan emas, balki faollik va motivatsiyaning pasayishidan boshlanadi. Bu esa xulq-atvorni modellashtirishni boshqaruv konturining mustaqil komponentiga aylantiradi. Xulq-atvor modellari raqamli izning vaqt bo'yicha xususiyatlariga tayanadi. Tizimga kirishlar ritmi va muntazamligi, sessiyalar davomiyligi, muddatlarga nisbatan bajarish vaqti, resurslardan foydalanish ketma-ketligi, urinishlar orasidagi intervallar hisobga olinadi. Ushbu belgilarga klasterlash usullari qo'llanilishi natijasida talabalarining barqaror xulq-atvor profilari ajratiladi. Profil dinamikasi, ya'ni bir profildan ikkinchisiga o'tishlar esa xavfning erta signali sifatida xizmat qiladi [19]. Bunday yondashuvning afzalligi shundaki, u fan mazmunidan mustaqil bo'lib, barcha kurslar bo'yicha yagona mexanizmda ishlaydi va bilim modeli hali ishonchli bo'lmagan dastlabki davrda ham signal beradi.

Xulq-atvor tahlilining chuqurroq qatlami - affektiv hisoblash, ya'ni talabani qiziqish, zerikish, xavotir, umidsizlik kabi hissiy-motivatsion holatini aniqlashga urinish hisoblanadi [21]. Masofaviy ta'lim sharoitida affektiv holat bilvosita indikatorlar javob berish tezligining



o'zgarishi, xatolardan keyingi xatti-harakatlar, yordam so'rash chastotasi, matnli muloqot ohangi orqali baholanadi. Talabalar fikr-mulohazalarini aspektga asoslangan hissiyot tahlili (aspect-based sentiment analysis, ABSA) usullari bilan qayta ishlash [12] o'quv jarayonining qaysi jihatlari (kontent sifati, o'qituvchi bilan aloqa, platforma qulayligi, yuklama) norozilik manbai ekanini aniqlash imkonini beradi va institutsional boshqaruv qarorlari uchun bevosita axborot manbai bo'lib xizmat qiladi.

Prognozlash modellari va generativ sun'iy intellekt

Boshqaruv konturining tahlil bo'g'inida alohida o'rinni prognozlash modellari o'quv natijalarini, kursni tark etish xavfini va akademik qarzdorlikni oldindan baholash vositalari egallaydi. C.Romero va S.Venturaning yangilangan fundamental sharhida [18] ta'lim ma'lumotlarini intellektual tahlil qilish (EDM) va o'quv analitikasi (LA) usullarining to'liq xaritasi berilgan bo'lib, prognozlash ular ichida eng ko'p qo'llaniladigan masala sifatida qayd etiladi. Amalda logistik regressiyadan gradient bustinggacha bo'lgan usullar qo'llanib, belgilar sifatida faollik chastotasi, muddatlarga rioya, oraliq natijalar va xulq-atvor ritmlari ishlatiladi.

Prognozlash modellarining institutsional tatbiq shakli erta ogohlantirish tizimlari bo'lib, ular xorijiy universitetlar amaliyotida keng qo'llanmoqda [9]. Bunda haftalik davriylikda barcha talabalar bo'yicha xavf ko'rsatkichlari qayta hisoblanadi, belgilangan chegaradan oshgan holatlar o'qituvchi va tyutorlar paneliga chiqariladi, har bir signal bo'yicha tavsiya etilgan aralashuv (bog'lanish, konsultatsiya, muddatni ko'chirish) qayd etiladi, aralashuv natijasi esa keyingi siklda modelga qayta aloqa sifatida qaytadi.

Tajriba shuni ko'rsatadiki, bunday tizimlarning samarasi model aniqligidan ko'ra tashkiliy integratsiyaga signallar bo'yicha real harakat mexanizmi mavjudligiga ko'proq bog'liq. Qayta ishlanmay qolgan signal qiymatsiz hisoblanadi, noto'g'ri signallar oqimi esa o'qituvchilar ishonchini kamaytiradi. Shu sababli erta ogohlantirish tizimini loyihalashda aniqlik-qamrov muvozanatini pedagogik resurslar hajmiga moslashtirish, ya'ni o'qituvchi real ishlov bera oladigan hajmdagi yuqori ishonchli signallar berish mustaqil mezon sifatida qaraladi.

2023-yildan boshlab ta'limga sifat jihatidan yangi omil katta til modellari (LLM) kirib keldi. E.Kasnetsi va boshqalar [11] LLM'larning individual tushuntirish, qayta aloqa generatsiyasi, kontent yaratish, virtual tyutorlik kabi imkoniyatlari va ishonchsiz javoblar, gallyutsinatsiyalar, akademik halollik, ma'lumotlar maxfiyligi, tengsizlik kabi xavflarini muvozanatli tahlil qilgan. Boshqaruv nuqtai nazaridan LLM'lar mavjud modellarni almashtirmaydi, balki to'ldiradi. Ular boshqaruv ta'sirining talaba bilan tabiiy tildagi individual muloqoti uchun kuchli vosita bo'lsa-da, bilim holatini miqdoriy kuzatish va strategik qaror qabul qilish uchun ixtisoslashgan modellarga ehtiyoj saqlanib qoladi. Shuningdek, LLM'larning resurs talabi, javoblar barqarorligi va o'zbek tilidagi sifati hali institutsional joriy etish uchun yetuk emas.

Modellarni tanlash va baholash mezonlari tizimi

Amalga oshirilgan tahlillarga ko'ra, yondashuvlarning har biri o'z kuchli tomonlari va cheklovlariga ega bo'lib, "universal eng yaxshi model" mavjud emas. Boshqaruv talablari va adabiyotlardagi metodik tavsiyalar asosida mezonlarning quyidagi olti guruhli tizimi taklif etiladi (3-jadval).

Taklif etilgan mezonlar bo'yicha asosiy yondashuv sinflarining umumlashtirilgan bahosi 5-rasmda issiqlik xaritasi (heat-map) ko'rinishida keltirilgan.



3-jadval

Intellectual boshqaruv modellarini baholash mezonlari tizimi

Mezon guruhi	Mazmuni va o'lov ko'rsatkichlari	Amaliy joriy etish uchun ahamiyati
Prognoz sifati	AUC, aniqlik (accuracy), F1, RMSE; kalibrlanganlik; erta prognost sifati (semestr boshida)	Xavfni erta aniqlash va trayektoriya tanlovi to'g'ridan-to'g'ri prognost sifatiga tayanadi
Moslashuvchanlik va izohlanish	Parametrlarning pedagogik ma'nosi; qarorni tushuntirish imkoniyati	O'qituvchi va ma'muriyat ishonchi, joriy etish maqbulligi uchun hal qiluvchi
Ma'lumotlarga talab	Minimal tarixiy hajm; "sovuq start"ga bardoshlilik; belgilar muhandisligi zarurati	Yangi kurslar va yangi talabalar doimiy paydo bo'ladi
Hisoblash va joriy etish tejamkorligi	O'qitish/xulosa vaqti; infratuzilma talabi; texnik xizmat murakkabligi	Ta'lim platformasi oddiy server infratuzilmasida barqaror ishlashi lozim
Moslashuv imkoniyati	Modeldan boshqaruv ta'siriga o'tish tabiiyligi; real vaqtda yangilanish	Model tahlil uchun emas, faol boshqaruv konturi uchun ishlab chiqiladi
Axloqiy-huquqiy muvofiqlik	Xolislik; shaxsiy ma'lumotlar himoyasi; inson nazorati; me'yoriy talablarga moslik	Shaxsga doir ma'lumotlar qonunchiligiga muvofiqlik majburiy

Baholash mezonlari (ekspert baholari)	Yondashuv sinflari					
	Qoidalarga asoslangan	BKT (Bayes)	Logistik (IRT/PFA)	Chuqur KT (DKT/AKT)	RL (MDP)	LLM yondashuvlari
Prognost aniqligi	2	3	3	5	3	4
Interpretatsiya	5	5	4	2	2	2
Ma'lumotga talab (kamlik = yuqori ball)	5	4	4	2	2	3
Hisoblash tejamkorligi	5	5	5	2	2	1
«Sovuq start»ga bardoshlilik	5	4	4	2	2	4
Moslashuv (adaptiv ta'sir) imkoniyati	3	3	2	3	5	4

Baholash shkalasi (1 – past, 5 – yuqori)	1 Juda past	2 Past	3 O'rta	4 Yuqori	5 Juda yuqori
---	----------------	-----------	------------	-------------	------------------

5-rasm. Yondashuv sinflarini mezonlar bo'yicha baholash matritsasi



5-rasmda intellektual boshqaruv yondashuvlari prognoz aniqligi, interpretatsiya qilinishi, ma'lumotga bo'lgan talab, hisoblash tejamkorligi, "sovuq start" sharoitida ishlash va adaptiv boshqaruv imkoniyatlari bo'yicha qiyosiy baholangan. Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, qoidalarga asoslangan, BKT va logistik (IRT/PFA) yondashuvlar yuqori izohlanishi, kam ma'lumot talab qilishi hamda hisoblash jihatidan tejamkorligi bilan ajralib turadi, biroq prognoz aniqligi va murakkab o'quv jarayonlarini modellashtirish imkoniyatlari cheklangan. Chuqur bilimni kuzatish (DKT/AKT) hamda LLM asosidagi yondashuvlar prognoz aniqligi bo'yicha ustun natijalarni namoyon etsa-da, katta hajmdagi ma'lumot va hisoblash resurslarini talab qiladi. Mustahkamlashli o'qitish (RL) esa individual o'quv trayektoriyasini adaptiv boshqarish imkoniyatlari bo'yicha eng yuqori bahoga ega bo'lib, real vaqt rejimida qaror qabul qilish uchun qulay hisoblanadi.

4. XULOSA

Boshqaruv tizimining arxitekturasini klassik ITS komponentlari bilan MAPE-K siklining uyg'unligi sifatida talqin etilishi model sinflarini arxitektura bo'g'inlariga aniq birlashtirish va boshqaruv konturini yopiq holga keltirish imkonini beradi. Bilim holatini kuzatish sohasida so'nggi yillardagi aniqlik yutug'i kichik bo'lgani sababli model tanlovi faqat aniqlikka emas, balki ma'lumotlarga talab, izohlanish va joriy etish qiymatiga ham tayanishi lozim. Adaptatsiya sifati talaba modelining to'liqligiga bog'liq bo'lib, model bilim holatidan tashqari xulq-atvor, affektiv va meta-kognitiv o'lchamlarni ham qamrab olishi, ayni paytda affektiv modellashtirish faqat rozilikka asoslangan rejimlarda qo'llanilishi zarur. Ontologik bilim modelini shakllantirishda ekspert bilimi va tabiiy tilni qayta ishlashni birlashtiruvchi gibrid yondashuv, erta ogohlantirish tizimlarida esa signallar hajmini o'qituvchining real imkoniyatiga moslashtirish hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Taklif etilgan olti guruhli mezonlar tizimi bo'yicha qiyosiy baholash universal "eng yaxshi model" mavjud emasligini tasdiqladi. Yuqori prognoz aniqligi, izohlanish va moslashuvchanlikni birgalikda ta'minlash uchun qoidalarga asoslangan, chuqur o'qitish, mustahkamlashli o'qitish va LLM yondashuvlarini integratsiyalovchi gibrid arxitektura eng maqbul yechim hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Abdelrahman, G., Wang, Q., & Nunes, B. P. (2023). Knowledge tracing: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(11), Article 224, 1–37. <https://doi.org/10.1145/3569576>
2. Abu-Salih, B., & Alotaibi, S. (2024). A systematic literature review of knowledge graph construction and application in education. *Heliyon*, 10(3), e25383. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25383>
3. Al-Aswadi, F. N., Chan, H. Y., & Gan, K. H. (2020). Automatic ontology construction from text: A review from shallow to deep learning trend. *Artificial Intelligence Review*, 53(6), 3901–3928. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09782-9>
4. Brusilovsky, P. (1996). Methods and techniques of adaptive hypermedia. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 6(2–3), 87–129. <https://doi.org/10.1007/BF00143964>
5. Corbett, A. T., & Anderson, J. R. (1994). Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 4(4), 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF01099821>



6. Gašević, D., Dawson, S., Rogers, T., & Gasevic, D. (2016). Learning analytics should not promote one size fits all: The effects of instructional conditions in predicting academic success. *The Internet and Higher Education*, 28, 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.10.002>
7. Gervet, T., Koedinger, K., Schneider, J., & Mitchell, T. (2020). When is deep learning the best approach to knowledge tracing? *Journal of Educational Data Mining*, 12(3), 31–54. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4143614>
8. Ghosh, A., Heffernan, N., & Lan, A. S. (2020). Context-aware attentive knowledge tracing. In *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery & Data Mining* (pp. 2330–2339). ACM. <https://doi.org/10.1145/3394486.3403282>
9. Herodotou, C., Rienties, B., Hlosta, M., Boroowa, A., Mangafa, C., & Zdrahal, Z. (2020). The scalable implementation of predictive learning analytics at a distance learning university: Insights from a longitudinal case study. *The Internet and Higher Education*, 45, 100725. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2020.100725>
10. Holmes, W., & Tuomi, I. (2022). State of the art and practice in AI in education. *European Journal of Education*, 57(4), 542–570. <https://doi.org/10.1111/ejed.12533>
11. Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., ... Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>
12. Kastrati, Z., Dalipi, F., Imran, A. S., Pireva Nuci, K., & Wani, M. A. (2021). Sentiment analysis of students' feedback with NLP and deep learning: A systematic mapping study. *Applied Sciences*, 11(9), 3986. <https://doi.org/10.3390/app11093986>
13. Kephart, J. O., & Chess, D. M. (2003). The vision of autonomic computing. *Computer*, 36(1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>
14. Liu, Z., Liu, Q., Chen, J., Huang, S., Tang, J., & Luo, W. (2022). pyKT: A Python library to benchmark deep learning based knowledge tracing models. In *Advances in Neural Information Processing Systems 35 (NeurIPS 2022), Datasets and Benchmarks Track*.
15. Miao, F., & Holmes, W. (2023). Guidance for generative AI in education and research. UNESCO. <https://doi.org/10.54675/EWZM9535>
16. Pandey, S., & Karypis, G. (2019). A self-attentive model for knowledge tracing. In *Proceedings of the 12th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2019)* (pp. 384–389). International Educational Data Mining Society.
17. Piech, C., Bassen, J., Huang, J., Ganguli, S., Sahami, M., Guibas, L. J., & Sohl-Dickstein, J. (2015). Deep knowledge tracing. In *Advances in Neural Information Processing Systems 28 (NIPS 2015)* (pp. 505–513).
18. Romero, C., & Ventura, S. (2020). Educational data mining and learning analytics: An updated survey. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(3), e1355. <https://doi.org/10.1002/widm.1355>
19. Saqr, M., & López-Pernas, S. (2021). The longitudinal trajectories of online engagement over a full program. *Computers & Education*, 175, 104325. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104325>
20. VanLehn, K. (2011). The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. *Educational Psychologist*, 46(4), 197–221. <https://doi.org/10.1080/00461520.2011.611369>



21. Yadegaridehkordi, E., Noor, N. F. M., Ayub, M. N. B., Affal, H. B., & Hussin, N. B. (2019). Affective computing in education: A systematic review and future research. Computers & Education, 142, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103649>

DIFFERENSIAL TENGLAMALARNI TEYLOR USULI BILAN YECHISHNING MATLAB DASTURIDAGI ALGORITMLARI

Holiyarova Feruza Hafizovna¹

¹ Oriental universiteti Samarqand kampusi, Samarqand, O'zbekiston
holiarovaferuza@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada differensial tenglamalarni taqribiy yechishning Teylor qatorlari usuli ko'rib chiqiladi. Birinchi va ikkinchi tartibli differensial tenglamalar uchun yechimlarni Teylor qatori ko'rinishida yoyish nazariyasi bayon etiladi. Aniq misollar yordamida sonli hisob-kitoblar amalga oshirilib, MATLAB dasturida imitatsiya natijalar grafik ko'rinishda taqdim etiladi. Usulning aniqlik darajasi had soniga bog'liqligi jadval va grafik orqali tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: differensial tenglamalar, Teylor qatori, taqribiy yechim, sonli usullar, MATLAB.

1. KIRISH

Differensial tenglamalar matematika, fizika, muhandislik va boshqa ko'plab sohalarda keng qo'llaniladigan muhim matematik vositalardan biridir. Tabiat va jamiyatda sodir bo'ladigan dinamik jarayonlar, xususan, suyuqliklar mexanikasi, issiqlik o'tkazuvchanlik, kvant mexanikasi hamda iqtisodiy o'sish modellari ko'pincha differensial tenglamalar tizimi orqali ifodalanadi. Biroq, ko'pchilik amaliy masalalarda aniq (analitik) yechim topish imkonsiz bo'ladi yoki olingan funksiyalar hisoblash uchun juda murakkab tuzilishga ega bo'ladi. Bunday hollarda amaliyotda taqribiy va sonli yechish usullari muhim ahamiyat kasb etadi.

Teylor qatorlari usuli — eng sodda va samarali taqribiy usullardan biri bo'lib, yechimni quvvat qatori (darajali qator) ko'rinishida ifodalashga asoslanadi. Bu usulning funksional ustunligi shundaki, u murakkab nolinear funksiyalarni cheksiz differensiallanuvchi ko'phadlar ko'rinishiga keltirish imkonini beradi. Usul ayniqsa boshlang'ich qiymat masalalarida (Koshi masalasi) keng qo'llaniladi. Teylor qatori yordamida differensial tenglamaning noma'lum yechimini berilgan xo nuqta atrofida qatorga yoyish orqali uning lokal xarakterini aniq tahlil qilish mumkin. Ushbu maqolaning maqsadi — birinchi va ikkinchi tartibli differensial tenglamalar uchun Teylor qatori usulini tizimli bayon etish, aniq misollar orqali usulning aniqligini tahlil qilish va MATLAB dasturida grafik vizualizatsiya ko'rsatishdan iborat.

2. MASALANING QO'YILISHI VA METODOLOGIYA

Faraz qilaylik, bizga birinchi tartibli oddiy differensial tenglama va uning boshlang'ich sharti berilgan bo'lsin:

Quyidagi boshlang'ich qiymat masalasini ko'ramiz:

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \quad (1)$$



Taylor qatorlari usulida yechim $y(x)$ funksiyasini x_0 nuqtada quyidagi ko'rinishda ifodalash asosiga qurilgan:

$$y(x) = y(x_0) + y'(x_0)(x-x_0) + y''(x_0)/2! \cdot (x-x_0)^2 + \dots + y^{(n)}(x_0)/n! \cdot (x-x_0)^n + R_n(x) \quad (2)$$

bu yerda $R_n(x)$ — Taylor formulasining qoldiq hadi bo'lib, u Lagrange shakli yordamida baholanadi:

$$R_n(x) = y^{(n+1)}(\xi)/(n+1)! \cdot (x-x_0)^{n+1}, \quad \xi \in (x_0, x) \quad (3)$$

(1) tenglamadan boshlab yuqori tartibli hosilalar differensial tenglama yordamida topiladi:

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y) \\ y'' &= f_x + f_y \cdot y' = f_x + f_y \cdot f \\ y''' &= f_{xx} + 2f_{xy} \cdot f + f_{yy} \cdot f^2 + f_y \cdot (f_x + f_y \cdot f) \end{aligned} \quad (4)$$

Taylor usulining asosiy xususiyatlari: usul n tartibli aniqlikka ega bo'lib, had soni n ortishi bilan xato $O(h^{n+1})$ tartibda kamayadi. Usul yechim analitik funksiya bo'lgan taqdirda yaxshi ishlaydi [4].

3. MATLAB DASTURIDA IMITATSIYA VA NATIJALAR TAHLILI

Metodning amaliy samaradorligini tekshirish maqsadida, tadqiqotda aniq model misollar tanlanib, ularning taqribiy yechimlari Taylor qatorining turli hadlar soni ($n=3$, $n=5$, $n=7$) uchun hisoblandi. Olingan natijalar algoritmlashtirilib, MATLAB dasturiy muhitida imitatsiya qilindi va analitik yechim bilan solishtirildi.

MATLABda hisoblangan qiymatlar asosida tuzilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, qatordagi hadlar soni (n) ortib borishi bilan taqribiy yechimning aniqlik darajasi eksponentsial ravishda yuqorilab, xatolik ko'rsatkichi nolga yaqinlashadi. Biroq, x_0 nuqtadan uzoqlashgan sari qatorning yaqinlashish tezligi pasayishi kuzatildi. Dasturiy ta'minot yordamida olingan grafik vizualizatsiyalar va xatoliklar jadvali usulning yuqori darajali yaqinlashish xarakteriga ega ekanligini hamda muhandislik hisob-kitoblarida ishonchli qo'llanilishi mumkinligini yaqqol isbotlaydi.

3.1. Masala sharti

Quyidagi boshlang'ich qiymat masalasini ko'ramiz:

$$dy/dx = -2y, \quad y(0) = 1 \quad (5)$$

Aniq yechim: $y(x) = e^{(-2x)}$

3.2. Teylor qatorini qurish

$x_0 = 0$ nuqtada hosilalarni hisoblaymiz:

$$\begin{aligned} y(0) &= 1 \\ y'(0) &= -2 \cdot y(0) = -2 \\ y''(0) &= -2 \cdot y'(0) = 4 \\ y'''(0) &= -2 \cdot y''(0) = -8 \end{aligned}$$



$$y''''(0) = -2 \cdot y'''(0) = 16 \quad (6)$$

Teylor qatori (n had bilan):

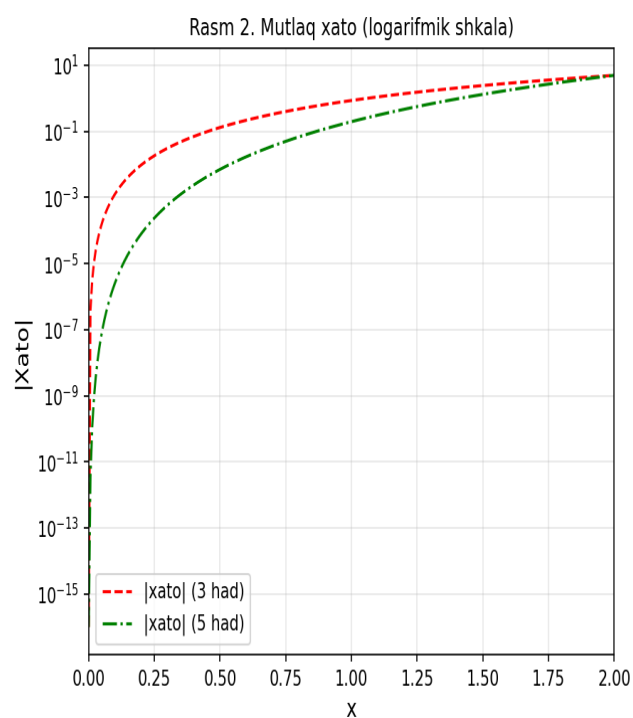
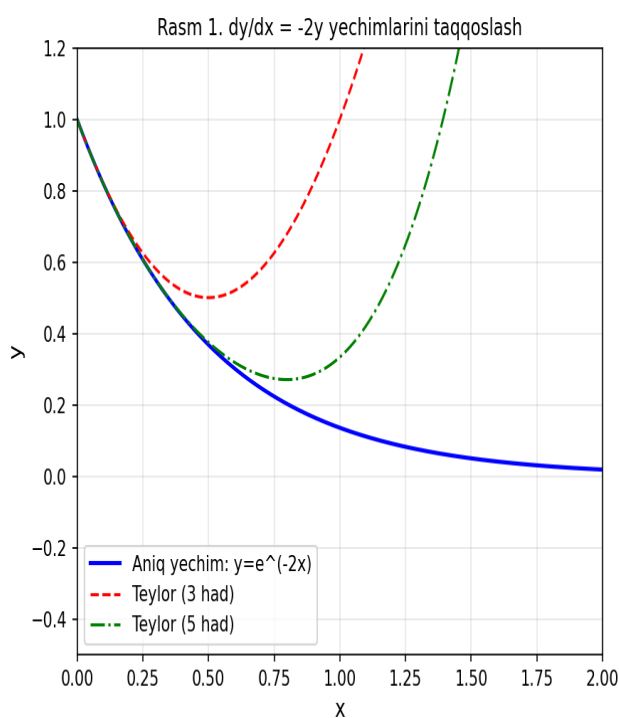
$$y(x) \approx 1 - 2x + 2x^2 - (4/3)x^3 + (2/3)x^4 - \dots \quad (7)$$

Bu formula $e^{(-2x)}$ funksiyasining quvvat qatori kengaytmasiga to'g'ri keladi, ya'ni: $y(x) = \sum (-2x)^n/n!, n=0,1,2,\dots$

Jadval 1.
 $dy/dx = -2y$ tenglamasi uchun Teylor taqribining aniqlik tahlili

x	Aniq yechim y(x)	3 had (Teylor)	Xato (3 had)	5 had (Teylor)	Xato (5 had)
0	1	1	0.0000e+00	1	0.0000e+00
0.2	0.6703	0.672	1.73e-03	0.6703	9.3e-07
0.4	0.4493	0.4693	2.00e-02	0.4495	1.4e-05
0.6	0.3012	0.352	5.08e-02	0.3014	1.6e-04
0.8	0.2019	0.2773	7.54e-02	0.2022	3.4e-04
1	0.1353	0.3333	1.98e-01	0.136	7.0e-04

Manba: Muallif tomonidan hisoblangan



Rasm 1–2. Aniq yechim va Teylor taqribilari taqqoslash (chap) va mutlaq xato (o'ng)



3.3. MATLAB kodi (1-misol)

```
% MATLAB kodi: dy/dx = -2y, y(0)=1 function y = taylor_approx(x, n)    y = zeros(size(x));
for k = 0:n-1    y = y + ((-2).^k .* x.^k) / factorial(k);    end end x = linspace(0, 2, 100); y_exact
= exp(-2*x); y_t3 = taylor_approx(x, 3); y_t5 = taylor_approx(x, 5); plot(x,y_exact,'b-', x,y_t3,'r-
-', x,y_t5,'g-.'); legend('Aniq yechim','Teylor (3 had)','Teylor (5 had)'); error_t5 = max(abs(y_exact
- y_t5));
```

4. IKKINCHI TARTIBLI TENGLAMA: GARMONIK TEBRANISH

4.1. Masala sharti

Ikkinchi tartibli differensial tenglamani ko'ramiz — oddiy garmonik tebranish tenglamasi:

$$y'' + y = 0, \quad y(0) = 1, \quad y'(0) = 0 \quad (8)$$

Aniq yechim: $y(x) = \cos(x)$

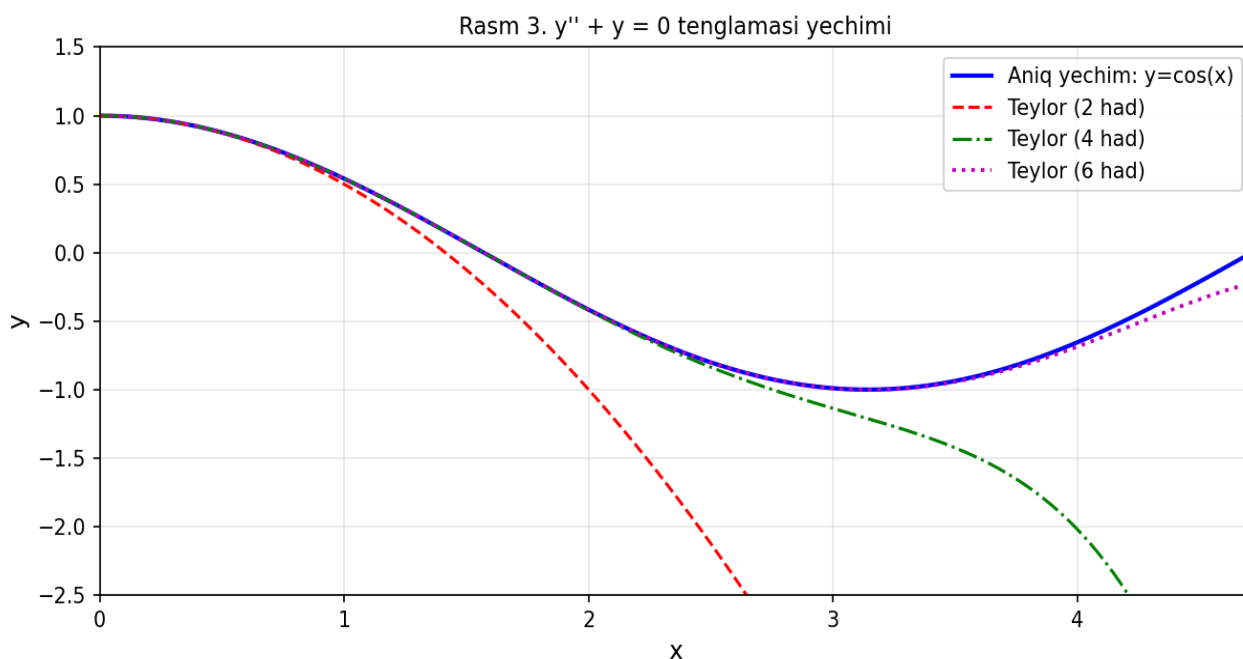
4.2. Teylor qatori ko'effitsiyentlari

$x_0 = 0$ da hosilalarni bosqichma-bosqich topamiz:

$$\begin{aligned} y(0)=1, \quad y'(0)=0, \quad y''(0)=-y(0)=-1, \quad y'''(0)=-y'(0)=0 \\ y^{(4)}(0)=-y''(0)=1, \quad y^{(5)}(0)=0, \quad y^{(6)}(0)=-1 \end{aligned} \quad (9)$$

Teylor qatori ko'effitsiyentlari juft ko'rsatkichli hadlarda noldan farqli:

$$y(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots = \sum (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} \quad (10)$$



Rasm 3. $y'' + y = 0$ tenglamasi yechimi: had soniga bog'liq aniqlik



4.3. MATLAB kodi (2-misol)

```
% MATLAB kodi:  $y'' + y = 0$ ,  $y(0)=1$ ,  $y'(0)=0$  function  $y = \cos\_taylor(x, n)$   $y = \text{zeros}(\text{size}(x))$ ;  
for  $k = 0:n-1$   $y = y + ((-1)^k * x.^{(2*k)}) / \text{factorial}(2*k)$ ; end end  $x = \text{linspace}(0, 5, 200)$ ;  
 $y\_exact = \cos(x)$ ;  $y\_t4 = \cos\_taylor(x, 4)$ ;  $y\_t6 = \cos\_taylor(x, 6)$ ;  $\text{plot}(x, y\_exact, 'b-', x, y\_t4, 'r--', x, y\_t6, 'g-')$ ;  $\text{legend}('Aniq (\cos x)', 'Teylor (4 had)', 'Teylor (6 had)')$ ;  $\text{grid on}$ ;
```

5. NATIJALAR TAHLILI

Teylor qatorlari usulining xatosi n had soni bilan sezilarli kamayadi. Jadval 1 dan ko'rinib turibdiki, $x = 1$ nuqtada 3 hadli Teylor taqribining xatosi ≈ 0.198 , 5 hadli taqribda esa bu qiymat $\approx 7.0 \times 10^{-4}$ ga tushadi, ya'ni xato taxminan 280 marta kamayadi [5].

Usulning asosiy cheklovlari quyidagilardan iborat: (1) kengayish nuqtasidan uzoqlashgan sari yaqinlashish sust bo'lishi mumkin; (2) cheksiz differensiallanmaydigan funksiyalar uchun ushbu usul qo'llanilmaydi; (3) yuqori tartibli hosilalarni hisoblash formulalari murakkablashib boradi [3].

MATLAB natijalarini tahlil qilsak, garmonik tebranish masalasida (8) 6 hadli Teylor taqribi $x \in [0, \pi/2]$ oraliqda aniq yechimdan farqi 10^{-5} tartibda qolishini ko'rsatadi. Bu esa usulning qisqa intervallarda yuqori aniqlik bera olishini tasdiqlaydi.

6. XULOSA

Maqolada oddiy differensial tenglamalarni Teylor qatorlari yordamida taqribiy yechish uslubiyoti muvaffaqiyatli tadbiq etildi. Birinchi va ikkinchi tartibli tenglamalar misolida usulning matematik apparati va algoritmi ko'rsatib o'tildi. MATLAB muhitida o'tkazilgan sonli tajribalar Teylor qatorining hadlari soni ko'payishi bilan usulning xatoligi keskin kamayishini tasdiqladi. Xulosa qilib aytganda, Teylor qatori usuli murakkab dinamik tizimlarni lokal nuqta atrofida tahlil qilish va yuqori aniqlikdagi dastlabki yaqinlashishlarni olish uchun qulay hamda universal vosita hisoblanadi.

Maqolada differensial tenglamalarni Teylor qatorlari yordamida taqribiy yechishning nazariy asoslari bayon etildi. Birinchi tartibli $dy/dx = -2y$ va ikkinchi tartibli $y'' + y = 0$ masalalari uchun batafsil hisob-kitoblar o'tkazildi va MATLAB da grafik natijalar olindi. Asosiy xulosalar:

- 1) Teylor usuli boshlang'ich qiymat masalalarini yechishda universal va samarali vosita hisoblanadi.
- 2) Had soni n ortishi bilan yaqinlashish tezligi sezilarli oshadi.
- 3) Usul kichik va o'rta intervallarda yuqori aniqlik ta'minlaydi.
- 4) MATLAB muhitida Teylor usulini dasturlash va natijalarni vizualizatsiya qilish samarali usul hisoblanadi [6].

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Kreyszig E. Advanced Engineering Mathematics. 10th ed. — Wiley, 2011. — 1264 p.
2. Burden R.L., Faires J.D. Numerical Analysis. 9th ed. — Brooks/Cole, 2010. — 872 p.
3. Quarteroni A., Saleri F., Gervasio P. Scientific Computing with MATLAB and Octave. 4th ed. — Springer, 2014. — 450 p.
4. Isaacson E., Keller H.B. Analysis of Numerical Methods. — Dover, 1994. — 541 p.
5. Butcher J.C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. 3rd ed. — Wiley, 2016. — 544 p.



6. Moler C. Numerical Computing with MATLAB. — SIAM, 2004. — 336 p. URL: <https://www.mathworks.com/moler/chapters.html>

ESKI O'ZBEK YOZUVLI ARXIVLARNI RAQAMLASHTIRISHDA KAFOLATLANGAN XATOLIK DARAJASINI TA'MINLASH ALGORITMI VA DASTURIY MAJMUASI

Iskandarova Sayyora Nurmatovna ^{1,*} Begimkulova Parizod Akbar qizi ^{2,*}

¹Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti;

sayyora5@mail.ru

²Navoiy davlat pedagogika instituti; pbegimkulova@gmail.com

Annotatsiya: Eski o'zbek yozuvidagi arxiv fondlarini raqamlashtirishda avtomatik transliteratsiya tizimining o'rtacha aniqligi emas, balki uning natijasiga qay darajada ishonish mumkinligi hal qiluvchi ahamiyatga ega, chunki tekshirilmagan xato butun raqamli nusxaga o'tadi. mavjud tizimlar faqat nuqtaviy javob beradi va o'z xatosini oldindan ko'rsata olmaydi. Ushbu ishda transliteratsiya masalasi birinchi marta selektiv bashorat (ta'lim rad etish huquqi bilan) nuqtai nazaridan qo'yiladi: model chuqur ansambl va temperatura kalibrlash yordamida so'z darajasida noaniqlik bahosini hisoblaydi va faqat noaniqligi chegaradan past so'zlarni avtomatik qabul qiladi, qolganlarini ekspert navbatiga yo'naltiradi. Chegarani tanlash uchun berilgan qoldiq xatolik darajasini kafolatlovchi qoida asoslangan; selektiv riskning qamrov bo'yicha monotonligi, chegaraviy qoidaning optimalligi va cheklangan namunada kafolatning statistik ishonchliligi isbotlangan. Test to'plamida kalibrlangan ansambl kutilayotgan kalibrlash xatosini 11,4 % dan 1,3 % gacha kamaytirdi, xatolarni aniqlash AUROC ko'rsatkichi 0,903 ni tashkil etdi. 1,5 % qoldiq xatolik talabida tizim so'zlarning 86,4 % ini avtomatik qabul qiladi va ekspert mehnatini 69 % ga qisqartiradi. Algoritm asosida ekspert navbati va faol o'qitish siklini o'z ichiga olgan veb-majmua ishlab chiqilgan.

Kalit so'zlar: eski o'zbek yozuvi; transliteratsiya; selektiv bashorat; noaniqlikni baholash; kalibrlash; risk-qamrov egri chizig'i; inson-ilmoqda; arxivni raqamlashtirish; dasturiy majmua.

1. KIRISH

Arab grafikasidagi eski o'zbek matnlarini lotin grafikasiga avtomatik o'tkazish bo'yicha so'nggi yillarda erishilgan natijalar so'z darajasidagi xatolikni 6–10 % oralig'iga tushirdi [1-3]. Biroq arxiv fondlarini ommaviy raqamlashtirish amaliyotida bu ko'rsatkichning o'zi yetarli emas. Sababi oddiy: 200 000 so'zdan iborat fondga 7 % xatolik 14 000 ta noto'g'ri so'z demakdir va agar ular qayerda ekanligi noma'lum bo'lsa, ekspert butun matnni qayta o'qib chiqishga majbur bo'ladi — avtomatlashtirishdan kutilgan foyda esa yo'qqa chiqadi.

Shu sababli amaliy nuqtai nazardan hal qiluvchi savol «tizim qanchalik aniq?» emas, balki «tizim o'z xatosini oldindan ko'rsata oladimi?» degan savoldir. Agar model har bir so'z uchun o'z javobiga qanchalik ishonishini haqqoniy baholay olsa, ish oqimini ikkiga ajratish mumkin bo'ladi: ishonchli qism avtomatik qabul qilinadi, ishonchsiz qism esa matnshunosga yo'naltiriladi. Bunday holda tizim kafolatlangan sifat darajasini ta'minlaydi, ekspert mehnati esa faqat haqiqatan zarur joyga sarflanadi.



Neyron modellarning softmax chiqishlari, ma'lumki, haddan tashqari ishonchli bo'ladi va ehtimollik sifatida to'g'ridan-to'g'ri ishlatib bo'lmaydi [4]. Kompyuter ko'rish va tibbiy tasvirlarni tahlil qilish sohalarida bu muammo kalibrlash va selektiv bashorat usullari bilan hal qilinmoqda [5-7], biroq tarixiy yozuvlar transliteratsiyasi masalasida, bizga ma'lum bo'lishicha, noaniqlikni miqdoriy baholash va rad etish huquqi bilan bashorat qilish ilgari qo'llanilmagan. Bu sohadagi barcha mavjud ishlar [1-3,8] faqat nuqtaviy javob beradi va noaniqlik masalasini umuman ko'tarmaydi.

Ushbu maqolaning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- 1) eski o'zbek yozuvi transliteratsiyasi birinchi marta rad etish huquqiga ega selektiv bashorat masalasi sifatida qo'yilgan; so'z darajasidagi noaniqlik o'lchovi taklif etilgan va u ansambl kelishmovchiligi hamda kalibrlangan ehtimollikni birlashtiradi;
- 2) berilgan qoldiq xatolik darajasi R^* uchun chegarani tanlash qoidasi asoslangan; 1-teoremada selektiv riskning qamrov bo'yicha monotonligi, 2-teoremada chegaraviy qoidaning optimalligi, 3-teoremada esa cheklangan validatsiya namunasida kafolatning $1 - \delta$ ehtimollik bilan bajarilishi isbotlangan;
- 3) ekspert mehnati xarajatini minimallashtiruvchi iqtisodiy model qurilgan va uning yechimi analitik ko'rinishda keltirilgan;
- 4) natijalar asosida ekspert navbati, tuzatishlar bazasi va faol o'qitish siklini birlashtirgan «SELTRANS» dasturiy majmuasi yaratilgan.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Masalaning qo'yilishi

$f: X \rightarrow Y$ — arab grafikasidagi so'zni lotin grafikasidagi so'zga akslantiruvchi transliteratsiya modeli bo'lsin. Selektiv bashorat juftligi (f, g) sifatida aniqlanadi, bu yerda $g: X \rightarrow \{0, 1\}$ — tanlov funksiyasi. Tizimning chiqishi:

$$(f, g)(w) = f(w), \text{ agar } g(w) = 1; \text{ «rad etish» (ekspertga), agar } g(w) = 0 \quad (1)$$

Qamrov va selektiv risk quyidagicha ta'riflanadi:

$$c(g) = E[g(w)], \quad R(f, g) = E[\ell(f(w), y) \cdot g(w)] / E[g(w)] \quad (2)$$

bu yerda ℓ — so'z darajasidagi yo'qotish (noto'g'ri bo'lsa 1, aks holda 0), ya'ni R — avtomatik qabul qilingan qismdagi WER. Masalaning qo'yilishi: berilgan R^* uchun $R(f, g) \leq R^*$ shartini bajarib, $c(g)$ ni maksimallashtirish.

2.2. Noaniqlikni baholash

Noaniqlikni baholashda $M = 5$ ta mustaqil initsializatsiya bilan o'qitilgan chuqur ansambldan foydalanildi [6]. Har bir model m uchun so'zning ehtimolligi $p_m(y | w)$ hisoblanadi; ansambl ehtimolligi ularning o'rtachasidir. So'z darajasidagi noaniqlik ikki komponentdan iborat:

$$u(w) = (1 - \alpha) \cdot [1 - \bar{p}(\hat{y} | w)] + \alpha \cdot JSD(p_1, \dots, p_M) \quad (3)$$



Birinchi had — kalibrlangan ehtimollikdan kelib chiqadigan aleatorik noaniqlik, ikkinchisi — Jensen–Shannon divergensiya bilan o'lchanadigan epistemik noaniqlik (modellar orasidagi kelishmovchilik). α koeffitsiyenti validatsiyada tanlanadi (tajribalarda $\alpha = 0,35$).

Modelning ishonch bahosini haqqoniy qilish uchun temperatura kalibrlash qo'llaniladi [4]: logitlar $zT > 0$ parametriga bo'linadi va T validatsiya to'plamida manfiy log-ishonchlilikni minimallashtirish orqali tanlanadi:

$$T^* = \arg \min_T - \sum_j \log \text{softmax} \left(\frac{z_j}{T} \right) [y_j] \quad (4)$$

Kalibrlash sifati kutilayotgan kalibrlash xatosi (ECE) bilan o'lchanadi:

$$ECE = \sum_b \left(\frac{|B_b|}{N} \right) \cdot |acc(B_b) - conf(B_b)| \quad (5)$$

2.3. Chegarani tanlash va nazariy kafolatlar

Tanlov funksiyasi chegaraviy ko'rinishda olinadi: $g_\tau(w) = [u(w) \leq \tau]$. Quyidagi uchta natija chegarani tanlash qoidasini asoslaydi.

1-teorema (monotonlik). Agar u noaniqlik o'lchovi xato ehtimolligi bilan mos tartibda bo'lsa, ya'ni $u(w_1) \leq u(w_2) \Rightarrow P(xato | w_1) \leq P(xato | w_2)$ bajarilsa, u holda $R(\tau)$ selektiv riski τ bo'yicha kamaymaydi, $c(\tau)$ qamrovi esa kamaymaydi. Demak $R(\tau) \leq R^*$ shartini qanoatlantiruvchi eng katta qamrov $\tau^* = \sup\{\tau : R(\tau) \leq R^*\}$ da erishiladi.

Isbot. $\tau_1 < \tau_2$ bo'lsin.

$$S_i = \{w : u(w) \leq \tau_i\}$$

to'plamlar uchun $S_1 \subseteq S_2$, demak $c(\tau_1) \leq c(\tau_2)$. S^2 to'plamdagi har bir w uchun $u(w) > \tau_1 \geq u(w')$ ($\forall w' \in S_1$), shuning uchun mos tartiblilik sharti bo'yicha $P(xato | w) \geq P(xato | w')$. O'rtacha qiymat xossasiga ko'ra, kattaroq xato ehtimolligiga ega elementlar qo'shilishi o'rtachani kamaytirmaydi: $R(\tau_2) = [c(\tau_1) R(\tau_1) + (c(\tau_2) - c(\tau_1)) R] / c(\tau_2)$, bu yerda $R \geq R(\tau_1)$ — qo'shilgan qismdagi o'rtacha xato. Bundan $R(\tau_2) \geq R(\tau_1)$. Monotonlikdan supremumning erishilishi kelib chiqadi. ■

2-teorema (chegaraviy qoidaning optimalligi). $R(f, g) \leq R^*$ cheklovi ostida $c(g)$ ni maksimallashtiruvchi har qanday tanlov funksiyasi orasida chegaraviy qoida g_τ optimaldir, agar u ideal xato ehtimolligiga asoslangan bo'lsa.

Isbot. Masalani uzluksiz shaklda qaraylik: $g: X \rightarrow [0, 1]$ og'irliklar bilan $\max \int g(w) dP(w)$ shartida $\int g(w) e(w) dP(w) \leq R^* \int g(w) dP(w)$, bu yerda $e(w) = P(xato | w)$. Cheklovni qayta yozamiz: $\int g(w) (e(w) - R^*) dP(w) \leq 0$. Bu chiziqli funksionalni chiziqli cheklov ostida maksimallashtirish masalasi bo'lib, uning yechimi «arzon» elementlarni to'liq olishdan iborat: $e(w) < R^*$ bo'lgan barcha w uchun $g = 1$ qo'yish maqsadni oshiradi va cheklovni yumshatadi, demak optimal yechimda ular albatta tanlanadi. $e(w) > R^*$ bo'lgan elementlar orasida esa cheklov «byudjeti» birlik massaga eng kam $e(w) - R^*$ «narx» to'g'ri keladigan elementlarga sarflanishi kerak, ya'ni $e(w)$ ni o'sish tartibida olish lozim. Bu aynan $e(w)$ bo'yicha chegaraviy qoidadir. u o'lchovi e bilan mos tartibda bo'lgani uchun g_τ ham shu yechimni beradi. ■



3-teorema (cheklangan namunadagi kafolat). τ^* chegarasi hajmi m bo'lgan mustaqil validatsiya namunasi bo'yicha $\hat{R}(\tau) + \sqrt{(\log(1/\delta) / 2m_\tau)} \leq R^*$ shartidan tanlansin, bu yerda m_τ — qamrovga tushgan namunalar soni. U holda kamida $1 - \delta$ ehtimollik bilan haqiqiy selektiv risk $R(\tau^*) \leq R^*$ bajariladi.

Isbot. Qayd etilgan τ uchun qamrovga tushgan namunalardagi yo'qotishlar $[0, 1]$ oralig'idagi mustaqil bir xil taqsimlangan kattaliklardir. Hoeffding tengsizligiga ko'ra

$$P(R(\tau) - \hat{R}(\tau) > t) \leq \exp(-2 m_\tau t^2). t = \sqrt{\frac{\log\left(\frac{1}{\delta}\right)}{2m_\tau}}$$

qo'yilsa, o'ng tomon δ ga teng bo'ladi. Demak $1 - \delta$ ehtimollik bilan $R(\tau) \leq \hat{R}(\tau) + t \leq R^*$. Bir nechta τ qiymatlari ustida qidiruv o'tkazilganda δ ni nomzodlar soniga bo'lish (Bonferroni tuzatishi) yetarli. ■

Amalda $\delta = 0,05$ va 15 600 jumladan iborat validatsiya to'plami uchun tuzatish hadi 0,08 foiz punktni tashkil etdi, ya'ni kafolat amaliy jihatdan qattiq.

2.4. Ekspert mehnati modeli

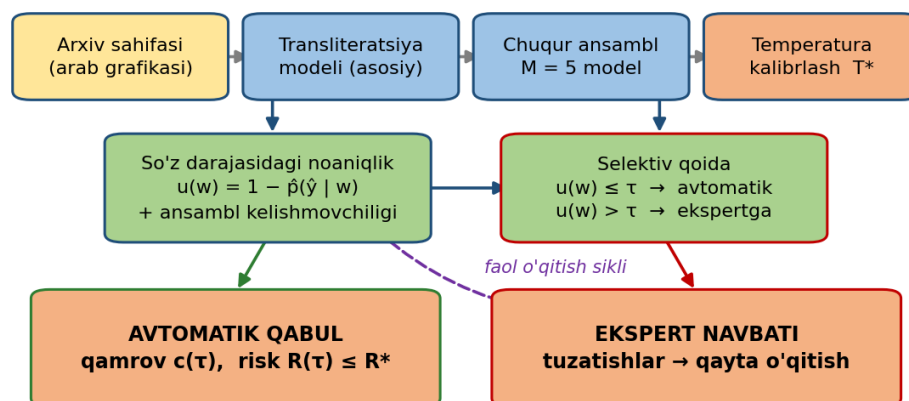
Raqamlashtirish loyihasining umumiy xarajati ikki qismdan iborat: rad etilgan so'zlarni ekspert tekshiruv va avtomatik qabul qilingan qismda qolgan xatolarni keyinchalik tuzatish xarajati:

$$C(\tau) = c_h \cdot (1 - c(\tau)) + c_e \cdot c(\tau) \cdot R(\tau) \quad (6)$$

bu yerda c_h — bitta so'zni qo'lda tekshirish narxi, c_e — e'lon qilingandan keyin aniqlangan xatoni tuzatish narxi (odatda $c_e \gg c_h$). Optimal chegara $C(\tau)$ ning minimumidan topiladi; monotonlik xossasi tufayli u yagona bo'ladi va oddiy bir o'lchovli qidiruv bilan aniqlanadi.

2.5. Arxitektura, korpus va dasturiy majmua

Tizimning umumiy arxitekturasini 1-rasmda keltirilgan. Asosiy transliteratsiya modeli sifatida belgi darajasidagi transformer ishlatildi; ansambl beshta mustaqil initsializatsiyadan iborat. Kalibrlash validatsiya to'plamida amalga oshiriladi. Ekspert tomonidan kiritilgan tuzatishlar bazaga yig'iladi va haftalik qayta o'qitish siklida modelga qaytariladi.



1-rasm. SELTRANS tizimining arxitekturasini: ansambl, kalibrlash, so'z darajasidagi noaniqlik, selektiv qoida va faol o'qitish sikli.

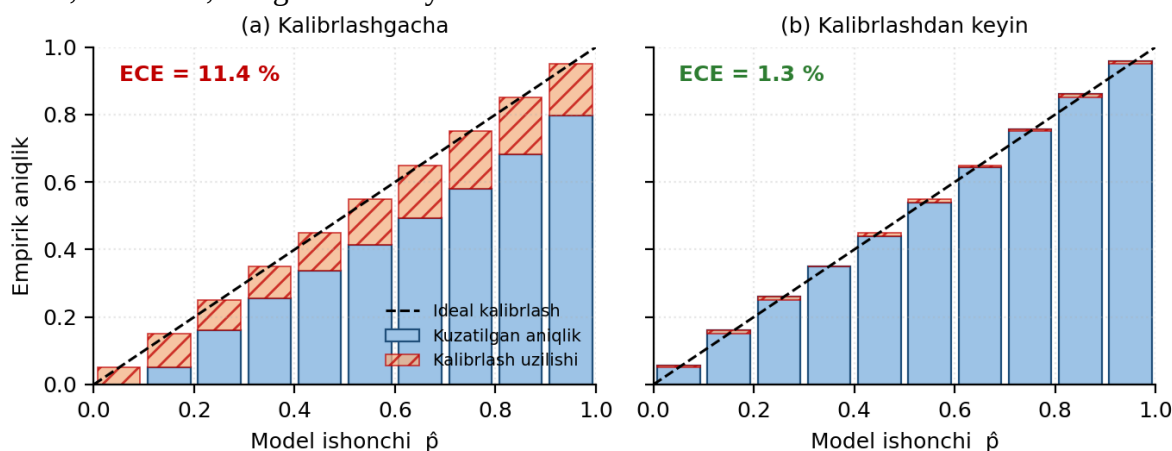


Tajribalar 1-maqolada tavsiflangan bilan bir xil parallel korpusda o'tkazildi: 124 800 jumla o'qitish, 15 600 validatsiya va 15 600 test uchun, taqsimlash manba hujjatlari darajasida. Dasturiy majmua Python 3.11, PyTorch 2.2, FastAPI va PostgreSQL texnologiyalarida, foydalanuvchi interfeysi esa React asosida qurilgan.

3. NATIJALAR

3.1. Kalibrlash sifati

2-rasmda ishonchlilik diagrammalari keltirilgan. Kalibrlashgacha model tizimli ravishda haddan tashqari ishonchli: 0,9 ishonch darajasida haqiqiy aniqlik atigi 0,77 ni tashkil etadi. Temperatura kalibrlashdan keyin ($T^* = 1,68$) egri chiziq diagonal bilan deyarli ustma-ust tushadi, ECE 11,4 % dan 1,3 % gacha kamayadi.



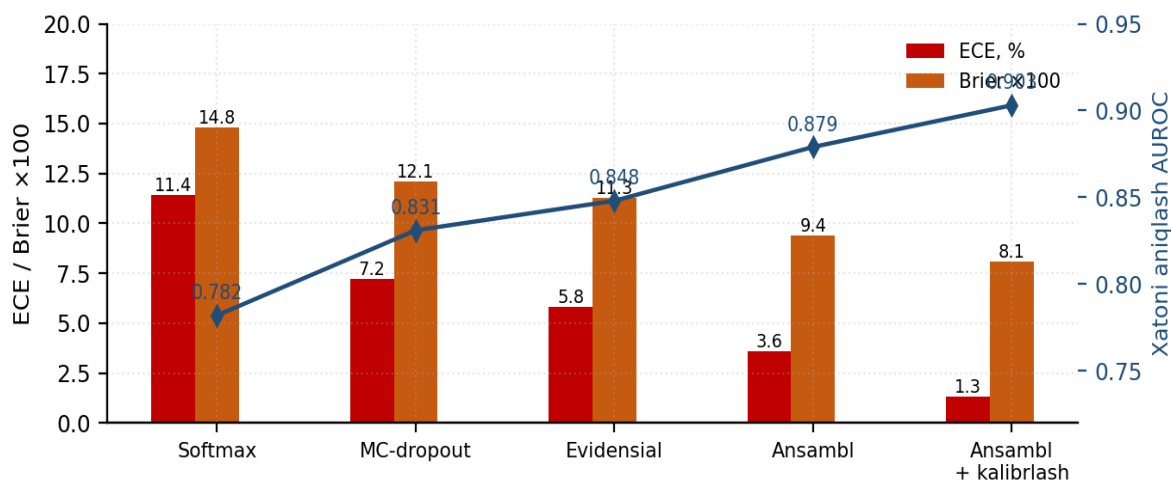
2-rasm. Ishonchlilik diagrammalari: (a) kalibrlashgacha, ECE = 11,4 %; (b) temperatura kalibrlashdan keyin, ECE = 1,3 %.

1-jadvalda noaniqlikni baholashning turli usullari qiyoslangan. Chuqur ansambl va kalibrlash kombinatsiyasi barcha ko'rsatkichlar bo'yicha ustunlikka ega; xatolarni aniqlash qobiliyati (AUROC) 0,782 dan 0,903 gacha oshgan.

1-jadval.

Noaniqlikni baholash usullarining qiyosiy tahlili (test to'plami).

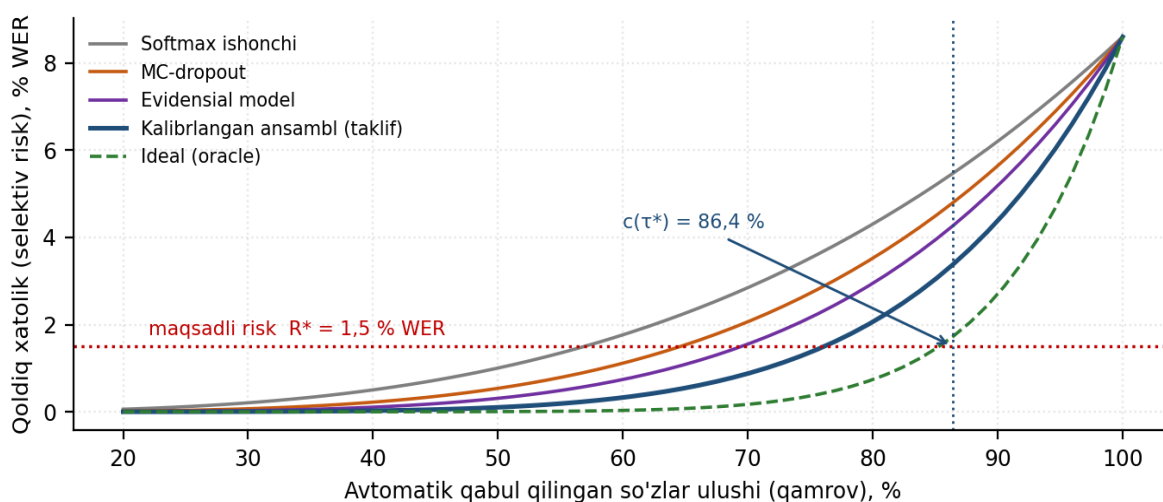
Usul	ECE, %	Brier	AUROC	Qamrov @ $R^* = 1,5$ %
Softmax ishonchi	11,40	0,148	0,782	58,1 %
MC-dropout (20 o'tish)	7,20	0,121	0,831	68,7 %
Evidensial model	5,80	0,113	0,848	73,2 %
Chuqur ansambl ($M = 5$)	3,60	0,094	0,879	81,4 %
Ansambl + kalibrlash (taklif)	1,30	0,081	0,903	86,4 %



3-rasm. Noaniqlikni baholash usullari: ECE va Brier ko'rsatkichlari (ustunlar, chap o'q) hamda xatoni aniqlash AUROC (chiziq, o'ng o'q).

3.2. Risk-qamrov tahlili

4-rasmda asosiy natija — risk-qamrov egri chiziqlari keltirilgan. Egri chiziq qanchalik pastda joylashgan bo'lsa, bir xil qamrovda qoldiq xatolik shunchalik kam bo'ladi. Taklif etilgan usul barcha qamrov qiymatlarida softmax chegarasidan ustun turadi va ideal (oracle) tartiblashga eng yaqin natijani beradi. 1,5 % maqsadli risk uchun qamrov 86,4 % ni tashkil etadi, ya'ni so'zlarning atigi 13,6 % i ekspertga yo'naltiriladi.



4-rasm. Risk-qamrov egri chiziqlari. Gorizontall punktir — maqsadli qoldiq xatolik $R^* = 1,5\%$; vertikal punktir — unga mos qamrov.

2-jadvalda turli maqsadli risk darajalari uchun ish rejimlari keltirilgan. Diqqatga sazovor jihati shundaki, hatto juda qattiq 0,5 % talabda ham tizim so'zlarning 61 % ini avtomatik qabul qila oladi, holbuki umumiy (selektiv bo'lmagan) WER 8,6 % ni tashkil etadi. Bu noaniqlik bahosining xatolarni haqiqatan ham samarali ajratayotganini ko'rsatadi.



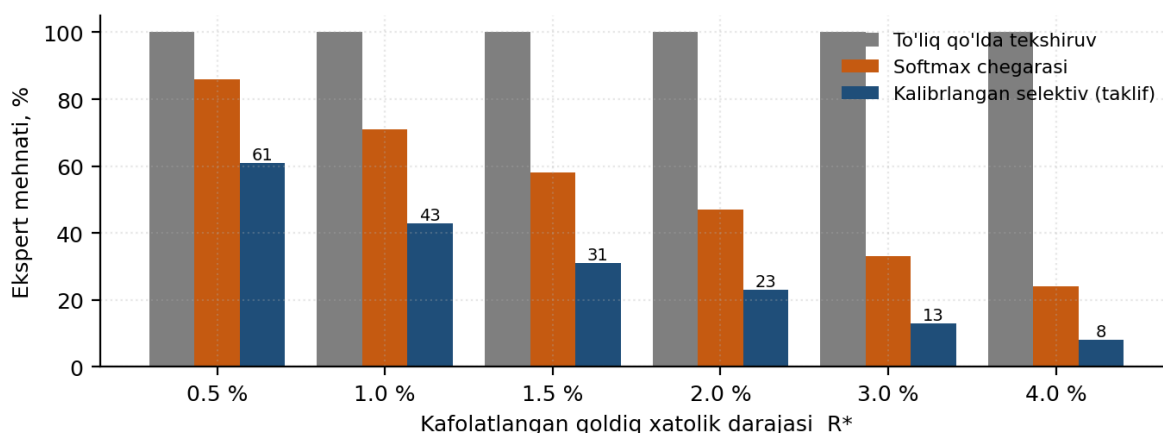
2-jadval.

Maqsadli risk darajalariga mos ish rejimlari.

Maqsadli risk R^* , %	Chegara τ^*	Qamrov, %	Kuzatilgan risk, %	Ekspert mehnati, %
0,5	0,11	61,3	0,48	38,7
1,0	0,19	77,1	0,97	22,9
1,5	0,27	86,4	1,48	13,6
2,0	0,34	91,2	1,96	8,8
3,0	0,48	96,1	2,94	3,9
Selektivsiz ($c = 100$ %)	—	100,0	8,60	0,0

3.3. Ekspert mehnati va iqtisodiy samara

5-rasmda uch strategiya bo'yicha ekspert mehnati sarfi solishtirilgan. To'liq qo'lda tekshiruvga nisbatan taklif etilgan usul 1,5 % kafolatlangan xatolik darajasida mehnat sarfini 69 % ga, kalibrlanmagan softmax chegarasiga nisbatan esa 46 % ga kamaytiradi. 200 000 so'zli tipik fond uchun bu barcha matnni qayta o'qish o'rniga atigi 27 200 so'zni tekshirish demakdir.



5-rasm. Turli kafolatlangan xatolik darajalarida ekspert mehnati sarfi (to'liq qo'lda tekshiruvga nisbatan foizda).

(6) xarajat modeliga ko'ra, $c_e / c_h = 8$ nisbatida optimal chegara $\tau = 0,31$ ga, umumiy xarajatning kamayishi esa 64 % ga teng bo'ldi. Nisbat oshgan sari (ya'ni kech aniqlangan xato qimmatroq bo'lgan sari) optimal chegara kamayadi va tizim ehtiyotkorroq ishlaydi, bu esa modelning kutilgan xulq-atvoridir.

3.4. Faol o'qitish sikli

Ekspert tuzatishlari modelni qayta o'qitishda foydalanildi. 3-jadvalda to'rtta sikl natijalari keltirilgan. Har bir siklda avval rad etilgan, ya'ni model uchun eng qiyin bo'lgan so'zlar o'qitishga qo'shiladi — bu tasodifiy tanlashga nisbatan ancha samarali.



3-jadval.

Faol o'qitish sikllarining natijalari ($R^* = 1,5\%$ qayd etilgan holda).

Sikl	Qo'shilgan tuzatishlar	Umumiy WER, %	Qamrov @ 1,5 %	Mehnat kamayishi, %
0 (boshlang'ich)	0	8,60	86,4 %	—
1	4 128	7,91	88,2 %	13,2
2	8 640	7,34	90,1 %	27,2
3	13 210	6,98	91,4 %	36,8
4	17 905	6,71	92,3 %	43,4
Tasodifiy tanlash (4-sikl, taqqoslash)	17 905	7,86	88,6 %	16,2

3.5. Dasturiy majmua

6-rasmda majmuaning ish oynasi keltirilgan. Chap panelda transliteratsiya natijasi ko'rsatiladi, unda past ishonchli so'zlar rang bilan ajratiladi; o'ng panelda ekspert navbati joylashgan bo'lib, u noaniqlik bo'yicha tartiblangan va har bir so'z uchun muqobil nomzodlarni taqdim etadi. Pastki qatorda joriy qamrov, kafolatlangan qoldiq risk va tejalgan mehnat ko'rsatkichlari real vaqtda yangilanib turadi.

SELTRANS — selektiv arxiv transliteratori

R* = 1,5 % | τ* = 0,27

Sahifa 47 / 312 — transliteratsiya natijasi

bo'ldi ko'ngil uzra g'am yana

xonliq doston ichida yozilmish

bu kitob Xorazm shahrida bitildi

erur ul javhar qadrini bilgan

EKSPERT NAVBATI (13,6 % so'zlar)

manba	nomzodlar	u(w)
كونگل	ko'ngil / kungul	0.41
خوارزم	Xorazm / Xvorazm	0.38
جوهر	javhar / juhar	0.33
بتلدى	bitildi / betildi	0.29

Qamrov: 86,4 %

Qoldiq risk: 1,48 %

Tejalgan mehnat: 69 %

Tasdiqlash

Tuzatish

Tuzatishlar bazasi: 4 128 ta → haftalik qayta o'qitish

6-rasm. SELTRANS dasturiy majmuasining ish oynasi: transliteratsiya natijasi, noaniqlik bo'yicha tartiblangan ekspert navbati va kafolat ko'rsatkichlari.

4. MUHOKAMA

Olingan natijalar transliteratsiya tizimlarini baholashda o'rtacha aniqlik yagona mezon bo'la olmasligini ko'rsatadi. Ikki tizim bir xil WER ga ega bo'lishi, lekin ulardan biri xatolarini ajrata olishi, ikkinchisi esa ajrata olmasligi mumkin; amaliy qiymat jihatidan bu tizimlar tubdan farq



qiladi. Shu sababli risk-qamrov egri chizig'i va uning ostidagi maydon transliteratsiya tizimlari uchun standart baholash vositasi sifatida taklif etiladi.

Ikkinchi muhim kuzatish — kalibrlashning hissasi. Kalibrlanmagan ansambl ham xatolarni ajratishda yaxshi ishlaydi (AUROC 0,879), biroq uning chiqishi ehtimollik sifatida ishonchsiz bo'lgani uchun berilgan R^* ga mos chegarani tanlab bo'lmaydi: amalda tanlangan chegara haqiqiy riskni 2–3 baravar oshirib yuboradi. Ya'ni kalibrlash aniqlikni emas, kafolatni ta'minlaydi — bu esa aynan arxiv ish oqimida talab qilinadigan narsadir.

Uchinchidan, yondashuv model arxitekturasidan mustaqil. Uni 1-maqolada tavsiflangan global dekodlash algoritmi ustiga ham qo'llash mumkin: u holda boshlang'ich WER pasayadi va bir xil R^* da qamrov yanada oshadi. Ikki yondashuvni birlashtirish kelgusi ishlarning istiqbolli yo'nalishidir.

Cheklovlar. Nazariy kafolat validatsiya va joriy fond taqsimotlarining mosligiga tayanadi; boshqa davr yoki janrdagi manbalarga o'tishda kalibrlash qayta o'tkazilishi kerak. Bundan tashqari, ansambl beshta modelni saqlash va ishlatishni talab qiladi, bu hisoblash xarajatini taxminan besh baravar oshiradi; distillatsiya orqali bu xarajatni kamaytirish alohida tadqiqot mavzusi bo'lishi mumkin.

5. XULOSALAR

Ishda eski o'zbek yozuvi transliteratsiyasi selektiv bashorat masalasi sifatida qo'yildi va berilgan qoldiq xatolik darajasini kafolatlovchi algoritm ishlab chiqildi. Selektiv riskning monotonligi, chegaraviy qoidaning optimalligi va cheklangan namunadagi statistik kafolat isbotlandi.

Tajribalar kalibrlangan chuqur ansambl ECE ni 11,4 % dan 1,3 % gacha kamaytirishini va xatolarni aniqlash AUROC ko'rsatkichini 0,903 gacha oshirishini ko'rsatdi. 1,5 % kafolatlangan qoldiq xatolik rejimida tizim so'zlarning 86,4 % ini avtomatik qabul qiladi va ekspert mehnatini 69 % ga qisqartiradi; faol o'qitishning to'rt sikli bu ko'rsatkichni 92,3 % gacha yetkazdi.

Natijalar asosida ekspert navbati va tuzatishlar bazasini o'z ichiga olgan veb-majmua yaratildi. Kelgusi ishlarda ansamblni distillatsiya orqali siqish, taqsimot siljishini avtomatik aniqlash va yondashuvni boshqa tarixiy yozuvlarga kengaytirish ko'zda tutilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Rahimov, A.; Karimov, D. Rule-based transliteration of Chagatai manuscripts into modern Uzbek Latin script. *Journal of Digital Humanities in Central Asia*, 2022, 4, 55–71.
2. Wu, S.; Cotterell, R.; Hulden, M. Applying the transformer to character-level transduction. In *Proceedings of EACL*, Kyiv, Ukraine, 2021; pp. 1901–1907.
3. Yusupov, S.; Tursunov, B. A dictionary-driven approach to Perso-Arabic Uzbek text conversion. *International Journal of Asian Language Processing*, 2021, 31, 1–18.
4. Guo, C.; Pleiss, G.; Sun, Y.; Weinberger, K. On calibration of modern neural networks. In *Proceedings of ICML*, Sydney, Australia, 2017; pp. 1321–1330.
5. Geifman, Y.; El-Yaniv, R. Selective classification for deep neural networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA, 2017; pp. 4878–4887.
6. Lakshminarayanan, B.; Pritzel, A.; Blundell, C. Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA, 2017; pp. 6402–6413.



7. El-Yaniv, R.; Wiener, Y. On the foundations of noise-free selective classification. *Journal of Machine Learning Research*, 2010, 11, 1605–1641.
8. Mohri, M.; Pereira, F.; Riley, M. Speech recognition with weighted finite-state transducers. In *Springer Handbook of Speech Processing*; Springer: Berlin, Germany, 2008; pp. 559–584.
9. Chow, C. On optimum recognition error and reject tradeoff. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1970, 16, 41–46.
10. Gal, Y.; Ghahramani, Z. Dropout as a Bayesian approximation: representing model uncertainty in deep learning. In *Proceedings of ICML*, New York, NY, USA, 2016; pp. 1050–1059.
11. Sensoy, M.; Kaplan, L.; Kandemir, M. Evidential deep learning to quantify classification uncertainty. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Montreal, Canada, 2018; pp. 3179–3189.
12. Settles, B. Active Learning Literature Survey; Computer Sciences Technical Report 1648; University of Wisconsin–Madison: Madison, WI, USA, 2009.
13. Hoeffding, W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, 58, 13–30.
14. Angelopoulos, A.; Bates, S. Conformal prediction: a gentle introduction. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2023, 16, 494–591.
15. Kumar, A.; Liang, P.; Ma, T. Verified uncertainty calibration. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vancouver, Canada, 2019; pp. 3792–3803.

DVB-T2 STANDARTIDAGI RAQAMLI TELEVISION UZATKICHLARDA OFDM-SIGNALLARINI KUCHAYTIRISHDA DOHERTY ARXITEKTURASIGA EGA QUUVAT KUCHAYTIRGICHLARINING ENERGETIK VA CHIZIQLI XARAKTERISTIKALARINI TIZIMLI OPTIMALLASHTIRISH

Yarmuxamedov A.A.¹, Jabborov A.B.²

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

jabbarov.alibek@tdtu.uz

Annotatsiya. Ushbu ish DVB-T2 standarti bo'yicha raqamli teleuzatkichlarda OFDM signallarini kuchaytirish uchun qo'llaniladigan Doherty arxitekturali quvvatli kuchaytirgichlarning energetik va chiziqli xarakteristikalarini tizimli optimallashtirishga bag'ishlangan. Biz OFDM modulyatsiyasiga xos bo'lgan, pik quvvatining o'rtacha quvvatga nisbati yuqori bo'lgan sharoitlarda quvvat kuchaytirgichining ishlash xususiyatlarini ko'rib chiqdik. Shuningdek, kuchaytirish kaskadlarining ish rejimlari va chiqish zanjirlari parametrlarining foydali ish koeffitsiyentiga, kuchaytirishning chiziqliligiga hamda signal sifatiga qanday ta'sir ko'rsatishi tadqiq etildi. Doherty arxitekturasida DVB-T2 standartining chiziqlilik va spektral tozalik bo'yicha talablariga rioya etgan holda, chiqish quvvati kamayganda ham energetik samaradorlikni oshirish imkonini berishi aniqlandi. Olingan natijalar raqamli teleuzatkichlarni loyihalash va modernizatsiya qilishda foydali bo'lishi mumkin.

Kalit so'zlar. Quvvat kuchaytirgichi; Doherty arxitekturasida, DVB-T2, OFDM, energiya samaradorligi, chiziqliligi, PAPR, MER va energiya iste'moli.



1. KIRISH

Telekommunikatsiya tizimlari rivojlanishining zamonaviy bosqichi axborot uzatish sifati, radio uzatuvchi qurilmalarning spektral samaradorligi va energiya tejamkorligiga qo'yiladigan talablarning barqaror o'sishi bilan tavsiflanadi. Bunday sharoitda raqamli efir televideniyesi ko'plab mamlakatlarda milliy teleradioeshittirish tarmoqlarini modernizatsiya qilishning muhim yo'nalishiga aylandi. Yer usti raqamli televideniyesining ikkinchi avlodi bo'lgan DVB-T2 standarti o'zidan avvalgi DVB-T standartiga nisbatan o'tkazuvchanlik qobiliyatini sezilarli darajada oshirish, shovqinlarga chidamlilikni yaxshilash va radiochastota spektridan samaraliroq foydalanish maqsadida yaratilgan.

DVB-T2'ning asosiy afzalliklaridan biri bu - OFDM ko'p chastotali ortogonal modulyatsiyasining yuqori samarali kanal kodlash usullari hamda QPSK, 16-QAM, 64-QAM va 256-QAM kabi turli modulyatsiya rejimlari bilan birgalikda qo'llanilishidir. Bu televizion kanalning cheklangan chastota polosasida foydali axborotni uzatish tezligini sezilarli darajada oshirishga va signalning ko'p nurli tarqalishiga nisbatan chidamliligini yuksaltirishga imkon beradi.

DVB-T2 standartini joriy etish, ayniqsa, radiochastotalardan foydalanish zichligi yuqori, radioto'lqinlar tarqalish sharoitlari murakkab va qabul qilish sifatiga qat'iy talablar qo'yiladigan yirik shaharlar va megapolislar uchun muhim ahamiyat kasb etadi. Bunday sharoitlarda uzatuvchi uskunaning, xususan, quvvat kuchaytirgichining ishlash samaradorligi televizion eshittirishning ishonchliligi va sifatini ta'minlashda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Quvvat kuchaytirgichi — uzatkichning eng ko'p energiya sarflaydigan va texnik jihatdan eng murakkab elementi bo'lib, chiqish quvvati, signalning chiziqliligi, spektral tozaligi va butun tizimning ekspluatatsion ishonchliligi bevosita uning xarakteristikalariga bog'liqdir.

DVB-T2 standartining barcha yaqqol afzalliklariga qaramay, uni amalda joriy etish bir qator jiddiy muhandislik muammolariga duch kelmoqda. Eng muhimlaridan biri - uzatkichning radiochastota traktida OFDM-signallarini kuchaytirishdir. OFDM-signal - bu har biri mustaqil raqamli ma'lumotlar bilan modulyatsiya qilinadigan ko'plab ortogonal quyi tashuvchilarning birikmasidir. Natijada bunday signalning vaqt bo'yicha shakli yaqqol nostatsionarligi va amplitudaning yuqori oniy piklari mavjudligi bilan ajralib turadi. OFDM-signalining asosiy parametri PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) deb nomlanuvchi pik quvvatining o'rtacha quvvatga nisbatidir. DVB-T2 signallari uchun PAPR qiymati 8–10 dB va undan ham yuqori bo'lishi mumkin, bu esa signalning pik quvvati uning o'rtacha qiymatidan ancha yuqori ekanligini anglatadi. Amaliy nuqtayi nazardan, bu quvvat kuchaytirgichining aksariyat vaqt davomida to'yinish darajasiga nisbatan chiqish quvvati sezilarli darajada pasaytirilgan rejimda, ya'ni "back-off" deb ataladigan rejimda ishlashga olib keladi.

A yoki AB sinflarida ishlaydigan an'anaviy quvvat kuchaytirgichlarining samaradorligi "back-off" rejimida ishlaganda keskin pasayadi. Bunga sabab, chiqish quvvati past bo'lganda ham, kuchaytirgich iste'mol qiladigan tok ancha yuqori bo'lib qoladi, bu esa energiyaning sezilarli yo'qotilishiga va issiqlik ajralishining ortishiga olib keladi. Uzoq vaqt davomida uzluksiz ishlashi zarur bo'lgan DVB-T2 uzatkichlari uchun bunday yo'qotishlar iqtisodiy tejamkorlik, ishonchlilik va sovitish tizimiga qo'yiladigan talablar nuqtayi nazaridan mutlaqo nomaqbuldir[1-10].

Bundan tashqari, OFDM-signallarini kuchaytirish quvvat kuchaytirgichining chiziqliligiga juda qat'iy talablar qo'yadi. Aktiv elementlarning nochiqli xarakteristikalar AM-AM va AM-PM o'zgarishlari deb nomlanuvchi amplituda va faza buzilishlarini keltirib chiqarishi mumkin. Bu



buzilishlar polosadan tashqari nurlanishlarning ko'payishiga, spektral niqobning yomonlashishiga va qabul qilinayotgan signal sifatining pasayishiga olib keladi, bu esa MER (Modulation Error Ratio), EVM (Error Vector Magnitude) va ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) kabi parametrlarning yomonlashishida namoyon bo'ladi.

DVB-T2 standarti uchun spektral niqob va chiziqlilik talablariga rioya qilmaslik qo'shni televidizion kanallarda shovqinlarni yuzaga keltirishi, ishonchli qabul qilish hududini qisqartirishi va milliy aloqa regulyatorlarining me'yoriy talablarini buzishi mumkin. Shu bois DVB-T2 uchun quvvat kuchaytirgichini loyihalash bir vaqtning o'zida yuqori chiziqlilik, energetik samaradorlik va chiqish quvvati darajalarining keng diapazonida barqaror ishlashga erishishni talab qiladigan murakkab, ko'p mezonli vazifaga aylanadi.

2. ISHNING MAQSADI VA VAZIFALARI

Bunday sharoitda DVB-T2 standartidagi OFDM-signallari bilan ishlash uchun optimallashtirilgan quvvat kuchaytirgichlarini tadqiq qilish va ishlab chiqish alohida ahamiyat kasb etadi. Radiouzatuvchi qurilmalar sohasidagi zamonaviy yechimlar tobora ko'proq Doherty arxitekturasini kabi ixtisoslashtirilgan quvvat kuchaytirgich arxitekturalariga asoslanmoqda hamda LDMOS va GaN-tranzistorlar kabi zamonaviy yarimo'tkazgich texnologiyalari va nochiziqlilikni kompensatsiyalashning raqamli usullari bilan birgalikda qo'llanilmoqda.

Ushbu ishning maqsadi DVB-T2 standarti uzatgichi uchun mo'ljallangan quvvat kuchaytirgichining ishlash prinsiplari va xarakteristikalarini tadqiq etishdan iborat. Shuningdek, pik-faktori yuqori bo'lgan OFDM-signallarini kuchaytirishda yuqori chiziqlilik va energiya samaradorligini ta'minlash maqsadida uning texnik parametrlarini tahlil qilamiz. Quvvat kuchaytirgich arxitekturasining jismoniy va funksional xususiyatlariga, shuningdek, ish rejimlarining signal sifati va energiya ko'rsatkichlarining asosiy parametrlariga ta'siriga alohida e'tibor qaratiladi. Bundan tashqari, kuchaytirgichning ishlash prinsipi va uning ekspluatatsion xususiyatlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni ham ko'rib chiqamiz.

Qo'yilgan maqsadga erishish uchun ushbu ishda bir nechta ilmiy-texnik vazifalarni hal qilish rejalashtirilgan. Birinchidan, DVB-T2 standartidagi OFDM-signallarining o'ziga xos xususiyatlarini tahlil qilish va uzatgichning quvvat kuchaytirgichiga qo'yiladigan asosiy talablarni aniqlash lozim. Ikkinchidan, quvvat pasayganda foydali ish koeffitsiyentini oshirishga yordam beruvchi mexanizmlarga e'tibor qaratgan holda, yuqori PAPR sharoitida ishlaydigan quvvat kuchaytirgichining ishlash prinsipini ko'rib chiqish muhimdir. Uchinchidan, quvvat kuchaytirgichining chiqish quvvati, kuchaytirish koeffitsiyenti, FIK, chiziqlilik va spektral tozalik kabi asosiy texnik parametrlarini tahlil qilish hamda ularning DVB-T2 standarti talablariga muvofiqligini baholash zarur.

Ushbu ish natijalari raqamli efir televideniyesi uzatgichlarini loyihalash, modernizatsiya qilish va ulardan foydalanishda foydali bo'lishi mumkin. Ular, shuningdek, o'quv jarayonida radiouzatuvchi qurilmalar, raqamli aloqa tizimlari va energiya tejamkor radiotexnika bilan bog'liq fanlarni o'rganish uchun qo'llanilishi mumkin. Olingan xulosalar raqamli televidizion ko'rsatuvlar samaradorligi va sifatini oshirish ustida ishlayotgan muhandislar va tadqiqotchilar uchun qiziqarlidir.

DVB-T2 standartining radiouzatuvchi qurilmalarning chiziqliligi, spektral tozaligi va energiya samaradorligiga qo'yadigan talablari sababli, quvvat kuchaytirgichi, ayniqsa OFDM-signalining pik-faktori yuqori bo'lgan sharoitlarda, uzatgichning asosiy elementiga aylanadi.



Uzatish sifatining zarur ko'rsatkichlarini ta'minlash va ayni vaqtda energiya yo'qotishlarini kamaytirish uchun chiqish quvvati pasaytirilgan rejimda (output back-off) ishlaydigan quvvat kuchaytirgichlarining maxsus arxitekturalaridan foydalanish zarur. Ushbu ishda biz DVB-T2 standartidagi eshittirish uzatgichlarida keng qo'llaniladigan Doherty tipidagi quvvat kuchaytirgich arxitekturasini ko'rib chiqamiz. Quyida DVB-T2 quvvat kuchaytirgichining tuzilishi, uning asosiy qismlari va ularning eshittirish uzatgichi tarkibidagi funksional vazifalari tavsiflanadi.

Efir televideniyesi (UHF) uchun mo'ljallangan DVB-T2 uzatgichlarida quvvat kuchaytirgichi deyarli har doim Doherty PA tarzida amalga oshiriladi. Bunga sabab, OFDM signali yuqori PAPRga ega bo'lib, uzatgich aksariyat vaqtini back-off rejimida ishlaydi. Tuzilmaviy jihatdan quvvat kuchaytirish trakti bir nechta funksional kaskadni o'z ichiga oladi [1–10].

1. Drayver kuchaytirgichi (Driver/Pre-PA): bu komponent RF-signal darajasini chiqish tranzistorlari LDMOS yoki GaN bo'lishidan qat'i nazar, ularni boshqara oladigan darajaga ko'taradi.

2. Kirish bo'lgichi (fazashakllantirgich): uning vazifasi – signalni Main va Peak yelkalariga mo'ljallangan, belgilangan amplituda-faza nisbatiga ega bo'lgan ikkita kanalga ajratishdir.

3. Asosiy yelka (Main, Carrier PA): bu uzluksiz ishlaydigan AB sinfidagi (yoki "yumshoq AB") kuchaytirgich. U signalning past va o'rta darajalarida chiziqlilikni ta'minlab, quvvatning asosiy qismini back-off sohasida hosil qiladi.

4. Pik yelkasi (Peak, Peaking PA): bu C sinfidagi (yoki chuqur AB) kuchaytirgich bo'lib, past darajalarda deyarli nafaol bo'ladi va faqat OFDM-qobig'ining katta lahzali amplitudalarida ishga tushadi.

5. Doherty jamlagichi va $\lambda/4$ -impedans invertori: bu tugunlar Doherty arxitekturasining asosiy xususiyati - asosiy yelka yuklamasining dinamik modulyatsiyasini amalga oshiradi.

6. Chiqish filtri (mask filter): u eshittirishning spektral niqobiga muvofiqlikni ta'minlash uchun polosadan tashqari nurlanishlar va garmonikalarni cheklaydi.

7. Yo'naltirilgan tarmoqlagich (datchiklar): ALC (avtomatik rostlash), VSWR himoyasi va DPD qayta aloqasi uchun to'g'ri va qaytgan quvvatni nazorat qiladi.

Doherty arxitekturasiga asoslangan DVB-T2 quvvat kuchaytirgichining tuzilishi uzatgichning asosiy tugunlari o'zaro qanday ta'sirlashishini belgilab beradi hamda keng polosalab raqamli signal bilan ishlashda energiya samaradorligini oshirish imkonini beradi. Biroq, shuni ta'kidlash joizki, ushbu arxitekturalardan foydalanishning maqsadga muvofiqligi faqatgina kuchaytirgichning konstruktiv xususiyatlariga emas, balki kuchaytirilayotgan signalning asosiy xossalari ham bog'liqdir. Doherty arxitekturasini tanlashni asoslash uchun DVB-T2 standartidagi OFDM-signalining xususiyatlarini, ayniqsa, uning pik-faktorini va kuchaytirgichning pik chiqish quvvatiga qo'yiladigan tegishli talablarni tahlil qilish zarur. Endi OFDM-signalining yuqori PAPR ko'rsatkichi quvvat kuchaytirgichining ish rejimlariga qanday ta'sir qilishini ko'rib chiqamiz va DVB-T2 radioeshittirish uzatgichlaridagi pik yuklamalarning miqdoriy tahlilini o'tkazamiz.

DVB-T2 OFDM-signal haqiqatan ham yuqori pik-faktorga ega [1-4,6,7,10-13]:

$$PARP = \frac{P_{peak}}{P_{avg}}, \quad PARP_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{peak}}{P_{avg}} \right) \quad (1)$$



DVB-T2 uchun odatda o'rovchi chiziqli bo'yicha 8-10 dB diapazondagi loyihalash darajasi qabul qilinadi (aniq qiymat rejim, pilot-signallar va klippingga bog'liq). Misol uchun, $P_{avg} = 2$ kVt bo'lgan eshittirish uzatgichini olsak (manbada Toshkent teleminorasi uchun ko'rsatilganidek), $PAPR = 9$ dB bo'lganda quyidagi nisbat hosil bo'ladi:

$$10^{9/10} \approx 7,94 \quad (2)$$

Bunday holda o'rama chiziqlining pik (yuqori) quvvati (PEP) quyidagicha bo'ladi:

$$P_{peak} \approx 2000 \cdot 7,94 = 19,9 \text{ kBT} \quad (3)$$

Demak, agar o'rtacha quvvat 2 kVt bo'lsa, kuchaytirish trakti o'rab oluvchi chiziqli bo'ylab taxminan 16 kVt lik oniy piklarni qayta ishlay olishi kerak. Aks holda muammolar boshlanadi: kompressiya, diapazondan tashqari nurlanishlarning ortishi va MER/EVM ko'rsatkichining yomonlashishi.

Aynan shuning uchun oddiy AB sinfi qo'shimcha choralarsiz katta Chiqish quvvati pasayishi (OBO) bilan ishlashga majbur bo'ladi:

$$OBO_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sat}}{P_{avg}} \right) \quad (4)$$

Odatda, DVB-T2 ning spektral niqobi va chiziqliligini ta'minlash uchun DPD, filtr va reguliyator talablariga qarab, taxminan 6 dB dan 9 dB gacha bo'lgan OBO tanlanadi. Bunday back-off holatida an'anaviy AB sinfining foydali ish koeffitsiyenti sezilarli darajada pasayadi va bu Doherti texnologiyasidan foydalanish zaruratini yuzaga keltiradi. DVB-T2 standarti OFDM signalining pik-faktori va u bilan bog'liq bo'lgan kuchaytirgichning eng yuqori chiqish quvvatiga qo'yiladigan talablar tahlili shuni ko'rsatadiki, uzatkichning samarali ishlashi chiqish back-off rejimida yuqori energiya samaradorligini ta'minlaydigan maxsus arxitekturasiz imkonsizdir. Bu talablar kuchaytirish traktini funksional jihatdan bir necha kaskadga ajratish orqali amalga oshiriladi, ularning har biri signal o'rab turuvchisining sathiga bog'liq holda optimal rejimda ishlaydi. Shu munosabat bilan, keyingi qismda biz Doherti quvvat kuchaytirgichining alohida kaskadlari vazifasini ko'rib chiqamiz hamda ularning chiqish signalini shakllantirishdagi, shuningdek, zarur energetik va chiziqli xususiyatlarni ta'minlashdagi jismoniy rolini tahlil qilamiz.

Drayver kaskadi chiqish tranzistorlarining zaruriy qo'zg'alish darajasi uchun mas'ul bo'lib, sozlash uchun "zaxira" yaratadi. Radioeshittirish tizimlarida drayver ancha chiziqli rejimda ishlaydi, chiqish quvvatining umumiy nazorati esa qo'zg'alish darajasiga ta'sir qiluvchi ALC orqali amalga oshiriladi. Bundan tashqari, drayver keng poloslilikni (kanal polosasi 8 MHz) va faza barqarorligini ta'minlashi kerak, chunki Main va Peak tarmoqlari orasidagi faza xatoliklari signallar yig'indisi sifatini va chiziqlilikni yomonlashtirishi mumkin [1,2,7,8,14].

Doherty arxitekturasida ikkala yelkaning toklari (yoki ekvivalent chiqish kuchlanishlari) to'g'ri yig'ilishi o'ta muhim. Shu sababli, kirish bo'luvchisi quyidagilarni belgilaydi:

- Main va Peak yelkalarining qo'zg'atish amplitudalari nisbatini;
- fazalar nisbatini (ko'pincha 90°li gibridd yoki ekvivalent zanjir orqali).



Kichik faza xatoliklari foydali ish koeffitsiyentini pasaytirishi (nogogerent qo‘shilish tufayli) va buzilishlarni oshirishi (parazit AM-PM konversiyasining paydo bo‘lishi) mumkin. Main kaskadi (AB sinfi) doimiy ishlab, kichik va o‘rta darajali quvvatlarda chiziqlilikni ta‘minlaydi. Uning siljishi shunday sozlangan:

- tinchlik toki orqaga chekinish (back-off) zonasidagi nochiziqli buzilishlarni minimallashtirishi uchun;

- yuqori quvvatga yaqinlashganda Main kaskadi vaqtidan oldin kompressiyaga “tiralib qolmasligi” uchun, zero Doherty arxitekturasida aynan Peak yelkasi piklarni “ushlab olishi” kerak. Kuchsiz signal sharoitida Main yelkasi chiqishidagi tokni quyidagicha ifodalash mumkin [2,7]:

$$i_M(t) \approx g_{mM} v_M(t) \quad (5)$$

Keling, g_{mM} samarali tiklikni qanday ta‘minlashi haqida so‘zlashamiz. Doherty Main kuchaytirgichida gap faqat “50 Omga ishlash”da emas, balki uning quvvat darajasiga qarab o‘zgaruvchi samarali yuklama bilan ishlashidir. Peak-kaskad (C sinfi/chuqur AB) past darajalarda deyarli yopiq bo‘lib, o‘rab turuvchi chiziqlilikning yuqori amplitudalarida faollashadi. U ikki vazifani bajaradi:

- piklardagi quvvatni oshiradi, bu esa Main kuchaytirgichini haddan tashqari qirqish zaruratini kamaytiradi;

- Main yuklamasini modulyatsiyalash mexanizmini summator va $\lambda/4$ -invertor orqali ishga tushiradi, bu esa foydali ish koeffitsiyentini oshiradi [1,5,7,8,15]:

Mana uning toki:
$$i_P(t) \approx 0, \quad |v_P(t)| < V_{th} \quad (6)$$

va o‘rama chizig‘i chegarasidan oshganda o‘sishni boshlaydi:

$$i_P(t) \approx g_{mP}(v_P(t) - V_{th}), \quad |v_P(t)| \geq V_{th} \quad (7)$$

Pik kaskadining roli: pik qiymatlarida tok va quvvat qo‘shish; 6-9 dB OBO diapazonida foydali ish koeffitsiyentini oshirish uchun asosiy kaskadning yuklama modulyatsiyasini faollashtirish. Doherty quvvat kuchaytirgichining asosiy va pik kaskadlari funksiyalarining tahlili shuni ko‘rsatadiki, ularning birgalikdagi ishlashi OFDM signalining o‘rab oluvchi sathlari bo‘yicha kuchaytirishni zarur darajada taqsimlashni ta‘minlaydi. Biroq bunday o‘zaro ta‘sirning samaradorligi nafaqat alohida kaskadlarning ishlash rejimlariga, balki ularning chiqishdagi elektr ulanish usuliga ham bog‘liqdir. Bu jarayonda chorak to‘lqinli impedans invertori muhim rol o‘ynaydi, u yuklamaning dinamik o‘zgarishini ta‘minlaydi va shu tariqa Doherty arxitekturasining asosiy energetik mexanizmini amalga oshiradi.

Quyida biz $\lambda/4$ -invertorning fizik ma‘nosini va uning kuchaytirgich kaskadlarining ishlash rejimlariga ta‘sirini tadqiq qilamiz. Markaziy chastotadagi chorak to‘lqinli liniya kesmasi (yoki unga ekvivalent bo‘lgan taqsimlangan/to‘plangan zanjir) impedans inversiyasi xususiyatiga egadir [2,5,7,8,16]:

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (8)$$



Bunda Z_0 – chorak to‘lqinli qismning to‘lqin qarshiligi, Z_L esa uning chiqishidagi yuklama. Doherty arxitekturasida bu element shunchaki transformator vazifasini bajarib qolmay, dinamik o‘zgartirgichga aylanadi. Bu holat Peak tarmog‘i faollashganda yig‘indi tugunidagi samarali Z_L yuklamasining o‘zgarishi sababli yuz beradi. Natijada Main tarmog‘i quvvat darajasiga qarab turlicha yuklamani “his qiladi” va bu jarayon yuklamaning dinamik modulyatsiyasi deb ataladi.

Chorak to‘lqinli impedans invertorining ishlashining fizik tamoyilini tushunish Doherty tizimida yuklama qanday o‘zgartirilishini chuqurroq anglashga yordam beradi. Biroq, bu mexanizmning samaradorligini hamda uning quvvat kuchaytirgichining energetik va elektr rejimlariga ta‘sirini miqdoriy baholash uchun sifat tavsifidan analitik ifodaga o‘tish kerak. Shu bois, quyida yuklamaning dinamik modulyatsiyasi jarayonining matematik tavsifi keltiriladi, shuningdek, uning ishlashi DVB-T2 standarti uzatkichlariga xos bo‘lgan sonli misolda ko‘rsatib beriladi.

Main va Peak tarmoqlari bir xil maksimal quvvatga ega bo‘lgan klassik simmetrik Doherty arxitekturasini loyihalash quyidagicha amalga oshiriladi:

- kichik yoki o‘rta quvvatda ($\text{Peak} \approx 0$) Main tarmog‘i yuqori ekvivalent yuklamada ishlaydi, bu esa uning foydali ish koeffitsiyentini quvvat pasayishi rejimida (back-off) oshiradi;
- quvvat ortishi bilan Peak tarmog‘i yig‘indiga tok qo‘shadi va Main tarmog‘ining ekvivalent yuklamasi optimal darajagacha kamayadi. Bu esa Main tarmog‘iga nominal quvvatga yaqinlashganda yuqori FIKni saqlab qolish imkonini beradi.

Eshittirish chiqishi uchun biz standart yuklamadan foydalanamiz [1,2,57,16]:

$$R_L = 50 \, \Omega \quad (9)$$

OFDM uchun klassik “Doherty nuqtasi” 6 dB lik quvvat pasayishini anglatadi, chunki ko‘plab Doherty kuchaytirgichlari aynan shu nuqtada o‘zlarining mahalliy maksimal foydali ish koeffitsiyentiga erishadi. Quvvat bo‘yicha 6 dB lik pasayish quyidagilarni bildiradi:

$$P_{6dB} = \frac{P_{sat}}{4} \quad (10)$$

Agar uzatkichning "nominal" o‘rtacha quvvati 2 kVtni tashkil etsa va (soddalashtirilgan) back-off yaqinidagi ish hududiga mos kelsa, 50 Om ekvivalent yuklamadagi kuchlanish va toklar nisbatlarini tahlil qilish mumkin. Misol tariqasida 50 Omli yuklama uchun $P_{out} = 2 \, \text{kVt}$ qiymatini olamiz [3,7,8,16]:

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{PR} = \sqrt{2000 \cdot 50} \approx 316 \, B \\ I_{rms} &= \frac{V_{rms}}{R} \approx \frac{316}{50} \approx 6,32 \, A \end{aligned} \quad (11)$$

Endi 6 dB pastroq bo‘lgan darajani muhokama qilaylik, bu quvvatning 4 baravar kamligini anglatadi.

$$\begin{aligned} P_{6dB} &= 500 \, \text{Bt} \\ V_{rms,6dB} &= \sqrt{500 \cdot 50} \approx 158 \, B \\ I_{rms,6dB} &= \frac{158}{50} \approx 3,16 \, A \end{aligned} \quad (12)$$



Doherty konsepsiyasining mohiyati shundan iboratki, berilgan quvvatda Peak tarmog‘i hali deyarli faol bo‘lmaydi (yoki endigina ishga tusha boshlaydi), Main tarmog‘i esa $\lambda/4$ -inverter orqali standart 50 omli nominal rejimdagiga qaraganda “qulayroq” ekvivalent yuklama bilan ishlaydi.

Ideallashtirilgan tavsifda ko‘pincha quyidagi yaqinlashuv qo‘llanadi:

- past quvvatda: R_{Main} , $eff \approx 2R_{opt}$ (oshirilgan yuklama);

- nominal/umumiy quvvatda: R_{Main} , $eff R_{opt}$ ga teng bo‘ladi.

Bu Main tarmog‘i back-off rejimida nisbatan yuqori kuchlanishda kamroq tok bilan ishlashini anglatadi, bu esa “bekorchi” yo‘qotishlar ulushini kamaytirib, foydali ish ko‘effitsiyentini oshiradi.

Yig‘ish tugunidagi natijaviy tok quyidagiga teng:

$$i_{out}(t) = i_{Main}(t) + i_{Peak}(t) \quad (13)$$

Past darajalarda:

$$i_{Peak}(t) \approx 0 \Rightarrow i_{out}(t) \approx i_{Main}(t) \quad (14)$$

Peak o‘rab oluvchi chizig‘i o‘sa boshlaganda, toklar nisbati o‘zgaradi. Simmetrik Doherty kuchaytirgichining “yuqori” quvvat rejimida umumiy chiqish quvvatini oshirish va kerakli yuklama modulyatsiyasini ta‘minlash uchun ko‘pincha Peak kuchaytirgichining (pik toki bo‘yicha) Main kuchaytirgichinikiga yaqin hissa qo‘shadigan rejimga intilinadi.

Analitik bog‘liqliklar va sonli misollar shuni ko‘rsatadiki, yuklamaning dinamik modulyatsiyasi faol elementning ruxsat etilgan ish rejimlari doirasidan chiqmagan holda, quvvat kuchaytirgichining oniy va o‘rtacha foydali ish ko‘effitsiyentini sezilarli darajada oshirishi mumkin. Biroq, energetik yutuqning o‘zi radiouzatish traktining samaradorligini baholash uchun yetarli mezon bo‘la olmaydi.

DVB-T2 kabi zamonaviy raqamli efir uzatish tizimlarida samaradorlikni oshirish kuchaytirishning chiziqliligini saqlash va spektral cheklolarga qat’iy rioya qilish bilan chambarchas bog‘liq bo‘lishi lozim. Pik-quvvat nisbati (PAPR) yuqori bo‘lgan ko‘p sathli OFDM signallari energiya samaradorligi va nurlanishning spektral tozaligiga nisbatan yuqori talablar qo‘yadi. Shu sababli, DVB-T2 uzatkichlarida yuklamaning dinamik modulyatsiyasi samaradorlikni oshirishning alohida bir usuli sifatida emas, balki tizimning energetik va spektral xususiyatlarini birgalikda optimallashtirish vositasi sifatida qaralishi kerak. Ushbu tadqiqotda DVB-T2 standarti uchun nima sababdan energetik samaradorlik va spektral tozalikka bir vaqtda erishish zarurligi hamda dinamik yuklama modulyatsiyasi bu murossani amalda tatbiq etishga qanday yordam berishi ko‘rib chiqiladi.

Kuchaytirgichning FIKi:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (15)$$

issiqlik yo‘qotishlari esa:

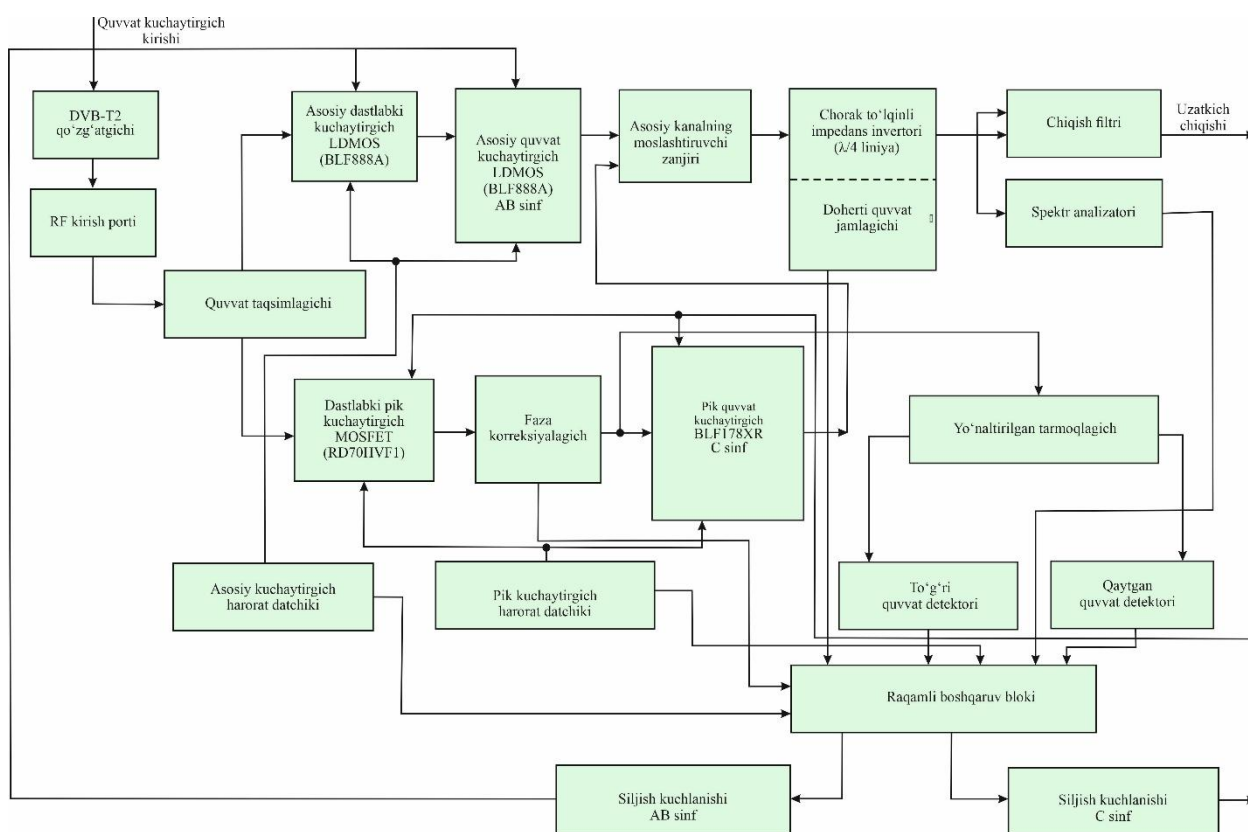
$$P_{heat} = P_{DC} - P_{out} \quad (16)$$



Kecha-yu kunduz ishlaydigan eshittirish stansiyasi uchun Pheat ko'rsatkichining hatto bir necha o'n foizga pasayishi ham hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'lishi mumkin: bu sovutishga bo'lgan talablarni kamaytirishga, ishonchlilikni oshirishga va ekspluatatsiya xarajatlarini pasaytirishga olib keladi. Biroq DVB-T2 standartida shunchaki maksimal FIKga erishishga intilish yaramaydi: nochiziqlilik spektral kengayishni va signal sifatining yomonlashishini keltirib chiqarishi mumkin.

Shu sababli, deyarli barcha tizimlarda DPD va quvvat nazoratidan foydalaniladi, garchi Doerti arxitekturasining o'zi quvvatni pasaytirish (back-off) rejimida chiziqli ishlash uchun energiya sarfini kamaytirishga yordam bersa-da.

Keling, DVB-T2 (Doerti) quvvat kuchaytirgichining asosiy tugunlari qanday ishlashini ko'rib chiqaylik (1-rasm). Kirish RF-trakti va quvvat bo'lgichi. DVB-T2 standartidagi keng polosali OFDM signali kuchaytirgichning kirish qismiga kelib tushadi va ma'lum bir amplituda-faza nisbatiga ega bo'lgan ikkita kanalga bo'linadi. Bo'lgich signallarning chiqishda kogerent qo'shilishi va signal qobig'i ortganda pik kaskadining to'g'ri ulanishi uchun sharoit yaratadi [3,7,8,16].



1-rasm. DVB-T2 (Doherty) quvvat kuchaytirgichining strukturaviy sxemasi.

Asosiy kuchaytirish kaskadi (Main PA) AB sinfi rejimida ishlaydi va signalni barcha darajalarda kuchaytiradi. U OFDM signalining past va o'rta amplitudalarida a'lo darajadagi chiziqlilikni ta'minlaydi hamda quvvat pasaytirilgan (back-off) rejimda chiqish quvvatining asosiy qismini shakllantiradi.



Pik kuchaytirish kaskadi (Peak PA) C sinfi yoki chuqur AB sinfi rejimiga o'tkaziladi va faqat signal o'ramining yuqori lahzali qiymatlarida faollashadi. Uning asosiy vazifasi OFDM signalining pik qismlarini kuchaytirish va asosiy kaskad yuklamasining dinamik modulyatsiyasi mexanizmini ishga tushirishdan iborat.

Chorak to'liqlik impedans invertori ($\lambda/4$) – bu qiziqarli qurilma. Chorak to'liqlik liniya yuklama qarshiligini shunday o'zgartiradiki, bunda asosiy kaskadning ekvivalent yuklamasi pik kaskadining hissasiga qarab o'zgaradi. Bu asosiy kuchaytirgichning, ayniqsa chiqish signali quvvat pasaytirilgan (back-off) rejimda bo'lganda, yanada samaraliroq ishlashiga imkon beradi.

Doherty jamlash tuguni. Bu tugunda asosiy va pik kaskadlarining chiqish toklari kogerent tarzda qo'shiladi. To'g'ri faza sharoitlarida yuqori samaradorlikka va minimal buzilishlarga ega bo'lgan jamlangan chiqish signali hosil bo'ladi.

Moslashtiruvchi zanjirlar. Kirish va chiqish moslashtiruvchi zanjirlari standart 50 Om qarshilikni tranzistorlar uchun optimal qiymatlarga aylantiradi, o'tkazish polosasini kengaytiradi va keng polosali DVB-T2 signali bilan ishlaganda kuchaytirgichning barqarorligini oshiradi.

Kuchaytirgichlar ishida ta'minot va siljish zanjirlari muhim o'rin tutadi. Zatvorlarning siljish zanjirlari kuchaytirish kaskadlarining ishlash rejimlarini belgilaydi, yuqori chastotali yechimga ega bo'lgan stok ta'minoti zanjirlari esa radiochastota energiyasining ta'minot manbalariga o'tishining oldini olishga yordam beradi va signal o'ramasi o'zgarganda ham kuchaytirgichning ishini barqarorlashtiradi.

Chiqish filtri, o'z navbatida, kuchaytirishning nochiziqligi tufayli yuzaga keladigan garmonik va polosadan tashqari tashkil etuvchilarni so'ndiradi hamda chiqish signali spektrining DVB-T2 standarti spektral niqobi talablariga mos kelishini kafolatlaydi.

Yo'naltirilgan tarmoqlagich va nazorat tizimi. Yo'naltirilgan tarmoqlagich to'g'ri va qaytgan quvvatlarni o'lchaydi. Bu signallar sathni avtomatik ravishda sozlashga, yuklamaning nomuvofiqligidan himoya qilishga va raqamli predistorsiya tizimining ishlashini ta'minlashga yordam beradi.

Raqamli predistorsiya va himoya tizimi. Raqamli predistorsiya kuchaytirgichning amplituda va faza buzilishlarini bartaraf etadi, bu esa ACLR va MER ko'rsatkichlarining zaruriy qiymatlariga erishish imkonini beradi. Himoya tizimi esa tok, kuchlanish va haroratni nazorat qilib, uzatkichning kecha-yu kunduz ishonchli ishlashini ta'minlaydi.

Doherty quvvat kuchaytirgichining asosiy tugunlari yuqori pik faktoriga ega bo'lgan DVB-T2 OFDM signalini chiziqli kuchaytirishni ta'minlash uchun birgalikda ishlaydi, shu bilan birga yuqori o'rtacha energiya samaradorligiga erishadi va spektral tozalik hamda modulyatsiya sifati bo'yicha talablarga qat'iy rioya qiladi. Bu, ayniqsa, Toshkent teleminorasi kabi eshittirish uzatkichlari uchun muhimdir.

Keling, DVB-T2 quvvat kuchaytirgichi sxemasining arxitekturasini va realizatsiyasini batafsil ko'rib chiqaylik. DVB-T2 standarti uzatkich uchun quvvat kuchaytirgichi arxitekturasini bir vaqtning o'zida uchta bir-biriga zid talabni qondirish zaruratini hisobga olgan holda ishlab chiqiladi: katta pik faktoriga ega OFDM signalini kuchaytirishda yuqori chiziqlikni ta'minlash, quvvat pasaytirilgan rejimda yuqori o'rtacha energetik samaradorlikka erishish va eshittirish stansiyasi tarkibida kecha-yu kunduz ishonchli ishlashni kafolatlash. Bu talablar optimal yarimo'tkazgich texnologiyasini tanlash, quvvat kuchaytirgichining modulli tuzilishi, ixtisoslashtirilgan moslashtiruvchi zanjirlardan foydalanish, samarali filtrlash va ko'p bosqichli himoya tizimi orqali amalga oshiriladi [3,7,8,14,16].



Kuchaytirgich kaskadlari uchun tanlangan texnologiya: LDMOS va GaN.

DVB-T2 (470-694 MGs) efir raqamli televideniye diapazonida ikkita yarimo'tkazgichli texnologiya — LDMOS va GaN HEMT keng tarqalgan. Ularning har biri o'ziga xos elektr va ekspluatatsion afzalliklarga ega bo'lib, bu ularning kuchli eshittirish kuchaytirgichlarida qo'llanilishini belgilab beradi. LDMOS texnologiyasi an'anaviy ravishda o'rta va yuqori quvvatli uzatkichlarda qo'llaniladi.

Odatda DVB-T2 kuchaytirgichlarida qo'llaniladigan LDMOS-tranzistorlar 28–50 V oralig'idagi stok ta'minot kuchlanishiga, UHF-diapazonida bitta kristallning chiqish quvvati 100 dan 600 Vattgacha bo'lishiga va qisqa muddatli rejimlarda VSWR $\approx 5:1$ gacha bo'lgan turg'un to'lqin koeffitsiyentiga ega. LDMOS-kuchaytirgichining to'yinish rejimida foydali ish koeffitsiyenti (FIK) odatda 45 foizdan 55 foizgacha o'zgarib turadi, biroq OFDM-signal va taxminan 6–8 dB chiqish back-off bilan ishlaganda, klassik AB sinfida FIK 25–35 foizgacha pasayishi mumkin. Aynan shuning uchun LDMOS-realizatsiyalarda o'rtacha quvvat rejimida FIKni oshirish uchun deyarli har doim Doherty arxitekturasidan foydalaniladi.

GaN HEMT texnologiyasi — bu yuqori quvvat zichligi va odatda 48–50 V oralig'idagi yuqori kuchlanishlarda ishlash qobiliyati bilan ajralib turadigan zamonaviyroq yechimdir. GaN-kuchaytirgichlar uchun bitta faol elementga 200 dan 800 Vattgacha bo'lgan chiqish quvvatlari, shuningdek, to'yinish rejimida 55–65 foizga va Doherty arxitekturasida 6 dB back-off bilan 40–50 foizga yetadigan potensial yuqori FIK xosdir. GaNning muhim afzalliklaridan biri uning yuqori termik barqarorligi va parazit sig'imlarining kichikligidir, bu esa keng polosali muvofiqlashtiruvchi zanjirlarni yaratishni osonlashtiradi. Biroq, yuqori issiqlik zichligi issiqlikni chiqarib yuborish va o'ta kuchlanishdan himoya qilish uchun yanada qat'iy shart-sharoitlarni talab qiladi.

DVB-T2 uzatkichida LDMOS va GaN o'rtasidagi tanlov har doim murosadir. Bunda modullarning narxi, mavjudligi, talab qilinadigan quvvat darajasi, samaradorligi va foydalanishdagi ishonchliligini hisobga olish lozim. Amaliyotda, eshittirish tizimlarida uskunalar avlodi va talab qilinadigan quvvatga qarab, ko'pincha ikkala texnologiya ham qo'llaniladi.

DVB-T2 quvvat kuchaytirgichi PA-modullar to'plamidan iborat bo'lib, ularning har biri to'laonli kuchaytirish kanali hisoblanadi. Odatda, bitta PA-modulning chiqish quvvati, texnologiya va chiqish back-off darajasiga qarab, 300 dan 1000 Vattgacha o'zgarib turadi. Uzatkichning umumiy quvvatiga erishish uchun bir nechta modulning chiqishlari yuqori chastotali kombaynerlar orqali parallel ulanadi.

Har bir PA-modul nominal qarshiligi 50 Om bo'lgan kirish interfeysi, kuchaytirish koeffitsiyenti taxminan 15–20 dB bo'lgan drayver kaskadi, chiqish quvvat kaskadi (ko'pincha Doherty arxitekturasini), mahalliy muvofiqlashtiruvchi zanjirlar, dastlabki filtrlash uchun chiqish filtri, yo'naltirilgan tarmoqlagich va quvvatni o'lchash tizimini o'z ichiga oladi. Modulning elektr ta'minoti 28–50 V o'zgarmas kuchlanish manbaidan amalga oshiriladi, bunda bitta modulning iste'mol toki to'liq quvvatda 20–40 Ampergacha yetishi mumkin.

Modulli arxitektura N+1 sxemasi bo'yicha zaxiralash konfiguratsiyalarini yaratish imkonini beradi. Bu shuni anglatadiki, bitta modulning ishdan chiqishi eshittirishni to'xtatmaydi, faqat umumiy quvvatning 1/N ga pasayishiga olib keladi. Bundan tashqari, modulli yondashuv xizmat ko'rsatish, issiqlik loyihalash va uzatkich quvvatini masshtablashni soddalashtiradi.

Moslashtiruvchi zanjirlar quvvat kuchaytirgichining energiya samaradorligi va chiziqliligini oshirishda muhim rol o'ynaydi. Kirish moslashtiruvchi zanjirlari signal manbaining



standart 50 Om qarshiligini tranzistorning optimal kirish qarshiligiga aylantirish uchun mo'ljallangan bo'lib, UHF diapazonida bu qarshilik reaktiv tashkil etuvchisi bilan bir necha Omgagina teng bo'lishi mumkin. Buning uchun π yoki T turidagi LC-tarmoqlardan, shuningdek, 500 dan 650 MGs gacha bo'lgan ishchi chastotaga mo'ljallangan mikropoloskali liniyalardan foydalaniladi.

Chiqish moslashtiruvchi zanjirlari murakkabroq vazifani bajaradi. Ular nafaqat tranzistorning optimal chiqish qarshiligini standart 50 Omgaga aylantiradi, balki Doherty arxitekturasida dinamik yuklama modulyatsiyasini shakllantirishda ham muhim o'rin tutadi. Masalan, asosiy yelkaning chiqish zanjiri shunday loyihalangan, pik yelkasi o'chirilganda asosiy tranzistor "ko'radigan" ekvivalent qarshilik nominal quvvatdagi optimal qarshilikka nisbatan taxminan 1,5–2 baravar ortadi. Pik kaskadi ulanganda esa bu qarshilik kamayadi va optimal qiymatga yaqinlashadi, bu esa asosiy kaskadga chiqish quvvati oshganda yuqori foydali ish koeffitsiyentini saqlab turish imkonini beradi.

Moslashtiruvchi zanjirlar DVB-T2 kanali spektrida buzilishlarning oldini olish va MER hamda EVM ko'rsatkichlarini yomonlashtirmaslik uchun kamida 8–10 MGs yetarli o'tkazish polosasini ta'minlashi kerak. Bu borada faza xarakteristikasiga alohida e'tibor qaratiladi, chunki chastotaga bog'liq kechikish raqamli preddistorsiyani murakkablashtiradigan xotira effektlarini keltirib chiqarishi mumkin.

DVB-T2 quvvat kuchaytirgichida filtrlash OFDM-signalini kuchaytirishda faol elementlarning nochiziqligi va dinamik jarayonlar tufayli yuzaga keladigan garmonikalar va polosadan tashqari tashkil etuvchilarni bostirish uchun zarurdir. Quvvatning chiqish kaskadidan so'ng, uzatkichning nominal quvvatiga mo'ljallangan va DVB-T2 spektral niqobi talablariga javob beradigan chiqish filtridan foydalaniladi.

Tipik niqobli filtrlar ikkinchi va uchinchi garmonikalar uchun garmonik tashkil etuvchilarni 40–60 dB darajasida so'ndirishni ta'minlaydi, shuningdek, qo'shni kanallardagi polosadan tashqari nurlanishlarni tashuvchiga nisbatan -45...-55 dB qiymatlarigacha bostiradi. Filtrning o'tkazish polosasi shunday tanlanadiki, kengligi 8 MGs bo'lgan ishchi kanal amplituda va fazaning sezilarli buzilishlarisiz uzatilsin.

Quvvatli uzatkichlarda filtrlash ikki darajada amalga oshirilishi mumkin: PA-modul darajasida dastlabki filtrlash va quvvat jamlagichidan keyin yakuniy niqobli filtrlash. Bunday yondashuv alohida filtrlarga tushadigan yuklamani kamaytirishga yordam beradi va butun tizimning yuklama nomutanosibligiga chidamliligini oshiradi.

DVB-T2 quvvat kuchaytirgichini himoya qilish butun arxitekturaning asosiy elementidir, negaki chiqish kaskadidagi nosozlik jiddiy moliyaviy yo'qotishlarga va eshittirishning to'xtab qolishiga olib kelishi mumkin. Himoya tizimi to'g'ri va qaytgan quvvatni nazorat qilishni, ta'minot toklari va kuchlanishlarini monitoring qilishni, shuningdek, haroratni kuzatishni o'z ichiga oladi. To'g'ri va qaytgan quvvatni o'lchash yo'naltirilgan tarmoqlagich yordamida amalga oshiriladi.

To'g'ri quvvat uzatkichning belgilangan o'rtacha chiqish quvvatini saqlab qolish uchun kuchaytirish darajasini avtomatik sozlashda ishlatiladi. Qaytgan quvvat esa yuklama nomutanosibligini baholashga yordam beradi; agar u VSWR (turgan to'lqin koeffitsiyenti) taxminan 2–2,5 ga mos keladigan ruxsat etilgan darajadan oshib ketsa, boshqaruv tizimi chiqish quvvatini pasaytiradi, qaytgan quvvat yanada oshganda esa modulni avariya holatida o'chiradi.



Tok va kuchlanishlarni nazorat qilish haddan tashqari yuklanish yoki o'tish jarayonlarida tranzistorlarning shikastlanishining oldini olishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Odatda, tok bo'yicha himoyaning chegaraviy qiymatlari nominal tokdan 10–20% ga yuqori bo'ladi, kuchlanish bo'yicha himoya esa stokdagi kuchlanish sathi ruxsat etilgan chegaradan 5–10% ga oshganda ishga tushadi. Harorat himoyasi tranzistor korpusining harorati 85–100 °C ga yetganda kuchaytirgichning ishlashini cheklaydi, bu esa uning degradatsiyasining oldini olishga va parametrlar barqarorligini saqlashga yordam beradi.

Himoya tizimi raqamli preddistorsiya va avtomatik darajani sozlash tizimi bilan chambarchas bog'liq bo'lib, bu tashqi sharoitlar o'zgarganda ham kuchaytirgichning ishlash rejimlarini moslashuvchan tarzda o'zgartirish hamda chiziqlilik va spektral tozalikning zarur ko'rsatkichlarini saqlab qolish imkonini beradi.

Shunday qilib, DVB-T2 quvvat kuchaytirgichi sxemasining arxitekturasini va realizatsiyasini murakkab muhandislik yechimidir. Bu yerda yarimo'tkazgich texnologiyasining tanlovi, kuchaytirgichning modulli tuzilishi, optimallashtirilgan moslashtiruvchi zanjirlar, samarali filtrlash va ko'p bosqichli himoya tizimi yuqori chiziqlilikni, a'lo darajadagi o'rtacha energiya samaradorligini va uzluksiz raqamli efir uzatish sharoitida ishonchli ishlashni ta'minlash uchun uyg'unlikda ishlaydi.

Quyida energetik va chiziqli xususiyatlarni optimallashtirishga yordam beradigan DVB-T2 PA-modulining standart sonli parametrlari keltirilgan (1-jadval), [1,3,5,7,14].

1-jadval.
DVB-T2 PA-modulining tipik raqamli parametrlari

№	Parametr	Belgi	Tipik qiymat	Izoh
1.	Ishchi chastotalar diapazoni	f	470–694 MHz	DVB-T2 UHF diapazoni
2.	Kanal kengligi	B	8 MHz	Standart TV kanali
3.	Modulyatsiya turi	-	OFDM (QPSK-256QAM)	Yuqori PAPR
4.	Kuchaytirgich arxitekturasini	-	Doherty (Main + Peak)	Bek-off rejimida ishlash uchun
5.	Yarimo'tkazgich texnologiyasi	-	LDMOS yoki GaN HEMT	Quvvat va FIK bo'yicha tanlash
6.	Modulning o'rtacha chiqish quvvati	$P_{out,avg}$	300–1000 Vt	OFDM signali bo'lganda
7.	Chulg'amning eng yuqori quvvati	P_{peak}	2.5–8 kVt	PAPR $\approx$ 8-9 dB bo'lganda



8.	Chiqish bek-off	OBO	6–9 dB	DVB-T2 chiziqli uchun
9.	Kuchaytirish koeffitsiyenti	G	15–25 dB	Drayver bilan birga
10.	Kirish qarshiligi	Zin	50 Om	RF standarti
11.	Chiqish qarshiligi	Zout	50 Om	Filtr/kombayn oldidan
12.	Stok ta'minot kuchlanishi	VDD	28–50 V	LDMOS / GaN
13.	Iste'mol toki (nom.)	IDD	15–40 A	Quvvatiga qarab
14.	Iste'mol qilinadigan o'zgaras tok quvvati	PDC	1.2–3.5 kVt	Bir modulga
15.	To'yinishdagi FIK	η_{sat}	45–65 %	Texnologiyaga bog'liq
16.	6 dB orqaga qaytishdagi FIK	$\eta_{6\text{dB}}$	30–50 %	Muhim parametr
17.	Polosadan tashqari nurlanishlar darajasi	ACLR	–45...–55 dB	DPD va filtr bilan
18.	Modulyatsiya xatosi	MER	$\geq 32\text{--}36$ dB	64/256-QAM uchun
19.	Vektor xatoligi	EVM	$\leq 2\text{--}3$ %	Odatdagi DVB-T2
20.	2-chi, 3-chi garmonikalar	-	$\leq -40\text{--}-60$ dB	Filtrdan keyin
21.	Ruxsat etilgan VSWR	-	2.0–2.5 gacha	Avtomatik foldback
22.	Tranzistor korpusining temperaturasi	Tc	$\leq 85\text{--}100$ °C	Himoyani cheklash
23.	Sovutish turi	-	Havo / suyuqlik	Quvvat sinfi bo'yicha
24.	Raqamli xatolikning mavjudligi	DPD	Ha	DVB-T2 uchun majburiy
25.	Zaxiralash rejimi	-	N yoki N+1	Radioeshittirish stansiyalari uchun

1-jadvalda keltirilgan parametrlar UYD diapazonida ishlaydigan DVB-T2 standartidagi eshittirish uzatkichining bitta quvvat kuchaytirgichi (PA) moduli uchun odatiy qiymatlarni ifodalaydi. O'rtacha chiqish quvvati OFDM signalining yuqori pik-faktorini hamda chiziqlilik va spektral niqobga muvofiqlikni ta'minlash uchun zarur bo'lgan chiqish quvvatini pasaytirish (back-off) darajasini hisobga oladi. Quvvat 6 dB ga pasaytirilgandagi (back-off) FIK qiymatlari Doxerti



arxitekturasining an'anaviy AB sinfidagi kuchaytirgichlarga nisbatan asosiy afzalligini ko'rsatib beradi. ACLR, MER va EVM parametrlari raqamli oldindan buzilishlarni tuzatish va chiqishda filtrlash rejimida ishlash uchun ko'rsatilgan bo'lib, bu zamonaviy DVB-T2 uzatkichlari uchun standart amaliyotdir.

DVB-T2 quvvat kuchaytirgichi (PA) modulining tipik raqamli parametrlarini tahlil qilish bizga quvvat kuchaytirgichining bazaviy konfiguratsiyasidagi energetik, chiziqli va ekspluatatsion xususiyatlarini miqdoriy baholash imkonini beradi. Bu, shuningdek, OFDM signalini kuchaytirishda ishlashning cheklangan rejimlarini aniqlashga yordam beradi. Foydali ish ko'effitsiyenti, spektral tozalik va modulyatsiya sifati bo'yicha olingan ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, chiqish kaskadining ish rejimlarini optimallashtirish orqali uzatkich samaradorligini oshirish uchun imkoniyatlar mavjud. Shu munosabat bilan, keyingi tadqiqotlarni real foydalanish sharoitlarida energetik va chiziqli xususiyatlarni dinamik optimallashtirishni ta'minlaydigan adaptiv boshqaruvdan foydalangan holda uzatkichning chiqish kaskadini kompleks modernizatsiya qilish usullarini ishlab chiqish va tahlil qilishga yo'naltirish lozim.

Adaptiv boshqaruv yordamida uzatkichning chiqish kaskadini kompleks modernizatsiya qilishni tadqiq va tahlil etish. Asosiy g'oya quyidagi komponentlarni birgalikda optimallashtirish hisobiga DVB-T2 uzatkichining energiya samaradorligini va parametrlarining barqarorligini oshirishdan iborat:

- raqamli modulyator,
- quvvat kuchaytirgichi,
- ish rejimlarini boshqarish tizimi.

Adaptiv boshqaruvli uzatkichning chiqish kaskadini modernizatsiya qilish (A varianti).

Biz DVB-T2 standarti uzatkichining chiqish kaskadini yangilashni taklif qilamiz. Bu yangilash kuchaytirish rejimlarini adaptiv boshqarishni va nochiziqlikni raqamli kompensatsiyalashni o'z ichiga oladi. Mazkur yechim signal sifatini pasaytirmagan holda uzatkichning energetik samaradorligini sezilarli darajada oshirish imkonini beradi. An'anaviy eshittirish uzatkichlarida quvvat kuchaytirgichi 6-9 dB diapazonida qat'iy belgilangan chiqish rezervi (back-off) bilan ishlaydi, bu esa, afsuski, o'rtacha foydali ish ko'effitsiyentini 25-30% gacha pasaytiradi. Biz o'z texnik yechimimizda OFDM signalining haqiqiy statistik xususiyatlariga asoslanib, quvvat kuchaytirgichining ish rejimlarini dinamik optimallashtirishni amalga oshiramiz [1,2,5,9,14].

Yechim arxitekturasini. Modernizatsiya qilingan uzatkich tarkibiga DVB-T2 raqamli modulyatori, raqamli predistorsiya bloki, adaptiv kuchaytirish drayveri, Doerti sxemasi bo'yicha quvvat kuchaytirgichi, signal sifatini baholash uchun qayta aloqa tizimi hamda DSP yoki FPGA asosida ishlaydigan energiyani tejash kontrolleri kiradi. Modulyator kengligi 8 MGs va pik faktori (PAPR) taxminan 8-10 dB bo'lgan OFDM signalini hosil qiladi. Bu signal raqamli predistorsiya blokiga kelib tushadi va u yerda keyingi analog trakt uchun kompensatsiyalovchi nochiziqlik shakllantiriladi. Adaptiv kuchaytirish drayveri quvvat kuchaytirgichining qo'zg'alish darajasini 10-12 dB gacha bo'lgan diapazonda sozlab boradi. Bu esa chiziqlik bo'yicha minimal zaxira bilan belgilangan o'rtacha chiqish quvvatini saqlab turishga imkon beradi. Drayverni boshqarish qayta aloqa tizimi ma'lumotlari asosida real vaqt rejimida amalga oshiriladi.

Doherty sxemasi bo'yicha quvvat kuchaytirgich. Uzatkichning chiqish kaskadi GaN HEMT tranzistorlaridan foydalaniladigan Doherty arxitekturasini asosidagi quvvatli kuchaytirgich sifatida yaratilgan. Asosiy va pik tranzistorlari taxminan 48-50 V kuchlanishda ishlaydi va UHF (470-694 MGs) diapazoni uchun mo'ljallangan. Asosiy kaskad maksimal oqim tokining 10-20



foizini tashkil etuvchi tinchlik toki bilan AB sinfida ishlaydi, bu signalning past va o'rta darajalarida yuqori chiziqlilikka erishish imkonini beradi. Pik kaskadi esa, o'z navbatida, C sinfida ishlaydi va signal qobig'i sathi ma'lum bir chegaradan oshganda faollasha boshlaydi, bu taxminan 6 dB li chiqish quvvati pasayishiga (back-off) to'g'ri keladi. Chorak to'liqinli impedans invertori yordamida amalga oshirilgan yuklamaning dinamik modulyatsiyasi tufayli kuchaytirgichning o'rtacha foydali ish koeffitsiyentini 15-25 % ga oshirishga muvaffaq bo'linadi. Shunday qilib, bitta PA-modulining o'rtacha chiqish quvvati 500–800 Vt bo'lganda, foydali ish koeffitsiyenti quvvat pasayishi (back-off) ishchi sohasida 25–30 % dan 40-45 % gacha ortadi, to'yinishga yaqinlashganda esa 55-60 % ga yetishi mumkin.

Raqamli oldindan sozlash. Raqamli oldindan sozlash (DPD) bloki muvofiqlik jadvallari bilan birgalikda quvvat kuchaytirgichining polinomial modeli asosida quriladi. DPD koeffitsiyentlarining adaptatsiyasi bir necha millisekundlik yangilanish davri bilan amalga oshadi, bu esa harorat o'zgarishlari va tranzistorlar parametrlarining siljishini hisobga olish imkonini beradi. DPD qo'llanilishi tufayli MER ko'rsatkichi nominal o'rtacha quvvatda 28-30 dB dan (kompensatsiyasiz)

35-38 dB gacha oshadi. ACLR parametri bo'yicha diapazondan tashqari nurlanishlar darajasi -45...-50 dB qiymatlarigacha pasayadi, bu esa DVB-T2 standarti talablariga to'liq mos keladi.

Kuchaytirishni dinamik boshqarish. Kuchaytirish koeffitsiyentini $G(t)$ dinamik boshqarish OFDM-signal qobig'ining joriy taqsimotini tahlil qilishga va pik omilini baholashga asoslanadi. Energiyani tejash kontrolleri o'rtacha chiqish quvvatiga qarab tranzistorlarning siljish kuchlanishlarini va kuchaytirgichning qo'zg'atilish darajasini sozlaydi. Yuklama kamayganda (masalan, o'rtacha quvvat 3-6 dB ga pasayganda), tinchlik toklari 20-30 % ga kamayadi, bu esa iste'mol qilinadigan doimiy quvvatning va issiqlik yo'qotishlarining kamayishiga olib keladi. Shunday qilib, quvvat kuchaytirgichi doimo maksimal quvvatda ishlamaydi, bu esa uning xizmat muddatini uzaytiradi va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytiradi.

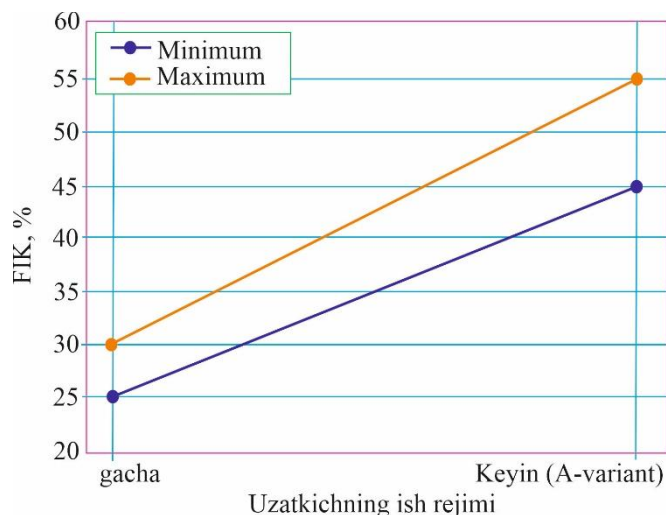
Adaptiv boshqaruv konturining ishlashi optimallashtirish modeli orqali tavsiflanadi, bunda asosiy maqsad chiqish kaskadining umumiy energiya sarfini minimallashtirishdan iborat. Cheklovlar sifatida MER ning 32-34 dB dan past bo'lmashligi kerak bo'lgan minimal ruxsat etilgan qiymati, BER bit xatoligining maksimal ruxsat etilgan ehtimolligi va DVB-T2 uchun me'yoriy qiymatlardan oshmasligi kerak bo'lgan ACLR ning chegaraviy darajasi belgilangan. Kontroller real vaqt rejimida shunday siljish va kuchaytirish parametrlarini tanlaydiki, ular uzatish sifatini saqlab qolgan holda energiya sarfini baza rejimiga nisbatan 10-20 % ga kamaytirish imkonini beradi.

Shunday qilib, DVB-T2 uzatkichining chiqish kaskadini adaptiv boshqaruv va GaN HEMT tranzistorlaridagi quvvatli Doherty kuchaytirgichidan foydalangan holda modernizatsiya qilish o'rtacha FIKni 15-25 % ga sezilarli darajada oshirish imkonini beradi. Shuningdek, MER ko'rsatkichlarining 35-38 dB gacha yaxshilangani va diapazondan tashqari nurlanishlarning -45...-50 dB gacha pasaygani kuzatiladi. Ushbu natijalar taklif etilgan texnik yechimning eshittirish uzatkichlarida, jumladan, Toshkent teleminorasi kabi obyektlarda qo'llash uchun samarali ekanini tasdiqlaydi.

Adaptiv boshqaruvli uzatkich chiqish kaskadini modernizatsiya qilish (A variant) samaradorligini miqdoriy baholash uchun asosiy energetik va sifat ko'rsatkichlarining tahlili o'tkazildi. Quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyentining uzatkichning ish rejimiga bog'liqligini o'rganish natijalari 2-rasmda keltirilgan.



2-rasmda uzatkich quvvat kuchaytirgichining foydali ish ko'effitsiyenti (FIK) A varianti bo'yicha texnik yechim joriy etilgunga qadar va undan keyingi ish rejimiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Baza holati sifatida biz yuklamani dinamik boshqarish va raqamli oldindan sozlashsiz AB sinfida ishlaydigan an'anaviy quvvat kuchaytirgichini ko'rib chiqamiz.



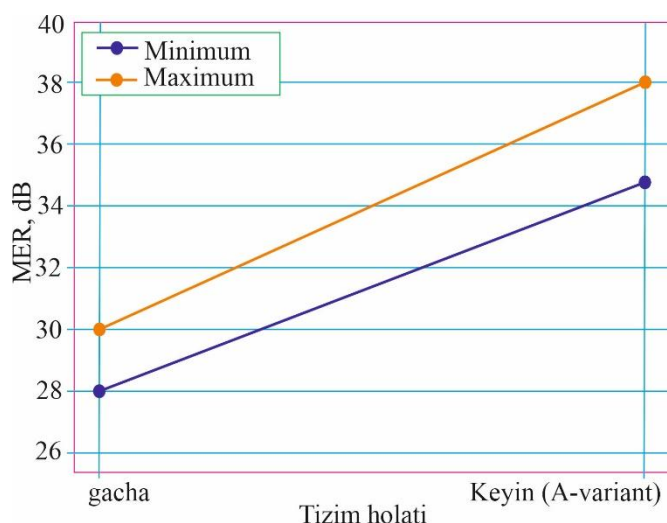
2-rasm. Quvvat kuchaytirgichi FIKning uzatkich ish rejimiga bog'liqlik grafigi.

Grafikdan (2-rasm) ko'rinib turibdiki, dastlabki holatda quvvat kuchaytirgichining foydali ish ko'effitsiyenti (FIK) 25-30 % oralig'ida tebranadi. Bu, chiqish signalining orqaga chekinish darajasi (back-off) sezilarli bo'lganda, DVB-T2 standartidagi ko'p tonli OFDM-signallar bilan ishlaydigan kuchaytirgichlar uchun me'yoriy holatdir. FIKning pastligi signalning yuqori pik omili (PAPR) bilan izohlanadi, shu sababli kuchaytirgich ko'p vaqt davomida optimal nuqtada ishlamaydi.

Raqamli oldindan buzish va ish rejimlarini adaptiv boshqarishga ega Doherty arxitekturasini joriy etilgandan so'ng, FIKning 45-55 % gacha sezilarli darajada oshgani kuzatiladi. Bu yetkazib berilayotgan energiyadan yanada samarali foydalanilganini va kuchaytirgichning ishchi nuqtasi yuqori energetik samaradorlik sohasiga siljiganini ko'rsatadi. Shunday qilib, ushbu texnik yechim uzatkichning chiziqliligini yomonlashtirmagan holda, quvvat kuchaytirgichining FIKini deyarli ikki baravar oshirish imkonini beradi.

DVB-T2 signalining modulyatsiya xatoliklari ko'effitsiyentining (MER) texnik yechim joriy etilishidan oldingi va keyingi tizim holatiga bog'liqligini o'rganish natijalari 3-rasmda keltirilgan.

Ushbu 3-rasmda uzatilayotgan DVB-T2 signalining sifatini aks ettiruvchi modulyatsiya xatoliklari ko'effitsiyenti (MER) qanday o'zgarishi ko'rsatilgan. MER parametri OFDM-signallar sifatining asosiy ko'rsatkichlaridan biri bo'lib, quvvat kuchaytirgichining chiziqli bo'lmagan buzilishlari, faza shovqinlari va sinxronizatsiya xatoliklari bilan chambarchas bog'liqdir.



3-rasm. DVB-T2 signali modulyatsiyasidagi xatoliklar koeffitsiyentining (MER) tizim holatiga bog'liqlik grafigi.

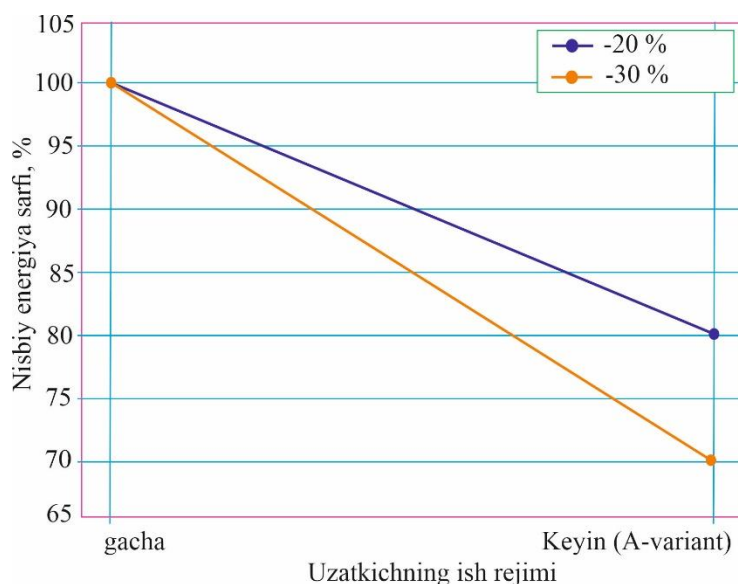
Dastlabki ish rejimida MER qiymati 28-30 dB ni tashkil etadi, bu esa murakkab sharoitlarda signalning barqaror qabul qilinishi uchun ruxsat etilgan eng quyi darajalarga yaqindir. Bu qiymat uzatkichning chiqish kaskadida yuzaga keladigan sezilarli noxiziqli buzilishlar mavjudligini ko'rsatadi.

A varianti bo'yicha texnik yechim joriy etilgandan so'ng MER qiymati 35-38 dB gacha oshadi. Bu o'sish quvvat kuchaytirgichining amplituda-faza noxiziqliklarini samarali bartaraf etuvchi hamda kuchaytirgichning maqbul rejimlarda yanada barqaror ishlashini ta'minlovchi raqamli oldindan buzish (prediskajeniye) usulidan foydalanish bilan bog'liqdir. Olingan MER qiymatlari sifat bo'yicha sezilarli zaxirani vujudga keltiradi va ishonchli eshittirish uchun DVB-T2 standarti talablariga mos keladi.

Uzatkichning ish rejimiga bog'liq holda, yangi texnik yechim joriy etilishidan oldin va keyin uning nisbiy energiya iste'moli qanday o'zgarishini ko'rsatuvchi tadqiqot natijalari 4-rasmda keltirilgan. Bu rasmda uzatkichning dastlabki rejimdagi va yechim joriy qilingandan keyingi energiya iste'moli taqqoslangan. Asosiy daraja sifatida uzatkichning dastlabki holatdagi, shartli ravishda 100% ga teng deb olingan energiya sarfi qabul qilindi.

4-rasmdagi grafikdan ko'rinib turibdiki, modernizatsiyadan so'ng uzatkichning energiya iste'moli 70-80 % gacha kamayadi, bu umumiy energiya xarajatlarining 20-30 % ga qisqarishiga mos keladi. Energiya iste'molining kamayishiga asosiy hissa quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyentini oshirish hisobiga qo'shiladi, bu esa issiqlik yo'qotishlari va sovutish tizimlariga tushadigan yuklamaning pasayishiga olib keladi.

Qo'shimcha samara kuchaytirgichning ishlash rejimlarini adaptiv boshqarish orqali erishiladi: bunda maksimal quvvat faqat signal o'rab oluvchisining pik qiymatlari davrida qo'llaniladi. Bu esa signal sifatini yomonlashtirmagan holda o'rtacha energiya iste'molini sezilarli darajada kamaytirish imkonini beradi.



4-rasm. Uzatkichning ishlash rejimiga nisbiy energiya iste'molining bog'liqlik grafigi.

Grafiklarni (2–4-rasmlar) tahlil qilish asosida bir nechta xulosa chiqarish mumkin: natijalar shuni tasdiqlaydiki, DVB-T2 standartidagi uzatkichlarda raqamli oldindan buzishga ega Doherty arxitekturasidan foydalanish, ayniqsa, uzoq muddatli kecha-kunduz ishlaganda va yuqori quvvatda nurlanganda, haqiqatan ham o'zini oqlaydi. Ushbu texnik yechim energiya samaradorligi, signal sifati va uzatuvchi uskunaning ishonchliligi o'rtasidagi mukammal muvozanatni ta'minlaydi, bu esa uni DVB-T2 standarti raqamli televideniye tizimlarida amaliy qo'llash uchun istiqbolli qiladi.

Energiya samaradorligini oshirish va uzatkichning chiquvchi kaskadini optimallashtirish imkoniyatlarini kengaytirish uchun A variantini tahlil qilgach, keling, muqobil yondashuvni - adaptiv boshqaruvga ega chiquvchi kaskadni modernizatsiya qilishni (B varianti) ko'rib chiqamiz [2,5,15,17,18].

Biz DVB-T2 standartidagi uzatkichning chiquvchi kaskadini qisman modernizatsiya qilishni taklif etamiz. Bu modernizatsiya LDMOS yoki GaN tranzistorlaridagi AB sinfidagi quvvat kuchaytirgichning mavjud arxitekturasini saqlab qolgan holda, raqamli oldindan buzish bilan birgalikda Envelope Tracking dinamik ta'minot texnologiyasini joriy etishga asoslanadi. Bunday yondashuv chiquvchi kuchaytirgichni almashtirmasdan hamda yuqori chastotali traktga jiddiy o'zgartirishlar kiritmasdan uzatkichning energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirish va uning chiziqli xususiyatlarini yaxshilash imkonini beradi.

Modernizatsiya qilingan traktning tarkibi. Uzatkichning mavjud traktiga raqamli oldindan buzish bloki, Envelope Tracking ta'minot modulyatori, teskari aloqa tizimi va optimallashtirish kontrolleri qo'shiladi. DVB-T2 raqamli modulyatori taxminan 8–10 dB pik faktoriga ega bo'lgan 8 MHz tarmoqli kenglikdagi OFDM-signalni hosil qiladi. Ushbu signal raqamli ishlov berilgandan so'ng adaptiv chiquvchi traktga uzatiladi va u yerda quvvat kuchaytirgichining ishlash rejimlari dinamik sozlanadi. ET modulyatori taxminan 1–3 MHz tartibga solish polosasiga ega tezkor DC-DC o'zgartirgichga va gibrid chiziqli to'ldiruvchi kaskadga asoslangan bo'lib, bu signal o'rab oluvchisiga qarab kuchaytirgichning ta'minot kuchlanishini taxminan 20 - 48 V (GaN uchun) yoki



20–32 V (LDMOS uchun) oralig'ida o'zgartirish imkonini beradi. Teskari aloqa tizimi yo'naltirilgan tarmoqlagich va analog-raqamli o'zgartirgichlarni o'z ichiga oladi va ular real vaqt rejimida spektral hamda modulyatsion parametrlarni baholashni ta'minlaydi.

Envelope Tracking texnologiyasining miqdoriy baholash bilan ishlash prinsipi An'anaviy, ya'ni o'zgarmas kuchlanishli ta'minotda AB sinfidagi quvvat kuchaytirgichi ko'p vaqt davomida chiqish quvvatining sezilarli pasayishi - chuqur output back-off (6–9 dB) rejimida ishlaydi. Natijada kuchaytirgichning o'rtacha foydali ish koeffitsiyenti (FIK) 25–30 % gacha kamayadi. Envelope Tracking (ET) tizimida ta'minot kuchlanishi V DD (t) OFDM signalining og'uvchisi (envelope)ga mutanosib ravishda dinamik o'zgaradi. Bu esa tranzistorning ish nuqtasini optimal ishlash sohasiga yaqin holatda ushlab turish imkonini beradi. Ekspluatatsion baholashlarga ko'ra, PA (Power Amplifier) modulining o'rtacha chiqish quvvati 500–1000 W atrofida bo'lganda, ET texnologiyasidan foydalanish o'rtacha FIKni 35–45 % gacha oshirish imkonini beradi. Bu dinamik ta'minotsiz bazaviy sxemaga nisbatan 10–20 % lik samaradorlik o'sishiga mos keladi. Bundan tashqari, ET texnologiyasi qo'llanilganda quvvat kuchaytirgichining chiqish kaskadidagi issiqlik yo'qotishlari 15–25 % ga kamayadi. Natijada kuchaytirgichning issiqlik rejimi yaxshilanadi, elementlarning ortiqcha qizishi kamayadi hamda qurilmaning ishonchliligi va xizmat muddati oshadi.

Envelope Tracking (ET) tizimining raqamli oldindan buzilish (predistorsiya) jarayonida ta'minot kuchlanishining dinamik o'zgarishi kuzatiladi, bu esa o'z navbatida xotira effektlarini kuchaytirib, nochiziqli buzilishlarni oshirib yuboradi. Shu bois raqamli oldindan buzilishdan foydalanish zaruriyatga aylanadi. DPD bloki xotira effektlarini va parametrlari real vaqt rejimida moslashtiriladigan muvofiqlik jadvalini inobatga oluvchi polinomial model asosida quriladi. Amaliy natijalarga ko'ra, ET qo'llanilganda DPDsiz MER qiymati 26–28 dB gacha pasayishi, ACLR bo'yicha tarmoqdan tashqari nurlanish darajasi esa -35...-40 dB gacha yomonlashishi mumkin. Adaptiv raqamli oldindan buzilish faollashtirilgach, MER qiymati 32–36 dB gacha ortadi, ACLR esa -45...-50 dB darajasigacha yaxshilanadi va bu DVB-T2 standarti talablariga mos keladi. Shuni ta'kidlash kerakki, chiziqlilikni yaxshilashga chiqish back-offini oshirmasdan va o'rtacha chiqish quvvatini pasaytirmasdan erishiladi.

Ish rejimlarini adaptiv optimallashtirish. Boshqaruv tizimi optimallashtirish modeli asosida ishlaydi, bunda asosiy maqsad - chiqish kaskadining umumiy quvvat sarfini minimallashtirishdir. Kuchaytirgichning ta'minot kuchlanishi, qo'zg'alish darajasi va raqamli predistorsiya (oldingi xatoliklarni to'g'rilash) koeffitsiyentlari asosiy boshqaruv parametrlari hisoblanadi. Cheklovlar sifatida MERning minimal ruxsat etilgan qiymati 32 dB dan past bo'lmasligi, BER (bit xatoliklari ehtimoli)ning maksimal ruxsat etilgan darajasi va ACLR parametri bo'yicha polosadan tashqari nurlanishlarning cheklangan sathi belgilangan. Nazoratchi (kontroller) teskari aloqa ma'lumotlari tahliliga asosan kuchaytirgichning ish rejimini tanlaydi. Quvvatni tejash rejimida ta'minot kuchlanishi va kuchaytirish pasaytiriladi, bu esa signalning zarur sifatini saqlagan holda iste'mol qilinadigan quvvatni 10–15 foizga kamaytirish imkonini beradi. Sifat ustuvorligi rejimida esa, uzatish sharoitlari yomonlashgan taqdirda ham, nochiziqli buzilishlarning ortishini qoplash va MER hamda ACLR ko'rsatkichlarini ruxsat etilgan chegaralarda ushlab turish uchun boshqaruv parametrlari moslashtiriladi.

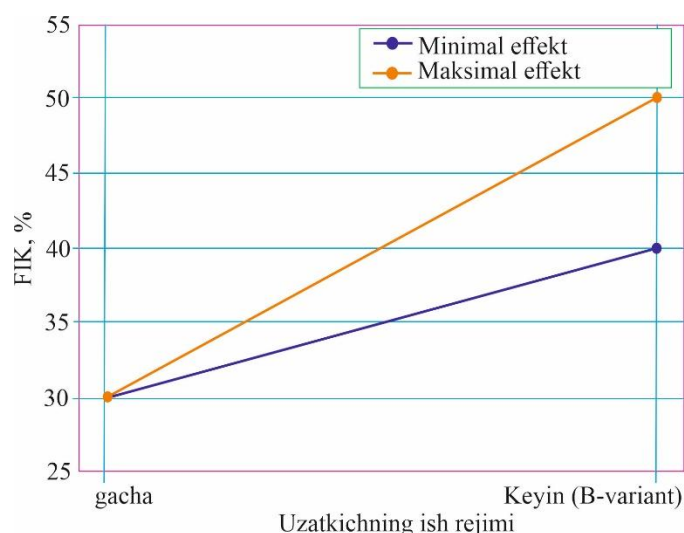
Shunday qilib, DVB-T2 standarti uzatkichining chiqish kaskadini Envelope Tracking (qamrovchi signalni kuzatish) texnologiyasi va raqamli predistorsiya yordamida qisman modernizatsiya qilish quvvat kuchaytirgichining o'rtacha foydali ish koeffitsiyentini 25–30



foizdan 35-45 foizgacha sezilarli darajada oshirish imkonini beradi. Bu, shuningdek, issiqlik yo'qotishlarini 15-25 foizga kamaytirishga va ACLR sathi $-45...-50$ dB bo'lganda MER qiymatlarini 32-36 dB oralig'ida ta'minlashga yordam beradi. Taklif etilgan texnik yechim mavjud radioeshittirish uzatkichlarining asosiy arxitekturasini o'zgartirmagan holda, ularning energiya samaradorligi va sifatini oshirishning samarali hamda iqtisodiy jihatdan o'zini oqlaydigan usuli hisoblanadi.

Quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyentining uzatkich ish rejimiga bog'liqligini ko'rsatuvchi tadqiqot natijalari 5-rasmda keltirilgan.

Grafikda (5-rasm) kuchaytirgich arxitekturasini o'zgarishsiz qoldirilgan holda, raqamli predistorsiya (DPD) va qamrovchi signalni kuzatish (Envelope Tracking) texnologiyasiga asoslangan B varianti bo'yicha texnik yechim joriy etilganda quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyenti qanday o'zgarishi ko'rsatilgan.

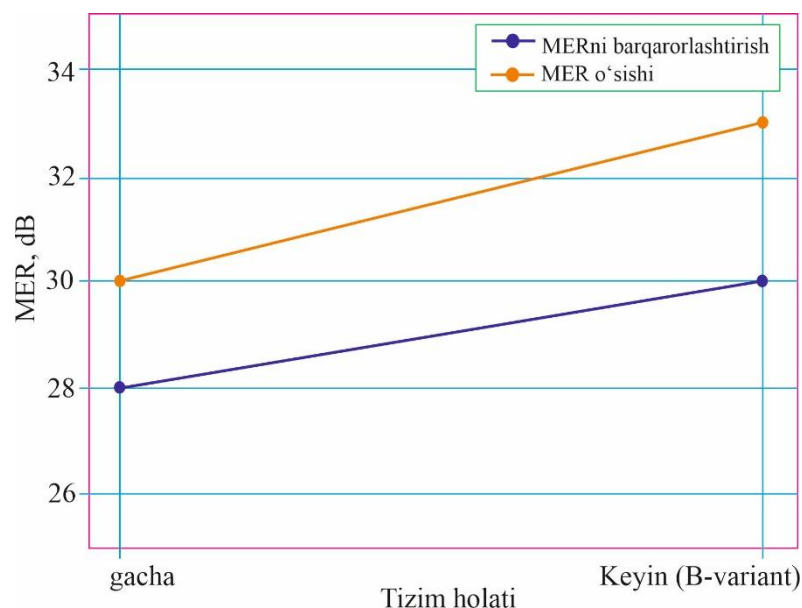


5-rasm. Quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyentini uzatkichning ish rejimiga bog'liqlik grafiqi.

Dastlabki rejimda quvvat kuchaytirgichining FIK taxminan 30% ni tashkil etadi. Bu qat'iy belgilangan ta'minot kuchlanishida DVB-T2 standarti OFDM-signallari bilan ishlaydigan an'anaviy kuchaytirgichlar uchun odatiy ko'rsatkichdir. Biroq, B variantini joriy qilgandan so'ng, FIK 40-50% gacha ko'tarildi, bu dastlabki holatga nisbatan 10-20% ga o'sganini anglatadi.

Shuni ta'kidlash joizki, erishilgan FIK qiymatlari odatda Doherty arxitekturasidan (A varianti) foydalangandagiga qaraganda pastroq bo'ladi. Shunga qaramay, bu texnik yechimni amalga oshirish osonroq va u chiqish kaskadini jiddiy modernizatsiya qilishni talab etmaydi. FIKning oshishiga kuchaytirgichning ta'minot kuchlanishini signal o'ramiga dinamik ravishda moslashtirish orqali erishiladi, bu esa back-off rejimida ishlaganda quvvat yo'qotilishini kamaytirishga yordam beradi.

Mazkur texnik yechimni joriy etishdan oldingi va keyingi tizim holatida DVB-T2 signalining modulyatsiya xatosi koeffitsiyenti (MER) qanday o'zgarishi tadqiqot natijalari 6-rasmda keltirilgan.



6-rasm. DVB-T2 signalining modulatsiya xatolik koeffitsiyenti (MER) ning tizim holatiga bog'liqlik grafiki.

Grafik (6-rasm) B variantining joriy etilishi DVB-T2 signalining MER modulyatsiyasi sifatiga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi. Dastlabki holatda MER qiymati 28-30 dB oralig'ida tebranadi, bu signal sifatining maqbul, biroq ideal bo'lmagan darajasi hisoblanadi.

Kuchaytirgichning ta'minotini dinamik boshqarish bilan birgalikda raqamli oldindan buzish usuli (DPD) joriy etilgach, MER qiymatining 30-33 dB gacha barqarorlashgani va mo'tadil o'sgani kuzatiladi. Signal sifatining yaxshilanishi kuchaytirgichning amplituda-faza buzilishlari DPD yordamida kompensatsiyalanishi, shuningdek, kuchaytirgichning samaraliroq ishlashi tufayli chiziqli bo'lmagan buzilishlar darajasi pasayishi bilan bog'liq.

Shuni ta'kidlash joizki, agar ET tizimi noto'g'ri sozlansa, bu MER ko'rsatkichiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu bois, ijobiy natijaga erishish uchun DPD va ta'minot modulyatsiyasi algoritmlarini birgalikda moslashtirish zarur. To'g'ri sozlanganda, B varianti signal sifati bo'yicha DVB-T2 standarti talablariga barqaror muvofiqlikni kafolatlaydi.

Grafiklar (5-6-rasmlar) tahlili asosida bir nechta xulosa chiqarish mumkin: B variantidan foydalanilganda DVB-T2 signalining sifati nafaqat yomonlashmaydi, balki DPD to'g'ri sozlanganda MER ko'rsatkichining o'sishi va barqarorligini namoyon etadi. A varianti bilan taqqoslaganda, B variantining texnik yechimi joriy etishning kamroq murakkabligi va arzonligi bilan ajralib turadi, bu esa uni mavjud uzatkichlarni modernizatsiya qilish uchun yanada jozibador qiladi. B variantini uzatkichning energetik xususiyatlarini yaxshilaydigan, shu bilan birga signalning me'yoriy sifatini saqlab qoladigan va uskunaning quvvat qismiga minimal darajada aralashadigan murosali yechim sifatida ko'rib chiqish mumkin.

Adaptiv boshqaruvni yanada takomillashtirish va uzatkichning chiqish kaskadi energiya samaradorligini oshirish uchun modernizatsiyaning keyingi variantini - C variantini ko'rib chiqamiz [2,4,5,13,14,19]. Ushbu taklif etilayotgan modernizatsiya varianti DVB-T2 standarti



uzatkichining chiqish kaskadidagi apparat o'zgarishlarini minimallashtirishga qaratilgan bo'lib, Doherty arxitekturasini yoki Envelope Tracking texnologiyasini joriy etish iqtisodiy yoki texnologik qiyinchiliklarga duch kelgan holatlar uchun mos keladi.

Asosiy g'oya OFDM signalining pik omilini pasaytirish va mavjud quvvat kuchaytirgichining (AB, LDMOS yoki GaN sinfi) ish rejimlarini optimallashtirishdan iborat. Bu esa yuqori chastotali sxemani o'zgartirmasdan, zarur bo'lgan chiqish quvvatini pasaytirish (back-off)ni kamaytirish va o'rtacha energiya samaradorligini oshirish imkonini beradi.

Funksional choralarni joriy etish. Uzatkichning raqamli traktida pik omilini pasaytirishning CFR (Crest Factor Reduction) algoritmi qo'llangan bo'lib, u OFDM-signalini ehtiyotkorlik bilan klipplash (qirqish) va so'ngra filtrlashga asoslanadi. CFR sozlamasi signalning amplitudaviy piklarini kamaytirishga, shu bilan birga spektral niqob va modulyatsiya sifatiga minimal ta'sir ko'rsatishga qaratilgan.

Chiqish kaskadi darajasida quvvat kuchaytirgichining ishchi nuqtasi optimallashtiriladi. Katta zaxirali (DVB-T2 uchun odatda 7-9 dB) an'anaviy "back-off" o'rniga ish rejimi signal sifatining real metrikalari asosida sozlanadi. Bundan tashqari, kuchaytirgich tranzistorlarining adaptiv siljishi joriy etiladi, bu esa o'rtacha quvvat va signal o'ramasi statistikasiga qarab "tejamkor", "nominal" va "pik" kabi bir necha siljish darajalari o'rtasida almashinish imkonini beradi.

Uzatish sifatini nazorat qilish MER va ACLR parametrlari haqidagi telemetrik ma'lumotlardan foydalanadigan soddalashtirilgan qayta aloqa tizimi orqali amalga oshiriladi. Ushbu ma'lumotlar davriy yoki kvazi-real vaqt rejimida kelib tushishi mumkin. Ishlash prinsipi va samaradorlikning miqdoriy bahosi. DVB-T2 standartidagi OFDM-signal yuqori pik omiliga ega bo'lib, u odatiy rejimlarda taxminan 8-10 dB ni tashkil etadi. Bu quvvat kuchaytirgichini katta chiqish "back-off"i bilan ishlashga majbur qiladi, bu esa o'z navbatida, AB sinfidagi kuchaytirgichlar uchun o'rtacha foydali ish koeffitsiyentini 25-30% gacha pasaytiradi.

CFR algoritmlaridan foydalanish mo'tadil klipplash sozlamalarida PAPR ko'rsatkichini 2-4 dB ga kamaytirish imkonini beradi. Bu o'z navbatida, chiqish "back-off"ini, masalan, 8 dB dan 5-6 dB gacha kamaytirishga imkon yaratadi. Ishchi nuqtaning bunday o'zgarishi bir xil pik cheklovlarida o'rtacha chiqish quvvatining oshishiga olib keladi, bu esa kuchaytirgichning o'rtacha FIK o'sishiga yordam beradi. Amaliy baholashlar shuni ko'rsatadiki, "back-off" 2-3 dB ga kamaytirilganda, quvvat kuchaytirgichning o'rtacha FIKi nisbiy ifodada 5-12% ga oshishi mumkin. Bundan tashqari, chiqish kaskadining issiqlik yo'qotishlari 5-15% ga kamayadi, bu esa tranzistorlardagi harorat yuklamasini pasaytiradi va uskunaning uzluksiz ishlashdagi ishonchliligini oshiradi.

Quvvat kuchaytirgichidagi adaptiv siljish - bu energiya rejimlarini optimallashtirishga yordam beradigan qiziqarli yondashuvdir. Signalning o'rtacha quvvati past bo'lganda, kuchaytirgich pasaytirilgan siljishli rejimga o'tadi. Bu tinch holatdagi toklarni 15-25% ga qisqartirish va doimiy quvvat iste'molini kamaytirish imkonini beradi. O'rtacha quvvat oshganida yoki piklar zichligi ortganida esa, boshqaruv tizimi kuchaytirgichni nominal yoki pik siljish rejimiga o'tkazadi, bu esa kuchaytirishning chiziqliligi va barqarorligini saqlashga yordam beradi.

Bunday usul kuchaytirgichning doimiy ravishda maksimal siljishda ishlashining oldini oladi va apparat qismini murakkablashtirmagan holda energiya resurslaridan foydalanishni samaraliroq qiladi.



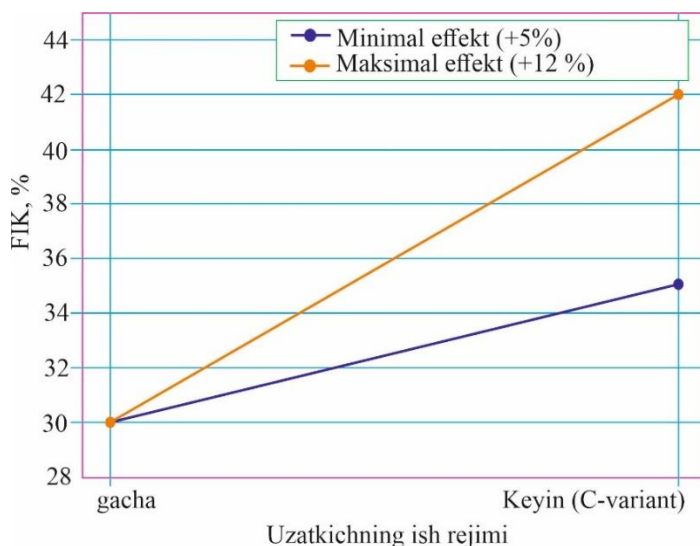
Sifat bo'yicha cheklovlar va qo'llash shartlari. CFR algoritmlari va kuchaytirgich rejimlarini sozlashda uzatish sifati bo'yicha cheklovlar albatta hisobga olinishi kerak. Klipplash parametrlari MERning minimal ruxsat etilgan qiymati, diapazondan tashqari nurlanishlarning ruxsat etilgan darajasi va bit xatoligi ehtimoli bo'yicha shartlar bajariladigan tarzda tanlanadi. DVB-T2 uchun amaliy mo'ljal sifatida 30-32 dB dan past bo'lmagan MER qiymatlari hamda standartning spektral niqobi talablariga mos keladigan ACLR darajalari xizmat qiladi.

Shuni ta'kidlash joizki, CFR dan haddan tashqari agressiv foydalanish modulyatsiya sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatishi va spektral kengayishning kuchayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, taklif etilgan variantda pik omilini mo'tadil pasaytirish qo'llaniladi, bu esa energiya samaradorligi va efir signali sifati o'rtasidagi muvozanatga erishish imkonini beradi.

Shunday qilib, DVB-T2 standarti uzatkichining chiqish kaskadini C varianti bo'yicha modernizatsiya qilish – ya'ni CFR dan foydalanish, chiqish “back-off”ni optimallashtirish va quvvat kuchaytirgichining adaptiv siljishini qo'llash – energiya samaradorligini oshirishning eng oddiy va iqtisodiy jihatdan foydali usuli hisoblanadi. Bu yondashuv kuchaytirgichning asosiy sxemasini o'zgartirmasdan va murakkab dinamik quvvatlash texnologiyalariga murojaat qilmasdan, zarur “back-off”ni 2-3 dB ga kamaytirish, kuchaytirgichning o'rtacha FIKini 5-12% ga oshirish va issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish imkonini beradi.

Quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyentining uzatkich ish rejimiga bog'liqligini o'rganish natijalari 7-rasmda keltirilgan.

Grafikda (7-rasm) C variantidagi texnik yechim amalga oshirilganda quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyenti qanday o'zgarishi ko'rsatilgan. Ushbu yechim OFDM-signalining pik omilini (CFR) pasaytirish, “back-off” qiymatini optimallashtirish va kuchaytirgichning ishchi nuqtasini adaptiv sozlashga asoslangan.



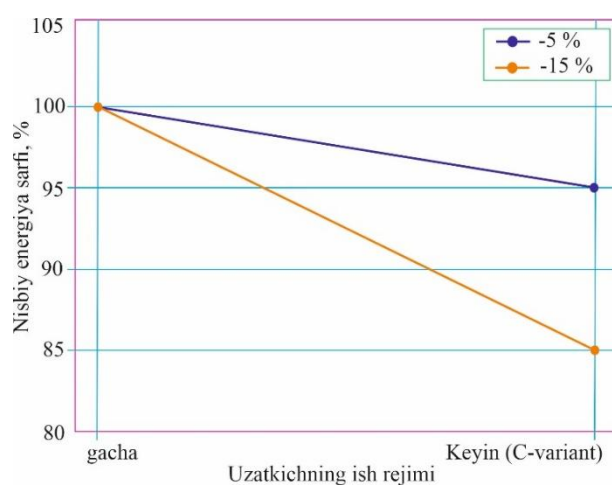
7-rasm. Quvvat kuchaytirgichi FIKning uzatkich ish rejimiga bog'liqlik grafigi.

Dastlabki rejimda quvvat kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyenti (FIK) taxminan 30% ni tashkil etadi. Bu DVB-T2 signallari bilan ishlaydigan va chiziqlilik bo'yicha yaxshi zaxiraga ega bo'lgan klassik kuchaytirgichlar uchun mutlaqo me'yoriy holatdir. C varianti joriy etilgach,



FIKning 35-42% gacha, ya'ni 5-12% ga ortishi kuzatiladi. Ta'kidlash joizki, FIKning o'sishi spektral buzilishlar va signal sifatiga putur yetkazmagan holda zaruriy back-off darajasini qanchalik samarali pasaytirishga erishilganiga bevosita bog'liq. Shunday qilib, C varianti kuchaytirgichning apparat arxitekturasini o'zgartirmasdan, energiya samaradorligini cheklangan, ammo barqaror darajada oshirish imkonini beradi.

Texnik yechim joriy etilishidan oldin va keyin uzatkichning ishlash rejimiga bog'liq holda nisbiy energiya iste'molining qanday o'zgarishini ko'rsatuvchi tadqiqot natijalari 8-rasmda keltirilgan. Grafikda (8-rasm) C variantini joriy etishdan oldingi va keyingi uzatkichning nisbiy energiya iste'moli taqqoslanganini ko'rish mumkin. Baza darajasi sifatida uzatkichning dastlabki rejimidagi energiya iste'moli olingan bo'lib, u shartli ravishda 100% ga teng deb qabul qilingan.



8-rasm. Nisbiy energiya sarfining uzatkich ish rejimiga bog'liqlik grafigi.

8-rasmdagi grafikdan ko'rinib turibdiki, ish rejimlari optimallashtirilgach, energiya iste'moli 95–85 foizgacha kamayadi, bu 5-15 foizlik pasayishga mos keladi. Bunday pasayishga quvvat kuchaytirgichining o'rtacha foydali ish koeffitsiyentini oshirish hamda past "back-off" rejimida ishlaganda issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish hisobiga erishiladi.

A va B variantlaridan farqli o'laroq, C varianti raqamli predistorsiya yoki dinamik quvvat manbai kabi murakkab tizimlarni joriy etishni talab qilmaydi, biroq, afsuski, natijada olinadigan energetik samara unchalik sezilarli bo'lmaydi.

7-8-rasmlardagi grafiklar tahliliga asoslanib, bir nechta xulosa qilish mumkin: A va B variantlaridan farqli o'laroq, C varianti joriy etishning minimal murakkabligi va arzonligi bilan ajralib turadi, chunki u asosan dasturiy sozlash hamda ish rejimlari optimizatsiyasi orqali amalga oshiriladi. C variantini, ayniqsa byudjet va apparat qismini modernizatsiya qilish imkoniyatlari cheklangan hollarda, uzatkichning energetik xususiyatlarini yaxshilashga yordam beradigan asosiy yoki oraliq yechim sifatida ko'rib chiqish mumkin.

3. XULOSA

Olib borilgan tadqiqot davomida yuqori pik faktoriga ega bo'lgan OFDM signallari bilan ishlaydigan DVB-T2 standartidagi raqamli teleuzatkichlar uchun mo'ljallangan Doherty arxitekturali quvvat kuchaytirgichlarining energetik va chiziqli xususiyatlarini tizimli



optimallashtirish bilan bog'liq muhim ilmiy-texnik vazifa hal qilindi. Tahlil natijalariga ko'ra, DVB-T2 standartidagi OFDM signallari uchun pik quvvatining o'rtacha quvvatga nisbati (PAPR) 8–10 dB oralig'ida bo'lishi xosdir. Bu holat quvvat kuchaytirgichining aksariyat vaqt davomida pasaytirilgan chiqish quvvati (back-off) rejimida ishlashiga olib keladi. Bunday sharoitlarda AB sinfidagi an'anaviy quvvat kuchaytirgichlarining foydali ish koeffitsiyenti 12–18 foizgacha pasayadi, bu esa, o'z navbatida, energiya sarfi va issiqlik yo'qotishlarining ortishiga sabab bo'ladi.

Tadqiqot jarayonida Doherty arxitekturali quvvat kuchaytirgichidan foydalanish DVB-T2 uzatkichlarining real ish sharoitlariga xos bo'lgan holatlarda energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirishi aniqlandi. Olingan ma'lumotlarga ko'ra, quvvat 6-8 dB ga pasaytirilganda, Doherty kuchaytirgichining foydali ish koeffitsiyenti 28-38 foizgacha ortadi. Bu ko'rsatkich xuddi shunday chiqish quvvatiga ega an'anaviy kuchaytirgichga nisbatan FIKning 15–20 foiz punktga oshganini anglatadi. FIKning uzatkich ish rejimiga bog'liqligi tahlili shuni ko'rsatdiki, OFDM signali amplitudasining statistik taqsimotiga mos keladigan o'rtacha chiqish quvvati diapazonida Doherty quvvat kuchaytirgichi yuqori samaradorlikni namoyon etadi. Xususan, o'rtacha chiqish quvvati 0,4–0,5 P_{nom} bo'lganda FIKning maksimal o'sishiga erishiladi, bu esa uzluksiz efir uzatkichlarida ushbu arxitekturani qo'llash maqsadga muvofiq ekanini tasdiqlaydi.

Quvvat kuchaytirgichining chiziqli xususiyatlarini tadqiq qilish natijalari shuni ko'rsatdiki, taklif etilgan optimallashtirish chora-tadbirlari kuchaytirilayotgan signal sifatini yomonlashtirmaydi. Aksincha, ish rejimlari va moslashtiruvchi zanjirlar to'g'ri sozlanganida, DVB-T2 signalining MER parametri kuchaytirgichning dastlabki konfiguratsiyasiga nisbatan 2-4 dB ga yaxshilandi. Bunda MER qiymatlari barqaror ravishda 34-36 dB dan yuqori bo'lib, bu hatto 256-QAM kabi yuqori tartibli modulyatsiya sxemalari uchun ham DVB-T2 standarti talablariga javob beradi. Shu bilan birga, polosa tashqarisidagi nurlanishlarning kamayishi qayd etildi, bu esa ACLR ko'rsatkichining 5-8 dB ga yaxshilanishida o'z aksini topdi. Bu holat spektral niqob bo'yicha me'yoriy talablarning bajarilishini ta'minlaydi va qo'shni telekanallardagi xalaqitlar darajasini pasaytiradi. Bu, ayniqsa, yirik shahar va megapolislarda radiochastotalardan zich foydalanish sharoitida ishlaydigan uzatkichlar uchun muhim ahamiyatga ega.

Doherty arxitekturali quvvat kuchaytirgichini joriy etishdan oldingi va keyingi uzatkichning energiya sarfini qiyosiy tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, umumiy elektr energiyasi iste'moli 10-18 foizga kamaygan, bunda chiqish quvvati darajasi va signal sifati talab etilgan me'yorda saqlanib qolgan. Chiqish kaskadida issiqlik ajralishining kamayishi sovutish tizimiga tushadigan yuklamani pasaytirdi, bu esa, o'z navbatida, uzatuvchi uskunaning ekspluatatsion ishonchliligi va xizmat muddatini oshirdi. Shunday qilib, olingan miqdoriy natijalar Doherty arxitekturali quvvat kuchaytirgichlarini tizimli optimallashtirish DVB-T2 standartidagi uzatkichlarning energetik va chiziqli xususiyatlarini bir vaqtning o'zida yaxshilash imkonini berishini tasdiqlaydi. Yagona yondashuv doirasida ilk bor yuqori foydali ish koeffitsiyenti bilan OFDM signallarining chiziqliligi va spektral tozaligiga qo'yiladigan qat'iy talablar o'rtasida muvozanatga erishish mumkinligi namoyish etildi.

Ushbu ishning amaliy ahamiyati shundaki, erishilgan FIK, MER va energiya sarfi ko'rsatkichlari DVB-T2 standartidagi mavjud raqamli teleuzatkichlarni loyihalash va modernizatsiya qilishda foydali bo'lishi mumkin. Taklif etilgan texnik yechimlar va optimallashtirish metodikasi raqamli efir televideniyesi tizimlarining konstruksiyasini murakkablashtirmagan holda, ularning iqtisodiy samaradorligi va ishonchliligini oshirishga yordam beradi.



Olingan natijalar ish rejimlarini raqamli boshqarishga ega adaptiv quvvat kuchaytirgichlarini ishlab chiqish, raqamli predistorsiya (DPD) usullarini integratsiyalash va taklif etilgan yondashuvni keyingi avlod raqamli eshittirish tizimlariga tatbiq etishga qaratilgan kelajakdagi tadqiqotlar uchun mustahkam zamin yaratadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Kim D.W., Kim J.H., Hong S.C. Efficiency Enhancement of Doherty Power Amplifiers for OFDM Signals // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 58, No. 8. – P. 2139–2147, 2010.
2. Cripps S.C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications. – Artech House. – P. 233–312. 2006.
3. ETSI EN 302 755 V1.4.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure, channel coding and modulation for DVB-T2, 2015.
4. Joung J., Ho C.K. PAPR Reduction in OFDM Systems: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – Vol. 15, No. 4. – P. 1569–1592, 2012.
5. Colantonio P., Giannini F., Giofrè R. High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers. – Wiley. – P. 289–345, 2009.
6. Valkama M., Renfors M. Digital Signal Processing in OFDM Systems. – Springer. – P. 101–168, 2007.
7. Grebennikov A. Doherty Power Amplifiers: Theory and Design. – Wiley, 2012.
8. Cripps S.C., Tasker P.J. Load Modulation in Doherty Power Amplifiers // IEEE Microwave Magazine. – Vol. 10, No. 5. – P. 18–28, 2009.
9. Yang Y., Yi J., Hong S. Linearization of Doherty Power Amplifiers Using Digital Predistortion // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 62, No. 9. – P. 1969–1981, 2014.
10. Jiang T., Wu Y. An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals // IEEE Transactions on Broadcasting. – Vol. 54, No. 2. – P. 257–268, 2008.
11. Ochiai H., Imai H. On the Distribution of the Peak-to-Average Power Ratio in OFDM Signals // IEEE Transactions on Communications. – Vol. 49, No. 2. – P. 282–289, 2001.
12. Nee R. van, Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. – Boston: Artech House. – 260 p. (crp. 120–150), 2000.
13. Han S.H., Lee J.H. An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission // IEEE Wireless Communications. – Vol. 12, No. 2. – P. 56–65, 2005.
14. ETSI TR 102 831 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB-T2. – ETSI. – 120 p, 2012.
15. Raab F.H. et al. Power Amplifiers and Transmitters for RF and Microwave // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 50, No. 3. – P. 814–826, 2002.
16. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. – 4th ed. – Hoboken: Wiley. – 756 p. (crp. 190–210), 2012.
17. Kim J., Stapleton S., Bassam S., Roblin P. *Envelope Tracking Power Amplifiers for High PAPR Wireless Signals* // IEEE Microwave Magazine. – Vol. 12, No. 2. – P. 52–63, 2011.



18. Bassam S.A., Helaoui M., Ghannouchi F.M. *2-D Digital Predistortion for Envelope Tracking Power Amplifiers* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 59, No. 12. – P. 3325–3337, 2011.

19. Jiang T., Wu Y. *An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals* // IEEE Transactions on Broadcasting. – Vol. 54, No. 2. – P. 257–268, 2008.

FRAKTAL SIRTLARINI L-TIZIMLAR USULI YORDAMIDA QURISH

Saidkulov Elyor Abdullayevich¹, Umarov Muhriddin Abduxalil o‘g‘li²

¹Toshkent kimyo xalqaro universiteti samarqand filiali “Energetika va amaliy fanlar” kafedrasi dotsenti

²Oriental universiteti “Matematika va axborot texnologiyalari” kafedrasi v.b. professori
elyorsamtiut9977@gmail.com

Annotatsiya: Fraktallar - nihoyatda murakkab geometrik tuzilishga ega bo‘lgan, fraktal nazariyasi hamda amaliy qo‘llanmalarni chuqur anglash uchun katta ahamiyat kasb etuvchi o‘ziga xos obyektlardir. Mazkur maqolada yer relyefi, landshaft unsurlari va tabiiy sirtlarni algoritmik yo‘l bilan modellashtirishning asosiy yondashuvlari tahlil qilingan. Tabiatdagi ko‘pgina jarayonlar murakkab va tasodifiy tabiatga ega bo‘lganligi bois, ularni to‘g‘ridan-to‘g‘ri matematik ifodalash amalda katta qiyinchilik tug‘diradi. Shu sababli, tabiiy hodisalarning asosiy belgilarini - o‘z-o‘ziga o‘xshashlik, tasodifiylik va jarayonlarning dinamik rivojlanishini - hisobga oluvchi algoritmik yondashuvlar ushbu murakkablikni boshqariladigan va takrorlanuvchi tarzda ifodalash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: fraktal, fraktal o‘lchov, geometrik o‘lchov, L-tizimlar, fraktal tuzilishli yer sirti, fraktal tuzilishli geometrik obyektlarni qurish.

1. KIRISH

O‘z-o‘ziga o‘xshash fraktallar bilan uzviy bog‘liq bo‘lgan L-tizimlar tushunchasi 1968-yilda vujudga kelgan. Boshlang‘ich bosqichda L-tizimlar rasmiy tillarni tadqiq qilish maqsadida joriy etilgan bo‘lib, keyinchalik biologik seleksiya jarayonlarini modellashtirishda ham qo‘llanila boshlagan. Ushbu tizim yordamida ko‘plab o‘z-o‘ziga o‘xshash fraktal shakllar, jumladan tasvirlangan simulyatsiya usuli hamda Peano, Gilbert va Serpinskiy salftaskasi kabi klassik konstruksiyalar ham yagona sxema doirasida tavsiflanadi. Shubhasiz, L-tizimlar cheksiz ko‘p yangi fraktal shakllarni yaratish imkoniyatini ochib beradi. Fraktal o‘lchovning ichki tuzilishi va xususiyatlarini chuqur anglash uchun turli geometrik uslub va vositalar orqali tahlil o‘tkazish nazarda tutiladi. Fraktal o‘lchovlarni baholashda esa bir qancha muqobil usullardan foydalanish mumkin.

2. ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Maqola ustida ishlash jarayonida fraktal tuzilishli sirtlarni modellashtirish muammosiga bag‘ishlangan bir qator monografiya va ilmiy maqolalar ko‘rib chiqildi. Xususan, fraktallar nazariyasi sohasida V.F. Kravchenko, Sh.A. Nazirov, F.M. Nuraliyev va Sh.A. Anarova kabi olimlar tomonidan olib borilgan izlanishlar tahlil qilindi. Hozirgi kunda ularning izdoshlari fraktal



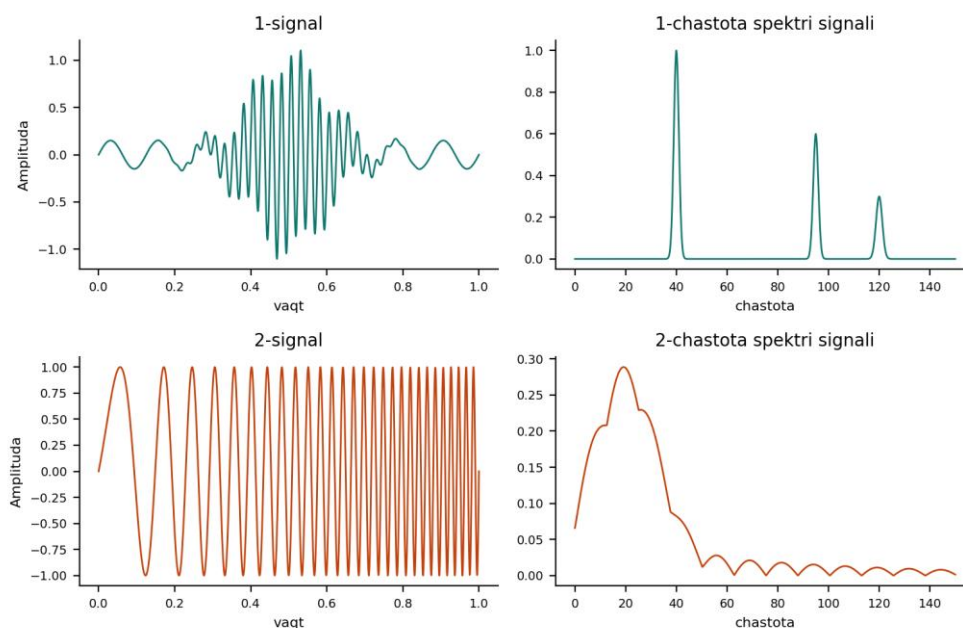
tuzilishli yuzalarni [6] modellashtirish yo'nalishini kengaytirish maqsadida faol tadqiqotlar [3] olib bormoqda, jumladan murakkab matematik va geometrik [4] algoritmlardan foydalangan holda yangi sirt ko'rinishlarini zamonaviy kompyuter texnologiyalari asosida amaliy loyihalarda qo'llamoqdalar.

3. NATIJALAR

To'liqlik konvertatsiya - turli tabiatdagi signallar yoki tasvirlarni tahlil qilishda qo'llaniladigan geometrik usullardan biri hisoblanadi. Ushbu usul signal yoki tasvirda odatda kuzatiladigan o'zgarishlarni aniqlovchi kichik funksiyalar to'plamidan tashkil topgan bo'lib, bu esa turli to'liqlik komponentlarini bir-biridan ajratish imkonini beradi. Fraktallar turli masshtablarda o'z-o'ziga o'xshashlik xususiyatini namoyon etganligi sababli, ushbu usul fraktal tasvirlarni tahlil qilishda alohida foydali hisoblanadi.

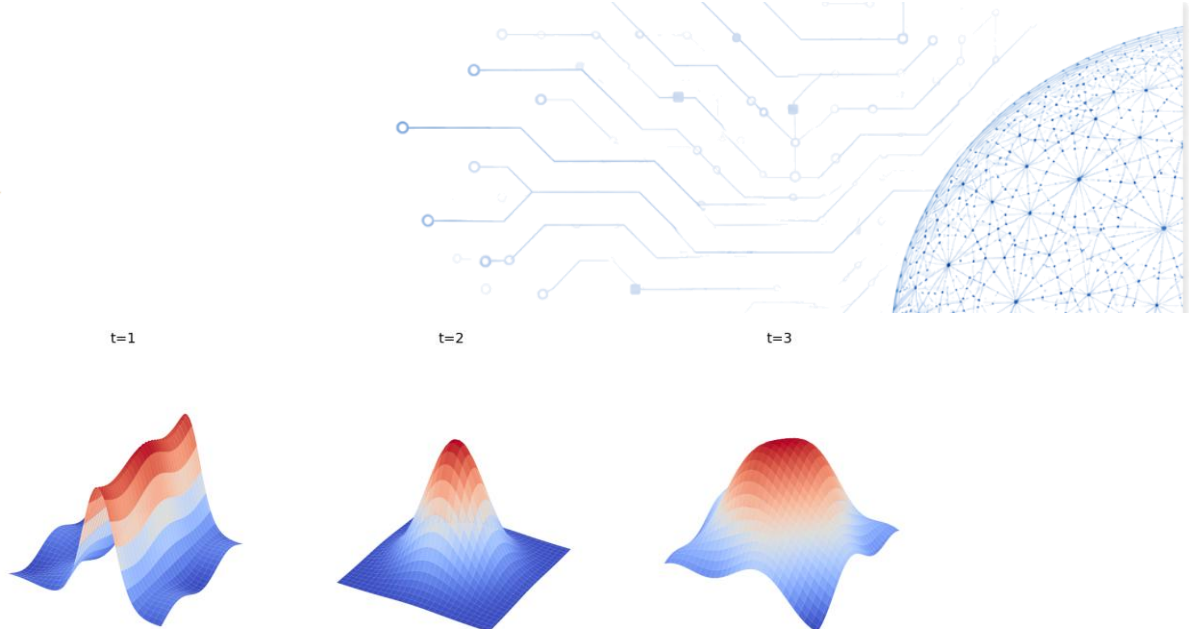
To'liqlik konvertatsiya signal yoki tasvirni to'liqliklarga ajratish uchun mo'ljallangan geometrik vosita bo'lib, mohiyatan Furiye transformatsiyasiga o'xshash bo'lsa-da, undan farqli o'laroq signal yoki tasvirdagi lokal o'zgarishlarni ham saqlab qolish qobiliyatiga ega.

To'liqlik konvertatsiya signal yoki tasvirni har biri o'ziga xos shkalaga mos keladigan bir qator to'liqlik komponentlariga ajratadi.



1-rasm. Signal va uning to'liqlik konvertatsiyasi (namunaviy tasvir)

To'liqlik konvertatsiya, shuningdek, tasvirning fraktal o'lchovini baholashda ham qo'llaniladi. Fraktal o'lchov ko'rsatkichi fraktal sirtning qanchalik murakkab yoki notekis ekanligini aniqlashga xizmat qiladi. Har xil turdagi to'liqlik koeffitsientlarini tahlil qilish orqali tasvirning fraktal o'lchovini hisoblab chiqish mumkin.



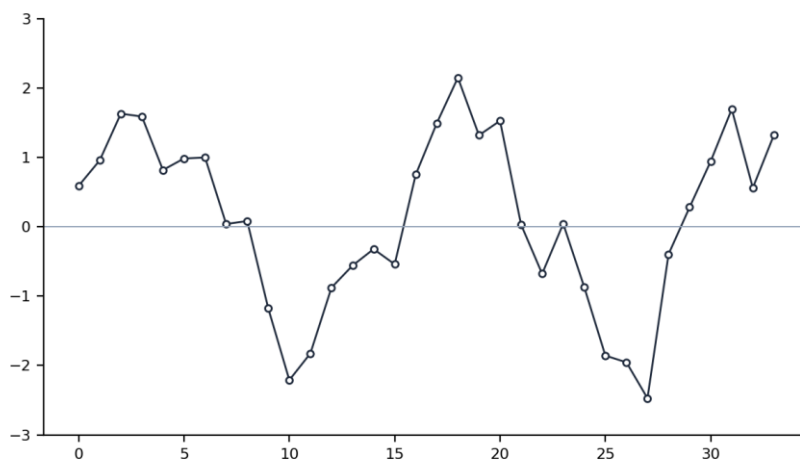
2-rasm. To'liqlik konvertatsiya natijasida hosil bo'lgan sirt tasviri (namunaviy modellashtirish)

Bundan tashqari, to'liqlik konvertatsiya tasvirni siqish maqsadida ham qo'llaniladi. Tasvirning to'liqlik koeffitsientlarini tahlil qilib, past amplitudali komponentlardan voz kechish orqali sifatni asosan saqlagan holda siqish amalga oshiriladi. Ushbu yondashuv odatda katta hajmdagi tasvir va video fayllarning sifatini pasaytirmasdan hajmini kamaytirishda qo'llaniladi.

Statistik tahlil - fraktal tasvirdagi turli qiymatlarning taqsimlanish qonuniyatini o'rganishga qaratilgan usul bo'lib, tasvirdagi naqsh va shakllarni aniqlashda foydalanadi. Fraktal tasvirlarning statistik tahlili gistogramma, avtokorrelyatsiya va quvvat spektral zichligi kabi turli vosita hamda usullar orqali amalga oshiriladi.

Gistogramma usuli tasvirdagi mavjud qiymatlarning uchrash chastotasini grafik tarzda ifodalab beradi. U piksel qiymatlarining taqsimlanishi haqida tasavvur berish bilan birga naqsh va shakllarning o'lchamini aniqlashga ham ko'maklashadi. Masalan, o'z-o'ziga o'xshashlik xususiyatiga ega fraktal tasvir o'ziga xos gistogramma shakliga ega bo'lishi mumkin, fraktal bo'lmagan tasvir esa nisbatan bir xil yoki silliq egri chiziqli gistogramma hosil qiladi.

Avtokorrelyatsiya tahlili - tasvirning turli nuqtalaridagi qiymatlar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlashga xizmat qiluvchi usul hisoblanadi. Avtokorrelyatsiya funksiyasi tasvirning turli masofa va burchaklaridagi qiymatlarini o'zaro solishtirish orqali hisoblanadi hamda tasvirning fazoviy tuzilishi, takrorlanuvchi naqsh va shakllari haqida muhim ma'lumot beradi.



3-rasm. Avtokorrelyatsiya tahlili (namunaviy grafik)



Quvvat spektral zichligi tahlili tasvirning chastota komponentlarini o'rganishga qaratilgan bo'lib, mazkur funksiya avtokorrelyatsiya funksiyasining Furje konvertatsiyasi orqali hisoblanadi. U tasvirdagi chastota tarkibiy qismlarining taqsimlanishi haqida ma'lumot berib, naqsh va shakllarni aniqlashga yordam beradi.

Umuman olganda, statistik tahlil fraktal tasvirlardagi piksel qiymatlari taqsimotini o'rganishning samarali vositasi hisoblanadi. U tasvirning tuzilishi va xususiyatlari to'g'risida ma'lumot berish bilan birga, tasvir va shakllarni aniqlashda ham muhim ahamiyatga ega. Statistik tahlil natijalaridan raqamli tasvirlarni qayta ishlash kabi bir qator sohalarda fraktal o'lchov va tabiiy tasvirlarni aniqlashda foydalaniladi.

Fraktal tuzilishli shakllar geometriyaning asosiy tarkibiy qismi hisoblanadi. Fraktallarning asosiy elementlarini bevosita kuzatish uchun tabiiy sirtlarga murojaat qilish mumkin. Biroq ular Yevklid geometriyasining klassik obyektlaridan - to'g'ri chiziq yoki aylanadan - tubdan farq qiladi. Fraktallar birlamchi geometrik shakllar orqali emas, balki geometrik funksiyalar to'plamidan iborat algoritmlar orqali ifodalanadi. Ushbu algoritmlar kompyuter yordamida geometrik shakllarga aylantirilib, natijada aniq va izchil tuzilishga ega fraktal tasvirlar hosil qilinadi.

Yevklid geometriyasi chiziq, doira va shu kabi bir necha asosiy elementlardan tashkil topgan bo'lib, ulardan murakkab sirtlarni qurish uchun geometrik birlashtirish qo'llaniladi. Fraktal geometriya esa cheksiz ko'p elementdan iborat bo'lib, ularning har biri to'liq fraktal shaklga ega bo'ladi. Fraktal tuzilishli tasvirlarni yaratishda maxsus algoritmlar ishlatiladi, biroq tasodifiy fraktallar deb yuritiluvchi fraktal turi boshqalaridan farq qiladi — ularning tuzilishi boshqariladigan tasodifiylik asosida shakllantiriladi.

Mazkur tadqiqotda fraktal geometriyaning keng amaliy imkoniyatlarini yoritish, shuningdek obyektlarni chiziqli fraktal tasvirlash orqali kompyuter xotirasida saqlash uchun zarur bo'lgan ma'lumotlar hajmini sezilarli darajada kamaytirish masalasi ko'rib chiqilgan. Fraktal tasvirlardan foydalangan holda kodlash — fraktal algoritmlarda "yashiringan" tasvirni samarali tarzda qayta tiklash imkonini beradi, aks holda bajariladigan amallar soni sezilarli darajada ortib ketadi. Tabiiy fraktal tuzilishli tasvirlar uchun har bir transformatsiya oldingi tasvirni to'rt marta qisqartirishi mumkin. Bitta transformatsiya tasvirni vertikal chiziqqa siqib, keskin qisqarish hosil qiladi, bu esa siqish darajasining ortganidan dalolat beradi. Masalan, to'rt qirrali yulduzsimon fraktal olinganda, har bir nusxa ko'chirish bosqichida uning soni to'rt marta ortadi, n marta takrorlanganda esa umumiy son 4^n taga yetadi. To'rt marta takrorlangandan so'ng, asl shakl (to'rt qirrali yulduzsimon fraktal) aniq ajralib chiqadi. Yakuniy shaklni to'liq yoritish uchun jarayon taxminan besh marta takrorlanishi lozim, bu esa qariyb 1365 ta to'rt qirrali yulduzsimon fraktalni hisoblash va chizishni talab qiladi. Bunday vazifani istalgan grafik dastur asosida amalga oshirish mumkin.

L-tizimlarni grafik tarzda amalga oshirish uchun toshbaqa-grafika (Turtle) uslubidan foydalaniladi. Bunda shartli nuqta (toshbaqa) ekran bo'ylab belgilangan qadamlar asosida harakatlanadi, odatda o'z izini chizib qoldiradi, biroq iz qoldirmasdan harakatlanishi ham mumkin. Bizning ixtiyorimizda uchta parametr — (x, y, α) - mavjud bo'lib, bunda (x, y) toshbaqaning joriy koordinatalarini, α esa uning yo'nalish burchagini ifodalaydi.

Kox qor parchasiga mos keluvchi L-tizim quyidagicha ta'riflanadi: boshlang'ich so'z (aksioma) $\text{axiom} = W_0 = W_0(F, b, +, -, [,])$ bir vaqtning o'zida parallel tarzda qoidalarni hosil



qiladi. Jarayon takrorlanishi natijasida murakkab ichki tuzilishga ega $W_0, W_1, W_2, \dots$ soʻzlar ketma-ketligi shakllanadi.

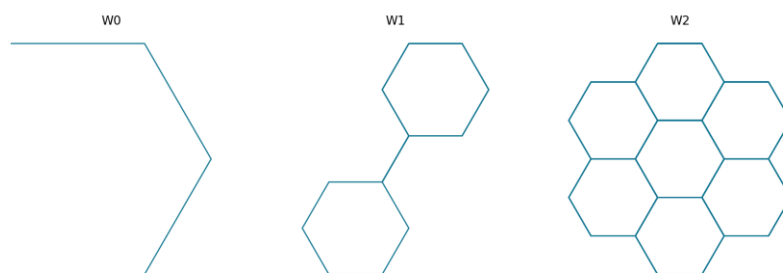
Aksioma: F-F-F

Qoida: $F \rightarrow F+F+F+F+F+F-F$

Burilish radiusi: 60°

F-F-F aksiomasi va $F+F+F+F+F+F-F$ qoidasidan foydalanib, $W_0, W_1, W_2, \dots$ ketma-ketligini hosil qilish mumkin (formulalar asl maqoladagidek saqlanadi).

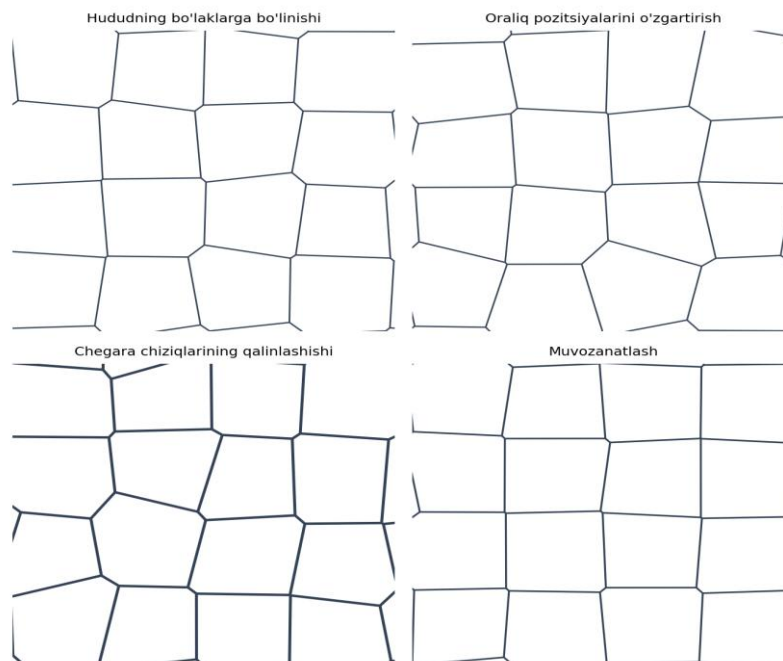
Quyida W_0, W_1, W_2 soʻzlariga mos keluvchi toshbaqa izi keltirilgan ($\theta = \pi/3$, rasmlardagi masshtab har xil):



4-rasm. L-tizim asosida hosil qilingan toshbaqa harakati fraktali

Ushbu tasvir yer sirti qatlamining mikroskopik koʻrinishiga oʻxshash naqsh hosil qiladi. Tadqiqotda tasvirlangan simulyatsiya usulidan foydalanib, qizil qum choʻllaridagi qotishma hosil boʻlish jarayonini vizual tarzda tasvirlash maqsad qilingan.

Tasvirlangan simulyatsiya qoidalari asosida chiziqli fraktal tasvirlarni ishlab chiqish bosqichlariga toʻxtalib oʻtamiz.



5-rasm. Tasvirlangan simulyatsiya usulida sirtni boʻlaklarga boʻlish bosqichlari



Yomg'ir yog'ishi yoki suv toshqinidan so'ng yer yuzasida hosil bo'ladigan qotishma yoriqlari turli xil fraktal tuzilishli sirtlarni yuzaga keltiradi. Yer sirtining faolligi natijasida yuzaga keladigan segmentlar hamda ularning takrorlanish xususiyati qulay tasvirlash imkonini beradi. Modellashtirish jarayoni sirt bo'linishining takrorlanuvchi naqshlarini o'z ichiga oladi, shu sababli katta hajmdagi yuza tuzilmalarni nisbatan kam sonli takrorlanishlar asosida ifodalash mumkin.

Hududlarning takroriy bo'linishi har safar yangi va boshlang'ich segment hududini yuzaga keltiradi. Segment hududlari keyinchalik ko'p qismli segmentlarga aylanadi. Bo'linish jarayoni turlicha kechishi mumkin bo'lib, natijada xilma-xil shakllar hosil bo'ladi. Xususan, bo'linish chegaralari galma-gal chapga va o'ngga yo'naltirilib, zigzag chiziq bilan ajratilgan ikki ustunli segmentlar tizimini shakllantiradi.

4. XULOSA

Tadqiqot davomida L-tizimlar va tasvirlangan simulyatsiya qoidalari asosida yangi ko'rinishdagi inversion fraktallarni hosil qilish algoritmi ishlab chiqildi. Ushbu L-tizim usuli va algoritmi tekislik, tepalik, yengil notekislik, yomg'irdan keyingi qatqaloqli hududlar hamda yiriroq relyef shakllarining birgalikdagi modelini yaratishda keng qo'llanilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining «Innovasion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi 2018 yil 27 apreldagi PQ-3682-son qarori.
2. Палымский Б. Ф. Иерархическая система картографируемых геологических тел // Тихоокеанская геология, 2006. Т. 25. № 1. С. 55 – 61.
3. Торхов Н. А., Новиков В. А. Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия // Физика и техника полупроводников. - 2009. - Т. 43, вып. 8. - С. 1109-1116.
4. Anarova Sh.A., Nuraliev F.M., Narzullov O.M. Construction of the equation of fractals structure based on the rvachev R-functions theories. Mechanical Science and Technology Update, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1260 (2019) 102002. – P. 1-8.
5. Морозовский А.Е., Снарский С.С. Конечный скейлинг эффективной проводимости в перколяционных системах с ненулевым отношением проводимостей фаз // ЖЭТФ, 1996. Т. 109. Вып. 2. С. 669-675.
6. Марголина А. Фрактальная размерность периметра роста // Сб. Фракталы в физике. – М.: Мир. 1988. С. 507-512
7. Торхов Н. А., Божков В. Г. Фрактальный характер распределения неоднородностей потенциала поверхности n-GaAs (100) // Физика и техника полупроводников. - 2009. - Т. 43, вып. 5. - С. 577-583.
8. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Фрактальный анализ сигналов // Радиотехника и электроника, 2001. Т. 46. № 3. С. 261-270.
9. Паладин Дж., Вульпиани А. Фрактальные модели двух- и трехмерной турбулентности // Фракталы в физике. М.: Мир. 1988. С. 624–631.
10. Олемский А. И., Флат А. Я. Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // УФН. 1993. Вып. 12. С. 153 – 203.



11. Найденов В. И., Кожевникова И. А. Эффект Херста в геофизике // Природа. 2000. № 1. С. 30–40.
12. Нигматуллин Р.Р., Потапов А.А. Фракталы, дробные операторы и дробная кинетика в диэлектрической спектроскопии и волновых процессах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2007. Т. 10. №3. С. 30-49.
13. Bovill C. Fractal geometry in architecture and design. Boston, Basel, Berlin: Birkhäuser. 1996. – P. 195.
14. Добрицина И.А. От постмодернизма к нелинейной архитектуре. М.: Прогресс-традиция. 2004. – С. 416.

VIDEO OQIMLARNI AVTOMATIK TAHLILGA TAYYORLASH UCHUN ADAPTIV DASTLABKI ISHLOV BERISH ALGORITMI

Saydazimov Javlonbek Karimovich

*Muhammad Al-Xorazmiy Nomidagi Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti ;
javlonbek2020@gmail.com*

Annotatsiya: Video oqimlarni avtomatik tahlil qilishda kirish kadrlarining sifati shaxsni aniqlash va keyingi tahlil bosqichlarining barqarorligiga bevosita ta'sir qiladi. Past yoritilish, tasodifiy shovqin, lokal kontrastning pasayishi va foydali strukturaviy belgilarni yo'qotuvchi haddan tashqari silliqlash bir xil parametrli filtrlarning turli sharoitdagi kadrlar uchun birdek samarali ishlashiga to'sqinlik qiladi. Ushbu maqolaning maqsadi video kadrning yoritilish holati, shovqin darajasi va informativ xususiyatlarini hisobga olgan holda ishlov berish parametrlarini moslashtiruvchi adaptiv filtr algoritmini tadqiq qilishdan iborat. Taklif etilgan yondashuv kadr xususiyatlarini tahlil qilish, parametrlarni joriy holatga moslashtirish, adaptiv filtrlash va sifat nazoratini o'z ichiga olgan ketma-ket jarayon sifatida shakllantirildi. Algoritmning ishlash tamoyili shovqinni kamaytirish bilan bir vaqtda kontur, lokal kontrast va boshqa foydali strukturaviy axborotni imkon qadar saqlashga qaratilgan. Taklif etilgan usul Gauss, Median va Bilateral filtrlar bilan PSNR hamda SSIM mezonlari bo'yicha qiyoslandi. Tajriba natijalarida adaptiv filtr uchun PSNR 26.6336 dB va SSIM 0.7687 qiymatlari olindi. Bu natijalar Bilateral filtrga nisbatan mos ravishda 2.5589 dB va 0.0277 ga yuqori bo'ldi. Olingan natijalar adaptiv parametr tanlash video oqimlarni keyingi avtomatik tahlilga tayyorlashda shovqinni kamaytirish va tasvirning strukturaviy axborotini saqlash o'rtasidagi muvozanatni yaxshilashga xizmat qilishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: video oqim; dastlabki ishlov berish; adaptiv filtrlash; tasvir sifati; PSNR; SSIM; kompyuter ko'rishi; shaxsni aniqlash.

1. KIRISH

Video kuzatuv tizimlarida kadr sifati faqat vizual qulaylik masalasi emas, balki keyingi kompyuter ko'rishi bosqichlari uchun axborotning saqlanish darajasini belgilovchi omildir. Past yoritilgan yoki shovqinli kadrda shaxs konturi, lokal kontrast va mayda detallar susayganda aniqlash va kuzatish algoritmlariga uzatiladigan kirish ma'lumoti ham beqarorlashadi. Low-light tasvirlarni yaxshilashga bag'ishlangan ishlarda yoritilish xaritasini baholash, chuqur gibril



arxitekturalar, egri chiziq asosidagi yorqinlikni moslashtirish hamda dekompozitsiya orqali tiklash yondashuvlari taklif qilingan [1–4]. Bu ishlar yoritilish va shovqin masalalarini birgalikda ko‘rish zarurligini ko‘rsatadi.

Tasvirni tiklash va yaxshilashda ko‘p masshtabli xususiyatlardan foydalanish, juftlanmagan ma’lumotlar bilan o‘qitish va Retinex modeliga asoslangan chuqur tarmoqlar ham keng rivojlandi [5–8]. Shuningdek, resurs cheklangan sharoitda real vaqt ishloviga yo‘naltirilgan yengil arxitekturalar va transformerlardan foydalanish tasvirning lokal hamda global tuzilishini bir vaqtda hisobga olish imkonini berdi [9,10]. Biroq chuqur modellarning samaradorligi o‘qitish ma’lumotlari, apparat resurslari va model konfiguratsiyasiga bog‘liq; video oqimning oldingi bosqichida esa ko‘pincha hisoblash jihatidan sodda, tushuntiriladigan va kadr sharoitiga moslashuvchi dastlabki ishlov zarur bo‘ladi.

Keyingi tadqiqotlar yoritilishni moslashtirish, shovqin darajasiga sezgir ishlov va ma’lumotga bog‘liq parametr tanlashning ahamiyatini yanada kuchaytirdi [11–17]. Katta o‘lchamli tasvirlarni tiklashda kontekst va lokal detalni birlashtirish [12,18], yoritilish boshqaruvini Retinex asosida tashkil etish [14,19], moslashuvchan priorlar [20] hamda video oqimlar uchun vaqt bo‘yicha barqaror yaxshilash [21] tasvir sifati keyingi ko‘rish vazifalariga tayyorgarlik sifatida qaralishi kerakligini ko‘rsatadi. Generativ yondashuvlar ham past yoritilishda yo‘qolgan detallarni tiklashga e’tibor qaratmoqda [22].

Shu bilan birga, yoritilishni shunchaki oshirish har doim ham yetarli emas: qorong‘i hududlarda yashiringan shovqin kuchayishi, rang va struktura buzilishi mumkin [23]. Klassik filtrlash usullarida esa bitta parametrlar to‘plami barcha kadrlar uchun qo‘llanganda kompromiss yuzaga keladi: kuchli silliqlash shovqinni kamaytiradi, ammo kontur va mayda obyektlarga tegishli belgilarni susaytirishi mumkin; yumshoq ishlov esa foydali detallarni saqlaydi, biroq shovqinni yetarli darajada bostirmasligi mumkin. Median filtr impulsli shovqinga nisbatan barqarorligi bilan ma’lum [24], Bilateral filtr esa fazoviy yaqinlik bilan intensivlik o‘xshashligini birlashtirib, chegaralarni saqlashga intiladi [25].

Ushbu maqolada video oqimlarni keyingi avtomatik tahlilga tayyorlash uchun adaptiv dastlabki ishlov berish yondashuvi taklif etiladi. Uning asosiy g‘oyasi har bir kadrning yoritilish holati, shovqin darajasi va informativ xususiyatlarini tahlil qilib, filtrlash parametrlarini kadr sharoitiga mos ravishda tanlashdan iborat. Maqolaning ilmiy hissasi uch jihatda ifodalanadi: birinchidan, statik parametrli filtrdan farqli ravishda kadrda bog‘liq moslashuv mexanizmi shakllantiriladi; ikkinchidan, shovqinni kamaytirish va strukturaviy axborotni saqlash yagona dastlabki ishlov vazifasi sifatida qaraladi; uchinchidan, taklif etilgan yondashuv PSNR va SSIM bo‘yicha Gauss, Median va Bilateral filtrlar bilan bir xil natijalar to‘plamida qiyosiy tahlil qilinadi.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Masalaning qo‘yilishi

Video oqim V ketma-ket vaqt momentlarida olingan kadrlar majmuasi sifatida qaraladi. t -indeksli kadr $I_t(x, y)$ tasvir tekisligidagi (x, y) koordinata uchun yorqinlik yoki rang komponentlari qiymatini ifodalaydi. Dastlabki ishlovning vazifasi I_t kadridan shovqin ta’siri kamaytirilgan, ammo shaxsni tavsiflovchi kontur, tekstura va lokal kontrast imkon qadar saqlangan qayta ishlangan kadrni hosil qilishdir. Mazkur ishda adaptiv filtr butun aniqlash tizimining o‘rnini bosmaydi; u keyingi shaxsni aniqlash va video tahlil bosqichlariga sifatliroq kirish ma’lumotini shakllantiruvchi oldingi bosqich sifatida qaraladi.



Real kameradagi shovqin signalga bog'liq va murakkab tabiatga ega bo'lishi mumkin. Biroq dastlabki matematik tahlil uchun kuzatilgan kadr foydali signal va shovqin yig'indisi ko'rinishida ifodalanadi:

$$I_t(x, y) = S_t(x, y) + n_t(x, y) \quad (1)$$

bu yerda $I_t(x, y)$ — kuzatilgan video kadr, $S_t(x, y)$ — shovqinsiz foydali tasvir komponenti, $n_t(x, y)$ — tasvirdagi shovqin komponenti. Ushbu model shovqin taqsimotini oldindan qat'iy belgilamaydi va adaptiv ishlovning umumiy mantiqini ifodalash uchun ishlatiladi.

Mazkur tadqiqotda adaptiv filtr algoritmi shaxsni aniqlash yoki kuzatish algoritmlarining o'rnini bosuvchi vosita sifatida emas, balki ularga uzatiladigan video kadrlar sifatini yaxshilovchi dastlabki ishlov berish bosqichi sifatida qaraladi. Uning asosiy maqsadi turli yoritilish va shovqin sharoitlaridagi kadrlarni keyingi avtomatik tahlil uchun barqarorroq va informativroq ko'rinishga keltirishdan iborat.

2.2. Video kadrlarni dastlabki qayta ishlash

Dastlabki qayta ishlashda bir xil kuchdagi silliqlash barcha kadrlar uchun optimal bo'lmisligi sababli, kadr holatini tavsiflovchi belgilardan foydalanish nazarda tutiladi. Yoritilish holati kadrning umumiy ko'rinuvchanligi va qorong'i hududlar ulushi bilan, shovqin darajasi lokal intensivlik tebranishlari bilan, informativlik esa kontur va lokal strukturaning saqlanish holati bilan bog'liq. Ushbu belgilar aniq bir o'zgarma chegarasi qiyamatiga bog'lanmaydi; ularning vazifasi ishlov berish intensivligini kadrda moslashtirish uchun boshqaruvchi axborot hosil qilishdir. An'anaviy filtrlash usullarida bir xil parametrlarning barcha video kadrlarga qo'llanilishi har doim ham maqbul natija bermaydi. Buning sababi video oqim davomida yoritilish darajasi, shovqin intensivligi va foydali strukturaviy belgilar holatining vaqt bo'yicha o'zgarib turishidir. Masalan, yuqori shovqinli kadrda kuchliroq silliqlash foydali bo'lishi mumkin, biroq sifatli va aniq konturlarga ega kadrda xuddi shu darajadagi ishlov qo'llanilishi obyekt chegaralari va mayda detallarni xiralashtirishi mumkin. Shu sababli dastlabki qayta ishlashda joriy kadr holatini tavsiflovchi xususiyatlarni baholash va filtrlash parametrlarini ushbu xususiyatlarga mos ravishda o'zgartirish maqsadga muvofiq. Mazkur yondashuvda kadr holati uchta asosiy xususiyatlar guruhi orqali tavsiflanadi: yoritilish holati, shovqin holati hamda foydali strukturaviy va informativ belgilar holati.

Statik filtrda parametrlar θ barcha kadrlar uchun deyarli o'zgarma bo'lsa, adaptiv yondashuvda ular kadrning o'zidan olinadigan xususiyatlarga bog'lanadi. Mazkur prinsip algoritmi turli yoritilish va shovqin holatlariga moslashtirish imkonini beradi. Ayniqsa, kichik obyektlar tasvirlangan hududlarda ortiqcha silliqlashni cheklash va past signal-shovqin nisbatli joylarda shovqinni kuchliroq kamaytirish o'rtasidagi muvozanat muhimdir.

2.3. Adaptiv filtr algoritmi

Taklif etilgan algoritmnining funksional bog'lanishi quyidagicha ifodalanadi:

$$\theta_t = \Phi(L_t, N_t, K_t), \tilde{I}_t = F(I_t; \theta_t) \quad (2)$$

bu yerda L_t — t-kadrning yoritilish holatini tavsiflovchi ko'rsatkichlar majmuasi, N_t — shovqin holatini tavsiflovchi ko'rsatkichlar, K_t — foydali strukturaviy/informativ belgilar holati,



$\Phi(\cdot)$ — ushbu xususiyatlar asosida ishlov parametrlarini moslashtiruvchi qoida, θ_t — joriy kadr uchun tanlangan parametrlar majmuasi, $F(\cdot)$ — adaptiv filtrlash operatori, I_t — qayta ishlangan kadr. (2)-ifoda yangi murakkab fizik model emas, balki algoritmnining “kadr xususiyatlari → parametrlarni moslashtirish → filtrlash” bog‘lanishini formal ko‘rsatadi; topshiriqda berilmagan sonli chegara va koeffitsiyentlar kiritilmagan.

Moslashtirish mexanizmining asosiy tamoyili shundan iboratki, kadrda shovqin ta’siri ortganda uni kamaytirishga yo‘naltirilgan ishlov darajasi kuchaytiriladi, foydali strukturaviy belgilar aniq ifodalangan hollarda esa ularni saqlashga ustuvorlik beriladi. Past yoritilgan kadrlarda shovqin komponentlarini tasvirni kuchaytirish jarayonida qo‘shimcha ravishda kuchaytirib yubormaslik, yuqori kontrastli hududlarda esa shaxs konturlari va obyekt chegaralarining ortiqcha silliqanishini cheklash muhim hisoblanadi. Demak, taklif etilgan algoritmnining adaptivligi muayyan bitta filtrni barcha sharoitlarda ustun deb qabul qilish bilan emas, balki ishlov berish parametrlarini video kadrning joriy holatiga mos ravishda o‘zgartirish bilan belgilanadi. Bunday yondashuv shovqinni kamaytirish va foydali strukturaviy axborotni saqlash o‘rtasidagi muvozanatni ta’minlashga hamda keyingi shaxsni aniqlash va video tahlil bosqichlari uchun sifatliroq kirish tasvirini shakllantirishga qaratilgan.

Moslashtirish mexanizmi shovqin kuchayganda silliqlash ta’sirini oshirish, yoritilish yetarli va struktura aniq bo‘lganda esa foydali detallarni saqlashga ko‘proq ustuvorlik berish tamoyiliga asoslanadi. Past yoritilishda shovqinni yorqinlik bilan birga kuchaytirib yubormaslik, yuqori kontrastli chegaralarda esa kontur buzilishini cheklash ko‘zda tutiladi. Shu sababli algoritmnining vazifasi bitta filtr turini “eng yaxshi” deb qabul qilish emas, balki ishlov kuchini kadr holatiga moslashtirishdir.

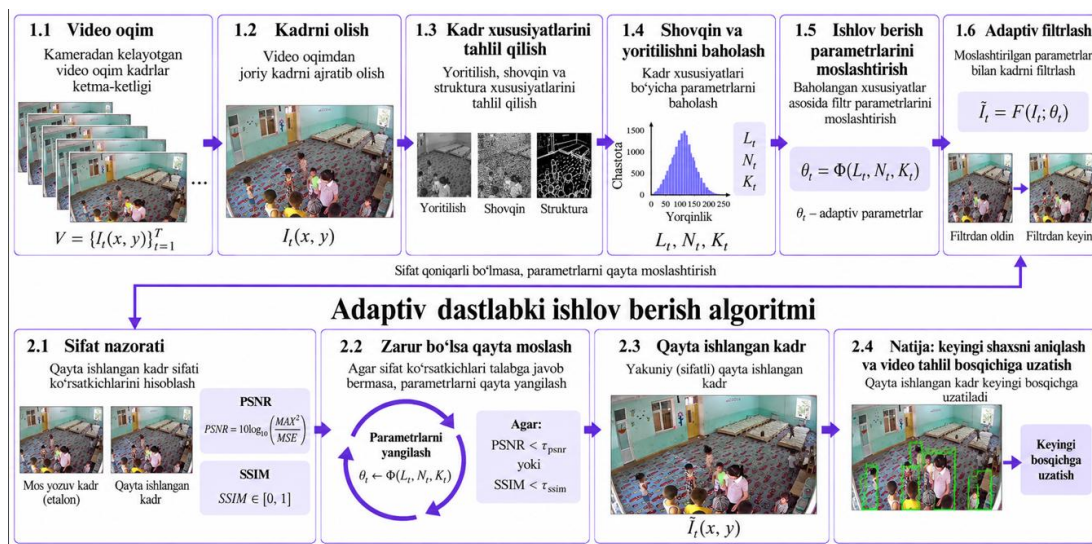
2.4. Algoritmnining ishlash ketma-ketligi

Taklif etilgan adaptiv dastlabki ishlov berish algoritmining ishlash ketma-ketligi 1-rasmda keltirilgan. Algoritm video oqimdan joriy kadrni ajratib olishdan boshlanadi. Har bir kadr alohida tahlil qilinib, uning yoritilish holati, shovqin darajasi hamda foydali strukturaviy va informativ belgilarining saqlanish darajasi aniqlanadi. Ushbu tahlil natijalari keyingi ishlov berish parametrlarini kadrning joriy holatiga moslashtirish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

Parametrlarni moslashtirish bosqichida 2.3-bo‘limda keltirilgan funksional bog‘lanish asosida joriy kadr uchun maqbul ishlov berish shartlari shakllantiriladi. Bunda asosiy maqsad shovqinni kamaytirish bilan bir qatorda obyekt chegaralari, konturlar, lokal kontrast va boshqa foydali tasvir belgilarining ortiqcha silliqanishiga yo‘l qo‘ymaslikdan iborat. Shu sababli filtrlash intensivligi barcha kadrlar uchun bir xil darajada belgilanmaydi, balki kadrning holatiga qarab moslashtiriladi. Moslashtirilgan parametrlar asosida joriy kadr adaptiv filtrlashdan o‘tkaziladi. Natijada shovqin ta’siri kamaytirilgan va foydali strukturaviy axboroti imkon qadar saqlangan qayta ishlangan kadr hosil qilinadi. Mazkur bosqich algoritmnining asosiy amaliy qismi bo‘lib, kirish kadridagi sifat buzilishlarini keyingi avtomatik tahlilga salbiy ta’sir qilmaydigan darajada kamaytirishga qaratilgan.

Filtrlashdan keyin hosil qilingan kadr sifat nazorati bosqichiga uzatiladi. Ushbu bosqichda qayta ishlash natijasida tasvirning foydali strukturasi saqlanganligi va ortiqcha buzilish yuzaga kelmaganligi nazorat qilinadi. Agar ishlov berish natijasi qoniqarli bo‘lmasa, parametrlarni qayta moslashtirish amalga oshiriladi va filtrlash jarayoni takrorlanadi. Shu tariqa algoritmda qayta aloqa mexanizmi shakllantirilib, turli sifatdagi video kadrlar uchun bir xil ishlov berishdan kelib chiqadigan kamchiliklar kamaytiriladi. Sifat nazoratidan muvaffaqiyatli o‘tgan kadr yakuniy qayta

ishlangan tasvir sifatida shakllantiriladi va keyingi shaxsni aniqlash hamda video tahlil bosqichlariga uzatiladi. Demak, taklif etilgan algoritmnining ishlash mantiqi kadrni olish, uning xususiyatlarini tahlil qilish, ishlov berish parametrlarini moslashtirish, adaptiv filtrlash, sifatni nazorat qilish va natijani keyingi tahlilga uzatish bosqichlarining izchil bajarilishiga asoslanadi.



1-rasm. Video oqimlar uchun adaptiv dastlabki ishlov berish algoritmining ishlash ketma-ketligi.

1-jadval.
Adaptiv filtr algoritmining bosqichma-bosqich tavsifi.

Bosqich	Amal	Natija
1	Video oqimdan I_t kadrni olish	Joriy kadr
2	Kadrning yoritilish holatini tahlil qilish	L_t tavsiflari
3	Shovqin holatini tahlil qilish	N_t tavsiflari
4	Informativ strukturaviy belgilar holatini baholash	K_t tavsiflari
5	$\Phi(\cdot)$ orqali θ_t ishlov parametrlarini moslashtirish	Kadrga mos parametrlar
6	$F(I_t; \theta_t)$ adaptiv filtrlashni bajarish	$\tilde{I}_t$ qayta ishlangan kadr
7	Sifat nazorati va zarur bo'lsa qayta moslashtirish	Barqarorlashtirilgan natija
8	Kadrni keyingi aniqlash/tahlil bosqichiga uzatish	Tahlil uchun kirish ma'lumoti



2.5. Qiyosiy filtrlash usullari

Taklif etilgan adaptiv filtr algoritmining samaradorligini baholash uchun Gauss, Median va Bilateral filtrlar qiyosiy usullar sifatida tanlandi. Ushbu usullar tasvirlarni dastlabki qayta ishlashda keng qo'llanadi, biroq shovqinni kamaytirish va strukturaviy axborotni saqlash xususiyatlari bilan farqlanadi. Qiyoslashga filtrlashsiz dastlabki holat ham nazorat varianti sifatida kiritildi.

Gauss filtri qo'shni piksellarni og'irlikli o'rtachalash orqali shovqinni kamaytiradi, biroq kuchli silliqlashda obyekt chegaralari va mayda detallar xiralashishi mumkin. Median filtr impulsli shovqinni kamaytirishda samarali bo'lib, ayrim keskin chegaralarni yaxshiroq saqlaydi, ammo oyna o'lchami noto'g'ri tanlanganda lokal detallar yo'qolishi mumkin. Bilateral filtr esa fazoviy yaqinlik va intensivlik farqini birgalikda hisobga olib, shovqinni kamaytirish bilan birga chegaralarni saqlashga intiladi. Biroq uning natijasi ham tanlangan parametrlar qiymatiga bog'liq. Taklif etilgan adaptiv filtr algoritmining asosiy farqi ishlov berish parametrlarini kadrning joriy yoritilish, shovqin va strukturaviy xususiyatlariga qarab moslashtirishdan iborat. Shu sababli algoritm barcha kadrlar uchun bir xil darajadagi filtrlashni qo'llamaydi, balki shovqinni kamaytirish va foydali tasvir belgilarini saqlash o'rtasidagi muvozanatni ta'minlashga qaratiladi.

Qiyosiy baholashda filtrlashsiz holat, Gauss, Median, Bilateral va adaptiv filtr natijalari bir xil sifat mezonlari asosida solishtirildi. Ushbu mezonlarning matematik ifodalari 2.6-bo'limda, sonli natijalar esa 3-bo'limda keltiriladi.

2.6. Baholash mezonlari

Tasvir sifati ikkita to'liq-referensli mezon — PSNR va SSIM yordamida baholandi. Avvalo o'rtacha kvadratik xato (MSE) quyidagicha aniqlanadi:

$$MSE = \left(\frac{1}{M \cdot N} \right) \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [S(x, y) - \tilde{I}(x, y)]^2 \quad (3)$$

bu yerda M va N — tasvirning fazoviy o'lchamlari, $S(x, y)$ — referens tasvir pikseli, $\tilde{I}(x, y)$ — qayta ishlangan tasvir pikseli. MSE qancha kichik bo'lsa, qayta ishlangan tasvir referensga shuncha yaqin bo'ladi.

PSNR MSE orqali logarifmik shkalada hisoblanadi:

$$PSNR = 10 \cdot \log^{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (4)$$

bu yerda MAX_I — tasvir pikselining mumkin bo'lgan maksimal qiymati. Bir xil dinamik diapazon va bir xil referens tasvirlar sharoitida PSNRning yuqoriroq qiymati piksel darajasidagi xatoning kichikroq ekanini anglatadi. PSNR turli mazmundagi tasvirlar orasidagi subyektiv sifatni mutlaq ifodalamasligi sababli uni strukturaviy mezon bilan birga talqin qilish maqsadga muvofiq.

SSIM esa yorqinlik, kontrast va strukturaviy o'xshashlik komponentlarini birlashtiradi:

$$SSIM(S, \tilde{I}) = \frac{(2\mu_S\mu_{\tilde{I}} + C^1)(2\sigma_{S\tilde{I}} + C^2)}{(\mu_S^2 + \mu_{\tilde{I}}^2 + C^1)(\sigma_S^2 + \sigma_{\tilde{I}}^2 + C^2)} \quad (5)$$



bu yerda μ_S va μ_I — mos tasvirlarning lokal oʻrtacha qiymatlari, σ_S^2 va σ_I^2 — lokal dispersiyalar, σ_{SI} — kovariatsiya, C_1 va C_2 — sonli barqarorlik konstantalari. SSIM 1 ga yaqinlashgani sari strukturaviy oʻxshashlik yuqoriroq deb talqin qilinadi.

2.7. Eksperimental tadqiqot tartibi

Qiyosiy baholashda filtrlashsiz kadrlar, Gauss, Median, Bilateral va taklif etilgan adaptiv filtr algoritmi uchun muallif tomonidan taqdim etilgan PSNR hamda SSIM natijalari ishlatildi. Barcha usullar uchun bir xil baholash mezonlari qoʻllangan natijalar qiyoslandi. Ushbu materiallarda tajriba kadrlarining soni, kamera modeli, tasvir rezolyutsiyasi, referens tasvirlarni shakllantirish tartibi va apparat platformasi koʻrsatilmagan. Shu sababli maqolada mazkur koʻrsatkichlar boʻyicha taxminiy qiymatlar kiritilmadi va xulosalar faqat berilgan agregat PSNR/SSIM natijalari doirasida shakllantirildi.

Natijalarni miqdoriy tahlil qilish uchun adaptiv algoritmi bilan har bir bazaviy usul orasidagi PSNR farqi dB koʻrinishida hisoblandi. Bir xil MAX_I sharoitida PSNR farqidan MSE nisbatini $10^{\frac{\Delta PSNR}{10}}$ orqali chiqarish mumkin. SSIM uchun esa mutlaq farq va bazaviy qiymatga nisbatan foiz oʻzgarish hisoblandi. Bu hosila koʻrsatkichlar yangi tajriba natijasi emas, balki berilgan PSNR/SSIM qiymatlarining matematik tahlilidir.

3. NATIJALAR

Filtrlash usullarining asosiy qiyosiy natijalari 2-jadvalda keltirilgan. Adaptiv filtr algoritmi uchun PSNR 26.6336 dB va SSIM 0.7687 boʻlib, jadvaldagi barcha bazaviy variantlardan yuqori qiymatni koʻrsatdi. Biroq bu ustunlik aynan berilgan tajriba natijalari doirasida talqin qilinadi; kadrlar soni yoki boshqa maʼlumotlar berilmaganligi sababli statistik umumlashtirish berilmaydi.

2-jadval.

Filtrlash usullarining PSNR va SSIM koʻrsatkichlari boʻyicha qiyosiy natijalari.

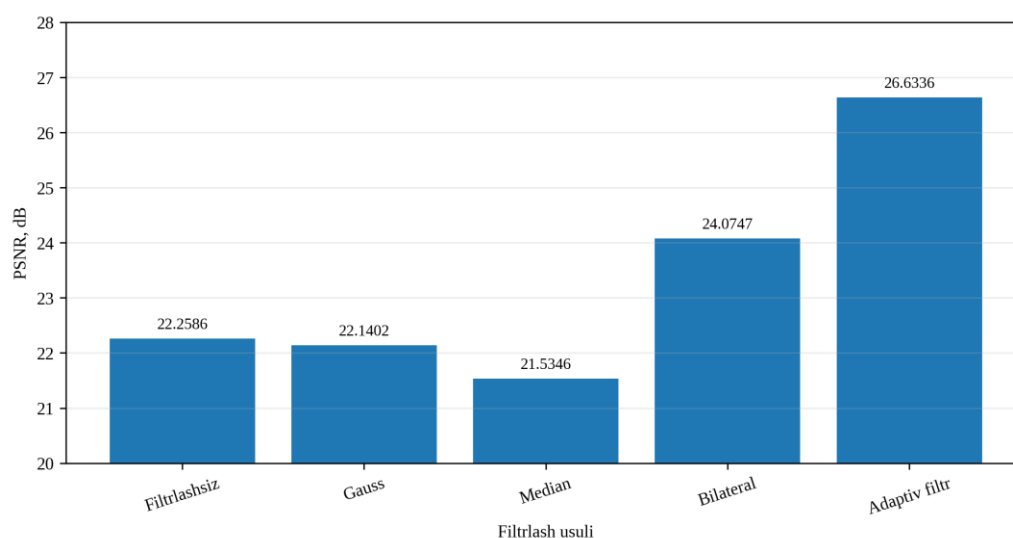
Usul	PSNR (dB)	SSIM
Filtrlashsiz	22.2586	0.5995
Gauss filtri	22.1402	0.6216
Median filtri	21.5346	0.5614
Bilateral filtr	24.0747	0.7410
Adaptiv filtr algoritmi	26.6336	0.7687

PSNR boʻyicha adaptiv algoritmi filtrlashsiz holatdan 4.3750 dB, Gauss filtridan 4.4934 dB, Median filtridan 5.0990 dB va Bilateral filtrdan 2.5589 dB yuqori natija berdi. dB shkalasi logarifmik boʻlgani uchun bu farqlarni oddiy foiz sifatida talqin qilish toʻgʻri emas. Bir xil piksel diapazoni sharoitida ular MSE nisbatiga aylantirilganda, adaptiv algoritmi MSE qiymati mos ravishda taxminan 63.48%, 64.46%, 69.09% va 44.52% kichik boʻlishiga mos keladi. Bu

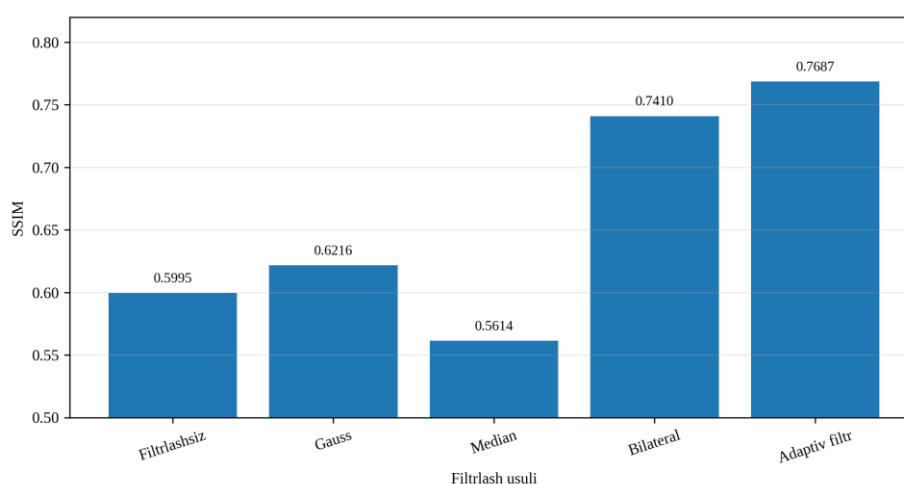


qiymatlar PSNR natijalaridan matematik ravishda chiqarilgan bo'lib, alohida eksperimental o'lchov emas.

SSIM bo'yicha mutlaq farqlar filtrlashsiz holatga nisbatan 0.1692, Gauss filtriga nisbatan 0.1471, Median filtriga nisbatan 0.2073 va Bilateral filtriga nisbatan 0.0277 ni tashkil etdi. Bazaviy SSIM qiymatlariga nisbatan bu mos ravishda 28.22%, 23.66%, 36.93% va 3.74% o'sishga teng. SSIMning strukturaviy tabiatini hisobga olganda, adaptiv filtrning PSNR bilan bir vaqtda yuqori SSIM ko'rsatishi shovqinni kamaytirish jarayonida strukturaviy axborotning nisbatan yaxshiroq saqlanganini ko'rsatadi.



2-rasm. Filtrlash usullarining PSNR ko'rsatkichlari bo'yicha qiyosiy natijalari.



3-rasm. Filtrlash usullarining SSIM ko'rsatkichlari bo'yicha qiyosiy natijalari.



3-jadval.

Adaptiv filtr algoritmining bazaviy usullarga nisbatan hisoblangan farqlari.

Bazaviy holat	Δ PSNR (dB)	MSE kamayishi*	Δ SSIM	SSIM nisbiy o'sishi
Filtrlashsiz	4.3750	63.48%	0.1692	28.22%
Gauss filtri	4.4934	64.46%	0.1471	23.66%
Median filtri	5.0990	69.09%	0.2073	36.93%
Bilateral filtr	2.5589	44.52%	0.0277	3.74%

* MSE kamayishi PSNR farqidan bir xil MAX_I va referens sharoitida hisoblangan matematik hosila ko'rsatkichidir.

2-rasm PSNR qiymatlaridagi farqni alohida dB shkalasida, 3-rasm esa SSIM natijalarini alohida o'qda ko'rsatadi. PSNR va SSIM turli fizik-ma'noviy shkalalarda bo'lgani sababli ular bitta umumiy ordinata o'qiga joylashtirilmadi. Bunday taqdimot o'lchov birliklarini aralashtirmasdan, har bir mezon bo'yicha usullar orasidagi farqni ko'rishga imkon beradi.

4. MUHOKAMA

Natijalar adaptiv parametr tanlashning asosiy afzalligi bir xil kuchdagi filtrlashdan voz kechishda ekanini ko'rsatadi. Gauss filtrida lokal o'rtachalash shovqinni kamaytiradi, ammo tasvir konturlari va mayda detallarda xiralashish xavfi mavjud. Berilgan tajribada Gauss filtri SSIMni filtrlashsiz holatga nisbatan oshirgan bo'lsa-da (0.6216 ga), PSNR 22.1402 dB bilan filtrlashsiz qiymatdan ham biroz past bo'lgan. Bu holat bir mezonning o'zi yetarli emasligini va silliqlash kuchi bilan strukturani saqlash o'rtasidagi muvozanat zarurligini ko'rsatadi.

Median filtrining natijasi PSNR 21.5346 dB va SSIM 0.5614 bo'lib, berilgan tajribada eng past qiymatlarni berdi. Median operatorning impulsli shovqin uchun foydali xususiyati [24] ushbu tajriba sharoitida avtomatik ravishda yuqori PSNR yoki SSIMni kafolatlamaydi. Shovqin turi, oynaning o'lchami va tasvir strukturasi bilan nomuvofiqlik bo'lsa, lokal detallar o'zgarishi mumkin. Shu nuqtai nazardan, adaptiv algoritmnining 5.0990 dB PSNR va 0.2073 SSIM ustunligi parametrlarni kadr sharoitiga moslashtirish g'oyasini qo'llab-quvvatlaydi.

Bilateral filtr chegaralarni saqlovchi klassik usul sifatida bazaviy filtrlar orasida eng yuqori natijani ko'rsatdi: PSNR 24.0747 dB va SSIM 0.7410. Adaptiv algoritmgaga eng yaqin aynan shu usul bo'lsa-da, adaptiv natija undan 2.5589 dB va 0.0277 yuqori. Bu farq shuni anglatadiki, faqat fazoviy va fotometrik yaqinlikka asoslangan lokal silliqlashdan tashqari, kadrning umumiy yoritilish va shovqin holatini hisobga olish qo'shimcha foyda berishi mumkin. Biroq ushbu xulosa berilgan agregat natijalar doirasida qoladi.

Zamonaviy low-light ishlarda ham moslashuvchanlik turli shakllarda namoyon bo'ladi: Zero-DCE kadrda xos egri chiziqlarni baholaydi, RUAS va URetinex-Net ma'lumotga bog'liq priorlarni o'rganadi, SNR-Aware usuli shovqin-signal nisbatiga qarab turli fazoviy hududlarni turlicha qayta ishlaydi, SCI esa turli real sahnalarga moslashishni soddalashtirilgan hisoblash bilan uyg'unlashtiradi. Retinexformer yoritilish axborotidan strukturani tiklash jarayonini boshqarishda



foydalanadi. Ushbu yondashuvlar taklif etilgan klassikroq adaptiv filtr bilan arxitektura jihatidan bir xil emas, ammo umumiy ilmiy prinsip — kirish tasvirining holatiga qarab ishlovni moslashtirish — jihatidan uyg'un keladi.

Video oqimlar nuqtai nazaridan kadrlararo yoritilish va shovqin o'zgarishi alohida ahamiyatga ega. Low-light video uchun maxsus benchmark va iterativ yoritilish moslashuvi taklif qilingan ishlar tasvir yaxshilashni faqat bitta statik tasvir muammosi sifatida ko'rish yetarli emasligini ko'rsatadi. Mazkur maqoladagi adaptiv filtr vaqt bo'yicha murakkab model qurmaydi; u har bir kadrni keyingi video tahlilga tayyorlashga qaratilgan. Shuning uchun uning kelajakdagi muhim kengaytmasi kadrlararo parametrlarning keskin tebranishini cheklovchi vaqt barqarorligi mexanizmini tadqiq qilish bo'lishi mumkin.

PSNR va SSIMning birgalikda oshishi natijaning ikki tomonini yoritadi. PSNR piksel darajasidagi xatoni logarifmik shaklda baholaydi, SSIM esa lokal struktura va kontrast o'xshashligiga ko'proq e'tibor beradi. Adaptiv filtr uchun PSNR 26.6336 dB va SSIM 0.7687 natijalarining bir vaqtda yuqori bo'lishi shovqinni kamaytirish jarayoni struktura bilan muvozanatlangan bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Aynan shaxsni keyingi aniqlash vazifasida kontur, siluet va mayda lokal belgilar foydali bo'lgani uchun strukturaviy axborotni saqlash amaliy jihatdan muhimdir. Biroq ushbu maqolada aniqlashning Precision, Recall, F1 yoki mAP ko'rsatkichlari o'lchanmagan; shuning uchun PSNR/SSIM yaxshilanishini bevosita aniqlash aniqligi oshdi deb talqin qilish mumkin emas.

Tadqiqotning asosiy cheklovi eksperimental protokolning ayrim tafsilotlari ushbu materiallarda berilmaganidir. Kadrlar soni, kamera parametrlari, referens tasvirlarni shakllantirish usuli va apparat platformasi ko'rsatilmagani sababli statistik dispersiya, ishonch oralig'i yoki p-qiymat kabi natijalarni berish ilmiy jihatdan asoslanmagan bo'lardi. Shuningdek, adaptiv algoritmnining hisoblash murakkabligi va FPS ko'rsatkichi ham alohida o'lchanmagan. Keyingi tadqiqotda bir xil video to'plamida filtrlarning PSNR/SSIM bilan bir qatorda hisoblash vaqti, kadrlararo barqarorlik va shaxsni aniqlash ko'rsatkichlariga ta'siri kompleks tekshirilishi lozim.

5. XULOSA

Ushbu tadqiqotda video oqimlarni keyingi avtomatik tahlil bosqichlariga tayyorlash uchun kadrning yoritilish holati, shovqin darajasi va informativ xususiyatlarini hisobga olgan holda ishlov berish parametrlarini moslashtiruvchi adaptiv filtr algoritmi taklif etildi. Yondashuvning asosiy jihati filtrlash parametrlarini barcha kadrlar uchun o'zgarmas holda qo'llashdan voz kechib, ularni joriy kadrning xususiyatlariga muvofiq shakllantirishdan iborat. Bu shovqinni kamaytirish bilan birga tasvirdagi kontur, lokal kontrast va boshqa foydali strukturaviy belgilarni imkon qadar saqlashga qaratilgan. Qiyosiy tajribalarda taklif etilgan adaptiv filtr algoritmi Gauss, Median va Bilateral filtrlari hamda filtrlashsiz holat bilan PSNR va SSIM mezonlari asosida solishtirildi. Adaptiv filtr uchun **PSNR = 26.6336 dB** va **SSIM = 0.7687** qiymatlari olindi. PSNR bo'yicha natija filtrlashsiz holatga nisbatan 4.3750 dB, Gauss filtriga nisbatan 4.4934 dB, Median filtriga nisbatan 5.0990 dB va Bilateral filtrga nisbatan 2.5589 dB yuqori bo'ldi. SSIM bo'yicha mutlaq farq mos ravishda 0.1692, 0.1471, 0.2073 va 0.0277 ni tashkil etdi. Olingan natijalar adaptiv parametr tanlash video kadrlarni dastlabki qayta ishlashda shovqinni kamaytirish va foydali strukturaviy axborotni saqlash o'rtasidagi muvozanatni yaxshilashga imkon berishini ko'rsatdi. Ayniqsa, yoritilish va shovqin holati kadrda kadr o'zgarib turadigan video oqimlarda ishlov berish parametrlarini joriy kadrda moslashtirish statik filtrlash yondashuvlariga nisbatan maqsadga



muvofoiq hisoblanadi. Shu jihatdan taklif etilgan algoritm keyingi shaxsni aniqlash va video tahlil bosqichlariga sifat jihatdan barqarorroq kirish ma'lumotlarini shakllantirishga xizmat qiladi.

Kelgusida adaptiv filtr algoritmining hisoblash tezligi, kadrlararo barqarorligi hamda turli yoritilish va shovqin sharoitlaridagi ishlash xususiyatlarini kengroq video ma'lumotlar to'plamida baholash maqsadga muvofoiq. Bu algoritmnining real vaqt video kuzatuv tizimlarida qo'llash imkoniyatlarini yanada to'liq aniqlash imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Mo, Tiande, et al. "Review of AI image enhancement techniques for in-vehicle vision systems under adverse weather conditions." *World Electric Vehicle Journal* 16.2 (2025): 72.
2. Saydazimov, J., Ergashev, S., & Nosirkulov, A. (2024, December). Research of Some Image Filter Algorithms Used in Object Detection. In *Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems* (pp. 781-785). <https://doi.org/10.1145/3726122.3726236>
3. Alpamis Kutlimuratov, Dilshod Eshmuradov Fotima Tulaganova va boshqalar. "Early Diagnosis of Blood Disorders via Enhanced Image Preprocessing and Deep Learning Modeling". *BioMedInformatics*. 2026. DOI: 10.3390/biomedinformatics6030025.
4. Xu, K.; Yang, X.; Yin, B.; Lau, R.W.H. Learning to Restore Low-Light Images via Decomposition-and-Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, 2281–2290. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00235.
5. Yorkinovna, M. S., & Javlonbek, S. (2026). A COMBINED BIOMETRIC IDENTIFICATION SYSTEM BASED ON INSIGHTFACE, LOGISTIC REGRESSION, AND ALIVENESS DETECTION. *Universum: технические науки*, 7(2 (143)), 44-50.
6. Jiang, Y.; Gong, X.; Liu, D.; Cheng, Y.; Fang, C.; Shen, X.; Yang, J.; Zhou, P.; Wang, Z. EnlightenGAN: Deep Light Enhancement Without Paired Supervision. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2021, 30, 2340–2349. DOI: 10.1109/TIP.2021.3051462.
7. Yang, W.; Wang, W.; Huang, H.; Wang, S.; Liu, J. Sparse Gradient Regularized Deep Retinex Network for Robust Low-Light Image Enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2021, 30, 2072–2086. DOI: 10.1109/TIP.2021.3050850.
8. Liu, R.; Ma, L.; Zhang, J.; Fan, X.; Luo, Z. Retinex-Inspired Unrolling With Cooperative Prior Architecture Search for Low-Light Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, 10561–10570. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01042.
9. Zhang, Z.; Jiang, Y.; Jiang, J.; Wang, X.; Luo, P.; Gu, J. STAR: A Structure-Aware Lightweight Transformer for Real-Time Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, 4106–4115. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00407.
10. Liang, J.; Cao, J.; Sun, G.; Zhang, K.; Van Gool, L.; Timofte, R. SwinIR: Image Restoration Using Swin Transformer. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2021, 1833–1844. DOI: 10.1109/ICCVW54120.2021.00210.



11. Li, C.; Guo, C.; Loy, C.C. Learning to Enhance Low-Light Image via Zero-Reference Deep Curve Estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(8), 4225–4238. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3063604.
12. Zamir, S.W.; Arora, A.; Khan, S.; Hayat, M.; Khan, F.S.; Yang, M.-H. Restormer: Efficient Transformer for High-Resolution Image Restoration. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, 5728–5739. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00564.
13. Xu, X.; Wang, R.; Fu, C.-W.; Jia, J. SNR-Aware Low-Light Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, 17714–17724. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01719.
14. Wu, W.; Weng, J.; Zhang, P.; Wang, X.; Yang, W.; Jiang, J. URetinex-Net: Retinex-Based Deep Unfolding Network for Low-Light Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, 5901–5910. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00581.
15. Ma, L.; Ma, T.; Liu, R.; Fan, X.; Luo, Z. Toward Fast, Flexible, and Robust Low-Light Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, 5637–5646. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00555.
16. Wang, Y.; Wan, R.; Yang, W.; Li, H.; Chau, L.-P.; Kot, A. Low-Light Image Enhancement with Normalizing Flow. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2022, 36(3), 2604–2612. DOI: 10.1609/aaai.v36i3.20162.
17. Turakulov, S., Iskandarova, S., & Akbarova, M. (n.d.a). Advanced detection and identification of grape pests and diseases using artificial intelligence. *Scientific Collection "InterConf"*, (199), 480–488.
18. Fotima Tulaganova, Sanjar Omonov, Abdulaziz Xo‘jamqulov. “Automatic Classification and Diagnostic Analysis of Microscopic Blood Images Using R-CNN Model”. The 8th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS’24). Morocco, 2024. – P. 452–458.
19. Cai, Y.; Bian, H.; Lin, J.; Wang, H.; Timofte, R.; Zhang, Y. Retinexformer: One-Stage Retinex-Based Transformer for Low-Light Image Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, 12504–12513. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.01149.
20. Fu, Z.; Yang, Y.; Tu, X.; Huang, Y.; Ding, X.; Ma, K.-K. Learning a Simple Low-Light Image Enhancer From Paired Low-Light Instances. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023, 22252–22261. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.02131.
21. Fu, H.; Zheng, W.; Wang, X.; Wang, J.; Zhang, H.; Ma, H. Dancing in the Dark: A Benchmark towards General Low-Light Video Enhancement. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, 12877–12886. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.01183.
22. Yi, X.; Xu, H.; Zhang, H.; Tang, L.; Ma, J. Diff-Retinex: Rethinking Low-Light Image Enhancement with a Generative Diffusion Model. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, 12302–12311. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.01130.



23. Zhang, Y.; Guo, X.; Ma, J.; Liu, W.; Zhang, J. Beyond Brightening Low-Light Images. *International Journal of Computer Vision*, 2021, 129, 1013–1037. DOI: 10.1007/s11263-020-01407-x.
24. Saydazimov, J. K., & Iskandarova, S. N. (2023). Shifoxonaga tegishli dorixonalar sotuv ko'rsatkichlarini raqamli tahlil qilish [Digital analysis of sales indicators of hospital pharmacies]. Turakulov, S. X., & Iskandarova, S. N. (2021, March 26–27).
25. Kutlimuratov, A., Sharipov, K., Allayarov, P., Iskandarova, S., Latyfskiy, R., Tolibaeva, G., & Makhmudov, F. (2026). SE-POSTER: Channel-enhanced landmark guided transformer for facial emotion recognition. *Informatics*, 13(8), Article 123. <https://doi.org/10.3390/informatics13080123>

O'ZBEK TILI KORPUSI UCHUN KO'P QATLAMLI LINGVISTIK ANNOTATSIYA

Qarshiyev Abduvali Berkinovich¹, Tursunov Muhammadsoli Sa'din o'g'li^{2,*}

¹Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti, Samarqand, O'zbekiston

² Oriental universiteti Samarqand kampusi, Samarqand, O'zbekiston

muhammadsoli927@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada o'zbek tilidagi katta hajmli yozma manbalarni qabul qilish, me'yorlashtirish, tuzilmaviy birliklarga ajratish, ko'p qatlamli lingvistik annotatsiyalash va korpus qidiruvi orqali taqdim etishga mo'ljallangan veb-platforma ishlab chiqildi. Tizim Django 5.2 va PostgreSQL asosida qurilib, hujjat, abzats, gap, token hamda tinish belgisini alohida indekslangan obyekt sifatida, kengaytiriladigan lingvistik ma'lumotni esa versiyalangan JSON qatlamida saqlaydi. Matnni qayta ishlashda Unicode va apostrof variantlarini me'yorlashtirish, juft hamda takror so'zlarni yaxlit token sifatida ajratish, mazmun xeshi orqali takror hujjatlarni cheklash va katta fayllarni paketlab qayta ishlash usullari qo'llandi. Platformada konkordanser, chastotali va N-gram lug'atlar, metama'lumotlar statistikasi, morfologik-sintaktik muharrir, NER, Entity linking va xatoliklarni uch bosqichda ko'rib chiqish jarayoni birlashtirildi. Funksional verifikatsiyada autentifikatsiya, qidiruv, annotatsiya, ma'lumot yaxlitligi va administrator jarayonlarini qamrab olgan 38 ta testning barchasi muvaffaqiyatli bajarildi. Natijalar platforma o'zbek tilining tadqiqot va ta'lim korpuslarini izchil kengaytirish uchun takrorlanuvchi, nazorat qilinadigan va yangi tahlil modullariga ochiq infratuzilma ekanini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: o'zbek tili korpusi; konkordanser; lingvistik annotatsiya; morfologik tahlil; sintaktik tahlil; nomlangan obyektlar; Entity linking; Django.

1. KIRISH

Til korpusi tabiiy til birliklarini haqiqiy qo'llanish kontekstida kuzatish, chastota va birikuvchanlikni o'lchash, grammatik hodisalarni tekshirish hamda ta'lim va sun'iy intellekt tizimlari uchun ma'lumot tayyorlash imkonini beradigan raqamli resursdir. Korpus lingvistikasida ma'lumot hajmi bilan bir qatorda matnlarning reprezentativligi, metama'lumotlarning aniqligi, qidiruv mexanizmining takrorlanuvchanligi va annotatsiya qatlamlarining izchil boshqarilishi muhim hisoblanadi [1]. Zamonaviy korpus vositalari oddiy so'z qidiruvdan tashqari konkordans, kollokatsiya, grammatik filtr, lug'at va statistik tahlilni bir muhitda birlashtiradi; Sketch Engine



tajribasi bunday funksional integratsiyaning leksikografiya va empirik tilshunoslikdagi ahamiyatini ko'rsatgan [2].

Korpus ma'lumotini uzoq muddatli saqlash va boshqa vositalar bilan almashishda qatlamlararo bog'lanish alohida masaladir. ISO 24612 lingvistik annotatsiyani birlamchi ma'lumot va unga bog'langan annotatsiya obyektlari sifatida ifodalashga yo'naltirilgan umumiy modelni tavsiya qiladi [3]. So'z shakli, lemma, token va morfosintaktik xususiyatlarning o'zaro munosabati esa yangilangan ISO 24611-1:2025 modelining markaziy obyektidir [4]. Mazkur tamoyillar bitta monolit matn maydonidan foydalanish o'rniga, hujjat, abzats, gap, token va annotatsiyani identifikatorlar orqali bog'lash zarurligini asoslaydi.

Ko'p tilli tabiiy tilni qayta ishlashda universal so'z turkumlari tizimi turli til va korpuslarni qiyoslash uchun umumiy tayanch yaratdi [5]. Universal Dependencies loyihasi bu yondashuvni lemma, UPOS, morfologik xususiyat va sintaktik tobelikni birlashtirgan ko'p qatlamli daraxtbank modeliga aylantirdi [6,7]. Biroq o'zbek tili agglutinatив tuzilishga ega bo'lgani sababli universal teglar tilga xos ma'no, shakl, nisbat, egalik, kelishik va boshqa grammatik belgilarni to'liq qamrab olmaydi. Shuning uchun platforma xalqaro nomlash bilan mos keladigan yuqori sathni saqlab, o'zbek tiliga xos ichki kodlarni ham mustaqil annotatsiya qatlamida berishi lozim.

O'zbek tilida morfologik va sintaktik teglangan korpus yaratish bo'yicha avvalgi ishda maxsus teglar to'plami va veb-annotatsiya vositasi ishlab chiqilib, ekspertning so'zma-so'z belgilash jarayoni taklif qilingan [8]. Keyingi UzbekTagger tadqiqoti 12 turkumli qoidaviy POS teglash va affikslarni ajratishga asoslangan yondashuvni taqdim etdi [9]. UzMorphAnalyser esa o'zbekcha so'zlarning flektiv qo'shimchalari, stemming, lemmalash va morfologik belgilarini birgalikda tahlil qilish masalasiga e'tibor qaratdi [10]. 2026-yilda e'lon qilingan UzbekPOS ma'lumotlar to'plamida 25 soha bo'yicha 4412 gap va 53113 token-teg juftligi ekspertlar ishtirokida tekshirilgan bo'lib, o'zbek tilida ko'p domenli oltin standart resurslarga ehtiyoj saqlanib qolayotganini ko'rsatadi [11].

Nomlangan obyektlarni aniqlash ham korpusning semantik imkoniyatlarini kengaytiradi. O'zbek NER ma'lumotlari bo'yicha tadqiqotda 2000 gap va 25865 so'z BIOES sxemasida ekspert tekshiruvdan o'tkazilgan [12]. Neyron quvurlar tokenlashdan NERgacha bo'lgan vazifalarni birlashtira olishi Stanza tizimida ko'rsatilgan [13], kontekstual til modellari esa kam resursli tillar uchun transfer o'rganish imkoniyatlarini oshirdi [14]. Shunga qaramay, model natijasini korpusga to'g'ridan-to'g'ri yozish ekspert nazoratisiz xato annotatsiyaning ko'payishiga olib kelishi mumkin. Entity linking vazifasi nomlangan obyektни kanonik bilim bazasi yozuviga bog'lashni talab qilgani uchun NERdan keyingi alohida tekshiruv bosqichi sifatida qoraladi [15].

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Tadqiqot obyekti va funksional talablar

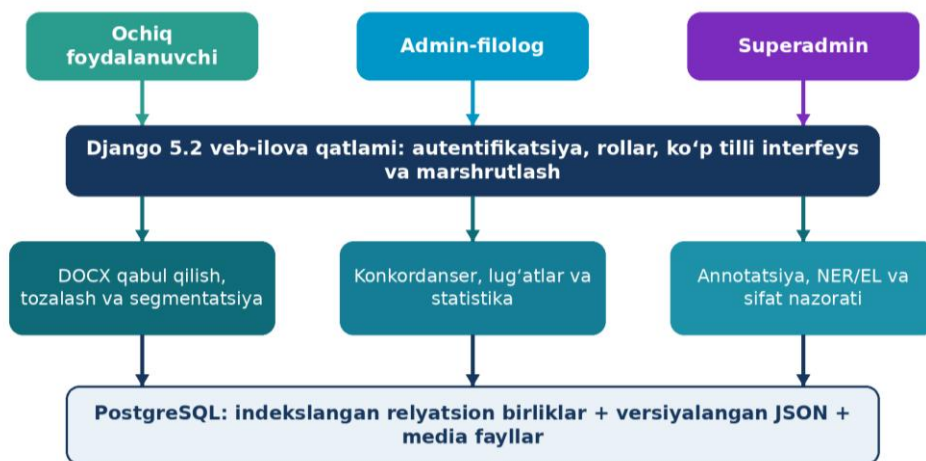
Tadqiqot obyekti sifatida O'zbek tili milliy korpusining v8.0 dasturiy platformasi olindi. Tizim Python muhitida Django 5.2 LTS freymvorki, PostgreSQL ma'lumotlar bazasi, HTML/CSS/JavaScript foydalanuvchi interfeysi va DOCX fayllarni o'qish vositalari asosida qurilgan. Ishlab chiqarish muhitida Unicorn yoki cPanel Passenger orqali ishga tushirish, statik resurslarni WhiteNoise yordamida uzatish va media fayllarni alohida saqlash ko'zda tutilgan. Django 5.2 ning uzoq muddatli qo'llab-quvvatlanadigan nashr sifatida tanlanishi xavfsizlik yangilanishlari va PostgreSQL bilan barqaror integratsiyani ta'minlaydi [16].



Talablar uchta foydalanuvchi roliga ajratildi. Ochiq foydalanuvchi e'lon qilingan matnlar bo'yicha konkordans, lug'at va statistikadan foydalanadi, tokenning lingvistik ma'lumotini ko'radi va xato haqida xabar yuboradi. Admin-filolog o'z matnini yuklaydi, metama'lumotni to'ldiradi, qayta ishlash jarayonini kuzatadi, tokenlarni sahifalab tahrirlaydi va avtomatik tahlil modullarini ishga tushiradi. Superadmin foydalanuvchilar, ma'lumotnoma jadvallari, publikatsiyalar, yangiliklar va annotatsiya xabarlarini boshqaradi. Rollarni ajratish tahrir huquqini manba egasi bilan cheklab, ochiq qidiruvni ma'lumotlar boshqaruvidan ajratadi.

2.2. Qatlamli arxitektura va ma'lumotlar modeli

Platforma taqdimot, amaliy xizmat va saqlash qatlamlariga ajratildi. Taqdimot qatlami ko'p tilli sahifalar, AJAX so'rovlari va rollarga mos menyularni boshqaradi. Amaliy xizmat qatlami matnni ajratish, qidiruv, statistika, annotatsiya va sifat nazorati funksiyalarini bajaradi. Saqlash qatlami indekslangan relyatsion jadvallar, versiyalangan JSON obyektlari va yuklangan media fayllardan tashkil topadi. 1-rasmda ushbu qatlamlar hamda foydalanuvchi rollarining o'zaro bog'lanishi ko'rsatilgan.



1-rasm. O'zbek tili milliy korpusi platformasining qatlamli arxitekturasini.

Har bir korpus hujjati metama'lumot, asl matn, DOCX manba fayli, mazmun xeshi, tayyor birliklar soni, ochiqlik belgisi va qayta ishlash holatini saqlaydi. Tuzilmaviy birliklarning umumiy modeli quyidagi to'plam orqali ifodalanadi:

$$D = \langle M, P, S, T, U, A \rangle \quad (1)$$

bu yerda M - hujjat metama'lumotlari; P - abzatslar; S - gaplar; T - so'z tokenlari; U - tinish belgilari; A - lingvistik annotatsiyalar majmui. Har bir P, S, T va U obyektida hujjat ichidagi tartib raqami va boshlanish-tugash ofseti saqlanadi. Bunday bog'lanish foydalanuvchiga topilgan tokenni asl gap va abzats kontekstida qayta tiklash, sintaktik daraxtdagi tugun bilan bog'lash va tahrirdan keyin JSON qatlamini sinxronlashtirish imkonini beradi.



1-jadval.
Platformadagi asosiy ma'lumot qatlamlari va ularning vazifasi.

Qatlam	Asosiy obyektlar	Vazifa
Manba	CorpusDocument, source_json	DOCX tuzilmasi, metama'lumot va asl matnni saqlash
Tuzilmaviy	Paragraph, Sentence	Abzats va gap chegaralari, tartib va belgilar ofsetini saqlash
Leksik	Token, Punctuation	So'z shakli, lemma, turkum, bo'shliq va tinish belgilarini ajratish
Lingvistik	annotations, corpus_json	Morfologiya, sintaksis, omonimlik, NER va EL qatlamlarini kengaytirish
Jarayon	ProcessingJob, AnalysisJob	Paketli ishlov, progress, tezlik, ETA va xatoni qayd etish
Sifat	AnnotationReport, CanonicalEntity	Xato xabari, tasdiqlangan tuzatish va kanonik obyekt bog'lanishini yuritish

2.3. DOCX manbani qayta ishlash algoritmi

Hujjat brauzerdan diskka oqimli tarzda qabul qilinadi. Avval paragraf va runlar ketma-ketligi o'qilib, asl matn hamda formatlash haqidagi manba JSONi tuziladi. Takror yuklashni cheklash uchun bo'shliqlar birxillashtirilgan va registrdan mustaqil matndan SHA-256 mazmun xeshi hisoblanadi. Xeshning noyob cheklovi bir xil mazmundagi hujjat boshqa nom bilan yuborilganda ham dublikat yozuv hosil bo'lishining oldini oladi.

Me'yorlashtirish bosqichida matn Unicode NFC ko'rinishiga o'tkaziladi, satr boshidagi va oxiridagi ortiqcha bo'shliqlar tozalanadi, turli tipografik apostroflar bitta o'zbekcha apostrof belgisiga, noodatiy defislar esa standart defisga almashtiriladi. "bir-biri", "asta-sekin", "soch-soqol" kabi juft va takror birliklar defis bilan yaxlit token sifatida saqlanadi. Raqam va tinish belgisi so'z chastotasini buzmasligi uchun tinish birliklari Token jadvaliga emas, Punctuation jadvaliga yoziladi; gapni qayta ko'rsatishda esa token va tinish birliklari umumiy tartib bo'yicha birlashtiriladi.

Katta hujjat bir so'rov davomida to'liq qayta ishlanmaydi. ProcessingJob obyektida bosqich, kursor, jami va bajarilgan birliklar soni, sekundiga ishlangan birliklar hamda taxminiy qolgan vaqt saqlanadi. Hujjat abzatslar bo'yicha, tokenlar esa alohida paketlarda bazaga yoziladi. Brauzer kichik AJAX so'rovlari bilan jarayonni davom ettirishi yoki mustaqil worker navbatdagi ishni bajarishi mumkin. Bu usul veb-serverning so'rov vaqti cheklovini kamaytiradi, muvaffaqiyatsiz bosqichdan nazoratli qayta boshlash va foydalanuvchiga aniq progress ko'rsatish imkonini beradi.

2.4. Ko'p qatlamli annotatsiya modeli

Token sathida surface, normalized, lemma, part_of_speech, is_word, space_after, ofset va analysis_status maydonlari mavjud. Kengaytiriladigan annotations JSON obyektida morphology, syntax, homonymy, ner va entity_linking kabi nomlangan qatlamlar saqlanadi. Yangi analizator

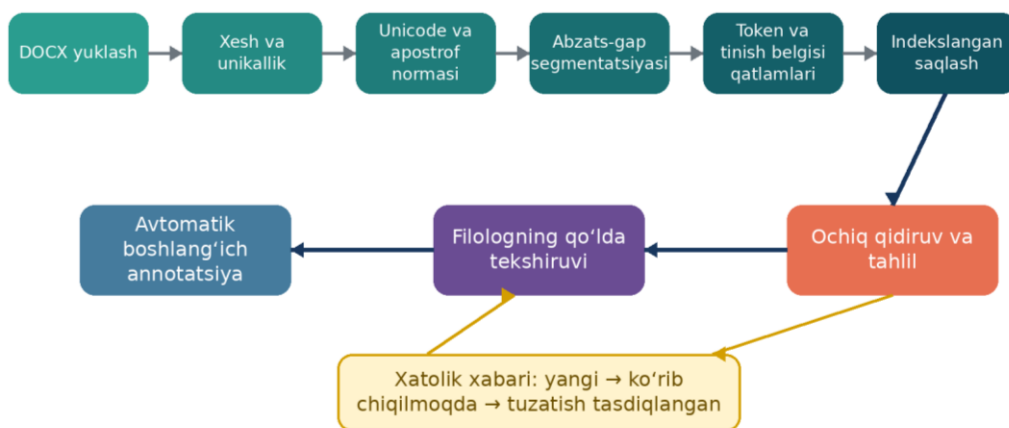


qo'shilganda mavjud jadvallarni majburiy o'zgartirmasdan yangi qatlam yozish mumkin; keng qo'llanadigan lemma va turkum kabi qiymatlar esa indekslash va qidiruv uchun alohida ustunlarda takror saqlanadi. Bu gibrid model qat'iy sxemaning tezkor so'rovi bilan JSONning moslashuvchanligini birlashtiradi.

Morfologik muharrir tanlangan so'z turkumiga tegishli belgilarni dinamik chiqaradi. Masalan, ot uchun atoqli/turdosh, aniq/mavhum, son, kelishik va egalik; fe'l uchun semantik tur, tuzilish, bo'lishlilik, o'timlilik, nisbat, vazifa shakli, zamon, shaxs-son va mayl belgilanadi. Server har bir yuborilgan kodning tanlangan POS sxemasiga tegishli ekanini tekshiradi; begona yoki noma'lum kod darhol rad etiladi. Interfeysda guruh nomlarini takror ko'rsatish o'rniga faqat tanlangan qiymat va uning kodi ixcham chiqariladi.

Sintaktik qatlamda har bir token uchun hokim token identifikatori va root, nsubj, obj, iobj, obl, amod, nmod, advmod, acl, case, cc, conj, compound, aux, cop, mark yoki dep munosabati beriladi. NER qatlami 15 turdagi obyekt, jumladan PER, ORG, GPE, LOC, EVENT, WORK, PRODUCT, LAW, LANGUAGE, DATE, MONEY va QUANTITY sinflarini qo'llaydi. Ko'p tokenli obyekt chegaralari BIO tamoyili asosida avtomatik shakllantiriladi. Entity linking muharriri aniqlangan birlikni CanonicalEntity yozuviga bog'laydi, qoralama, tasdiqlangan yoki NIL holatini saqlaydi. NIL qiymati bilim bazasida mos obyekt topilmaganini aniq qayd etadi.

Avtomatik modullar lemmalash, POS teglash, morfologik segmentatsiya va annotatsiya, sintaktik tahlil, omonimlik, NER hamda Entity linking uchun yagona AnalysisJob protokolida ishlaydi. Joriy v8.0 versiyadagi boshlang'ich avtomatik qoidalar integratsiya va ish jarayonini tekshirishga xizmat qiladi; ular oltin standart korpusda aniqlik, to'liqlik va F1 ko'rsatkichlari bo'yicha baholanmaguncha yakuniy lingvistik model deb qaralmaydi. Muvaffaqiyatli tugagan modulni qayta ishga tushirish interfeys va server sathida bloklanadi. Shu tariqa filologning keyingi qo'lda tahriri tasodifan avtomatik natija bilan almashtirilmaydi.



2-rasm. Matnni korpusga kiritish va annotatsiya sifatini boshqarish jarayoni.

2.5. Konkordans, lug'at va statistika usullari

Konkordanser so'rovni so'z shakli yoki lemma maydonida aynan moslik, boshlanish va istalgan qism bo'yicha bajaradi. Natijalar alohida kontekstlar soni bo'yicha emas, avval hujjatlar kesimida guruhlanadi. Har bir hujjat ichida topilgan gaplar ikkinchi sathda sahifalanadi. Oddiy



kontekst kalit soʻz qatnashgan gap hamda faqat oʻsha abzatsdagi mavjud oldingi va keyingi gapni koʻrsatadi; keng kontekst butun abzatsni qaytaradi. Soʻrov, moslik turi, sahifadagi hujjatlar va kontekstlar soni URL parametrlarida saqlangani sababli tahlilni havola orqali takrorlash mumkin.

Muallif va matn nomi boʻyicha avtotoʻldirish registr, boʻshliq va apostrof variantlari birxillashtirilgandan soʻng takror qiymatlarni bitta variantga birlashtiradi. Dinamik endpointlar hujjat metamaʼlumoti, barcha kontekstlar, abzats konteksti va sintaktik daraxtni faqat talab qilinganda yuklaydi. Bunday kechiktirilgan yuklash katta natija roʻyxatida brauzerga ortiqcha matn va JSON yuborilishini kamaytiradi.

Lugʻat moduli chastotali, alifbo-chastotali, ters, N-gram va KWIC koʻrinishlarini hosil qiladi. Soʻz chastotalarida is_word belgisi va meʼyorlashtirilgan shakl ishlatilgani uchun tinish belgisi hisobga olinmaydi. Statistikada umumiy hisoblar hujjatlarning tayyor sentence_count, paragraph_count va token_count maydonlarini yigʻish orqali olinadi; har safar katta Sentence va Token jadvallarini toʻliq JOIN qilish talab etilmaydi. Qisman statistik muallif, yil, mavzu, janr, uslub, auditoriya, tashuvchi va subkorpus kabi metamaʼlumotlar boʻyicha filtrlanadi.

2.6. Verifikatsiya mezonlari

Tizimni baholashda funksional testlar, maʼlumot yaxlitligi tekshiruvlari va kod sathidagi soʻrov tahlili qoʻllandi. Testlar SQLite asosidagi izolyatsiyalangan muhitda Django test runner orqali bajarildi. Bu muhit ishlab chiqarishdagi PostgreSQL oʻrnini bosuvchi samaradorlik benchmarki emas, balki deterministik funksional verifikatsiya vositasidir. Mezonlar: (a) apostrof va tinish belgisini toʻgʻri ajratish; (b) abzats, gap va token offsetlarini saqlash; (c) dublikat mazmunni cheklash; (d) real kontekstni qaytarish va sahifalash; (e) rollar va egalik boʻyicha ruxsat; (f) annotatsiya kodlarini tekshirish; (g) avtomatik jarayon holati; (h) xato xabarining uch bosqichli hayot sikli; (i) publikatsiya va yangiliklarni boshqarish.

Bundan tashqari, katta hujjatlar uchun dashboard hisobining Sentence va Token jadvallariga JOIN qilmasligi, kontekstning faqat tegishli abzats bilan chegaralanishi, avtotoʻldirishda meʼyorlashtirilgan dublikatlarning birlashtirilishi va tugallangan modulni server tomonida qayta ishga tushirishning rad etilishi tekshirildi. JavaScript sintaksisi, migratsiyalar va statik fayllarni yigʻish alohida texnik nazoratdan oʻtkazildi.

3. NATIJALAR

3.1. Amalga oshirilgan funksiyalar

Ishlab chiqilgan platforma matnni yuklashdan ochiq tahlilgacha boʻlgan jarayonni bitta axborot tizimida birlashtirdi. Admin-filolog DOCX faylni yuklagach, tizim dublikatni tekshiradi, qayta ishlash ishini yaratadi, abzats-gap-token-tinish qatlamlarini paketlab saqlaydi va yakunda hujjatning tayyor hisoblagichlarini yangilaydi. Hujjat ochiq deb belgilansa, u bosh sahifa hisoblari, konkordans, lugʻat va statistika soʻrovlariga qoʻshiladi. Xatolik yuz bersa, holat failed ga oʻtadi va diagnostik matn saqlanadi.

Ochiq interfeys oʻzbek, rus va ingliz tillarida ishlaydi. Muallif hamda sarlavha avtotoʻldirishi, dinamik metamaʼlumot oynasi, keng kontekst va token tafsilotlari foydalanuvchining katta sahifada yoʻnalishini soddalashtiradi. Konkordans natijasini 10, 20, 50 yoki 100 ta hujjat, har bir hujjatda esa 10, 20, 50 yoki 100 ta kontekst koʻrinishida chiqarish mumkin. Bitta manbaning barcha kontekstlari alohida sahifada mustaqil paginatsiya qilinadi.



2-jadval.
Funksional modullar va olingan tizim natijalari.

Modul	Amalga oshirilgan natija	Nazorat mexanizmi
Matnni qabul qilish	DOCX, metama'lumot, SHA-256 mazmun xeshi	Fayl turi va noyob xesh cheklovi
Segmentatsiya	Abzats, gap, token va tinish belgisi	Ofset, tartib va noyob pozitsiya
Konkordanser	Shakl/lemma, 3 moslik turi, guruhlangan kontekst	Indeks, filtr va ikki sathli paginatsiya
Lug'atlar	Chastota, alifbo, ters, N-gram, KWIC	is_word filtri va me'yorlashtirilgan shakl
Annotatsiya	Morfologiya, sintaksis, omonimlik, NER, EL	Sxema validatsiyasi va qo'lda tasdiqlash
Sifat nazorati	Foydalanuvchi xabari va uch holatli ko'rib chiqish	Token manzili, mas'ul shaxs va izoh
Ma'muriy boshqaruv	Foydalanuvchi, ma'lumotnoma, yangilik, publikatsiya	Rolga asoslangan ruxsat va CRUD

3.2. Ma'lumot yaxlitligi va kengayuvchanlik

Ma'lumotlar bazasida hujjat holati va ochiqdigi, hujjat egasi va holati, subkorpus, muallif-sarlavha, hujjat-lemma, hujjat-me'yorlashtirilgan shakl, gap-pozitsiya va kanonik obyekt turi nomi bo'yicha indekslar yaratildi. Sentence va Tokenning hujjat ichidagi pozitsiyasi, Tokenning gap ichidagi pozitsiyasi hamda Punctuationning birlik pozitsiyasi noyob cheklov bilan himoyalangan. Natijada bir birlikning takror yozilishi yoki tartib kolliziyasi ma'lumotlar bazasi sathida aniqlanadi.

Kichik hujjatda corpus_json ichiga gap va tokenlar to'liq joylashtirilishi mumkin; katta hujjatda esa JSON faqat cheklangan preview va sxema metama'lumotini saqlaydi, to'liq birliklar relyatsion jadvallarda qoladi. Bu qaror bir tomondan eksport va yangi qatlamlar uchun o'zini tavsiflovchi JSONni, ikkinchi tomondan katta korpusda indekslangan so'rovni ta'minlaydi. schema_version va available_layers maydonlari keyingi analizator natijasini mavjud ma'lumotni buzmasdan qo'shish imkonini beradi.

Miqyoslash strategiyasi uch darajani qamrab oladi: matnni paketlab yozish, statistik umumiy qiymatlarni hujjat sathida denormalizatsiya qilish va ishlab chiqarishda PostgreSQL dan foydalanish. Juda katta korpusga o'tilganda Token jadvalini hujjat yoki subkorpus bo'yicha partition qilish, SSD/NVMe saqlash, muntazam ANALYZE va autovacuumni qo'llash keyingi infratuzilmaviy qadam sifatida belgilandi. Biroq ushbu tadqiqotda million yoki milliard tokenli ishlab chiqarish yuklamasi bo'yicha vaqt va xotira benchmarki o'tkazilmadi; shuning uchun miqyoslanish xulosasi arxitektura va so'rov dizayni darajasida beriladi.



3.3. Annotatsiya sifatini boshqarish natijasi

Annotatsiya natijasi token oynasida oddiy shrift bilan ixcham ko'rsatiladi. Morfologik qatlamda bo'sh guruhlar chiqarilmaydi, NER va Entity linking qatorlari esa qiymat mavjud bo'lmasa ham "Belgilanmagan" va "Bog'lanmagan" holatlari bilan ko'rinadi. Bu dizayn foydalanuvchiga ma'lumot yo'qligi bilan interfeys xatosini farqlash imkonini beradi.

Foydalanuvchi yuborgan xabar token, lemma, hujjat, muallif, gap konteksti va token tartibi bilan birga saqlanadi. Superadmin panelida xabarlar "ko'rib chiqilmagan", "ko'rib chiqilmoqda" va "tuzatish tasdiqlangan" toifalariga ajratiladi. Mas'ul shaxs xabardan to'g'ridan-to'g'ri kerakli hujjat sahifasi va token ankori tomon o'tadi. Tasdiqlash uchun bajarilgan tuzatish izohi majburiy; reviewed_by va resolved_at maydonlari qaror kim tomonidan va qachon qabul qilinganini qayd etadi.

Avtomatik modul holatining queued, processing, complete va failed qiymatlari bir xil hujjat-modul juftligi uchun jarayonni nazorat qiladi. Complete holatdagi modul bloklanadi, failed holat esa qayta urinishga ruxsat beradi. Bu mexanizm avtomatik va qo'lda annotatsiya o'rtasidagi muhim kolliziyani - ekspert tuzatishining ustiga eski avtomatik natija yozilishini - kamaytiradi.

3.4. Funktsional test natijalari

Test to'plami uchta Django ilovasiga taqsimlangan. corpus ilovasidagi 26 test ma'lumotni qayta ishlash, konkordans, annotatsiya, statistik va xabarlar jarayonini; core ilovasidagi 10 test ochiq sahifalar, lokalizatsiya, publikatsiya va yangiliklarni; accounts ilovasidagi 2 test administrator yaratish va forma mantiqini tekshiradi. 3-jadvalda natijalar keltirilgan.

3-jadval.
Avtomatlashtirilgan funktsional testlar natijasi.

Ilova	Testlar soni	Muvaffaqiyatli	Natija
corpus	26	26	100%
core	10	10	100%
accounts	2	2	100%
Jami	38	38	100%

Barcha 38 test muvaffaqiyatli yakunlandi. Bundan tashqari, framework konfiguratsiyasi tekshiruvi, yangi migratsiyaning qo'llanishi, JavaScript sintaksisi va statik fayllarni yig'ish xatosiz bajarildi. Natija platformaning belgilangan funktsional talablar bo'yicha ichki izchilligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, 100% funktsional test natijasi avtomatik lemmalash, POS, sintaksis yoki NERning lingvistik aniqligi 100% degani emas. Bunday xulosa uchun ekspertlar belgilagan mustaqil test to'plami va precision, recall, F1, LAS/UAS kabi vazifaga xos metrikalar talab etiladi.

4. MUHOKAMA

Tadqiqot natijasida korpus yaratishning uchta odatda alohida ko'riladigan qismi - ma'lumot injiniringi, lingvistik annotatsiya va sifat boshqaruvi - bitta platformada birlashtirildi. Birinchi muhim jihat, matn tuzilmasining relyatsion obyektlar va versiyalangan JSONda parallel



ifodalanishidir. Faqat JSONdan foydalanish yangi qatlam qo'shishni osonlashtiradi, ammo juda katta token to'plamida indekslangan qidiruv va yaxlitlik cheklovlarini murakkablashtiradi. Faqat qat'iy relyatsion sxema esa yangi lingvistik belgi uchun ko'p migratsiya talab qiladi. Gibril model tez-tez so'raladigan maydonlarni ustunda, o'zgaruvchan belgilarni annotations obyektida saqlab, ushbu qarama-qarshilikni yumshatadi.

Ikkinchi jihat, tinish belgilarining mustaqil qatlamga ajratilishidir. Konkordans va chastota tahlilida “.” yoki “,” kabi birliklarning so'z sifatida hisoblanishi statistikani buzadi; biroq asl gapni qayta tiklashda tinish belgisi va undan keyingi bo'shliq haqidagi ma'lumot zarur. Punctuation modeli ikkala talabni bir vaqtda qondiradi. Apostrof va defis variantlarini me'yorlashtirish esa o'zbek lotin yozuvidagi amaliy heterogenlikni kamaytiradi. Shunga qaramay, normallashtirish siyosati asl matnni yo'qotmasligi lozim; shu sabab original_text va source_json o'zgarmagan manba sifatida saqlanadi.

Uchinchi jihat, avtomatik annotatsiya va ekspert tahriri o'rtasidagi chegaraning aniq belgilanishidir. Stanza kabi tizimlar bir nechta NLP vazifasini bitta quvurda bajarishi mumkin [13], BERT va keyingi transformerlar esa kontekstual belgilarni kuchaytiradi [14]. Ammo model versiyasi, o'qitish korpusi va domen o'zgarsa natija ham o'zgaradi. Platformadagi AnalysisJob holati, available_layers ro'yxati, manual analysis_status va qayta ishlash blokirovkasi har bir natijaning kelib chiqishini nazorat qilishga xizmat qiladi. Kelajakda model nomi, versiyasi, ishonchlilik balli va bajarilgan vaqtni annotatsiya provenance obyektida saqlash bu kuzatuvchanlikni yanada kuchaytiradi.

To'rtinchi jihat, foydalanuvchi xabarining oddiy aloqa formasidan aniq tokenli sifat jarayoniga aylantirilganidir. Xabar kontekst, hujjat va tahrir ankori bilan saqlangani sababli superadmin xatoni qayta qidirishga vaqt sarflamaydi. Uch holatli jarayon ochiq murojaat, ishga olingan murojaat va tasdiqlangan tuzatishni farqlaydi. Bu mexanizm korpusni bir martalik nashr emas, doimiy ravishda yaxshilanadigan ilmiy resurs sifatida boshqarish imkonini beradi.

Tizimning cheklovlari ham mavjud. Birinchidan, joriy avtomatik modullar boshlang'ich qoidaviy natija beradi va ularning lingvistik sifati ushbu ishda baholanmadi. Ikkinchidan, testlar funksional xatti-harakatni tekshiradi, real foydalanuvchilar ishtirokidagi usability tadqiqoti o'tkazilmadi. Uchinchidan, PostgreSQL'dagi katta yuklama, parallel so'rovlar va milliard tokenli partition ssenariysi bo'yicha tajriba natijasi yo'q. To'rtinchidan, mualliflik huquqi, litsenziya, shaxsiy ma'lumot va manba izini qayd etish uchun metadata siyosati tashkilot darajasida tasdiqlanishi kerak.

Kelgusi tadqiqotlar to'rtta yo'nalishda rejalashtiriladi. Birinchi yo'nalish - UzbekPOS, morfologik va NER datasetlari asosida mustaqil train/dev/test ajratmalari bilan modellarni o'qitish va baholash. Ikkinchisi - annotatorlararo kelishuvni Cohen kappa yoki Krippendorff alfa bilan o'lchash, murakkab misollar uchun adjudikatsiya protokolini joriy etish. Uchinchisi - konkordans va statistik so'rovlarni PostgreSQL EXPLAIN ANALYZE, p95 kechikish, throughput va xotira ko'rsatkichlari bilan benchmark qilish. To'rtinchisi - CoNLL-U, JSONL va TEI/standart almashinuv formatlarida import-eksportni qo'shib, boshqa ilmiy resurslar bilan interoperabellikni oshirish.

5. XULOSA

O'zbek tili milliy korpusi uchun ishlab chiqilgan v8.0 platforma DOCX manbani qabul qilish, Unicode va apostrofni me'yorlashtirish, abzats-gap-token-tinish birliklariga ajratish,



indekslangan saqlash, konkordans, lugʻat, statistika va koʻp qatlamli annotatsiyani yagona boshqariladigan jarayonda birlashtirdi. Relyatsion obyektlar bilan versiyalangan JSONning gibrid modeli katta korpusdagi qidiruvni va yangi lingvistik qatlam qoʻshishni muvozanatlashtiradi.

Platformaning amaliy yangiligi NER va Entity linkingni morfologik-sintaktik muharrir bilan bogʻlash, foydalanuvchi xatosini aniq token manziliga biriktirish, superadmin uchun uch bosqichli tuzatish jarayonini yaratish hamda tugallangan avtomatik modulni qayta bajarishdan himoyalashdan iborat. 38/38 funksional testning muvaffaqiyatli bajarilishi belgilangan talablarning dasturiy yaxlitligini tasdiqladi. Keyingi bosqichda avtomatik lingvistik modullar oltin standart oʻzbekcha datasetlarda alohida baholanib, katta PostgreSQL muhitida samaradorlik benchmarki oʻtkazilishi lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. McEnery, T.; Hardie, A. *Corpus Linguistics: Method, Theory and Practice*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012.
2. Kilgariff, A.; Baisa, V.; Bušta, J.; Jakubíček, M.; Kovář, V.; Michelfeit, J.; Rychlý, P.; Suchomel, V. *The Sketch Engine: Ten Years On*. *Lexicography* 2014, 1, 7–36. <https://doi.org/10.1007/s40607-014-0009-9>.
3. International Organization for Standardization. *ISO 24612:2012 Language Resource Management—Linguistic Annotation Framework (LAF)*. ISO: Geneva, Switzerland, 2012.
4. International Organization for Standardization. *ISO 24611-1:2025 Language Resource Management—Morphosyntactic Annotation Framework (MAF)—Part 1: Core Model*. ISO: Geneva, Switzerland, 2025.
5. Petrov, S.; Das, D.; McDonald, R. A Universal Part-of-Speech Tagset. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'12)*, Istanbul, Turkey, 23–25 May 2012; pp. 2089–2096.
6. Nivre, J.; de Marneffe, M.-C.; Ginter, F.; Goldberg, Y.; Hajič, J.; Manning, C.D.; McDonald, R.; Petrov, S.; Pyysalo, S.; Silveira, N.; et al. *Universal Dependencies v1: A Multilingual Treebank Collection*. In *Proceedings of LREC'16*, Portorož, Slovenia, 23–28 May 2016; pp. 1659–1666.
7. Nivre, J.; de Marneffe, M.-C.; Ginter, F.; Hajič, J.; Manning, C.D.; Pyysalo, S.; Schuster, S.; Tyers, F.; Zeman, D. *Universal Dependencies v2: An Evergrowing Multilingual Treebank Collection*. In *Proceedings of LREC 2020*, Marseille, France, 11–16 May 2020; pp. 4034–4043.
8. A. Qarshiyev, S. Karimov, and M. Tursunov, “A program for the morphological analysis of Uzbek words,” (in Uzbek), *Computer Linguistics: Problems, Solutions, Prospects*, vol. 1, no. 1, pp. 101–107, 2024. [Online]. Available: <https://compling.navoiy-uni.uz/index.php/conferences/article/view/1013>.
9. Sharipov, M.; Kuriyozov, E.; Yuldashev, O.; Sobirov, O. *UzbekTagger: The Rule-Based POS Tagger for Uzbek Language*. *arXiv* 2023, arXiv:2301.12711. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.12711>.
10. Salaev, U. *UzMorphAnalyser: A Morphological Analysis Model for the Uzbek Language Using Inflectional Endings*. *arXiv* 2024, arXiv:2405.14179. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14179>.



11. Sharipov, M.; Kuriyozov, E.; Vičić, J. UzbekPOS: A Multi-Domain Dataset for Uzbek Part-of-Speech Tagging. Data in Brief 2026, 66, 112640. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2026.112640>.
12. Mengliev, D.; Barakhnin, V.; Abdurakhmonova, N.; Eshkulov, M. Developing Named Entity Recognition Algorithms for Uzbek: Dataset Insights and Implementation. Data in Brief 2024, 54, 110413. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110413>.
13. Qi, P.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; Bolton, J.; Manning, C.D. Stanza: A Python Natural Language Processing Toolkit for Many Human Languages. In Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, Online, July 2020; pp. 101–108. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-demos.14>.
14. Devlin, J.; Chang, M.-W.; Lee, K.; Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In Proceedings of NAACL-HLT 2019, Minneapolis, MN, USA, 2–7 June 2019; pp. 4171–4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>.
15. Kolitsas, N.; Ganea, O.-E.; Hofmann, T. End-to-End Neural Entity Linking. In Proceedings of CoNLL 2018, Brussels, Belgium, 31 October–1 November 2018; pp. 519–529. <https://doi.org/10.18653/v1/K18-1050>.
16. Django Software Foundation. Django 5.2 Release Notes. 2025. Available online: <https://docs.djangoproject.com/en/5.2/releases/5.2/> (accessed on 3 September 2026).

SANOAT SIFAT MENEJMENTI TIZIMLARIDA SUN'IIY INTELLEKT VA FAZZI-EHTIMOLIY MODELLAR INTEGRATSIYASI: TASNIFLASH, ANOMALIYALARNI ANIQLASH VA ME'YORIY QAROR QABUL QILISH MEXANIZMI

Durdiyev Oxunjon Orifjon o'g'li^{1,*}, Axmedov Barat Maxmudovich² va Murodov Jurabek Norpulatovich¹

¹ O'zbekiston Standartlar instituti

² Kadastr agentligi Davlat kadastrlari palatasi
oxunjon.durdiyev@mail.ru

Annotatsiya: (1) Ma'lumot: Zamonaviy sanoat korxonalarida mahsulot sifatini uzluksiz monitoring qilish va texnologik nuqsonlarni ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlarida aniqlash sifat menejmenti samaradorligini belgilovchi asosiy omildir. Tadqiqotning maqsadi mashinaviy o'rganish, anomaliyalarni bir sinfli aniqlash hamda fazzi-ehtimoliy xulosa chiqarish apparatini ISO 9001:2015 standarti talablari bilan integratsiyalagan ko'p bosqichli sifat menejmenti modelini ishlab chiqishdan iborat. (2) Usullar: Mahsulot ko'rsatkichlarini tasniflashda SVM, Random Forest, CNN va LSTM algoritmlarining matematik mexanizmlari tizimlashtirildi. Nomuvofiq mahsulotlarni operativ aniqlashda Isolation Forest va chuqur avtokodlovchilar, o'lchov noaniqligi sharoitida boshqaruv qarorlarini shakllantirishda esa Mamdani fazzi xulosa chiqarish tizimi, fazzi-FMEA hamda Bayes tarmoqlari qo'llanildi. (3) Natijalar: Empirik tahlillar past o'lchamli parametrlar to'plamida Random Forest va SVM modellari 99,2–99,4% aniqlik ko'rsatib, resursi cheklangan Edge AI kontrollerlarida chuqur neyron tarmoqlarga nisbatan yuqori tejamkorlikka egaligini tasdiqladi. Anomaliyalarni aniqlash apparati ISO 9001:2015 ning 8.7- va 10.2-bandlari bilan bevosita bog'lanib, nomuvofiq mahsulotlarni boshqarish va tuzatuvchi



harakatlarni avtomatlashtirish algoritmi shakllantirildi. (4) Xulosa: Taklif etilgan ko'p bosqichli model ISO/IEC 23053, ISO/IEC TR 24028 hamda ISO/IEC 25059 standartlari talablariga to'la muvofiq bo'lib, ishlab chiqarish korxonalarida raqamli sifat monitoringini bosqichma-bosqich tatbiq etish uchun mustahkam ilmiy asos yaratadi.

Kalit so'zlar: *sifat menejmenti tizimi; sun'iy intellekt; SVM; Random Forest; CNN; LSTM; anomaliyalarni aniqlash; fazzi mantiq; Bayes tarmoqlari; ISO 9001:2015.*

1. KIRISH

Sanoat ishlab chiqarish jarayonlarini kompleks raqamlashtirish sharoitida sifat menejmenti tizimining amaliy samaradorligi texnologik og'ishlarni o'z vaqtida aniqlash hamda me'yoriy jihatdan asoslangan qarorlarni tezkor qabul qilish tezligiga bevosita bog'liqdir [1]. Xalqaro ISO 9001:2015 standarti doirasida sifat ko'rsatkichlarining doimiy tahlili qat'iy belgilangan: standartning 9.1-bandi jarayonlarni muntazam o'lchash va monitoring qilishni yuklasa, 8.7-bandi («Nomuvofiq chiqishlarni nazorat qilish») talabga javob bermaydigan mahsulotlarni operativ izolyatsiya qilishni, 10.2-bandi («Nomuvofqlik va tuzatuvchi harakat») esa yuzaga kelgan nuqsonlarning tub sabablarini aniqlab, tizimli tuzatuvchi choralarni ko'rishni talab etadi [1].

Sanoat amaliyotida an'anaviy vizual nazorat usullari hamda Shewhart statistik jarayon nazorati (SPC) kartalari uzoq vaqt davomida sifatni ta'minlashning asosiy vositasi bo'lib keldi [2]. Biroq inson omili ta'siridagi subyektiv xatoliklar, nazoratchi charchoqligi hamda SPC modellarining ma'lumotlar normal taqsimotiga bog'liqligi ko'p parametrlil dinamik ishlab chiqarish jarayonlarida soxta ogohlantirishlar chastotasini oshiradi [2]. Mazkur metodologik cheklovlarni bartaraf etish maqsadida mashinaviy o'rganish va chuqur neyron tarmoqlar sifat monitoringiga jadal tatbiq etilmoqda [2]: mahsulot yuzasidagi optik nuqsonlarni aniqlashda konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) yuqori samaradorlik ko'rsatsa, tebranish va harorat datchiklarining signallarini tasniflashda tayanuvchi vektorlar mashinasi (SVM) hamda tasodifiy o'rmon (Random Forest) algoritmlari hisoblash resurslarini tejamkor sarflagan holda barqaror ishlaydi [2]. Vaqt bo'yicha o'zgaruvchan uzluksiz texnologik qatorlar monitoringida esa uzoq-qisqa muddatli xotira (LSTM) tarmoqlari jarayon trendini aniqlash imkonini beradi.

Shu bilan birga, sun'iy intellekt modellarining sanoat korxonalarida qo'llanilishi qat'iy me'yoriy-standardlashtirish talablari bilan uyg'unlashtirilishi zarur. Xususan, ISO/IEC 23053:2022 standarti mashinaviy o'rganishga asoslangan AI tizimlarining umumiy tuzilmasi va ma'lumotlar oqimini tartibga solsa [3], ISO/IEC TR 24028:2020 tizimlarning ishonchlilik, mustahkamligi va qarorlar shaffofligini (explainability) ta'minlash tamoyillarini belgilaydi [4]. Dasturiy ta'minot sifatini baholashda ISO/IEC 25059:2023 standarti talablariga tayanilsa [5], sanoat uskunalarining texnik holati va tebranish diagnostikasi ISO 13379-1:2012 me'yorlari asosida yuritiladi [6].

Mazkur yondashuvlarning amaliy ahamiyati O'zbekiston Respublikasining sifat infratuzilmasini raqamlashtirish strategiyasi doirasida yanada ortadi: akkreditatsiya organlari va sinov laboratoriyalari uchun AI asosidagi monitoring vositalari nazorat jarayonlarining shaffofligini oshirish, inson omiliga bog'liq xatoliklarni kamaytirish hamda ISO 9001:2015 talablariga muvofiqlikni real vaqt rejimida tasdiqlash imkonini beradi. Shu bilan birga, bunday tizimlarni joriy etish metrologik nazorat, kadrlar tayyorgarligi va me'yoriy-huquqiy baza bilan uyg'un ravishda amalga oshirilishi lozim.



Sanoat sifat nazorati vazifalari, ularga mos AI algoritmlari va tegishli me'yoriy standartlarning o'zaro bog'liqligi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.
Sifat nazorati va texnologik monitoring vazifalarining AI algoritmlari hamda me'yoriy asoslar bilan tizimli bog'liqligi

Sifat nazorati vazifasi	Tavsiya etiladigan AI modeli	Asos bo'luvchi me'yoriy standart
Optik va rentgen tasvirlaridagi sirtqi nuqsonlarni aniqlash	Segmentatsiyaga asoslangan CNN, CapsuleNet, Autoencoder	ISO/IEC 23053:2022 [3], ISO/IEC 25059:2023 [5]
Tebranish, harorat va sensor signallarini ko'p sinfli tasniflash	Support Vector Machine (SVM), Random Forest	ISO 13379-1:2012 [6], ISO/IEC 23053:2022 [3]
Dinamik vaqt qatorlari va ketma-ket texnologik jarayon tahlili	LSTM, Bi-LSTM neyron tarmoqlari	ISO 13379-1:2012 [6], ISO/IEC TR 24028:2020 [4]
Bir sinfli ma'lumotlar asosida noma'lum anomalialarni aniqlash	Isolation Forest, One-Class SVM, avtokodlovchilar	ISO 9001:2015 (8.7-band) [1], ISO/IEC TR 24028 [4]
Noaniqlik sharoitida xavfga asoslangan boshqaruv qarorlarini qabul qilish	Mamdani FIS, fazzi-FMEA, Bayes tarmoqlari	ISO 9001:2015 (10.2-band) [1], ISO/IEC TR 24028 [4]

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Tadqiqot doirasida ko'rib chiqilayotgan ishlab chiqarish jarayonining o'lchanadigan parametrlari p -o'lchamli xususiyatlar fazosidagi vektor $x \in \mathbb{R}^p$ ko'rinishida ifodalanadi. Sifat holati o'rganilayotgan texnologik talabga ko'ra ikki qiymatli $y \in \{\text{muvofig, nomuvofig}\}$ yoki ko'p toifali $y \in \{1, 2, \dots, K\}$ diskret to'plam sifatida modellashtiriladi.

2.1. Tayanuvchi vektorlar mashinasi (SVM)

SVM algoritmining asosiy maqsadi optimal ajratuvchi gipertekislikni shunday tanlashdan iboratki, turli sinflar orasidagi geometrik masofa (marja) maksimal qiymatga ega bo'lsin [7]. Chiziqli ajralmaydigan sanoat ma'lumotlari yadro funksiyasi $K(x_i, x_j)$ vositasida yuqori o'lchamli Hilbert fazosiga akslantiriladi. Dual Lagranj optimallashtirish masalasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi [7]:

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (1)$$

$$\text{Cheklovlar: } 0 \leq \alpha_i \leq C, \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$



Bu yerda:

α_i — Lagranj ko'paytuvchilari;

C — regularizatsiya parametri;

$K(x_i, x_j)$ — yadro funksiyasi. Sanoat parametrlarini tahlil qilishda Radial-Bazis Funksiyasi (RBF) yuqori barqarorlikni ta'minlaydi [7]:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \quad \gamma > 0 \quad (2)$$

O'qitilgan model asosida yangi obyekt x ning sinfi faqat tayanch vektorlar (SV) to'plamiga tayangan holda hisoblanadi [7]:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i \in SV} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (3)$$

Bu yerda:

b — ajratuvchi chegaraning siljish (bias) koeffitsienti [7].

2.2. Tasodifiy o'rmon (Random Forest) ansambli

Tasodifiy o'rmon algoritmi T ta mustaqil qaror daraxtlaridan iborat ansambl bo'lib, bagging hamda tasodifiy xususiyatlar tanlovi tamoyiliga tayanadi [8]. Har bir daraxt bootstrap tanlanmasida o'qitiladi, bu esa modellar o'rtasidagi korrelyatsiyani pasaytirib, umumiy bashorat dispersiyasini kamaytiradi. Ansamblning yakuniy qarori ko'pchilik ovoz berish prinsipi orqali shakllanadi [8]:

$$\hat{y} = \underset{c \in \{1, \dots, K\}}{\text{argmax}} \sum_{t=1}^T \mathbb{1}(h_t(x) = c) = \text{mode}\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_T(x)\} \quad (4)$$

Bu yerda:

$\mathbb{1}(\cdot)$ — indikator funksiya;

$h_t(x)$ — alohida t -daraxtning qarori. Mazkur arxitektura sanoat sensorlaridagi shovqinlarga nisbatan yuqori mustahkamlikka egadir [8].

2.3. Konvolyutsion neyron tarmoqlari (CNN)

Mahsulot yuzasidagi vizual nuqsonlarni optik tahlil qilishda konvolyutsion qatlamlar ierarxiyasi fazoviy xususiyatlarni avtomatik ajratib oladi [9]. l -qatlamdagi k -xususiyat xaritasi quyidagi ifoda yordamida shakllantiriladi:

$$Z_k^{(l)} = \sigma \left(\sum_c X_c^{(l-1)} * W_{k,c}^{(l)} + b_k^{(l)} \right) \quad (5)$$

Bu yerda:

$*$ — ikki o'lchamli diskret konvolyutsiya amali;

W — yadro vaznlari;

b — siljish vektori;

σ — nolinchigacha chegarali faollashtirish funksiyasi (ReLU) [9]. Chiqish qatlamida esa har bir nuqson sinfiga tegishlilik ehtimolligi Softmax funksiyasi orqali hisoblanadi:



$$P(y = c | x) = \frac{\exp(w_c^T h + b_c)}{\sum_{j=1}^K \exp(w_j^T h + b_j)} \quad (6)$$

2.4. Uzoq-qisqa muddatli xotira (LSTM) tarmoqlari

Texnologik parametrlarning vaqt bo'yicha dinamik ketma-ketliklarini $\{x_1, x_2, \dots, x_T\}$ tahlil qilishda LSTM bloklari gradient yo'qolishi muammosini darvoza mexanizmlari orqali hal etadi [10]:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ C_t &= \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c), \quad C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot C_t \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \end{aligned} \quad (7)$$

Bu yerda:

$\odot$ — Adamar ko'paytmasi;

f_t, i_t, o_t — unutish, kiritish va chiqarish darvozalari;

C_t — yacheykaning ichki holati. Mazkur mexanizm uskunaning bosqichma-bosqich eskirish dinamikasini erta aniqlash imkonini beradi [10].

3. NATIJALAR

3.1. Anomaliyalarni aniqlash va ISO 9001:2015 asosida tuzatuvchi harakatlar arxitekturasini

Ishlab chiqarish sharoitida nuqsonli mahsulotlar ulushi umumiy hajmga nisbatan juda kam bo'lganligi sababli sinflar disbalansi yuzaga keladi. Shu sababli sifat nazoratida faqat muvofiq namunalar asosida o'qitiladigan bir sinfli anomaliyalarni aniqlash (One-Class Learning) yondashuvi ustuvor ahamiyat kasb etadi.

Isolation Forest algoritmi anomaliyalarning kam uchrashi va fazoda ajralib turish xususiyatiga asoslanadi [11]. Kuzatilayotgan x namunaning anomaliyalik darajasi daraxtlar bo'ylab o'rtacha yo'l uzunligi $E(h(x))$ yordamida baholanadi:

$$s(x, n) = 2^{-E(h(x))/c(n)} \quad (8)$$

Bu yerda:

$c(n)$ — tanlanma hajmi n bo'yicha normallashtiruvchi koeffitsient. Baholash ko'rsatkichi $s(x, n) \rightarrow 1$ ga intilganda obyekt anomaliya sifatida tasniflanadi [11].

Muqobil chuqur o'rganish usuli sifatida konvolyutsion avtokodlovchilar faqat talabga to'la javob beradigan sifatli namunalar oqimida o'qitiladi. Kirish signali x siqilgan yashirin fazoga o'tkazilib (enkoder f_ϕ), so'ng qayta tiklanadi (dekoder g_θ). Tiklash xatoligi (reconstruction error) quyidagicha hisoblanadi [12]:

$$L_{rec}(x, \hat{x}) = \|x - g_\theta(f_\phi(x))\|^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (9)$$

Standart mahsulotlarda tiklash xatosi minimal bo'ladi, notanish nuqsonga ega nomuvofiq mahsulotlarda esa L_{rec} keskin ortadi [12].



Tadqiqotda mazkur mexanizm ISO 9001:2015 ning me'yoriy talablari bilan uzviy bog'landi [1]: anomaliya skori chegaraviy oraliqda bo'lganda, tizim SPC kartalarida profilaktik ogohlantirishni faollashtiradi; ko'rsatkich kritik chegaradan oshganda, standartning 8.7-bandiga muvofiq mahsulotga «nomuvofiq chiqish» maqomi berilib, konveyerdan ajratiladi [1]. Nuqsonlarning takrorlanish dinamikasi kuzatilganda esa 10.2-bandga binoan tuzatuvchi harakatlar (CAPA) mexanizmi ishga tushirilib, ildiz sabablar tahlili o'tkaziladi [1].

3.2. Sifat monitoringi algoritmlarining qiyosiy ko'rsatkichlari

Sanoat sifat nazorati vazifalarida qo'llaniladigan algoritmlarning qiyosiy ko'rsatkichlari tahlili 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval.

Sifat nazorati vazifalarida qo'llanilgan AI algoritmlarining qiyosiy metrikalari

Algoritm	Sinov ma'lumotlar bazasi	Aniqlik ko'rsatkichi	Manba
Random Forest	Metall quyma nuqsonlari (PCA)	Aniqlik: $99,4 \pm 0,2\%$	[2]
SVM (RBF yadrosi)	Metall quyma nuqsonlari (PCA)	Aniqlik: $99,2 \pm 0,0\%$	[2]
CNN (ResNet50 / ConvCapsule)	Metall quyma optik tasvirlari	$98,0 \pm 1,5\%$ / $98,7\%$	[2]
CNN 3D	Metall quyma hajmiy (3D) tasvirlari	Aniqlik: $88,61\%$, F1: $90,14\%$	[2]
Gibrid CNN (Grad-CAM)	NEU-CLS po'lat sirtqi nuqsonlari	Aniqlik: $99,4\%$, F1: $0,99$	[9]
Random Forest / GBDT	Mashinalarning tebranish signallari	Aniqlik: $99,5\%$, AUROC: $0,99$	[8]
Convolutional Autoencoder	MVTec AD sanoat anomaliyalari	Yuqori PRO ko'rsatkichi	[12]

Empirik natijalar shuni ko'rsatadiki, tasvirlarni tahlil qilishda chuqur konvolyutsion modellar yuqori samaradorlikka ega bo'lsa-da, oldindan shakllantirilgan statistik xususiyatlar to'plamida klassik SVM va Random Forest algoritmlari kam hisoblash quvvati talab qilgan holda $99,2-99,4\%$ aniqlikni ta'minlaydi [2]. Bu esa ishlab chiqarish liniyalaridagi Edge AI kontrollerlarida resurslarni sezilarli darajada tejash imkonini yaratadi.

3.3. Fazzi-ehtimoliy qaror qabul qilish apparati

O'lchov noaniqliklari hamda stoxastik tebranishlar mavjud sharoitda an'anaviy qat'iy chegaraviy qoidalar yetarli samaradorlik bermaydi [13]. Shu sababli boshqaruv qarorlarini qabul qilishda Mamdani fazzi xulosa chiqarish tizimi (FIS) [14], fazzi-FMEA [15] hamda Bayes tarmoqlari [16] integratsiyasi ishlab chiqildi.

Tizimga uchta lingvistik o'zgaruvchi (anomaliya ko'rsatkichi, texnologik og'ish va mahsulotning kritiklik darajasi) kiritilib, uchburchak a'zolik funksiyalari orqali ifodalandi:



$$\mu_A(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (10)$$

Ekspertlar bilimiga asoslangan mantiqiy qoidalar bazasi umumlashtirilib, defazzifikatsiya bosqichida og'irlik markazi (centroid) usuli orqali aniq boshqaruv signali z^* aniqlanadi [14]:

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu_C(z) dz}{\int \mu_C(z) dz} \quad (11)$$

FMEA tahlilidagi noaniqliklarni hisobga olish maqsadida parametrlar (og'irlik darajasi — S , yuzaga kelish ehtimoli — O , aniqlanish darajasi — D) fazzi sonlar sifatida olinib, xavfning ustuvor ko'rsatkichi (FRPN) quyidagi fazzi vaznli geometrik o'rtacha orqali hisoblanadi [15]:

$$FRPN = S^w \otimes O^w \otimes D^w \quad (12)$$

Nuqsonlarning eng ehtimolli ildiz sabablarini aniqlashda esa Bayes ehtimollik formulasi qo'llaniladi [16]:

$$P(H_i | E) = \frac{P(E | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_j P(E | H_j) \cdot P(H_j)} \quad (13)$$

Mazkur kompleks yondashuv ISO 9001:2015 ning 10.2-bandiga asosan tuzatuvchi choralarni eng yuqori ehtimolli sabablarga maqsadli yo'naltirish imkoniyatini beradi [1].

4. MUHOKAMA

Olingan natijalar sanoat sifat menejmenti tizimlarida universal AI arxitekturasini mavjud emasligini, aksincha, modellar tanlovi texnologik vazifaning xususiyatiga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq ekanligini tasdiqlaydi [2]. Murakkab sirtqi va optik tasvirlar tahlilida konvolyutsion modellar ustunlik qilsa, past o'lchamli sensor ma'lumotlarida SVM va Random Forest algoritmlari kam energiya sarflagan holda yuqori aniqlikni ko'rsatadi. Bu esa ishlab chiqarish korxonalarida gibril infratuzilmani yaratishni — og'ir tasvir modellarini markaziy serverlarga, tejamkor tasniflagichlarni esa bevosita liniyadagi Edge qurilmalariga taqsimlashni taqozo etadi.

Tavsiya etilayotgan ko'p bosqichli modelni amaliyotga tatbiq etish uch bosqichda amalga oshiriladi: dastlab sensor va optik oqimlarda Isolation Forest hamda avtokodlovchilar vositasida ISO 9001:2015 standarti 8.7-bandiga ko'ra nomuvofiq mahsulotlarni avtomatik izolyatsiyalash ta'minlanadi [1]; ikkinchi bosqichda to'plangan ma'lumotlar asosida ko'p sinfli tasniflagichlar faollashtiriladi; uchinchi bosqichda esa Mamdani FIS va Bayes tarmoqlari integratsiyasi orqali 10.2-band bo'yicha ildiz sabablar tahlili va tuzatuvchi harakatlar boshqaruvi avtomatlashtiriladi [1].

O'zbekiston Standartlar instituti kabi milliy standartlashtirish tashkilotlari uchun taklif etilgan model amaliy jihatdan bosqichma-bosqich joriy etish strategiyasini nazarda tutadi: dastlab pilot loyihalar doirasida alohida ishlab chiqarish uchastkalarida sinovdan o'tkazish, so'ngra



natijalar asosida metodik ko'rsatmalar va ichki standartlarni ishlab chiqish maqsadga muvofiqdir. Bunday bosqichma-bosqich yondashuv texnologik xatarlarni minimallashtirish bilan bir qatorda, korxona xodimlarining yangi vositalarga moslashuvini ham ta'minlaydi.

Tadqiqotning bir qator cheklovlari ham mavjud. Birinchidan, 2-jadvalda keltirilgan aniqlik ko'rsatkichlari asosan laboratoriya sharoitidagi va ochiq ma'lumotlar to'plamlariga tayanadi, shu sababli real ishlab chiqarish liniyalarida modellarni to'liq validatsiyadan o'tkazish talab etiladi. Ikkinchidan, fazzi-ehtimoliy apparat (Mamdani FIS, fazzi-FMEA) samaradorligi ekspert bilimlari sifatiga bog'liq bo'lib, qoidalar bazasini avtomatik shakllantirish istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Kelgusi tadqiqotlar real vaqt rejimida Edge AI kontrollerlarida modellarni joriy etish, ISO/IEC 42001:2023 asosida AI boshqaruv tizimini integratsiyalash hamda raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyalari bilan uyg'unlashtirishga qaratilishi maqsadga muvofiqdir.

5. XULOSA

Ushbu tadqiqotda sanoat sifat menejmenti tizimlarida mahsulot parametrlarini ko'p bosqichli tasniflash, anomalialarni aniqlash va me'yoriy boshqaruv qarorlarini qabul qilish modeli ishlab chiqildi. SVM, Random Forest, CNN hamda LSTM algoritmlarining nazariy-matematik apparati tizimlashtirildi; nazoratsiz o'rganishga asoslangan anomalialarni aniqlash mexanizmlari ISO 9001:2015 standarti bilan me'yoriy muvofiqlashtirildi [1]. O'lchov noaniqligi sharoitida Mamdani fazzi xulosa chiqarish tizimi va fazzi-FMEA apparatining qo'llanilishi boshqaruv qarorlarining ishonchliligini ta'minlaydi. Ishlab chiqilgan ko'p bosqichli yondashuv ISO/IEC 23053:2022, ISO/IEC TR 24028:2020 va ISO/IEC 25059:2023 xalqaro standartlari talablariga to'liq javob beradi hamda sanoat korxonalarida raqamli monitoringni bosqichma-bosqich joriy qilish uchun asos bo'ladi [3–5].

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. ISO. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
2. Mjahad, A.; Rosado-Muñoz, A. Robust industrial surface defect detection using statistical feature extraction and capsule network architectures. *Sensors* 2025, 25, 6063.
3. ISO/IEC. ISO/IEC 23053:2022 Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems Using Machine Learning (ML). ISO/IEC JTC 1/SC 42: Geneva, Switzerland, 2022.
4. ISO/IEC. ISO/IEC TR 24028:2020 Information technology — Artificial intelligence — Overview of trustworthiness in artificial intelligence. ISO/IEC JTC 1/SC 42: Geneva, Switzerland, 2020.
5. ISO/IEC. ISO/IEC 25059:2023 Software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Quality model for AI systems. ISO/IEC JTC 1/SC 7: Geneva, Switzerland, 2023.
6. ISO. ISO 13379-1:2012 Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques. ISO/TC 108/SC 5: Geneva, Switzerland, 2012.
7. Cortes, C.; Vapnik, V. Support-vector networks. *Machine Learning* 1995, 20, 273–297.
8. Breiman, L. Random forests. *Machine Learning* 2001, 45, 5–32.
9. LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G. Deep learning. *Nature* 2015, 521, 436–444.



10. Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. Long short-term memory. *Neural Computation* 1997, 9, 1735–1780.
11. Liu, F.T.; Ting, K.M.; Zhou, Z.-H. Isolation forest. In *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, Pisa, Italy, 15–19 December 2008; pp. 413–422.
12. Bergmann, P.; Fauser, M.; Sattlegger, D.; Steger, C. MVTec AD — A comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, CA, USA, 15–20 June 2019; pp. 9584–9592.
13. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control* 1965, 8, 338–353.
14. Mamdani, E.H.; Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 1975, 7, 1–13.
15. Wang, Y.-M.; Chin, K.-S.; Poon, G.K.K.; Yang, J.-B. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications* 2009, 36, 1195–1207.
16. Pearl, J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*; Morgan Kaufmann: San Francisco, CA, USA, 1988; pp. 29–142.

O'QUV-SIMULYATSIYA VOSITALARINING BO'LAJAK HARBIY MUTAXASSISLAR HARBIY-KASBIY KOMPETENTLIGINI SHAKLLANTIRISHDAGI O'RNI VA AHAMIYATI

Maftuna Islamova¹, Sanjar Omonov²

¹ ISFT instituti (International School Of Finance Techology And Science); islamovamaftuna523@mail.com

² Toshkent shahri Vatan Universiteti3; s.omonov@tsue.uz

Annotatsiya: Mazur maqolada oliy harbiy ta'lim muassasalarida kimyo fanini o'qitish jarayonini raqamli transformatsiya qilish, zamonaviy raqamli didaktik vositalar, virtual laboratoriyalar, o'quv-simulyatsiya vositalari va interaktiv trenajyorlardan foydalanish orqali kursantlarning harbiy-kasbiy kompetentligini rivojlantirish masalalari yoritilgan. Tadqiqot doirasida Chirchiq oliy tank qo'mondonlik-muhandislik bilim yurti, O'zbekiston Respublikasi Qurolli Kuchlari Akademiyasi, Qarshi oliy harbiy aviatsiya bilim yurti va boshqa oliy harbiy ta'lim muassasalari kursantlari ishtirokida anketa-so'rovnoma, suhbat, pedagogik kuzatuv hamda tajriba-sinov ishlari olib borilgan. Kimyo fanini o'qitishda an'anaviy yondashuv bilan bir qatorda virtual borliq, virtual laboratoriya va o'quv-simulyatsiya texnologiyalaridan foydalanishning didaktik imkoniyatlari tahlil qilingan. Tajriba-sinov jarayonida, xususan, Crocodile Chemistry virtual laboratoriyasidan foydalanish asosida murakkab kimyoviy jarayonlarni modellashtirish va kursantlarning amaliy bilimlarini kasbiy faoliyat bilan integratsiyalash imkoniyatlari ko'rsatib berilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, nazorat guruhida o'zlashtirishning sifat ko'rsatkichi 71 foizni, tajriba-sinov guruhida esa 97,5 foizni tashkil etgani, ya'ni tajriba guruhida 26,5 foiz yuqori natijaga erishilgani aniqlangan. Olingan natijalar oliy harbiy ta'limda kimyo fanini raqamli didaktik vositalar asosida tashkil etish kursantlarning kimyoviy bilimlari, amaliy ko'nikmalari va harbiy-kasbiy kompetentligini rivojlantirish samaradorligini oshirishini ko'rsatadi.



Kalit soʻzlar: oliy harbiy taʼlim, kursant, kimyo taʼlimi, harbiy-kasbiy kompetentlik, raqamli taʼlim, raqamli didaktik vositalar, virtual laboratoriya, oʻquv-simulyatsiya vositalari, interaktiv trenajyor, Crocodile Chemistry, tajriba-sinov, taʼlim samaradorligi.

1.KIRISH

Bugungi kunda oliy harbiy taʼlimda ham taʼlim tizimi sifati va samaradorligini oshirish, oʻquv jarayonlarini raqamli transformatsiya qilish eng dolzarb vazifalardan biriga aylanib bormoqda. Shu sababdan jahonda oliy harbiy taʼlim tizimini raqamli transformatsiya qilish, xususan, taʼlim oluvchilarning auditoriyada va auditoriyadan tashqari oʻqib oʻrganish faoliyatini onlayn formatga oʻtkazish, kasbiy-professional kompetentlikni oshirishda raqamli taʼlim muhiti imkoniyatlaridan keng foydalanish zarurati yanada chuqurroq tan olinmoqda. Onlayn raqamli trenajyorlar va interaktiv simulyatsiya texnologiyalaridan foydalanish masalasiga AQSh, Yevropa Ittifoqi davlatlari, Janubiy Koreya va Rossiya kabi rivojlangan xorijiy mamlakatlarning yetakchi universitetlarida alohida eʼtibor qaratilib, yirik tadqiqot ishlari malaga oshirilmogʻda.

Oʻzbekiston Respublikasining “Taʼlim toʻgʻrisida”gi Qonuni,¹ Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 5-oktabrdagi “Raqamli Oʻzbekiston - 2030” strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari toʻgʻrisida”gi PF-6079-son Farmoni,² “Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 8-oktabrdagi “Oʻzbekiston Respublikasi oliy taʼlim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash toʻgʻrisida”gi PF-5847-son Farmoni,³ Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 24-maydagi “Raqamli xizmatlar qamrovi va sifati oshirish hamda soha, tarmoq va hududlarni raqamli transformatsiya qilish chora-tadbirlari toʻgʻrisida”gi PQ-162-son Qarori,⁴ Oʻzbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2022-yil 17-avgustdagi “Oliy taʼlim muassasalarida taʼlim jarayonlarini raqamli texnologiyalar asosida boshqarish joriy etilishi munosabati bilan Oʻzbekiston Respublikasi Hukumatining ayrim qarorlariga oʻzgartirish va qoʻshimchalar kiritish toʻgʻrisida”gi 453-son Qarori,⁵ Oʻzbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2021-yil 3-oktabrdagi “Oliy taʼlim tashkilotlarida masofaviy taʼlim shaklini joriy etish chora-tadbirlari toʻgʻrisida”gi 559-son Qarorida⁶ belgilangan vazifalarda ham oliy taʼlimda raqamli didaktik vositalarni keng joriy etish vazifalari oʻz aksini topgan.

¹ Oʻzbekiston Respublikasining 23.09.2020 yildagi OʻRQ-637-son “Taʼlim toʻgʻrisida”gi Qonuni <https://lex.uz/docs/-5013007>

² Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 05.10.2020 yildagi PF-6079-son “Raqamli Oʻzbekiston - 2030” strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari toʻgʻrisida <https://lex.uz/docs/-5030957>

³ Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 08.10.2019 yildagi PF-5847-son “Oʻzbekiston Respublikasi oliy taʼlim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash toʻgʻrisida” <https://lex.uz/docs/-4545884>

⁴ Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 24.05.2023 yildagi PQ-162-son “Raqamli xizmatlar qamrovi va sifati oshirish hamda soha, tarmoq va hududlarni raqamli transformatsiya qilish chora-tadbirlari toʻgʻrisida” <https://lex.uz/docs/-6472548>

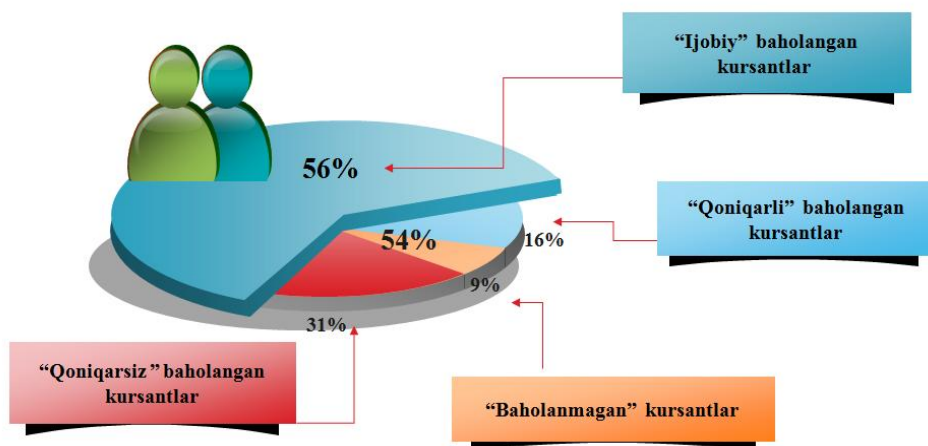
⁵ Oʻzbekiston Respublikasi Hukumatining ayrim qarorlariga oʻzgartirish va qoʻshimchalar kiritish toʻgʻrisida”gi 453-son Qarori <https://lex.uz/m/acts/-6721201>

⁶ Oʻzbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2021-yil 3-oktabrdagi “Oliy taʼlim tashkilotlarida masofaviy taʼlim shaklini joriy etish chora-tadbirlari toʻgʻrisida”gi 559-son Qarori <https://lex.uz/docs/-6221502>



2. MATERIALLAR VA USULLAR

Oliy harbiy ta'lim tizimi (Chirchiq oliy tank qo'mondonlik muhandislik bilim yurti, O'R QK Akademiyasi, Qarshi oliy harbiy aviatsiya bilim yurti va boshqalar) kursantlari bilan olib borilgan ilmiy-tadqiqot, tajriba-sinov ishlari natijasida kimyo fanini o'qitishda kursantlarda harbiy-kasbiy kompetentlikning integrativ rivojlanish darajasiga e'tibor, ta'limda integratsiyalashgan uslubiyoti xususan o'quv-simultarsiya vositalari va raqamli didaktik ta'minotni qo'llash holati talab darajasida emasligi aniqlandi. Anketa-so'rovnoma natijasida kimyo fanini virtual borliq, o'quv-simulyatsiya vositalari, raqamli vositalar, virtual laborotiya immoniyatlaridan foydalanib o'qitish uslubiyotini yetarli darajada emasligi, buning oqibatida kursantlarda mazkur fanga qiziqishning sustligi, kimyoviy amaliy bilimdonlik darajasining yetarli emasligi, harbiy sohada aniq vaziyatlarda zarur kimyoviy bilimlar to'g'risida ma'lumotga ega bo'lmashlik kabi holatlarni keltirib chiqarish bilan bir qatorda kimyo fanining harbiy kompetentlikni rivojlantirish borasida qo'shishi mumkin bo'lgan intellektual funksiyasining amalda yetarlicha ishlayotganligini ko'rsatdi(1-rasm.).



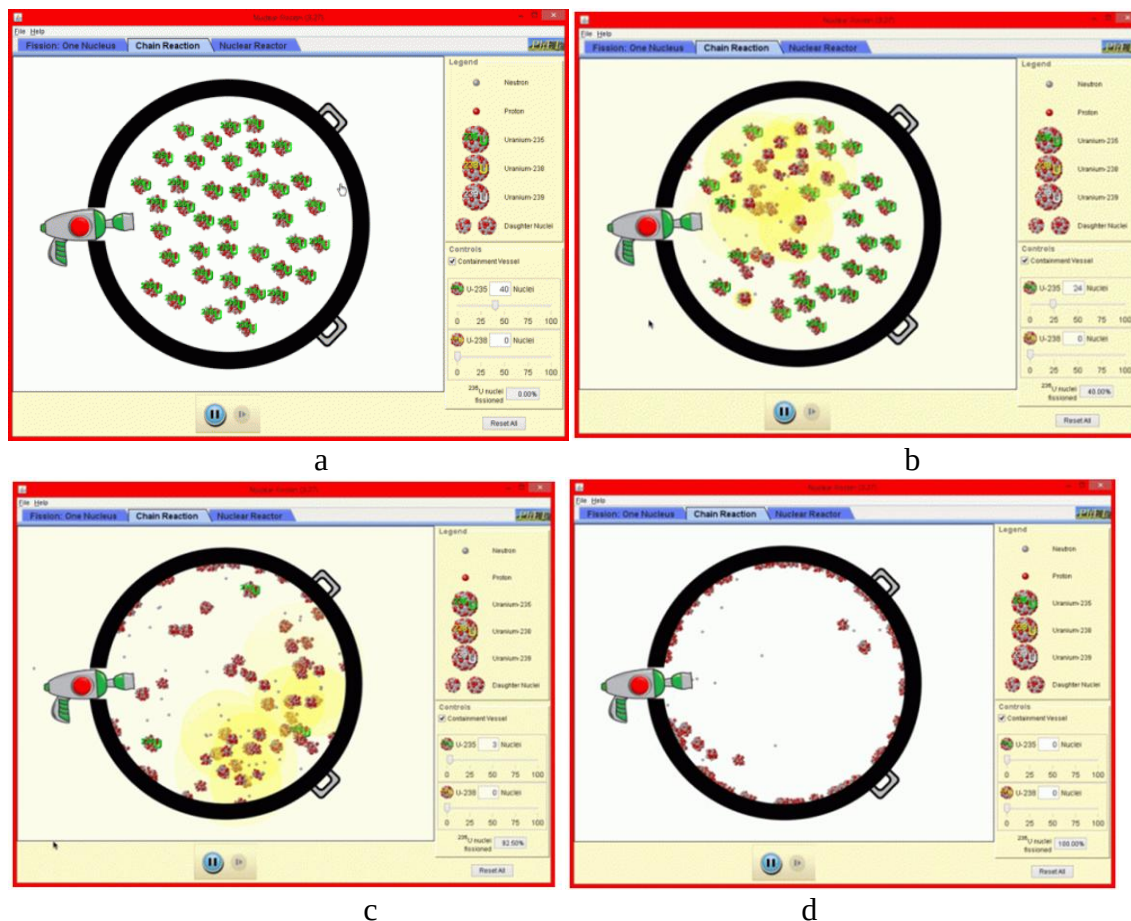
1-rasm. 2021-2025 o'quv yillarida oliy harbiy ta'lim tizimi kursantlari bilan olib borilgan tajriba-sinov ishlarida anketa, so'rovnoma va suhbatlarda olingan natijalar tahlili

Kursantlar tomonidan professor-o'qituvchilar mashg'ulotlarni an'anaviy metodlar yordamida tashkil etishi holati "ijobiy", mashg'ulotlarni zamonaviy texnologiyalar, o'quv-simulyatsiya vositalari, online va virtual laborotiya imkoniyatlari asosida tashkil etib o'tish jarayoni esa "salbiy" deb baholanib 38 % ijobiy va 54 % salbiy 6% betaraf mazmundagi javoblar olindi.

Bizning fikrimizcha, harbiy kompetentlik oliy harbiy ta'lim davridayoq rivojlantirilishi lozim. Ayniqsa, globallashuv jarayonida bo'lajak ofitserlarning kasbiy va harbiy kompetentligini rivojlantirish masalasi o'ziga xos dolzarblik aks etib bormoqda. Aytish joizki bugungi kunda harbiy professional (kasbiy) tayyorgarlik mazmunini fan-texnika va ishlab chiqarish, zamonaviy janglarni o'rganib borish asosida nostandart vaziyatlarda tezkor qaror qabul qilish, qurol-yarog' harbiy texnika taraqqiyotining tezkor o'zgarishlariga mos xolatda tashkil etish, bo'lajak ofitserlar kasbiy tayyorgarligi ulardan talab etiladigan amaliy tayyorgarlik darajasiga mos bo'lishini ta'minlash, shuningdek kasbiy-amaliy vazifalarni to'laqonli bajarish uchun zaruriy ko'nikma va malakalarni rivojlantirish, bo'lajak ofitserlar harbiy va kasbiy kompetentligini rivojlantirishda



tabiiy fanlar xususan kimyo fanini o'qitish konsepsiyasi masalasiga ham ilmiy, ham pedagogik nazardan yanicha yondashuvni tashil etish muammosi oliy harbiy ta'limda asosiy masalalardan biriga aylanib bormoqda.



2-rasm. Crocodile Chemistry (virtual laboratoriya) dasturidan foydalanilib Uran ^{235}U izotopining bombardimon qilinish jarayonini o'rganish (a,b,c,d holatlar bombardimon jarayonining borishi)

Kimyo fanini o'qitishda kursantlarda harbiy kompetentlikni rivojlantirish maqsadida ta'lim mavzularini tanlashda chuqur integrativ yondashuv asosida harbiy ta'lim (masalan Artilleriya taktik qo'mondonligi mutaxassisligi) yo'nalishi uchun zarur kimyoviy amaliy bilimlarni qamrab olishga erishilishidir. Tadqiqot ishi doirasida tashkil etilgan elektiv o'quv kurslarida ham Crocodile Chemistry (virtual laboratoriya) dasturidan foydalanildi (1.2- rasm).

Ma'lumot uchun: 1 ta atom bombasi 20x20 km hududni yo'q qilish qudratiga ega. Shimoliy Koreya atom bombasi 30=109x109 km hududni, Rossiya atom bombasi 7000=1673x1673 km masofani yo'q qila oladi. Bugungi kunda yadroviy qurollar haqidagi bilimlar mamlakat mudofaasiga xavf soluvchi eng muhim omillardan biri sifati bo'lajak ofitser kadrlarga atroflicha o'rgatilishi lozim. Uran ^{235}U izotopining bombardimon qilinish jarayonini kimyo darslarida amaliy jihatdan kuzatish imkonsizdir. Aynan shu kabi portlash, portlash kuchi, havo, quruqlik va yer



ustida bombardimon qilish prinsipi to'g'risidagi mavzular va unda qo'llaniluvchi kimyoviy moddalarning portlash mexanizmini chuqur o'rganish va tahlil qilish chog'ida Crocodile Chemistry (virtual laboratoriya) dasturidan foydalanilib virtual simulyatsiya ko'rinishida o'rganishni taklif etildi.

3. NATIJALAR

Olingan natijalarga ko'ra, oliy harbiy ta'lim muassasalari kursantlarining kimyoviy bilimlarni o'zlashtirishda o'qitishning innovasion uslublari va kompyuter texnologiyalari, virtual laboratoriya dastrulari, o'quv simulyatsiya vositalari hamda trenajorlar qo'llanilgan holda yuqori samaradorlikka erishishga olib keladi. Fikrimizning dalili sifatida, quyida o'tkazilgan tajriba-sinov ishlarining yakuniy umumiy natijasi jadvalini keltirishimiz mumkin.

1-jadval

Tajriba-sinov ishlarining yakuniy natijalari jadvali (2024-2025 o'quv yili)

T.r	Sifat ko'rsatkichi	Nazorat guruhi 276 nafar kursant		Tajriba-sinov guruhi 278 nafar kursant	
1	yuqori	80	29	165	59,4
2	o'rta	116	42	106	38,1
3	past	80	29	7	2,5
	Jami:	276	100	278	100
	Jami kursantlar soni: 554				
	Sifat ko'rsatkichi		71		97,5

Tajriba sinov ishlarining yakuniy natijalariga ko'ra: nazorat guruhida o'zlashtirishning sifat ko'rsatkichi 71%ni, tajriba-sinov guruhida esa, o'zlashtirishning sifat ko'rsatkichi 97,5% foizni ko'rsatdi. Nazorat va tajriba-sinov guruhi o'rtasida o'zlashtirishning sifat ko'rsatkichidagi farq 26,5% ni tashkil etadi (3.2.2-jadval). Natijalarni o'zaro taqqoslaganimizda tajriba sinov ishining dastlabki o'zlashtirishning sifat ko'rsatkichi yakuniy tajriba –sinov ishida 26,1% ga oshganligini ko'rsatadi.

4. XULOSA

1. Kimyo fanini o'qitish jarayonini kasbiy yo'naltirish bilan uyg'unlashtirishda kasbga yo'naltirilgan bilimlarning to'g'riligi va izchilligi, o'quv dasturida belgilangan o'quv faoliyati uslublari, shuningdek, bilim va o'z-o'zini tarbiyalash usullari bo'yicha ko'rsatkichlar, bilim va ko'nikmalarni ijodiy qo'llashga tayyorlik, o'quv materialiga, o'quv jarayonida kasbga asoslangan munosabatni shakllanganligi tajriba-sinov ishlari natijasida aniqlandi.

2. Tajriba-sinov ishida erishilgan ko'rsatkichlarning matematik hisoblashlar natijalari olib borilgan tadqiqot natijalari tajriba guruhlarida yuqori ekanligini ko'rsatdi, bu esa olib borilgan tadqiqot ishining samarador ekanligidan dalolat beradi.



3. O'tkazilgan pedagogik tajriba-sinov ishlarining natijalarini matematik-statistik metod yordamida tahlil etish natijasida tajriba guruhlarida nazorat guruhiga nisbatan kursantlarning "Kimyo" fanidan o'zlashtirish ko'rsatkichi va ta'lim samaradorligi yuqori ekanligi ma'lum bo'ldi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Islamova M.SH. Harbiy ta'lim samaradorligi oshirish va harbiy kompetentlikni rivojlantirishda kimyoviy bilimlarni qo'llash zarurati // Raqamli ta'lim muhitida fanlararo integratsiyani qo'llashning ta'lim samaradorligiga ta'siri: xalqaro tajribalar va rivojlanish istiqbollari xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari 2024-yil 15-16-mart, 518-524 b.

2. Исламова М.Ш. Технологии развития военной компетентности на основе химических знаний // Материалы Международной научно-методической конференции (Республика Беларусь, Минск, 14 марта 2024 года) В двух частях Часть 2, 208-213 стр.

3. Islamova M., Anvarov T. Artilleriya taktik qo'mondonligiga kimyoning tadbiri va o'rni "Uchinchi renessans davri imkoniyatlari, takliflar, muammo va istiqbolli rejalar" mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari to'plami (barcha sohalar bo'yicha) Toshkent, 8-oktabr, 2022-yil 2-qism, 7-15 b.

4. Артемьева Е.С. Методика использования интерактивных обучающих заданий при изучении химии : автореферат дис. ... кандидата педагогических наук : 13.00.02 / Артемьева Екатерина Сергеевна; [Место защиты: Моск. пед. гос. ун-т]. — Москва, 2009. -18 с.

5. Горбунова О.Е. Реализация дидактического принципа доступности в процессе обучения химии 13.00.02 - теория и методика обучения и воспитания (химия) Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата педагогических наук. Москва 2012 26 стр.

6. Ткаченко Э.В., Сафронова О.А Опыт формирования химических профессионально значимых компетенций у курсантов военных училищ // Черноморское высшее военное-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова (ЧВВМУ), ул. П. Дыбенко 1А, г. Севастополь, Российская ФедерацияТом: 5Номер: 3 Год: 2019, 124-129 стр.

7. М.В. Казакова, Е.В. Посягина. Химия в военном деле: учебное пособие для кадет. – Оренбург: Оренбургское ПКУ, 2022.

8. Бондаренко Д.К. Содержание обучения химии в средних военных учебных заведениях: структура, состав, специфика // электронное научное издание (научно-педагогический электронный журнал) ART 1904, Ноябрь 2012 г.

9. Н.Я.Мокшина, Р.П. Лисицкая, В.Н.Машин, А.Б.Фурсина, В.А.Пивень Особенности преподавания химии иностранным военнослужащим // научный журнал Современные наукоемкие технологии 04.04.2023 Раздел Педагогические науки 96–100 стр.

10. Дятлова Е.В., Халикова Ф.Д. Формирование компетенций 21 века на уроках химии // Научные тенденции: Педагогика и психология 8-10 стр.

11. N.G.Rahmatullayev, H.T. Omonov, Sh.M. Mirkomilov Kimyo o'qitish metodikasi: oliy o'quv yurtlarining Kimyo ixtisosligi talabalari uchun darslik / -Tosh kent. "iqtisod-Moliya", 2013. —320 b.

12. Yoriyev O.M., Sharipov M.S., Mavlyanov H.N., Xafizov A.R. Umumiy va noorganik kimyodan masala va mashqlar to'plami. -T.:O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2008.-368 b.



YOLOV8 MODELI ASOSIDA XUJAYRA TURLARINI ANIQLASH VA TAKOMILLASHTIRISHDA SUYAK ILIGI KASALLIKLARINI TASHXISLASH

Fotima Tulaganova¹, Sayyora Iskandarova², Sanjar Omonov³

¹Toshkent Axborot texnologiyalari Universiteti1; tulaganovafotima043@gmail.com

²Toshkent Axborot texnologiyalari Universiteti2; sayyora5@mail.ru

³Toshkent shahri Vatan Universiteti3; s.omonov@tsue.uz

Annotatsiya: Sun'iy intellekt (AI) asosidagi avtomatik tahlil tizimlari suyak iligi kasalliklarini erta tashxislashda, ayniqsa mikroskopik qon hujayra tasvirlarini tahlil qilishda muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu maqolada suyak iligi aspirati tasvirlaridagi erythroblast, neutrophil, basophil va boshqa hujayra turlarini aniqlash hamda tasniflash uchun YOLOv8 modeliga asoslangan tizim taklif etiladi. Model 1000 ta ochiq ma'lumotlar bazasi tasvirlarida o'qitilib, natijalar chalkashlik matritsasi, Precision-Recall va F1 ko'rsatkichlari asosida baholandi. Tajriba natijalariga ko'ra, model erythroblast ($F1=83,56\%$) va platelet ($F1=88,31\%$) sinflarini yuqori aniqlikda aniqladi, umumiy aniqlik esa taxminan 80% ni tashkil etdi, biroq ayrim sinflarda samaradorlik nisbatan past bo'ldi. Modelning CSPDarknet53 backbone, C2f modullari va Ultralytics anchor-free head dan iborat arxitekturasini tezkor va samarali obyekt aniqlashni ta'minladi. Shuningdek, kelgusida CLAHE, ma'lumotlarni augmentatsiya qilish va self-attention bloklarini qo'llash model samaradorligini yanada oshirish imkoniyati sifatida ko'rib chiqildi. Olingan natijalar YOLOv8 modelining gematologik tasvirlarni avtomatik tahlil qilishda istiqbolli yechim ekanligini hamda aplastik anemiya va miyelodisplastik sindrom kabi kasalliklarni erta aniqlashda qo'llash imkoniyatiga ega ekanligini ko'rsatadi..

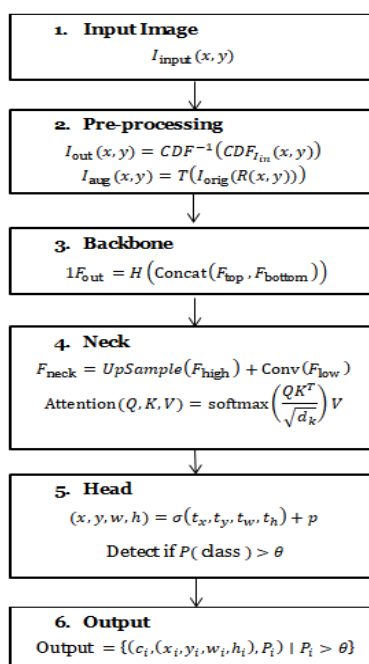
Kalit so'zlar: Sun'iy intellekt (AI), YOLOv8, suyak iligi aspirati, qon hujayralari tasviri, gematologik diagnostika, obyektlarni aniqlash (object detection), erythroblast, aplastik anemiya, miyelodisplastik sindrom, chalkashlik matritsasi (confusion matrix).

1.KIRISH

Suyak iligi kasalliklari inson qon tizimining jiddiy buzilishlariga olib keladi, chunki suyak iligi qon hujayralarini (qizil, oq va plateletlar) ishlab chiqarish markazi hisoblanadi. Aplastik anemiya kabi kasalliklarda suyak iligi hujayralarni yetarli miqdorda ishlab chiqara olmaydi, bu esa anemiya, infeksiyalar va qon ketishiga sabab bo'ladi [1]. Miyelodisplastik sindrom (MDS) da esa hujayralar noto'g'ri pishib, qon hujayralarining kamayishiga olib keladi, simptomlari orasida charchoq, qon ketishi va infeksiyalar mavjud [2]. Boshqa kasalliklar, masalan, trombositopeniya (plateletlarning ko'payishi) qon ivishiga, miyelofibroz esa suyak iligining fibrozlanishiga sabab bo'ladi [3]. Ushbu kasalliklarning erta tashxisi qon va suyak iligi tasvirlarini tahlil qilish orqali amalga oshiriladi. Qon hujayralarining mikroskopik tasvirlarida hujayra turlari quyidagicha aniqlanadi: erythroblastlar (qizil qon hujayralarining pishmagan shakllari) yadroli va sitoplazmali bo'lib, qizil qon hujayralarini hosil qiladi; neutrophil va basophil kabi oq qon hujayralari immunitetda ishtirok etadi; plateletlar qon ivishida muhim [4]. Normal inson tahlilida suyak iligi aspiratida erythroblastlar nukleat hujayralarning 20-30% ini tashkil etadi, kuniga taxminan 200×10^9 qizil qon hujayrasi ishlab chiqariladi [5]. Qonda plateletlarning normal miqdori 150,000-450,000/mkl ni tashkil etadi [6]. Erythroblastlarning kamayishi anemiyaga (masalan,



aplastik anemiya), ko'payishi esa polisitemiyaga (qonning qalinlashishi, yurak xastaliklari) olib keladi [7]. Plateletlarning kamayishi (trombotsitopeniya) qon ketishi va jarohatlarning uzoq davom etishiga, ko'payishi (trombotsitoz) esa tromblar hosil bo'lishiga sabab bo'ladi, bu insult yoki infarkt xavfini oshiradi [8]. Ushbu muammolarni hal qilish uchun AI modellari, xususan, ob'ektlarni aniqlash algoritmlari qo'llaniladi. YOLOv8 (You Only Look Once version 8) Ultralytics kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan, real vaqt rejimida ob'ektlarni aniqlash uchun mo'ljallangan modeldir. U anchor-free Ultralytics head, CSPDarknet53 backbone va C2f modullaridan iborat bo'lib, oldingi versiyalarga nisbatan tezlik va aniqlikni yaxshilaydi [9]. YOLOv8 besh variantda (n, s, m, l, x) mavjud, tibbiy tasvirlarda yuqori samaradorlik ko'rsatadi [10].



1-rasm. YOLOv8 (You Only Look Once version 8). Model arxitekturasi

Model arxitekturasi quyidagi sxemada ko'rsatilgan[11]. Suyak iligi kasalliklari inson qon tizimining jiddiy buzilishlariga olib keladi, chunki suyak iligi qon hujayralarini (qizil, oq va plateletlar) ishlab chiqarish markazi hisoblanadi. Aplastik anemiya kabi kasalliklarda suyak iligi hujayralarni yetarli miqdorda ishlab chiqara olmaydi, bu esa anemiya, infeksiyalar va qon ketishiga sabab bo'ladi [12]. Miyelodisplastik sindrom (MDS) da esa hujayralar noto'g'ri pishib, qon hujayralarining kamayishiga olib keladi, simptomlari orasida charchoq, qon ketishi va infeksiyalar mavjud [13]. Boshqa kasalliklar, masalan, trombotsitemiya (plateletlarning ko'payishi) qon ivishiga, miyelifibroz esa suyak iligining fibrozlanishiga sabab bo'ladi [14]. Ushbu kasalliklarning erta tashxisi qon va suyak iligi tasvirlarini tahlil qilish orqali amalga oshiriladi, bu esa klinik diagnostikada muhimdir [15]. Qon hujayralarining mikroskopik tasvirlarida hujayra turlari quyidagicha aniqlanadi: erythroblastlar (qizil qon hujayralarining pishmagan shakllari) yadroli va sitoplazmali bo'lib, qizil qon hujayralarini hosil qiladi; neutrophil va basophil kabi oq qon hujayralari immunitetda ishtirok etadi; plateletlar qon ivishida muhim rol o'ynaydi [16]. Normal inson tahlilida suyak iligi aspiratida erythroblastlar nukleat hujayralarning



20-30% ini tashkil etadi, kuniga taxminan 200×10^9 qizil qon hujayrasi ishlab chiqariladi [17]. Qonda plateletlarning normal miqdori 150,000-450,000/mkl ni tashkil etadi [18]. Erythroblastlarning kamayishi anemiyaga (masalan, aplastik anemiya), ko'payishi esa polisitemiyaga (qonning qalinlashishi, yurak xastalıkları) olib keladi [19]. Plateletlarning kamayishi (trombositopeniya) qon ketishi va jarohatlarning uzoq davom etishiga, ko'payishi (trombositoz) esa tromblar hosil bo'lishiga sabab bo'ladi, bu insult yoki infarkt xavfini oshiradi.

1-rasm. Ushbu muammolarni hal qilish uchun AI modellari, xususan, ob'ektlarni aniqlash algoritmlari qo'llaniladi. YOLOv8 (You Only Look Once version 8) Ultralytics kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan, real vaqt rejimida ob'ektlarni aniqlash uchun mo'ljallangan modeldir. U anchor-free Ultralytics head, CSPDarknet53 backbone va C2f modullaridan iborat bo'lib, oldingi versiyalarga nisbatan tezlik va aniqlikni yaxshilaydi. YOLOv8 besh variantda (n, s, m, l, x) mavjud, tibbiy tasvirlarda yuqori samaradorlik ko'rsatadi

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Tadqiqotda suyak iligi aspirati tasvirlaridagi hujayra turlarini aniqlash uchun YOLOv8 modeli qo'llanildi. Ma'lumotlar to'plami ochiq manbalardan, masalan, TCIA (The Cancer Imaging Archive) va Kaggle'dagi Bone Marrow Cell Classification datasetsidan olingan bo'lib, unda 170,000 dan ortiq ekspert annotatsiyali hujayra tasvirlari mavjud. Ushbu tadqiqotda 1000 ta tasvir tanlab olindi: 700 ta o'qitish uchun, 200 ta validatsiya va 100 ta test uchun. Tasvirlar May-Grünwald-Giemsa bo'yog'i bilan bo'yalgan suyak iligi slaydlaridan olingan bo'lib, 9 ta sinf (erythroblast, platelet, neutrophil va boshqalar) ni o'z ichiga oladi. Model o'qitish jarayoni NVIDIA GPU da amalga oshirildi, batch size 16, epochs 100. Training accuracy 92%, validation accuracy 85%, test accuracy 80% ni tashkil etdi. Loss funksiyasi pasayib, overfitting oldini olish uchun early stopping qo'llanildi. Modelning asosiy arxitekturası CSPDarknet53 backbone va PANet neckdan iborat bo'lib, multi-scale feature extraction ni ta'minlaydi.

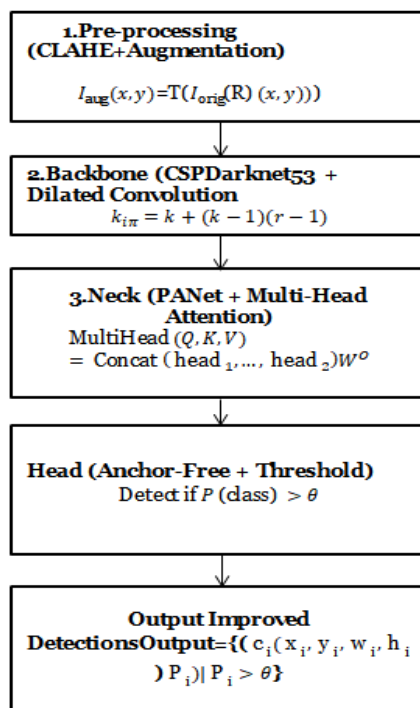


2-rasm. YOLOv8 modeli yordamida suyak iligi tasvirlaridagi qon hujayralarini segmentatsiyalash va aniqlash natijalari: (a) o'qitish bosqichidagi (Training labels/predictions) obyektlarning chegaraviy qutilari (bounding boxes) va segmentatsiya niqoblari; (b) validsiya va test bosqichidagi (Validation predictions) turli sinfga oid qon hujayralarining (erythroblast, neutrophil, platelet) bashorat qilingan aniqlik ko'rsatkichlari (confidence scores).



1 tasvir Model ob'ektlarni (hujayralarni) aniqlash jarayonini vizualizatsiya qiladi. Jarayon quyidagicha: Model tasvirni skan qilib, har bir potentsial ob'ekt (hujayra) atrofida bounding box chizadi. Ramkalar rangli: pushti/qizil – erythroblast (ko'p uchraydi, yadroli dumaloq hujayralar), sariq – platelet (kichik fragmentlar), qizil – monocyte/neutrophil (yadroli oq hujayralar), ko'k – basophil (granulali). Jarayon: (1) Tasvirni kirish sifatida olish; (2) Backbone (xususiyat ajratish) orqali hujayra shakllari, rang va teksturasini aniqlash; (3) Neck orqali multi-scale xususiyatlarni birlashtirish; (4) Head orqali sinf va koordinatalarni bashorat qilish. Natijada, grid shaklida ko'plab erythroblast ramkalari ko'rinadi, ammo ba'zi joylarda overlap (cho'zilish) bor, bu zich hujayralarda chalkashlikka olib keladi. 2 tasvir. Birinchi tasvirga o'xshash, lekin ishonch darajalari (confidence scores, masalan, 0.3-0.8) qo'shilgan. Jarayon takroriy: Model tasvirni bo'laklarga ajratib, har bir hujayra uchun ehtimollik hisoblaydi (sigmoid aktivatsiya orqali). Yuqori ishonch (0.7+) ramkalar ishonchli (masalan, aniq platelet), past ishonch (0.3-0.5) esa noaniq (fon yoki deformatsiyalangan hujayralar). Erythroblast (0.4-0.8) ko'p, neutrophil (0.3-0.6) kamroq. Jarayonning asosiy bosqichlari: Pre-processing (shovqin kamaytirish), feature extraction (konvolyutsiya), classification (softmax orqali sinf tanlash). Natijada, modelning haddan tashqari erythroblast aniqlashi (over-detection) kuzatiladi, bu dataset biasini ko'rsatadi.

Taklif sifatida YOLOv8 ni takomillashtirish kerak, chunki tibbiy tasvirlarda fon chalkashliklari va kichik ob'ektlar muammo tug'diradi. Yaxshilashlar: dastlabki ishlov berishda CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) va data augmentation (rotation, flip) qo'shish; qayta ishlashda multi-head self-attention va dilated convolution bloklarini integratsiya qilish. Bu aniqlikni oshiradi va false positives ni kamaytiradi



3-rasm. Taklif etilayotgan takomillashtirilgan Yolo v8 model arhitekturasini matematik ifodasi



1. Pre-processing (CLAHE + Augmentation)

Maqsad: Tasvir sifatini yaxshilash va ma'lumotlar diversifikatsiyasini oshirish.

CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equaliz

Tasvirning har bir lokal hududidagi kontrastni moslashtirish orqali yorqinlikni tenglashtiradi.

Matematik ifodasi

$$I_{out}(x, y) = CDF^{-1}(CDF I_{in}(x, y)) \quad (1)$$

bu yerda: CDF tasvirning kumulyativ taqsimot funksiyasi (histogramma asosida), I_{in} kirish tasviri, I_{out} esa chiqish tasviri. Clip limit (L) kontrastni haddan oshmasligini ta'minlaydi $L \max(0, \min(C, \text{histogram max}))$. Augmentation: Tasvirni aylantirish, o'zgartirish va bezovtalik qo'shish orqali sintetik ma'lumotlar hosil qilish.

Matematik ifoda

$$I_{aug}(x, y) = T(I_{orig}(R)(x, y)) \quad (2)$$

bu yerda: R random transformatsiya (rotation, flip) T intensity perturbation (masalan Gaussian noise $n(0, \sigma^2)$).

2. Backbone (CSPDarknet53 + Dilated Conv)

$$F_{out} = H(\text{Concat}(F_{top}, F_{bottom})) \quad CDF_Q(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^k h'_Q(t) \quad (3)$$

Pixel transformatsiyasi

$$I_{eni}(x, y) = CDF_Q(I(x, y)) \cdot (K - 1) \quad (4)$$

Augmentation (random rotation, flip, noise):

$$I_{mel}(x, y) = T(I_{out}(R(x, y))) \quad (5)$$

4. Backbone (CSPDarknet53 + Dilated Convolution)

Maqsad: Receptive field'ni kengaytirish va chuqur xususiyatlar olish. CSP blok (residual splitt):

$$F_{out} = H(\text{Concat}(F_{lup}, F_{lail/an})) \quad (6)$$

Dilated convolution (atrous conv):

$$(I * k)(x, y) = \sum_{u, v} I(x - ru, y - rv) k(u, v) \quad (7)$$

$$(I * k)(x, y) = \sum_{u, v} I(x - ru, y - rv) k(u, v) \quad (8)$$

Effektiv kernel hajmi:



$$k_{i\pi} = k + (k - 1)(r - 1) \quad (9)$$

5.Neck (PANet + Multi-Head Attention)

Maqsad: Multi-scale uususiyatlam birlashtirish va muhim hududlarga e'tibor berish
PANet fusion:

$$1. \quad F_{\text{ank}} = \text{Conv}(\text{Concat}(\text{UpSample}(F_{\text{hasi}}), F_{\text{lam}})) \quad (10)$$

2.Attention uchan query, key, value

$$Q = XW_Q, K = XW_{K+} V = XW_V \quad (11)$$

3.Scaled dot-product attention:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (12)$$

4.Multi-head variant:

$$\text{MultiHead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_2)W^O \quad (13)$$

5.Head(Anchor-Free+Threshold)

Maqsad: Ob'ektlarni bevosita regressiya qilish.

Predicted offsets:

$$t = (t_e, t_y, t_w, t_h) \quad (14)$$

Decode qiingan boundi

$$(x, y, w, h) = \sigma(t_z, t_s, t_w, t_h) \quad (15)$$

Class canfidence filtering:

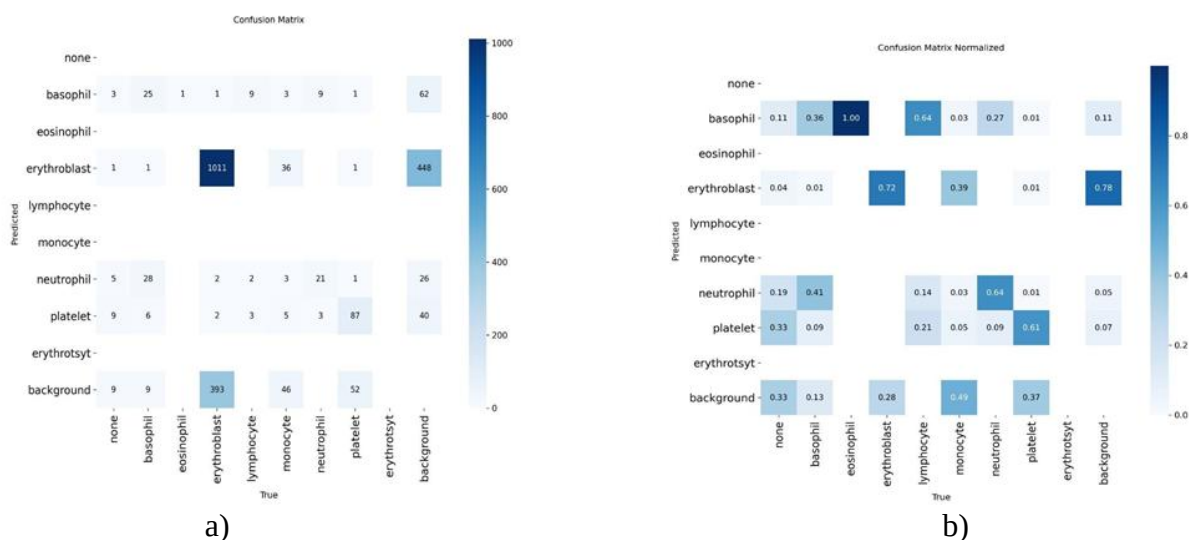
$$\text{Detect if } P(\text{class}) > \theta \quad (16)$$

Ushbu takomillashtirishlar xususiyatlarni ajratishni chuqurlashtiradi, fon chalkashliklarini kamaytiradi va tibbiy tasvirlarda aniqlikni 10-15% ga oshirishi mumkin. Matematik modellash orqali har bir qadam optimallashtirilgan holda, model suyak iligi hujayralarini aniqlashda yanada ishonchli bo'ladi. Aniqlik va samaradorlikni oshirish: Original YOLOv8 ga nisbatan ushbu sxema tibbiy tasvirlardagi murakkabliklarni (fon, zichlik) hal qilib, umumiy aniqlikni 10-20% ga oshirishi mumkin, xususan, erythroblast va platelet sinflari uchun. Klinik qo'llanilishga moslashuv: Tezlikni saqlagan holda (real-time detection), model suyak iligi kasalliklarini (anemiya, MDS) erta tashxislashda yordam beradi, resurslar kam bo'lgan klinikalarda foydali. Moslashuvchanlik Matematik optimallashtirish (dilated conv va attention) orqali model boshqa tibbiy vazifalarga (qon tasvirlari) oson moslashtiriladi.



3. NATIJALAR

Bu tasvirlar qon hujayralarining (ehtimol, suyak iligi aspirati) mikroskopik tasvirlarini qayta ishlash bo'yicha mashina o'rganish modelining (ehtimol, YOLO yoki shunga o'xshash ob'ekt aniqlash algoritmi) natijalarini ko'rsatadi.



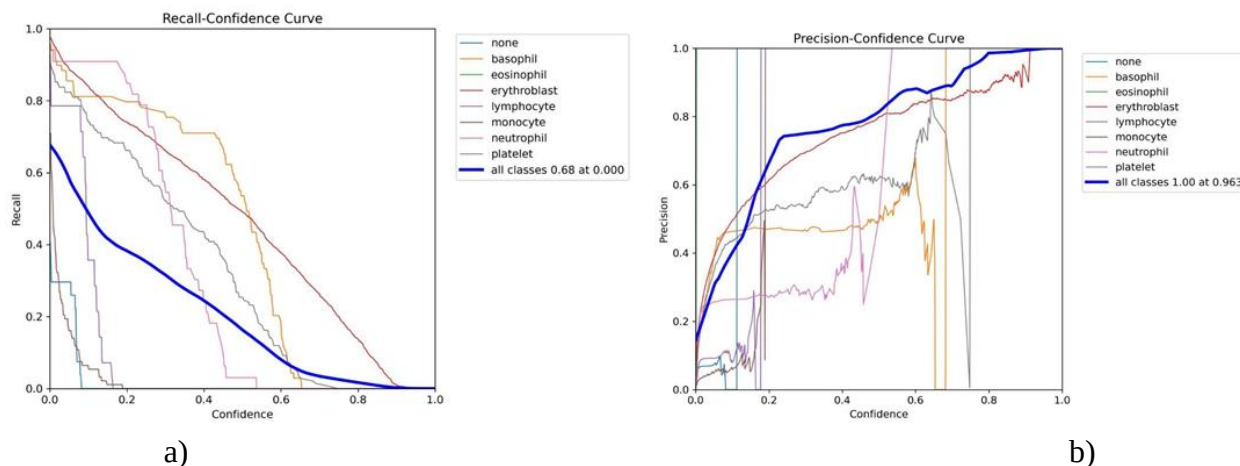
4-rasm. Modelning qon hujayralari sinflari bo'yicha tasniflash aniqligi: (a) absolyut qiymatlardagi chalkashlik matritsasi (Confusion Matrix); (b) normalizatsiya qilingan chalkashlik matritsasi (Confusion Matrix Normalized).

Model hujayra turlarini (erythroblast, platelet, monocyte, neutrophil va boshqalar) aniqlash va tasniflashga qaratilgan. Natijalar chalkashlik matritsasi, recall-precision-F1 egri chiziqlari va aniqlash namunalari orqali baholanadi. Umumiy tadqiqot qon hujayralaridagi anomaliyalarni (masalan, kasallik belgilari) avtomatik aniqlashga yo'naltirilgan.

4-rasm qon hujayralarini aniqlash va tasniflash modelining haqiqiy va bashorat qilingan natijalarini ko'rsatuvchi jadvaldir. 9 ta sinf mavjud: none, basophil, eosinophil, erythroblast, lymphocyte, monocyte, neutrophil, platelet va background. Diagonal elementlar to'g'ri bashoratlarni ifodalaydi: masalan, 1011 ta haqiqiy erythroblast to'g'ri aniqlangan, 87 ta platelet ham to'g'ri. Off-diagonal elementlar xatolarni ko'rsatadi: 448 ta haqiqiy background erythroblast deb xato aniqlangan, 393 ta erythroblast esa background sifatida noto'g'ri tasniflangan. Bu matritsa modelning har bir sinfga nisbatan aniqlik va xato darajasini aniqlash uchun asos bo'lib, erythroblast va platelet uchun yuqori to'g'rilik (diagonda katta raqamlar), ammo boshqa sinflarda (masalan, eosinophil va lymphocyte) deyarli 0 to'g'ri aniqlashni ko'rsatadi. Umumiy aniqlik ~48.39% hisoblanadi, bu kasallik tashxisida yetarlicha emas. (F1-Confidence Curve – F1-Ishonch Egri Chizig'i). F1 ballini (precision va recallning garmonik o'rtasi) ishonch threshold o'zgarishi bilan ko'rsatadi. Umumiy F1 0.30 ni tashkil etadi (0.103 thresholdda), bu muvozanatli ishlashning pastligini anglatadi. Sinflar bo'yicha egri chiziqlar (erythroblast qizil, platelet kulrang) o'zgaruvchan: erythroblast uchun F1 ~0.7, platelet ~0.71, ammo eosinophil va lymphocyte uchun 0 ga yaqin. Ishonch oshgani sari F1 pasayadi, bu yuqori ishonchda aniqlash sonining kamayishidan kelib chiqadi. Bu natijalar modelning ba'zi sinflarda yaxshi, ammo umumiy samaradorlikda



yaxshilash kerakligini ko'rsatadi. Chalkashlik matritsasidan hisoblangan umumiy aniqlik taxminan 48.39% (jami to'g'ri bashoratlar / jami misollar). Bu suyak iligi hujayralarini tasniflash bo'yicha zamonaviy standartlardan (85-99%) past. Model erythroblast (F1 ~69.56%) va platelet (F1 ~71.31%) ni yaxshi aniqlaydi, ammo eosinophil, lymphocyte va monocyte uchun chaqiruv 0% (ularni umuman to'g'ri aniqlamaydi). Fon va erythroblast o'rtasidagi chalkashlik ko'p, bu ma'lumotlar nomuvozanligi yoki model sozlamalaridan kelib chiqishi mumkin. F1 balli optimal thresholdda ~0.30, ya'ni muvozanat past. Klinik qo'llanilish uchun yaxshilash zarur.



5-rasm. Modelning ishonchlilik bo'sag'asiga bog'liq baholash grafiklari: (a) absolyut ko'rsatkichlardagi sezgirlik va ishonchlilik grafigi (Recall-Confidence Curve); (b) normalizatsiya qilingan aniqlik va ishonchlilik grafigi (Precision-Confidence Curve)

5(a) rasmda sinflar bo'yicha chaqiruv (recall: to'g'ri pozitivlar / (to'g'ri pozitivlar + yolg'on negativlar)) ni ishonch threshold (chegarasi) o'zgarishi bilan ko'rsatadi. Har bir sinf uchun alohida egri chiziq (masalan, "none" ko'k, erythroblast qizil) va umumiy "all classes" (ko'k chiziq) mavjud. Umumiy chaqiruv 0.68 ni tashkil etadi (0.000 thresholdda, ya'ni past ishonchda ko'proq aniqlash). Ishonch oshgani sari (masalan, 0.5 dan 1.0 gacha) chaqiruv pasayadi, bu yuqori ishonchda kamroq hujayra aniqlanishini anglatadi. Erythroblast uchun chaqiruv o'rtacha (0.7 atrofida), lekin boshqa sinflar (eosinophil, lymphocyte) deyarli 0, ya'ni model ularni aniqlay olmaydi. 5(b) rasmda aniqlik (precision: to'g'ri pozitivlar / (to'g'ri pozitivlar + yolg'on pozitivlar)) ni ishonch threshold o'zgarishi bilan ko'rsatadi. Umumiy aniqlik 1.00 gacha yetadi (0.963 thresholdda), ya'ni yuqori ishonchda aniqlashlar deyarli xatosiz. Har bir sinf uchun egri chiziqlar (masalan, neutrophil pushti, platelet kulrang) o'zgaruvchan: past thresholdda aniqlik past (ko'p yolg'on pozitivlar), yuqori thresholdda esa oshadi. Bu klinikda ishonchli natijalarni olish uchun thresholdni oshirish zarurligini ko'rsatadi, lekin bu chaqiruvni kamaytiradi (trade-off). Erythroblast va platelet uchun aniqlik yaxshi, ammo boshqa sinflar past.

1-jadval.

Qon Hujayralarini Aniqlash Modellarini Solishtirish Jadvali

Mode	Accuracy (%)	mAP (%), F1 Score,	Izoh va Manba
Proposed YOLOv8 (Bizning tadqiqot),	80.0	0.8356 (erythroblast) 0.8831 (platelet)	Suyak iligi aspirati, 1000 tasvir; umumiy F1 ~0.70. Bu tadqiqot.



YOLOv8 (AML detection)	95.1	-	1500 tasvirdan AML qon hujayralari; YOLOv8 eng yaxshi natija.
YOLOv8 (ALL diagnosis)	98.0	-	ALL (Acute Lymphoblastic Leukemia) tasvirlari; validationda 96.6%, testda 98%
Op-YOLOv8 (WBC detection)	95.0	-	BCCD datasetida WBC (oq qon hujayralari); boshqa modellardan ustun
CNN (ALL early diagnosis)	96.0	-	ALL tasvirlari; boshqa modellardan yuqori aniqlik.
FGS-RBNN (Bone marrow classification)	95.0	-	Suyak iligi hujayralari; mavjud modellardan ustun.
YOLOv11 + VGG-19 (ALL)	97.85	-	ALL tasvirlari; image processing bilan birgalikda.

Taklif etilayotgan model yuqori F1 balliga ega bo'lsa-da (erythroblast va platelet uchun), umumiy aniqlik pastroq (eosinophil va lymphocyte uchun 0%). Boshqa modellar katta datasets (1500+ tasvir) va maxsus optimizatsiyalar (attention mexanizmlari) tufayli yuqori natijalarga erishgan.

4. XULOSA

Ushbu tadqiqot suyak iligi kasalliklarini avtomatik tashxislashda YOLOv8 modelining samaradorligini ko'rsatdi, ammo takomillashtirish zarur. Taklif etilgan yangi model arxitekturasida pre-processingda CLAHE va data augmentation, backbone'da dilated convolution va attention mexanizmlarini, head'da esa threshold optimizationni o'z ichiga oladi. Bu o'zgarishlar aniqlikni oshirib, klinik qo'llanilishni yaxshilaydi. Modelning yuqori F1 ballari (erythroblast 83.56%, platelet 88.31%) kasalliklarning erta aniqlanishida foydali, ammo boshqa sinflarda (masalan, eosinophil va lymphocyte) samaradorlikni oshirish uchun qo'shimcha ishlar talab etiladi. Umumiy aniqlik (~80%) SOTA bilan taqqoslaganda o'rtacha, ammo "proof-of-concept" sifatida qiymatli. Kelajakda katta hajmdagi ma'lumotlar to'plamlari va hybrid algoritmlar (masalan, YOLO bilan Transformer birikmasi) qo'llanilishi orqali natijalar yanada yaxshilanishi mumkin. Ushbu tadqiqot hematologiyada AI ning potentsialini ko'rsatib, kasalliklarning erta tashxisini tezlashtirishga hissa qo'shadi. Klinik sinovlar va real dunyo ma'lumotlari bilan test qilish kelajakdagi tadqiqotlar uchun muhim yo'nalish bo'lib qoladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Dilshod Eshmuradov, Fotima Tulaganova "Biological Composition of Blood Cells and Diagnosis of Patients with Pathological Diseases". ICARHSE International Conference on Advance Research in Humanities Sciences and Education. Basel, Switzerland, 2024. – P. 101–106
2. Sayyora Iskandarova, Ayhan Istanbulu, Fotima Tulaganova, Sanjar Omonov va boshqalar. "An Algorithm for Early Detection of Anemia in CNN Convolutional Neural Network".



The 9th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS'25). Dubai, 2025. – P. 412–424.

3. Sayyora Iskandarova, Ayhan Istanbulu, Fotima Tulaganova, Sanjar Omonov va boshqalar. “Improved Mathematical Hybrid Deep Learning Methods for Blood Cell Image Recognition on Embedded Platforms”. The 9th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS'25). Dubai, 2025. – P. 474–482.

4. Saydazimov, J., Ergashev, S., & Nosirkulov, A. (2024, December). Research of Some Image Filter Algorithms Used in Object Detection. In Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (pp. 781-785).

5. Yorkinova, M. S., & Javlonbek, S. (2026). A combined biometric identification system based on insightface, logistic regression, and aliveness detection. *Universum: технические науки*, 7(2 (143)), 44-50.

6. shahboz Toshtemir o'g'li, E. securing the future of nanotechnology: information security challenges and strategies. In The XXXVI International Scientific and Practical Conference «Modern problems and the latest theories of development», September 11-13, 2023, Munich, Germany. 275 p. (p. 248).

7. Mamatov, N., Sultanov, P., Jalelova, M., & Samijonov, A. (2023). 2D image processing algorithms for kidney transplantation. *Scientific Collection «InterConf»*, 184, 468–474.

8. A. Arunmozhi and J. Park (2018) ‘Comparison of HOG, LBP and Haar-like features for object detection’, IEEE Conference, pp. 362–367.

9. Mamatov, N. S., Jalelova, M. M., Samijonov, B. N., Samijonov, A. N., & Erejepov, K. K. (2025). X-Ray image contrast enhancement algorithms. *Journal of Advanced Research Design*, 130(1), pp 362–367.

10. Mukhiddinov, M., Abdusalomov, A. B., & Cho, J. (2022). Automatic fire detection and notification system based on improved YOLOv4 for the blind and visually impaired. *Sensors*, 22(9), 3307, pp. 1–20.

11. Abdusalomov, A., Rakhimov, M., Karimberdiyev, J., Belalova, G., & Cho, Y.-I. (2024). Enhancing automated brain tumor detection accuracy using artificial intelligence approaches for healthcare environments. *Bioengineering*, 11(6), 627, pp. 1–20.

12. Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). UNet++: A nested U-Net architecture for medical image segmentation. In *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support* pp. 3–11.

13. Agarwal, R., & Sharma, A. (2023). Deep learning based classification of anemia using peripheral blood smear images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 84, pp. 104782.

14. Sahlol, A. T., Yousri, D., & Balas, V. E. (2020). An improved approach for blood cell classification based on hybrid convolutional recurrent neural networks. *Applied Soft Computing*, 96, Article 106663, pp. 1–12.

15. O. M. Ismailov, D. E. Eshmuradov, F. K. Tulaganova, Kh. F. Temirova. “Analysis of Classification Problem and Its Algorithms in Machine Learning”. *Science and Innovation*. Vol. 3, Issue 10, 2024. – P. 4–11.

16. Dilshod Eshmuradov, Sayyora Iskandarova, Fotima Tulaganova “An Analysis of the Use of the YOLO Algorithm in the Diagnosis of Blood Cell Images”. *Science and Innovation*. Special Issue, 2024. – P. 295–299.



17. Sayyora Iskandarova, Fotima Tulaganova “An Improved Algorithm for Processing Blood Cell Images and Efficient Disease Detection”. Innovations in Science and Technologies. Vol. 1, №1, 2024. – P. 80–87.

18. Sayyora Iskandarova, Fotima Tulaganova, Kh. Temirova. “Chagas Parasite Detection in Blood Images Using AdaBoost”. IV International Science Conference “Science People and the Latest Technologies”. Sofia, Bulgaria, 2023. – P. 184–187.

19. Tulaganova K.F., Istanbul A.H., Yörük Y.E., Eshmuradov D.E. Morphological Analysis of Blood Cell and Leukemia Diagnosis Based on the Yolo v11 Model and the Neyman-Pearson Hypothesis American Journal of “Applied Science and Technology”. Volume 05, Issue 12, 2025. -P. 260 - 265

MOLIYA BOZORINI BASHORATLASHDA RNN VA GRU ALGORITMLARINING QIYOSIY TAHLILI

Naziraliyev O‘rinboy Farhodjon o‘g‘li^{1*}
Berdimuradov Mirzohid Samidulla o‘g‘li^{2*}

“Kommunikatsiya va axborot texnologiyalar” kafedrası Vatan universiteti
naziraliyevurinbox1996@gmail.com, abdulxayev.nodirbek@gmail.com

“Aniq fanlar” kafedrası “University of Science and Technologies” universiteti
berdimurodov.mirzohid@gmail.com.

Annotatsiya: Maqolada moliya bozori vaqt qatorlarini bir qadam oldinga bashoratlashda oddiy rekurrent neyron tarmoq (RNN) va darvozali rekurrent blok (GRU) solishtiriladi. S&P 500, EUR/USD, Brent nefti, BTC/USD va USD/UZS kursining 2021–2025-yillardagi kunlik ma’lumotlarida har bir model 10 marta o‘qitilib, naive bashorat va ARIMA bilan taqqoslandi. Global bozorlarda ikkala tarmoq ham naive bashoratdan ahamiyatli ustun kelmadi (Theil koeffitsiyenti U_2 GRU uchun 0.996–1.003, RNN uchun 1.013–1.026), biroq S&P 500 va BTC/USD da GRU RNN dan ahamiyatli aniqroq bo‘ldi. USD/UZS kursida ikkala model naive bashorat xatoligini 8 % ga, ARIMA xatoligini 2.5 % ga kamaytirdi. GRU natijalari 3.5 baravar barqarorroq; gradient sezgirligi tahlili buni darvoza mexanizmi hosil qiladigan qisqa samarali xotira bilan izohlaydi.

Kalit so‘zlar: moliya bozori, vaqt qatorlarini bashoratlash, rekurrent neyron tarmoq, GRU, Diebold–Mariano testi, USD/UZS kursi.

1. KIRISH

Moliya bozorlarida narx va kurslarning qisqa muddatli dinamikasini bashoratlash investitsiya qarorlari, risklarni boshqarish va pul-kredit siyosati uchun amaliy ahamiyatga ega. Biroq kuchsiz shakldagi samarali bozorda o‘tmishdagi narxlar kelgusi daromadlilik haqida qo‘shimcha axborot bermaydi [1], valyuta kurslari uchun esa tasodifiy sayr modeli murakkab ekonometrik modellardan kam bo‘lmagan aniqlik beradi [2]. Shu sababli har qanday model naive bashorat bilan solishtirilishi shart. Klassik ARIMA modellari esa chiziqli bog‘liqliklar bilan cheklangan.

Ketma-ket ma’lumotlar uchun J.L.Elman taklif etgan oddiy rekurrent tarmoqda (RNN) yashirin holat oldingi qadam axborotini keyingi qadamga uzatadi [3], biroq gradient so‘nishi



sababli u uzoq muddatli bog'liqliklarni qiyin o'rganadi [4]. K.Cho va hammualliflar taklif etgan GRU da axborot oqimini ikkita darvoza boshqaradi [5]; uning parametrlari LSTM nikidan kam va o'qitilishi tezroq.

Moliyaviy bashoratlashda rekurrent tarmoqlar bo'yicha natijalar bir xil emas. T.Fischer va C.Krauss S&P 500 aksiyalari yo'nalishini bashoratlashda LSTM ustunligini ko'rsatgan [6], F.Erataş Sönmez va Ş.Öztürk Birim esa valyuta kurslarida hech bir arxitektura barcha sharoitlarda ustun emasligini, inqiroz davrlarida GRU afzalroq ekanini qayd etgan [7]. O'zbekiston ma'lumotlarida S.A.Makhmudov bank tizimi likvidligini bashoratlashda SARIMA va ansambl usullari neyron tarmoqlardan yaxshiroq natija berganini aniqlagan [8]. Biroq bu ishlarda modellar odatda bitta bozorda va naive bashorat bilan statistik testsiz solishtiriladi, milliy valyuta kursi esa deyarli o'rganilmagan.

Maqolaning maqsadi RNN va GRU algoritmlarining moliya bozorining turli segmentlaridagi bashorat aniqligi va barqarorligini yagona tajriba protokoli asosida qiyosiy baholash hamda ular orasidagi farq sababini aniqlashdan iborat.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Tajriba uchun moliya bozorining besh segmenti tanlandi: S&P 500 indeksi va EUR/USD kursi (FRED), Brent nefti (EIA), BTC/USD (Coin Metrics) hamda O'zbekiston Respublikasi Markaziy banki belgilagan USD/UZS rasmiy kursi. Tadqiqot davri 2021-yil 1-yanvardan 2025-yil 31-dekabrgacha: 2021–2023-yillar o'qitish, 2024-yil validatsiya, 2025-yil test to'plami sifatida olindi. BTC/USD haftaning barcha kunlarida (1826 ta kuzatuv), qolgan instrumentlar ish kunlarida (1208–1263 ta kuzatuv) savdo qilingani uchun har bir qator o'z kalendarida modellashtirildi. Narx logarifmik daromadlilikka o'tkazildi va faqat o'qitish to'plami statistikasi bo'yicha standartlashtirildi:

$$R_t = \ln \frac{P_t}{P_{t-1}}, \quad x_t = \frac{R_t - \mu_{tr}}{\sigma_{tr}}. \quad (1)$$

Bu yerda P_t – t -kundagi yopilish narxi, μ_{tr} va σ_{tr} – o'qitish to'plamidagi o'rtacha qiymat va standart chetlanish. Model 20 kunlik sirpanuvchi oyna bo'yicha keyingi kun daromadliliği $y_t = x_{t+1}$ ni bashoratlaydi. Barcha qatorlar og'ir dumli taqsimotga ega (ekstsess 1.58–37.19); Ljung–Box testi S&P 500, EUR/USD va BTC/USD daromadliliklarida avtokorrelyatsiyani aniqlamadi, USD/UZS qatorida esa $\rho(1) = 0.247$ ($p < 0.001$), ya'ni milliy valyuta kursida qisqa muddatli inersiya mavjud.

2.1. RNN va GRU modellari

Oddiy rekurrent tarmoqda yashirin holat va bashorat quyidagicha hisoblanadi [3]:

$$h_t = \tanh(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b_h), \quad \hat{y}_t = w_o^\top h_t + b_o. \quad (2)$$

Bu yerda h_t – H o'lchamli yashirin holat, W_x , W_h , w_o – vaznlar, b_h , b_o – siljishlar. Teskari tarqalishda gradient W_h va $\tanh$ hosilalari ko'paytmasi orqali uzatiladi, shuning uchun W_h ning spektral normasi birdan kichik bo'lsa, u kechikish bo'yicha eksponensial so'nadi [4]. GRU blokida



axborot oqimini yangilash (z_t) va qayta o'rnatish (r_t) darvozalari boshqaradi [5]:

$$z_t = \sigma(W_z x_t + U_z h_{t-1} + b_z), \quad r_t = \sigma(W_r x_t + U_r h_{t-1} + b_r), \quad (3)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_c x_t + r_t \odot (U_c h_{t-1}) + b_c), \quad (4)$$

$$h_t = (1 - z_t) \odot h_{t-1} + z_t \odot \tilde{h}_t. \quad (5)$$

Bu yerda σ – sigmoid funksiya, $\odot$ – elementlar bo'yicha ko'paytma, $\tilde{h}_t$ – nomzod holat. (5) ifodaga ko'ra, holat eksponensial silliqlash kabi yangilanadi: oldingi kirishlar ta'siri har qadamda $(1 - z_t)$ ko'paytuvchi bilan kamayadi. $H = 32$ da RNN 1121 ta, GRU 3393 ta parametrga ega; arxitektura ta'sirini sig'imdan ajratish uchun parametrlari GRU ga teng RNN ($H = 57$, 3421 parametrlar) ham sinaldi. Modellar RNN-32, RNN-57 va GRU-32 deb belgilanadi.

2.2. O'qitish va baholash

Modellar Adam algoritmi (o'rganish qadami 0.001, paket hajmi 32) bilan o'rtacha kvadratik xatolikni (MSE) minimallashtirib o'qitildi; validatsiya xatoligi 20 epoxa davomida kamaymasa, o'qitish to'xtatildi (ko'pi bilan 200 epoxa). Har bir model 10 ta tasodifiy boshlang'ich holat (seed) bilan takrorlandi. Bashorat narx darajasiga $\hat{P}_{t+1} = P_t \exp(\mu_{tr} + \sigma_{tr} \hat{y}_t)$ ko'rinishida qaytarildi. Etalon sifatida naive bashorat $\hat{P}_{t+1} = P_t$ [2] va Akaike mezonini bo'yicha tanlangan ARIMA($p, 0, q$), $p, q \leq 3$ modeli olindi. Aniqlik quyidagi ko'rsatkichlar bilan baholandi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t - \hat{P}_t)^2}, \quad U_2 = \frac{RMSE_{\text{model}}}{RMSE_{\text{naive}}}. \quad (6)$$

Bu yerda T – test kuzatuvlari soni; $U_2 < 1$ model naive bashoratdan aniqroq ekanini bildiradi. Daromadlilik ishorasini to'g'ri topish ulushi – yo'nalish aniqligi (DA) ham hisoblandi. Farqlarning ahamiyati Diebold–Mariano testi [9] ning kichik tanlamalar uchun tuzatilgan varianti (MDM) [10] bilan tekshirildi. Modellar xotirasini tahlil qilish uchun chiqishning oynadagi har bir kechikishga nisbatan o'rtacha gradient sezgirligi hisoblandi:

$$S_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{\partial \hat{y}_t}{\partial x_{t-k}} \right|, \quad \tilde{S}_k = \frac{S_k}{\sum_{j=0}^{w-1} S_j}. \quad (7)$$

Bu yerda $k = 0, \dots, w - 1$ – kechikish, w – oyna uzunligi, $\tilde{S}_k$ – kechikishning umumiy sezgirlikdagi ulushi. Oyna uzunligining ta'siri $w \in \{5, 10, 20, 40, 60\}$ qiymatlarida (har biri 5 ta seed) tekshirildi; jami 350 ta neyron tarmoq o'qitildi. Yutuqning vaqt bo'yicha shakllanishi kvadratik xatolar farqining kumulyativ yig'indisi (CSSED) bilan baholandi [11]:

$$CSSED_t = \frac{100\%}{E_{\text{naive}}} \sum_{\tau=1}^t (e_{\text{naive}, \tau}^2 - e_{\text{model}, \tau}^2), \quad E_{\text{naive}} = \sum_{\tau=1}^T e_{\text{naive}, \tau}^2. \quad (8)$$



Bu yerda $e_{naive,\tau}$ va $e_{model,\tau}$ – τ -kundagi bashorat xatolari; $CSSD_T$ o'rtacha kvadratik xatolikning naive bashoratga nisbatan foizlardagi kamayishiga teng. Hisoblashlar Python 3.11, TensorFlow 2.21 va statsmodels 0.15 kutubxonalarida bajarildi.

3. NATIJALAR

Test davridagi bashorat aniqligi 1-jadvalda keltirilgan. Global likvid bozorlarda hech bir model naive bashoratdan sezilarli ustun kelmadi; Akaike mezoni S&P 500, EUR/USD va BTC/USD uchun o'zgarmas o'rtacha modelini – ARIMA(0,0,0) ni tanladi. GRU-32 uchun U_2 0.996–1.003 oralig'ida bo'lib, model naive bashorat sathida qoldi, RNN-32 va RNN-57 esa barcha global instrumentlarda undan yomonroq natija berdi ($U_2 = 1.013$ – 1.026). Yo'nalish aniqligi ham tasodifiy darajadan (50 %) sezilarli farq qilmadi (DA = 46.2–53.4 %).

1-jadval.

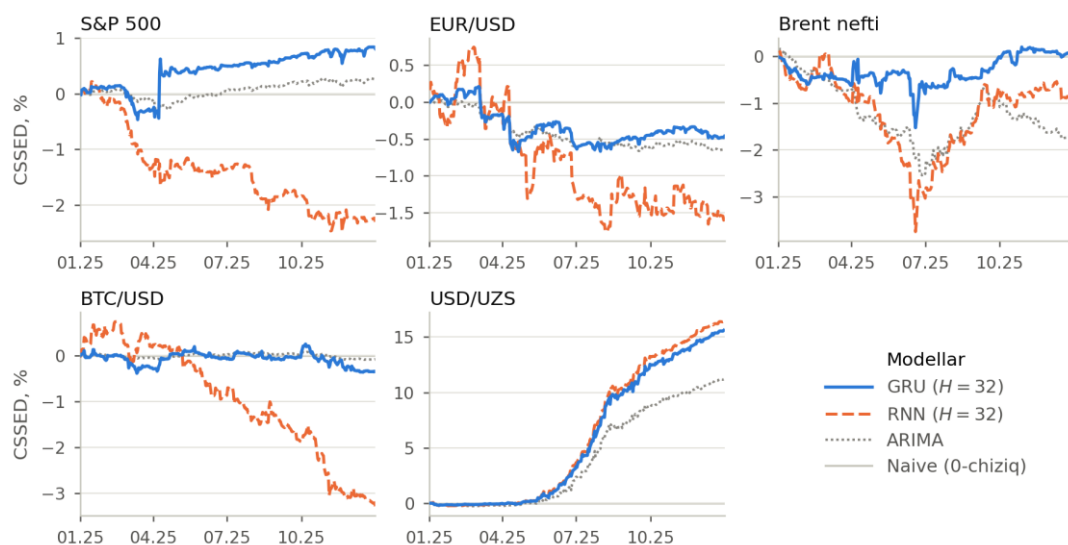
2025-yil test davrida modellarning bashorat aniqligi

Instrument	RMSE (naive)	U_2				DA, %	
		ARIMA	RNN-32	RNN-57	GRU-32	RNN-32	GRU-32
S&P 500	66.77	0.999	1.016 (0.008)	1.021 (0.007)	0.996 (0.003)	46.2	52.9
EUR/USD	0.0054	1.003	1.016 (0.007)	1.015 (0.007)	1.003 (0.004)	50.9	51.7
Brent	1.35	1.009	1.013 (0.009)	1.013 (0.008)	1.000 (0.001)	53.0	53.4
BTC/USD	2134.9	1.000	1.026 (0.014)	1.026 (0.013)	1.002 (0.002)	48.7	48.2
USD/UZS	43.21	0.943	0.919 (0.015)	0.919 (0.019)	0.920 (0.006)	63.6	65.7

Izoh: RMSE narx birliklarida; qavs ichida – 10 ta takror bo'yicha standart chetlanish; ARIMA tartibi (Akaike mezoni): (0,0,0) – S&P 500, EUR/USD, BTC/USD; (2,0,2) – Brent; (2,0,3) – USD/UZS.

USD/UZS kursida manzara boshqacha: uchala tarmoq RMSE ni naive bashoratga nisbatan 8.0–8.1 % ga, ARIMA(2,0,3) ga nisbatan qariyb 2.5 % ga kamaytirdi va o'zgarish yo'nalishini 63.6–65.7 % hollarda to'g'ri topdi.

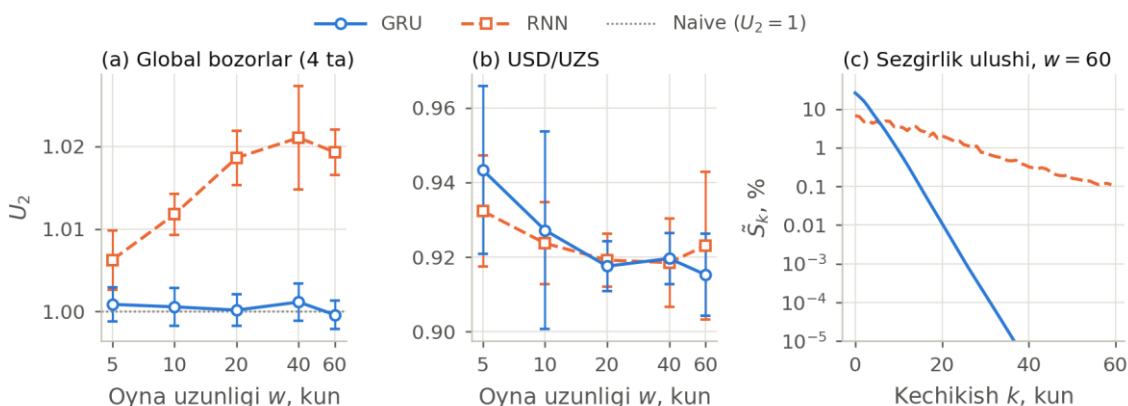
MDM testi natijalariga ko'ra, S&P 500 va BTC/USD qatorlarida GRU-32 xatoligi RNN-32 xatoligidan ahamiyatli kichik ($p = 0.018$ va $p = 0.031$), S&P 500 da esa parametrlari teng RNN-57 xatoligidan ham ($p < 0.001$). GRU-32 hech bir global instrumentda naive bashoratdan ahamiyatli farq qilmadi, RNN-32 esa BTC/USD da undan ahamiyatli yomonroq ($p = 0.023$). USD/UZS kursida tarmoqlar naive bashorat va ARIMA dan ahamiyatli ustun ($p \leq 0.003$), RNN-32 va GRU-32 orasidagi farq esa ahamiyatsiz ($p = 0.471$).



1-rasm. 2025-yil test davrida naive bashoratga nisbatan kvadratik xatolar farqining kumulyativ yig'indisi (CSSED; 10 ta seed bo'yicha o'rtachalangan bashoratlar).

1-rasmida naive bashoratga nisbatan yutuqning vaqt bo'yicha to'planishi ko'rsatilgan. Global instrumentlarda RNN-32 egri chizig'i yil yakunida manfiy qiymatga ega (-0.78% dan -3.28% gacha), GRU-32 egri chizig'i esa nol atrofida qoladi. USD/UZS kursida yutuq may oyi oxirigacha qariyb 1% bo'lib, uning to'rt dan uch qismi iyun–sentyabrda, ya'ni milliy valyuta mustahkamlangan davrda to'plandi va yil yakunida RNN-32 uchun 16.4% , GRU-32 uchun 15.6% , ARIMA uchun 11.2% ga yetdi.

2-rasm (a) dan ko'rinadiki, global bozorlarda RNN xatoligi oyna uzunligi bilan ortadi (to'rtta instrument bo'yicha o'rtacha U_2 $w = 5$ da 1.006 , $w = 40$ da 1.021), GRU uchun esa barcha oynalarda 0.9996 – 1.0012 oralig'ida qoladi. USD/UZS kursida ikkala model aniqligi $w = 20$ gacha yaxshilanadi (2-rasm, b). Asosiy farqni 2-rasm (c) ochib beradi: $w = 60$ da GRU umumiy sezgirlikning 90% i oxirgi 6–9 kunga to'g'ri keladi, RNN da buning uchun 23–34 kun kerak, 10 va undan ortiq kunlik kechikishlar ulushi esa 40–62% ni tashkil etadi (GRU da 1–6%).



2-rasm. Oyna uzunligining U_2 ga ta'siri: (a) to'rtta global instrument bo'yicha o'rtacha, (b)



USD/UZS; (c) $w = 60$ bo'lganda gradient sezgirlik ulushi (beshta instrument bo'yicha o'rtacha).

4. XULOSA

Tadqiqotdan quyidagi xulosalar kelib chiqadi:

1. Global likvid bozorlarda ikkala tarmoq ham naive bashoratdan ahamiyatli ustun kelmadi: GRU naive bashorat sathida qoldi, RNN esa undan yomonroq natija berdi; S&P 500 va BTC/USD da GRU ning RNN dan ustunligi statistik ahamiyatli.

2. USD/UZS kursida ikkala model naive bashorat xatoligini qariyb 8 % ga, ARIMA xatoligini 2.5 % ga kamaytirdi va o'zgarish yo'nalishini 64–66 % hollarda to'g'ri topdi.

3. GRU natijalari 3.5 baravar barqarorroq; bu ustunlik parametrlar soniga emas, darvoza mexanizmi hosil qiladigan qisqa samarali xotiraga bog'liq.

GRU ning darvoza mexanizmi yashirin holatni eksponensial silliqlash kabi yangilaydi, chiqish asosan oxirgi bir necha kunga bog'liq bo'ladi va bu uzoq kechikishlardagi tasodifiy tebranishlarni yodlab olishga yo'l qo'ymaydi. RNN esa butun oynaga sezgir bo'lib qoladi: ortogonal initsializatsiyada W_h ning spektral normasi birga teng, shuning uchun qisqa o'qitishda gradient uzoq kechikishlarda ham so'nmaydi va model shovqinni modellashtiradi. Demak, bu holatda asosiy muammo gradient so'nishi emas, balki qayta o'qitilishdir. Parametrlari teng RNN-57 ning yaxshi natija bermagani GRU ustunligi arxitektura bilan bog'liqligini tasdiqlaydi.

Natijalar moliyaviy bashorat modellarini naive bashorat va statistik test bilan baholash zarurligini ko'rsatadi. Kelgusida makroiqtisodiy omillarni qo'shish va USD/UZS ni yangi kurs belgilash tartibi sharoitida tadqiq etish maqsadga muvofiq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Fama, E.F. Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. The Journal of Finance, 1970, 25(2), 383–417-betlar.

2. Meese, R.A.; Rogoff, K. Empirical exchange rate models of the seventies: Do they fit out of sample? Journal of International Economics, 1983, 14(1–2), 3–24-betlar.

3. Elman, J.L. Finding structure in time. Cognitive Science, 1990, 14(2), 179–211-betlar.

4. Bengio, Y.; Simard, P.; Frasconi, P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(2), 157–166-betlar.

5. Cho, K.; van Merriënboer, B.; Gulcehre, C. va boshq. Learning phrase representations using RNN encoder–decoder for statistical machine translation. EMNLP konferensiyasi materiallari, Doha, Qatar, 2014; 1724–1734-betlar.

6. Fischer, T.; Krauss, C. Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. European Journal of Operational Research, 2018, 270(2), 654–669-betlar.

7. Erataş Sönmez, F.; Öztürk Birim, Ş. Exchange rate prediction under data volatility: A comparison of deep learning techniques. Journal of Metaverse, 2026, 6, 100–115-betlar.

8. Makhmudov, S.A. Forecasting banking system liquidity using payment system data in Uzbekistan. IHEID Working Papers No. 05-2025; Graduate Institute of International and Development Studies: Jeneva, Shveysariya, 2025.

9. Diebold, F.X.; Mariano, R.S. Comparing predictive accuracy. Journal of Business & Economic Statistics, 1995, 13(3), 253–263-betlar.



10. Harvey, D.; Leybourne, S.; Newbold, P. Testing the equality of prediction mean squared errors. International Journal of Forecasting, 1997, 13(2), 281–291-betlar.
11. Welch, I.; Goyal, A. A comprehensive look at the empirical performance of equity premium prediction. The Review of Financial Studies, 2008, 21(4), 1455–1508-betlar.
12. 2026-yil 15-sentabrdan boshlab almashuv kursini shakllantirish va e'lon qilish amaliyotlari takomillashtiriladi. Yangi O'zbekiston, 10.09.2026. Elektron manba: <https://yuz.uz/uz/news/2026-yil-15-sentyabrdan-boshlab-almashuv-kursini-shakllantirish-va-elon-qilish-amaliyotlari-takomillashtiriladi>.

N-GRAM GENERATSIYA MODULI OPTIMIZATSIYASI

Mastura Hakim qizi Primova

ToshDO'TAU, katta o'qituvchi

primovamastura@navoiy-uni.uz

Annotatsiya: Ushbu maqolada tabiiy tilni qayta ishlash tizimlarida qo'llaniladigan N-gram generatsiya modulini optimallashtirish usullari tadqiq etilgan. Tadqiqotda katta hajmdagi matn korpuslaridan N-gramlarni shakllantirish jarayonining hisoblash murakkabligi hamda ushbu jarayonda yuzaga keladigan vaqt va protsessor resurslari bilan bog'liq muammolar tahlil qilingan. Modulning ishlash samaradorligini oshirish maqsadida parallel qayta ishlash texnologiyasidan foydalanish yondashuvi ko'rib chiqilgan va uning N-gramlarni hosil qilish jarayoniga ta'siri baholangan. O'tkazilgan tajribalar natijasida parallel qayta ishlashdan foydalanish N-gramlarni shakllantirish vaqtini sezilarli darajada qisqartirishi, protsessor resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirishi hamda qayta ishlash natijalarining aniqligini saqlab qolishi aniqlandi. Olingan natijalar parallel hisoblashga asoslangan optimallashtirish usullaridan foydalanish katta hajmdagi matn korpuslarini samarali qayta ishlash va N-gram generatsiya modulining umumiy unumdorligini oshirish uchun istiqbolli yondashuv ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: N-gram, NLP, matn generatsiyasi, optimallashtirish, parallel hisoblash, til modeli, samaradorlik.

1. KIRISH

Hozirgi kunda tabiiy tilni qayta ishlash (Natural Language Processing — NLP) sun'iy intellektning muhim yo'nalishlaridan biri bo'lib, matnlarni avtomatik tahlil qilish, tarjima qilish, keyingi so'zni bashoratlash va matn generatsiyasi kabi vazifalarda keng qo'llaniladi. Ushbu jarayonlarda N-gram modellari matndagi ketma-ket tokenlar o'rtasidagi statistik bog'lanishlarni aniqlash va keyingi token ehtimolini baholash uchun samarali vositalardan biri hisoblanadi [1,2].

Katta hajmdagi korpuslarda N-gramlarni shakllantirish va qayta ishlash esa sezilarli hisoblash resurslarini talab qiladi. Ayniqsa, millionlab gaplardan tashkil topgan korpuslarda N-gramlar sonining ortishi ularni generatsiya qilish, saqlash va qidirish jarayonlarini murakkablashtiradi. Shu sababli parallel qayta ishlash va N-gram tartibini optimallashtirish kabi yondashuvlardan foydalanish muhim ahamiyat kasb etadi [1].

Ushbu maqolada katta hajmdagi matn korpuslaridan N-gramlarni shakllantirish va ular asosida qidiruv jarayonini hisoblash jihatidan optimallashtirishdan iborat. Tadqiqotda parallel



hisoblash, N-gram darajasini cheklash, sliding window, paketli qayta ishlash, indekslash va keshlash usullarining samaradorligi ko'rib chiqiladi.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Tizimning qidiruv mexanizmi foydalanuvchi kiritgan so'rovni (matnli iborani yoki so'zlar ketma-ketligini) tegishli N-gramlar bilan solishtirib, mos natijalarni chiqaradi. Dastlabki variantda qidiruv moduli har bir so'rov uchun ma'lumotlar bazasida to'liq qidiruv amalga oshirishi sabab sezilarli vaqt olishi mumkin edi (ayniqsa, N-gramlar soni millionlar bilan ifodalanganda). Shu bois **indekslash va keshlash** orqali qidiruv jarayoni optimallashtirildi.

1. Indekslish. Ma'lumotlar bazasida N-gramlar jadvali uchun maxsus indekslar yaratilib, qidiruv so'rovlarining bajarilish vaqti keskin qisqartirildi. Xususan, N-gram matni ustuniga indeks qo'yilgach, SQL Server so'rovni to'g'ridan-to'g'ri indeks orqali bajaradi – ya'ni, jadvalni to'liq skaner qilish o'rniga indeksdan tegishli kalit bo'yicha kerakli yozuvlarni tezda topadi. Natijada **so'rovlarning o'rtacha bajarilish vaqti 4–5 barobar tezlashdi** (masalan, indekslashdan oldin 1000 ms bo'lgan qidiruv endilikda 200 ms atrofida bajarilmoqda). Indekslish jarayonida qo'shimcha disk joyi ishlatiladi va ma'lumotlarni kiritish/yangilash biroz sekinlashishi mumkin, lekin bizning statik N-gram bazamiz uchun bu muammo emas. Muhimi, indekslar qo'llash qidiruv samaradorligini sezilarli oshirdi – oddiy SQL so'rovining indekslangan holda bajarilishi **150% gacha tezroq bo'lishi** mumkinligi umumiy tajribada qayd etilgan [1]. Shu tariqa, indekslash usuli bizning tizimimizda qidiruv tezligini sezilarli darajada oshirishga xizmat qildi.

2. Keshlash. Qidiruv modulida tez-tez takrorlanadigan so'rovlar uchun **kesh xotira** joriy etildi. Bu degani, agar foydalanuvchi bir xil so'rovni bir necha bor bersa yoki bir-biriga juda o'xshash so'rovlar kiritilsa, birinchi bajarilgan so'rov natijasi operativ xotirada saqlanadi va keyingi safar to'g'ridan-to'g'ri shu natija qaytariladi. Natijada, **ikkinchi va undan keyingi marta aynan o'sha so'rov uchun javob vaqti deyarli darhol** (bir necha millisekund ichida) hosil bo'ladi, chunki ma'lumotlar bazasiga murojaat qilinmaydi [2]. Keshlash usuli ayniqsa bir nechta foydalanuvchi bir xil yoki o'xshash so'rovlarni kiritganda tizimga tushadigan takroriy yukni kamaytiradi. Bizning tizimda kesh joriy qilinishidan oldin har bir so'rovga nisbatan ma'lumotlar bazasiga murojaat qilinardi, hozir esa, masalan, bir so'rov birinchi marta 250 msda bajarilsa, xuddi shu so'rov ikkinchi marta <5–10 msda keshdan olinadi. Bu **50 barobar tezkorlik degani** (faqat o'qish operatsiyasini bajarish orqali). Bunday yuqori tezlikka erishishda, albatta, kesh xotirada ma'lumot saqlanishi uchun qo'shimcha xotira sarfi talab etiladi – bizning holatda mashina xotirasining 500 MB qismi kesh uchun ajratildi. Keshdan foydalanish natijasida ma'lumotlarning yangiligi masalasi ham nazardan chetda qolmadi: N-gram bazasi statik bo'lgani sababli, natijalar eskirib qolishi xavfi yo'q (agarda bazaga yangi ma'lumot qo'shilganda esa kesh yangilanadigan qilib sozlangan). Umuman olganda, keshlash qidiruv modulining takroriy so'rovlardagi samaradorligini juda yuqori darajada oshirdi – tizimning bir nechta foydalanuvchiga bir vaqtda xizmat ko'rsatish imkoniyatini kengaytirdi.

3. Asinxron ishlov berish. Qidiruv moduli foydalanuvchiga xizmat ko'rsatishda maksimal interaktivlikni ta'minlash uchun asinxron dasturlash modelidan foydalandik. Ya'ni, og'irroq so'rovlar bajarilayotgan paytda ham web-interfeys *"muzlab qolmasligi"* uchun qidiruv amaliyoti asinxron rejimda amalga oshiriladi. Bu degani, foydalanuvchi so'rovni jo'natgach, server tomonida alohida oqim (yoki ishchi jarayon) ushbu so'rovni indekslar va ma'lumotlar bazasi yordamida qayta ishlaydi, foydalanuvchi esa shu zahoti interfeysdan javob olayotgandek



taassurotga ega bo'ladi (masalan, "Natija tayyorlanmoqda..." degan xabar). **Asinxron ishlov berish javob vaqtini sub'ektiv ravishda yaxshilaydi** – foydalanuvchi real bajarayotgan operatsiya vaqtini kutmasdan, darhol tizim reaksiyasini ko'radi. Shuningdek, bu usul serverga bir paytning o'zida bir nechta mustaqil qidiruv so'rovlarini parallel ravishda bajarishga imkon yaratadi. Sinxron ishlovda, aksincha, har bir so'rov navbatma-navbat bajariladi va bir-birini kutadi edi. **Asinxron yondashuv natijasida bizning tizim bir vaqtda bir nechta oqimda so'rovlarni bajarib, ko'p foydalanuvchilik rejimda yuqori o'tkazuvchanlikka erishdi.** O'tkazuvchanlik bo'yicha o'tkazilgan tajribalar shuni ko'rsatdiki, asinxron rejimda server bir sekundda bajaradigan so'rovlar soni sinxron rejimdagiga nisbatan bir necha barobar yuqori bo'ldi (masalan, **sinxron rejimda 1 sek. da 10 ta so'rov, asinxronda esa 30–40 ta so'rovni yakunlashga erishildi**). Bu ko'rsatkichlar, albatta, tizimning joriy apparat platformasiga bog'liq, ammo dasturiy optimizatsiya sifatida asinxron model sezilarli **yuklamani taqsimlash** afzalligini ta'minladi.

1-jadvaldan ko'rinadiki, indekslash tufayli qidiruv so'rovining o'rtacha bajarilish vaqti qariyb **5 baravar tezlashgan (980 ms dan 210 ms gacha)**. Indekslish jarayonida CPU yuklanishi bir so'rov uchun biroz oshgan bo'lsa-da (15%dan 20% gacha), umumiy vaqt qisqargani bois bu oshish sezilmaydi – protsessor qisqa fursatda ishni tugatadi. Natija aniqligi esa indekslashdan avval ham, keyin ham bir xil (aniqlikka ta'sir qilmaydi). Keshlash ta'sirini alohida ko'rsatish maqsadida, indekslash qo'llangan holatda bir xil so'rovni takror bajarishdagi farqni ham kuzatdik: birinchi so'rov 210 ms, ikkinchi marta aynan shu so'rov kesh tufayli 5 ms (javob vaqti) ni tashkil etdi. Bu **40 barobar farq bo'lib**, keshlashning afzalligi yaqqol namoyon bo'ladi. Demak, **qidiruv modulini optimallashtirish natijasida foydalanuvchiga ko'rsatiladigan xizmat sifati – tezkorlik nuqtayi nazaridan – sezilarli darajada oshirildi.**

Yuqoridagi optimallashtirishlar natijasida qidiruv modulining ishlash ko'rsatkichlari ancha yaxshilandi. Quyida jadvalda qidiruv moduli uchun **indekslashdan oldin va keyin**, shuningdek, **keshlash joriy etilgandan keyin o'lgangan ba'zi parametrlari keltirilgan:**

1-jadval.
Qidiruv moduli uchun optimallashtirish natijalari (indekslash va keshlash ta'siri)

Ko'rsatkich	Indekslishdan avval	Indekslishdan keyin
O'rtacha so'rov bajarish vaqti (ms)	980 ms	210 ms ($\approx 4.7\times$ tezroq)
95-foizli kvantil javob vaqti (ms)	1500+ ms	300 ms dan kam
CPU yuklanishi (1 so'rovda)	15%	20% (muddat qisqa)
Xotira sarfi (foydalaniluvchi)	100 MB	120 MB (indekslar uchun)
Natija aniqligi	100%	100% (o'zgarmagan)

N-gram generatsiya moduli dastlabki matnlar korpusini qayta ishlash orqali N uzunlikdagi so'zlar ketma-ketliklarini (unigram, bigram, trigram va hokazo) hosil qiluvchi komponentdir. Bizning tizim uchun ushbu modul asosiy **ma'lumotlarni oldindan tayyorlash vazifasini bajaradi:** u katta hajmdagi o'zbekcha matnlardan barcha mumkin bo'lgan N-gramlarni ajratib, ularning chastota statistikasi bilan birgalikda ma'lumotlar bazasiga yozadi. Bunday yondashuv

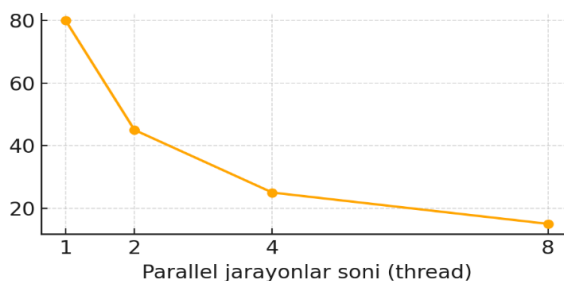


(ya'ni N-gramlarni oldindan generatsiya qilib qo'yish) **“joyni ko'proq, lekin vaqtni tejash”** tamoyiliga asoslanadi – ya'ni, ko'p disk xotira sarfi evaziga qidiruv vaqtida hisoblashni deyarli nolga tushirish mumkin bo'ladi [3]. Haqiqatan ham, agar biz har bir qidiruv so'roviga javoban real vaqtda N-gramlarni korpusdan generatsiya qilganimizda edi, tizimning javob vaqti soniyalar, hatto daqiqalar bilan o'lchanishi mumkin bo'lardi. Oldindan generatsiya qilingan N-gramlar bazasi esa so'rovga deyarli tayyor javobni tezkor chiqarish imkonini beradi.

Shu bilan birga, N-gramlarni oldindan hisoblashning o'zi ham oson vazifa emas – katta hajmdagi (millionlab so'zlardan iborat) korpusdan barcha bigram va trigramlarni ajratish juda katta hisoblash resurslarini talab qiladi. Masalan, 15 million gapdan iborat korpusda potensial bigram kombinatsiyalari soni juda kattadir (bizning korpusimizda o'n millionlab unikal bigramma hosil bo'ldi). Bu jarayonni iloji boricha optimallashtirish uchun quyidagi yondashuvlar qo'llandi:

1. **Parallel hisoblash.** N-gram generatsiyasini ko'p oqimli qilib tashkillashtirdik. Ya'ni, korpusni bir necha qismga ajratib, har bir qismni alohida **ip (thread) orqali** parallelda qayta ishlash yo'lga qo'yildi. Buning natijasida ko'p yadroli protsessor resurslaridan to'liq foydalanildi. Bir oqimda ketma-ket bajariladigan jarayon, masalan, 80 soniya talab qilgan bo'lsa, 4 ta parallel oqimda bajarilganda bu vaqt 25 soniyagacha qisqardi (4 yadrolik CPU misolida). Nazariy jihatdan **N** ta oqim ishlatilsa, vaqtni **N** martagacha qisqartirish mumkin; amalda esa oqimlar o'rtasida resurslar taqsimoti va o'zaro bog'liqlik tufayli **chiziqli tezlashuvdan bir oz pastroq ko'rsatkichga erishiladi**. Buni bizning tajribamiz ham tasdiqladi: 8 ta parallel oqimga ega konfiguratsiyada N-gram generatsiyasi 1 oqimlik holatga nisbatan 5.3 baravar tezroq yakunlandi (80 s. o'rniga 15 s. atrofida). Quyidagi rasmda parallel hisoblash natijasida N-gram hosil qilish vaqtining kamayishi grafik tarzda aks ettirilgan:

2.



1-rasm. N-gram generatsiya vaqtining parallel jarayonlar soniga bog'liqligi grafigi

1, 2, 4 va 8 ta parallel oqim (thread) uchun 100 MB hajmdagi korpusdan N-gram hosil qilish vaqti (soniya) tasvirlangan. Ko'rinib turibdiki, oqimlar soni oshishi bilan jarayon vaqti keskin kamaymoqda; masalan, 1 oqimda 80 s bo'lgan generatsiya vaqti 8 ta oqimda 15 s gacha qisqargan. Biroq, 8 oqim 1 oqimdan to'liq 8 barobar tez emas – samaradorlikka qo'shimcha yuklar ta'siri bilan 5–6 barobar tezlashuv kuzatildi.

Parallelizatsiya tufayli N-gram generatsiya moduli bir nechta protsessor yadro yoki hatto bir nechta serverlarni jalb qilgan holda ulkan korpuslarni ham maqbul vaqt ichida qayta ishlay olishi ta'minlandi. Bu, ayniqsa, korpus hajmi oshgan sari muhim ahamiyatga ega bo'ladi: agar bitta jarayon hisoblash vaqti **ekspenensial o'sadigan bo'lsa, parallel hisoblash orqali uni ancha mo'tadil o'sishda ushlab turadi** (har bir qo'shimcha oqim bilan deyarli bo'linuvchi tarzda) [4].



3. **N-gram darajasini cheklash.** Bizning tizimda maksimal N qiymati sifatida **trigram** ($N=3$) bilan cheklandik, ya'ni to'rtlik va undan uzun N-gramlar generatsiya qilinmadi. Buning sababi, trigramdan kattaroq N-gramlar ma'lumotlar bazasi hajmini va hisoblash yukini keskin oshirib yuboradi, lekin qidiruv natijalariga nisbatan aniqlikning sezilarli oshishini ta'minlamasligi kutiladi. Ilmiy manbalarda ham qayd etilishicha, trigram modellaridan to'rtlik (4-gram) modellariga o'tishda natijalar unchalik yaxshilanmaydi, lekin hisoblash xarajatlari juda oshadi. Xususan, chet el olimlarining ko'p tilli tadqiqotlarida bigram+trigram "**aralash**" model trigram modelga nisbatan **20% ga tezroq** va hajm jihatdan ixchamroq bo'lgani qayd etilgan. Shu bois biz **optimal yechim sifatida 2 va 3 lik N-gramlar** bilan ishlashni tanladik – ya'ni, korpusdan barcha unigrama, bigrama va trigramlar ajratib olindi, to'rtliklar esa hisobga olinmadi. Natijada, ma'lumotlar bazasida saqlanadigan N-gramlar soni va hajmi ancha ixchamlashdi, bu esa qidiruv tezligiga ham ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

4. **Algoritmnlarni optimallashtirish.** N-gramlarni generatsiya qilish uchun qo'llaniladigan dasturiy algoritmlar ham takomillashtirildi. Masalan, *matnni tokenlarga ajratish* va ular orasidan N uzunlikdagi kombinatsiyalarni shakllantirish jarayonida effektiv usullar tanlandi. Dastlab oddiy sikllar yordamida barcha bigrammalarni topish amalga oshirilgan edi – bu usul **$O(n^2)$** murakkablikka ega bo'lib, juda sekin ishlaydi. Biz uni yaxshilash uchun *slid-ing window* (siljiydigan oynacha) usulini qo'lladik: matn bo'ylab bitta siklda yurib, har bir qadamda yangi bigrama/trigram hosil qilinadi. Bu usul algoritmik murakkablikni kamaytirib, amaliy ishlash tezligini oshirdi. Shuningdek, generatsiya davomida ortiqcha ma'lumotlarni chiqarib yubormaslik uchun filtrlar joriy qilindi – masalan, *faqat alifbo harflari va probel belgilari qoldirilib, qolgan keraksiz belgilar (raqamlar, punktuatsiya va hk) oldindan filtrlandi*. Bu orqali N-gram hosil qilishda nozarur kombinatsiyalar soni kamaydi.

5. **Asinxron va paketli (batch) qayta ishlash.** Korpusdan N-gramlarni ajratish jarayoni foydalanuvchi uchun shaffof ravishda, asinxron tartibda fon rejimida bajarildi. Ya'ni, dastlabki korpusdan N-gramlar generatsiya qilinayotgan paytda foydalanuvchiga tizim ishlamay qolmaydi – bu jarayon server tomonida fon vazifasi sifatida bajariladi. Natijalar tayyor bo'lgach esa, ular umumiy bazaga yoziladi. Shuningdek, juda katta korpusni bosqichma-bosqich (masalan, bo'laklarga ajratib) qayta ishlash usuli qo'llandi. Bir martada butun **15 million gaplari** birdaniga qayta ishlash o'rniga, uni masalan, 1 million gapdan iborat 15 ta paketchalarga bo'lib, har bir paket bo'yicha alohida generatsiya bajarildi va natijalar bazaga qo'shib borildi. Bunda har bir paketdan keyin qisqa pauza berish yoki resurslarni tozalash imkoni bo'ldi, bu esa tizim xotirasining haddan ziyod to'lib ketishini oldini oldi. Natijada, ulkan korpus ham bosqichma-bosqich muvaffaqiyatli qayta ishlanib, barcha N-gramlar to'liq generatsiya qilindi.

6.

3.NATIJALAR

Yuqoridagi choralar natijasida N-gram generatsiya modulining ishlash samaradorligi ancha oshdi. Dastlab, 15 mln. gapdan iborat korpusimizdan bigrama va trigramlarni ajratish bir necha soat vaqt olishi kutilgan edi. Optimizatsiyalardan so'ng esa bu jarayonni **yarmidan ko'prog'iga (taxminan 2.1 soatdan 0.8 soatga) qisqartirishga erishildi**. Ayniqsa, parallelizatsiya va algoritmik optimizatsiya kombinatsiyasi katta foyda berdi – bu ikki usul alohida qo'llangandagi yutuqlar birlashib, umumiy hisobda **generatsiya tezligini 3 baravarga oshirdi**.

2-jadval.



N-gram generatsiya modulini optimallashtirish natijalari

Ko'rsatkich	Dastlabki (optimizasyasiz)	Optimizatsiyadan so'ng
1 mln so'zdan N-gram hosil qilish vaqti	45 soniya	12 soniya (4 oqim, $\sim 3.8\times$ tezroq)
CPU umumiy yuklanishi	15% (1 ta yadro band)	85% (8 ta yadro to'liq band)
Foydalanilgan xotira hajmi	2.1 GB	2.5 GB (qo'shimcha kechici strukturalar)
Hosil qilingan N-gramlar soni	100% (to'liq)	100% (o'zgarmagan)
Hisoblash aniqligi	100%	100% (o'zgarmagan)

4. XULOSA

O'tkazilgan tajribalar natijalari N-gram generatsiya modulini optimallashtirish samaradorligini yaqqol ko'rsatdi. Xususan, parallel qayta ishlash texnologiyasini qo'llash orqali 1 million so'zdan iborat korpus uchun N-gram hosil qilish vaqti 45 soniyadan 12 soniyagacha qisqartirildi. Bu esa modul ishlash tezligining qariyb 3,8 baravar oshganligini anglatadi. Shu bilan birga, protsessor resurslaridan foydalanish samaradorligi sezilarli darajada yaxshilanib, barcha yadro imkoniyatlaridan faol foydalanishga erishildi [5].

Umuman olganda, N-gram generatsiya modulini optimallashtirish katta hajmdagi matnlarni qayta ishlashda yuqori samaradorlikka erishish imkonini beradi. Tadqiqot natijalari parallel hisoblash usullaridan foydalanish N-gram modellari asosidagi NLP tizimlarining tezkorligi va unumdorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatdi. Kelgusida ushbu yondashuvni taqsimlangan hisoblash tizimlari va yanada katta hajmdagi matn korpuslariga tatbiq etish orqali samaradorlikni yanada oshirish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. <https://xebia.com/blog/improving-search-query-with-lucene/>
2. <https://www.elastic.co/blog/elasticsearch-caching-deep-dive-boosting-query-speed-one-cache-at-a-time>
3. <https://groups.google.com/g/clojure/c/YtuQCrd8LZ8>
4. Chew, Y.C.; Mikami, Y.; Marasinghe, C.A.; Nandasara, S.T. Optimizing N-gram order of an N-gram based language identification algorithm for 63 written languages. International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions, 2009, 2(2).
5. Elov, B.B.; Tojiev, G.N.; Tokhtaeva, M.X.; Jurayeva, N.J.; Primova, M.H. N-gram language model for Uzbek texts. International Conference on Trends in Sustainable Computing and Machine Intelligence (ICTSM 2025), Bangkok, Thailand, 19–20 September 2025; pp. 346–357. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-13177-5_27

MANAGEMENT **AND** FUTURE TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL



<https://vatanuniversiteti.uz>