

LoRaWAN VA MQTT TEXNOLOGIYALARI ASOSIDA SANOAT IoT TIZIMLARIDA MA'LUMOTLARNI INTELLEKTUAL YIG'ISH VA QAYTA ISHLASH ALGORITMI

Pirmatov S.B.

*Toshkent shahridagi Belarus–O'zbekiston qo'shma tarmoqlararo amaliy texnik
kvalifikatsiyalar instituti assistenti*

E-mail: sanatpirmatov29@gmail.com ORCID: 0009-0006-5006-117X

Matyusupova Norjongul Davronbekovna

U.A. Aripov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti muhandisi

E-mail: norjongulm@gmail.com ORCID: 0009-0006-5835-8605

Annotatsiya. Mazkur maqolada LoRaWAN va MQTT texnologiyalari asosida sanoat Interneti (Industrial Internet of Things — IIoT) tizimlarida sensor ma'lumotlarini intellektual yig'ish, filtrlash, ustuvorlashtirish va qayta ishlash algoritmi taklif etilgan. Tadqiqotda sensor tugunlari, LoRaWAN gateway, MQTT broker va ma'lumotlarni qayta ishlash serveridan tashkil topgan IoT arxitekturasini ko'rib chiqildi. Taklif etilgan algoritmi sensor qiymatlarining o'zgarish darajasi, belgilangan chegaraviy qiymatlardan chetga chiqishi va axborot ustuvorligini hisobga olgan holda ma'lumotlarni uzatishni boshqarishga asoslangan. Algoritmi samaradorligi oddiy davriy ma'lumot uzatish usuli bilan qiyosiy baholandi. Model tajribasi natijalariga ko'ra, intellektual filtrlash qo'llanilganda MQTT orqali uzatiladigan xabarlar soni 39,0 % ga kamaydi, paketlarni yetkazib berish koeffitsienti 91,8 % dan 96,4 % gacha oshdi va o'rtacha uzatish kechikishi 1,86 soniyadan 1,21 soniyagacha qisqardi. Anomal holatlarni yuqori ustuvorlikda uzatish darajasi 98,2 % ni tashkil etdi. Olingan natijalar taklif etilgan yondashuv sanoat IoT tizimlarida tarmoq yuklamasini kamaytirish, aloqa ishonchliligini oshirish va muhim sensor ma'lumotlarini tezkor qayta ishlash imkonini berishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: Industrial IoT, LoRaWAN, MQTT, sensor tarmog'i, ma'lumotlarni intellektual yig'ish, ma'lumotlarni filtrlash, anomal holat, ustuvorlashtirish, real vaqt monitoringi, ma'lumotlarni qayta ishlash.

Аннотация. В статье предложен алгоритм интеллектуального сбора, фильтрации, приоритизации и обработки сенсорных данных в системах

промышленного Интернета вещей (Industrial Internet of Things — IIoT) на основе технологий LoRaWAN и MQTT. Рассмотрена архитектура IoT-системы, включающая сенсорные узлы, шлюз LoRaWAN, MQTT-брокер и сервер обработки данных. Предлагаемый алгоритм основан на управлении передачей данных с учетом степени изменения сенсорных показателей, их отклонения от заданных пороговых значений и информационного приоритета. Эффективность алгоритма оценивалась путем сравнения с традиционным методом периодической передачи данных. Результаты модельного эксперимента показали, что применение интеллектуальной фильтрации позволило сократить количество сообщений, передаваемых через MQTT, на 39,0 %, повысить коэффициент доставки пакетов с 91,8 % до 96,4 % и уменьшить среднюю задержку передачи с 1,86 до 1,21 с. Доля аномальных состояний, переданных с высоким приоритетом, составила 98,2 %. Полученные результаты показывают, что предложенный подход позволяет снизить сетевую нагрузку, повысить надежность связи и обеспечить оперативную обработку значимых сенсорных данных в промышленных IoT-системах.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей, Industrial IoT, LoRaWAN, MQTT, сенсорная сеть, интеллектуальный сбор данных, фильтрация данных, аномальное состояние, приоритизация, мониторинг в реальном времени, обработка данных.

Abstract. This article proposes an intelligent algorithm for collecting, filtering, prioritizing, and processing sensor data in Industrial Internet of Things (IIoT) systems based on LoRaWAN and MQTT technologies. The investigated IoT architecture consists of sensor nodes, a LoRaWAN gateway, an MQTT broker, and a data processing server. The proposed algorithm manages data transmission by taking into account changes in sensor readings, deviations from predefined threshold values, and the information priority of the collected data. The effectiveness of the algorithm was evaluated by comparison with a conventional periodic data transmission approach. The model experiment showed that intelligent filtering reduced the number of MQTT messages by 39.0 %, increased the packet delivery ratio from 91.8 % to 96.4 %, and

decreased the average transmission delay from 1.86 s to 1.21 s. The proportion of anomalous events transmitted with high priority reached 98.2 %. The results demonstrate that the proposed approach can reduce network load, improve communication reliability, and enable more efficient real-time processing of significant sensor data in industrial IoT systems.

Keywords: Industrial Internet of Things, Industrial IoT, LoRaWAN, MQTT, sensor network, intelligent data collection, data filtering, anomaly detection, prioritization, real-time monitoring, data processing.

KIRISH. Sanoat korxonalarida ishlab chiqarish jarayonlarini raqamlashtirish, texnologik uskunalarning holatini masofadan kuzatish hamda real vaqt rejimida ma'lumot almashishni tashkil etish zamonaviy ishlab chiqarish tizimlarining ustuvor yo'nalishlaridan biriga aylandi. Ayniqsa, Industrial Internet of Things (IIoT) texnologiyalarining rivojlanishi ishlab chiqarish obyektlarida joylashgan sensorlar, nazorat-o'lchov qurilmalari, kontrollerlar va axborot tizimlarini yagona raqamli muhitga birlashtirish imkonini bermogda. Bunday tizimlarning samaradorligi ko'p jihatdan ma'lumotlarni barqaror yig'ish, uzatish, qayta ishlash va tahlil qilish jarayonlarining to'g'ri tashkil etilishiga bog'liq.

Sanoat IoT tizimlarida qurilmalar ko'pincha katta hududda tarqoq joylashadi, energiya resurslari cheklangan sharoitda ishlaydi hamda kichik hajmdagi ma'lumotlarni uzoq masofaga uzatishi talab etiladi. Shu nuqtai nazardan, LoRaWAN texnologiyasi past energiya sarfi, uzoq masofali aloqa va ko'p sonli qurilmalarni yagona tarmoqqa ulash imkoniyati bilan ajralib turadi. Mazkur texnologiya, ayniqsa, harorat, bosim, namlik, vibratsiya, elektr energiyasi sarfi va uskunalarning texnik holati kabi parametrlarni doimiy monitoring qilishda samarali vosita sifatida qo'llanilishi mumkin.

LoRaWAN tarmog'idan olingan ma'lumotlarni yuqori darajadagi axborot tizimlariga yetkazish va ularni real vaqt rejimida boshqarish uchun MQTT protokoli muhim ahamiyat kasb etadi. MQTT nisbatan yengil, tarmoq resurslariga kam talab qo'yadigan va publish/subscribe tamoyili asosida ishlaydigan protokol bo'lib, u IoT

qurilmalari va server tizimlari o'rtasida tezkor ma'lumot almashishni tashkil etishga imkon beradi. LoRaWAN va MQTT texnologiyalarining integratsiyasi sanoat obyektlaridan ma'lumotlarni yig'ishning ishonchli va energiya tejankor infratuzilmasini shakllantirish uchun qulay texnologik yechim hisoblanadi.

Biroq zamonaviy sanoat IoT tizimlarida faqat ma'lumotlarni yig'ish va uzatishning o'zi yetarli emas. Sensorlar sonining ko'payishi bilan ma'lumot oqimlari hajmi ham keskin ortadi, bu esa ularni avtomatik filtrlash, tasniflash, anomaliyalarni aniqlash va muhim holatlarni ajratib olish zaruratini yuzaga keltiradi. An'anaviy ma'lumot yig'ish tizimlarida barcha ma'lumotlar bir xil tartibda qayta ishlanishi natijasida ortiqcha trafik, server yuklamasi va kechikishlar paydo bo'lishi mumkin. Shu sababli sanoat IoT tizimlariga ma'lumotlarni intellektual qayta ishlash elementlarini joriy etish dolzarb ilmiy va amaliy vazifa hisoblanadi.

Ma'lumotlarni intellektual yig'ish mexanizmi sensorlardan kelayotgan axborotni dastlabki qayta ishlash, nosoz yoki takroriy qiymatlarni aniqlash, muhim parametrlarni ustuvorlashtirish hamda ularni keyingi tahlil bosqichiga uzatishni nazarda tutadi. Bunda ma'lumot oqimining mazmuniga, tarmoq holatiga va qurilmalar resurslariga qarab dinamik ravishda ishlaydigan algoritmlardan foydalanish tarmoq yuklamasini kamaytirish va tizimning javob berish tezligini oshirish imkonini beradi. Ayniqsa, LoRaWAN orqali uzatiladigan ma'lumotlarning hajmi va uzatish chastotasini optimallashtirish MQTT brokeri orqali tashkil etiladigan ma'lumot almashuvining samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Shu nuqtai nazardan, LoRaWAN va MQTT texnologiyalarining imkoniyatlarini yagona arxitekturada birlashtirish, sensorlardan olinayotgan ma'lumotlarni avtomatik saralash va dastlabki qayta ishlashni tashkil etish hamda qaror qabul qilish uchun muhim axborotni ajratib olish algoritmini ishlab chiqish muhim ilmiy ahamiyatga ega. Bunday yondashuv sanoat IoT infratuzilmasining energiya samaradorligini, ma'lumot uzatish ishonchliligini va real vaqt rejimida ishlash imkoniyatlarini yaxshilashi mumkin.

Mazkur tadqiqotning maqsadi LoRaWAN va MQTT texnologiyalari asosida sanoat IoT tizimlaridan kelayotgan ma'lumotlarni intellektual yig'ish, filtrlash, ustuvorlashtirish va qayta ishlash algoritmini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot doirasida LoRaWAN orqali sensor ma'lumotlarini uzatish, MQTT brokeri orqali ularni markaziy tizimga yetkazish, ma'lumotlar oqimini dastlabki qayta ishlash hamda muhim va anomal holatlarni avtomatik aniqlash mexanizmlarini shakllantirish nazarda tutiladi. Taklif etilayotgan yondashuv sanoat IoT tizimlarida ortiqcha ma'lumot almashinuvini kamaytirish, tarmoq resurslaridan oqilona foydalanish va monitoring jarayonining tezkorligini oshirishga yo'naltirilgan.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAHLILI

Sanoat Interneti (Industrial Internet of Things — IIoT) tizimlarida ma'lumotlarni uzoq masofaga, kam energiya sarfi bilan va barqaror uzatish masalasi so'nggi yillarda raqamli ishlab chiqarish tizimlarini rivojlantirishning muhim ilmiy yo'nalishlaridan biriga aylandi. Ushbu vazifalarni hal etishda LPWAN texnologiyalari, xususan LoRa va LoRaWAN, sensor qurilmalari hamda markaziy axborot tizimlari o'rtasida energiya tejamkor aloqa kanalini shakllantirish imkoniyati bilan ajralib turadi. M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella va M. Zorzi uzoq masofali, litsenziyalanmagan chastota diapazonlarida ishlaydigan LPWAN texnologiyalarining IoT tizimlaridagi imkoniyatlarini tahlil qilib, LoRa texnologiyasining kam quvvat sarfi bilan katta hududni qamrab olishi ko'p sonli sensor qurilmalarini tarmoqqa ulash uchun muhim texnologik asos ekanligini ko'rsatganlar [1]. Mualliflarning tadqiqoti LoRa texnologiyasining IoT infratuzilmasini tashkil etishdagi konseptual imkoniyatlarini belgilab bergan bo'lsa-da, unda sensor ma'lumotlarini keyingi bosqichda intellektual qayta ishlash masalasi alohida tadqiq etilmagan.

F. Adelantado va hammualliflar LoRaWAN texnologiyasining imkoniyatlari bilan bir qatorda uning masshtablanuvchanlik, kanal bandligi, uzatish chastotasi va tarmoqdagi tugunlar soniga bog'liq cheklovlarini o'rganganlar [2]. Tadqiqot natijalari LoRaWAN tarmog'ida qurilmalar soni va uzatiladigan paketlar intensivligi ortishi bilan tarmoq samaradorligini ta'minlash uchun ma'lumot uzatish parametrlarini

oqilona boshqarish zarurligini ko'rsatadi. Bu holat sanoat IoT tizimlarida barcha sensor ma'lumotlarini bir xil davriylikda uzatish o'rniga, ularning qiymati, o'zgarish dinamikasi va ustuvorligiga qarab adaptiv ravishda yig'ish va uzatish mexanizmlarini ishlab chiqish zaruratini yuzaga keltiradi [2].

LoRaWAN texnologiyasidan aynan sanoat muhitida foydalanish imkoniyatlari H.H.R. Sherazi, L.A. Grieco, M.A. Imran va G. Boggia tomonidan batafsil tadqiq etilgan [3]. Mualliflar Industry 4.0 sharoitida LoRaWAN tugunlarining energiya iste'moli, batareya xizmat muddati, ma'lumotlarni o'lchash intervallari hamda energiyani qayta tiklash imkoniyatlarini tahlil qilganlar. Tadqiqot LoRaWAN texnologiyasi past tezlikdagi sanoat monitoringi vazifalari uchun energiya jihatidan samarali yechim bo'lishini ko'rsatgan. Shu bilan birga, sensorlardan qaysi ma'lumotni qachon va qanday intensivlikda uzatish kerakligi masalasini ma'lumot mazmuniga qarab avtomatik boshqarish sanoat IoT tizimlari samaradorligini yanada oshirishi mumkin [3].

D. Magrin, M. Capuzzo, A. Zanella, L. Vangelista va M. Zorzi tomonidan olib borilgan tadqiqot bevosita sanoat sharoitidagi LoRaWAN tarmoqlarining ishlash xususiyatlariga bag'ishlangan [4]. Mualliflar tasdiqlangan va tasdiqlanmagan paket uzatish rejimlari, bir nechta gatewaylardan foydalanish, LoRaWAN qurilmalari sinflari va sanoat radioaloqa kanalining xususiyatlarini hisobga olgan holda tarmoq samaradorligini baholaganlar. To'g'ri konfiguratsiya sharoitida LoRaWAN sanoat sensor monitoringi vazifalarida 90 foizdan yuqori paket muvaffaqiyati ko'rsatkichiga erishishi mumkinligi aniqlangan [4]. Mazkur tadqiqot sanoat muhitida LoRaWAN texnologiyasining amaliy imkoniyatlarini tasdiqlaydi, biroq sensor oqimlarini mazmuniy tahlil qilish, ortiqcha qiymatlarni filtrlash va anomal holatlarni intellektual aniqlash masalalari uning asosiy tadqiqot obyekti bo'lmagan.

M. Ballerini, T. Polonelli, D. Brunelli, M. Magno va L. Benini sanoat ilovalari uchun LoRaWAN hamda NB-IoT texnologiyalarini eksperimental ravishda qiyoslaganlar [5]. Tadqiqotda energiya samaradorligi, qurilmaning ishlash muddati, xizmat sifati va qamrov ko'rsatkichlari baholangan. Olingan natijalarda kam

chastotali va kechikishga sezgir ma'lumot uzatish ssenariylarida LoRaWAN energiya sarfi bo'yicha muhim ustunlikni namoyon etgan [5]. Ushbu natijalar sanoat monitoringida LoRaWAN'dan foydalanish maqsadga muvofiqligini asoslaydi hamda ma'lumot uzatish davriyligini sensor holatiga qarab o'zgartirish energiya samaradorligini yanada oshirish imkonini berishini ko'rsatadi.

LoRaWAN orqali olingan ma'lumotlarni yuqori darajadagi axborot tizimlariga yetkazishda MQTT protokoli alohida ahamiyatga ega. B. Mishra va A. Kertész MQTT protokolining M2M va IoT tizimlarida qo'llanilishini keng ko'lamda tahlil qilganlar [6]. Ularning tadqiqotida MQTTning publish/subscribe modeli, broker arxitekturasini, turli implementatsiyalar va IoT ilovalaridagi afzalliklari ko'rib chiqilgan. MQTT protokolining kam xizmat ma'lumotlariga ega bo'lishi va resurslari cheklangan qurilmalarga mosligi uni sensor ma'lumotlarini server yoki bulut infratuzilmasiga yetkazish uchun samarali vositaga aylantiradi. Shu bilan birga, ko'p sonli qurilmalardan uzluksiz xabarlar kelib tushadigan tizimlarda broker yuklamasi, ma'lumotlarning ustuvorligi va real vaqt rejimidagi qayta ishlash masalalari qo'shimcha algoritmik yechimlarni talab qiladi [6].

MQTT asosidagi IoT tizimlarida kechikishni kamaytirish masalasi M. Veeramanikandan va S. Sankaranarayanan tadqiqotida Edge Computing konsepsiyasi bilan bog'langan [7]. Mualliflar publish/subscribe mexanizmiga asoslangan ko'p darajali edge-computing modelini taklif etib, MQTT broker funksiyalarining bir qismini ma'lumot manbalariga yaqin joylashtirish orqali bulut infratuzilmasiga yuboriladigan yuklama va kechikishni kamaytirish imkoniyatlarini o'rganganlar. Ushbu yondashuv barcha xom ma'lumotlarni markaziy serverga yuborish o'rniga ularni periferik tugunlarda dastlabki qayta ishlash IoT tizimlarining tezkorligini oshirishini ko'rsatadi [7]. Bu tamoyil LoRaWAN–MQTT arxitekturasida sensor qiymatlarini filtrlash, agregatsiyalash va ustuvorlashtirish algoritmlarini gateway yoki edge tugunlarida amalga oshirish uchun metodologik asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

IoT ma'lumotlarini intellektual qayta ishlashda mashinali o'qitish usullarini periferik hisoblash qurilmalari bilan integratsiyalash masalasi J.-C. Gamazo-Real, R. Torres Fernández va A. Murillo Armas tadqiqotida ko'rib chiqilgan [8]. Mualliflar markazlashgan va taqsimlangan Edge IoT arxitekturalarida yengil mashinali o'qitish modellaridan foydalanib sensor parametrlarini baholaganlar. Tadqiqot natijalarida ayrim ML konfiguratsiyalarida F-score va Accuracy qiymatlari 0,95 ga yaqin bo'lgan, taqsimlangan arxitektura esa energiya sarfini kamaytirish imkoniyati qayd etilgan [8]. Ushbu natijalar sensor oqimlarini faqat yig'ish va uzatish emas, balki ma'lumot manbasiga yaqin nuqtada intellektual tahlil qilish IoT arxitekturasining samaradorligini oshirishini ko'rsatadi.

LoRaWAN tizimlarini baholash bo'yicha zamonaviy tadqiqotlarni umumlashtirgan M. Alipio va M. Bureš mavjud sinov ssenariylari, arxitekturalar, tarmoq parametrlari va samaradorlik ko'rsatkichlarini tizimlashtirganlar [9]. Mualliflar LoRaWAN tizimlari samaradorligini baholashda faqat qamrov yoki energiya sarfini emas, balki packet delivery, kechikish, throughput, masshtablanuvchanlik va tarmoq konfiguratsiyasi kabi bir-biri bilan bog'liq parametrlarni kompleks hisobga olish zarurligini ta'kidlaydilar. Ushbu maqola Internet of Things jurnalida chop etilgan bo'lib, Scopus va Web of Science bazalarida indekslangan [9].

Ko'rib chiqilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, mavjud ilmiy ishlarda LoRaWAN tarmog'ining energiya samaradorligi, sanoat sharoitidagi ishonchliligi va masshtablanuvchanligi [1–5], MQTT orqali ma'lumot almashish mexanizmlari [6–7], shuningdek Edge Computing va mashinali o'qitish asosida sensor axborotini qayta ishlash usullari [8–9] yetarlicha keng tadqiq etilgan. Biroq tanlangan adabiyotlar doirasida LoRaWAN orqali sensor ma'lumotlarini olish, MQTT orqali ularni uzatish va ma'lumot mazmuniga qarab filtrlash, ustuvorlashtirish hamda anomal qiymatlarni ajratishni yagona intellektual algoritmgaga birlashtiruvchi sanoat IoT yechimlari nisbatan kam yoritilgan. Shuning uchun LoRaWAN–MQTT arxitekturasini uchun ma'lumotlarning o'zgarish darajasi, chegaraviy qiymati, ustuvorlik darajasi va

anomal holatini hisobga olgan holda adaptiv yig'ish va qayta ishlash algoritmini ishlab chiqish mazkur tadqiqotning ilmiy vazifasini belgilaydi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Mazkur tadqiqotda algoritmik-eksperimental metod qo'llanildi. Ushbu metod LoRaWAN va MQTT texnologiyalari asosida sanoat IoT tizimlaridan olinadigan sensor ma'lumotlarini yig'ish, uzatish va intellektual qayta ishlash algoritmining samaradorligini tajriba sharoitida baholashga yo'naltirildi.

Tajriba arxitekturasida sensor tuguni, LoRaWAN gateway, MQTT broker va ma'lumotlarni qayta ishlovchi serverdan tashkil etildi. Sensor tugunlari orqali sanoat jarayonlariga xos bo'lgan harorat, namlik, vibratsiya va elektr energiyasi sarfi kabi parametrlar davriy ravishda qayd etildi. Olingan ma'lumotlar LoRaWAN aloqa kanali orqali gatewayga uzatildi, so'ng MQTT protokolining publish/subscribe mexanizmi asosida markaziy serverga yetkazildi.

Taklif etilgan algoritmda har bir sensor qiymati avvalo belgilangan me'yoriy diapazon va undan oldingi qiymatlar bilan solishtirildi. Agar yangi qiymat oldingi kuzatuvdan sezilarli darajada farq qilmasa, u ikkilamchi ma'lumot sifatida belgilandi va uzatish chastotasi kamaytirildi. Parametrning o'zgarishi belgilangan chegaradan oshganda yoki anomal qiymat aniqlanganda ma'lumot yuqori ustuvorlikka ega xabar sifatida MQTT brokeriga uzatildi. Shu tariqa algoritmda barcha sensor ma'lumotlarini bir xil chastotada uzatish o'rniga ularni axborot ahamiyatiga qarab filtrlash va ustuvorlashtirish tamoyiliga asoslandi.

Algoritmnining ishlash jarayoni quyidagi ketma-ketlikda tashkil etildi: sensor ma'lumotini olish → qiymatni tekshirish → oldingi qiymat bilan taqqoslash → o'zgarish darajasini aniqlash → normal yoki anomal holatni belgilash → ma'lumot ustuvorligini aniqlash → MQTT orqali uzatish → serverda saqlash va qayta ishlash.

Eksperimental baholashda taklif etilgan intellektual yig'ish algoritmi oddiy davriy ma'lumot uzatish usuli bilan solishtirildi. Bunda uzatilgan paketlar soni, paketlarni yetkazib berish koeffitsienti, o'rtacha kechikish va tarmoq yuklamasi asosiy samaradorlik mezonlari sifatida qabul qilindi. Ushbu metod LoRaWAN–

MQTT arxitekturasida ortiqcha ma'lumot almashinuvini kamaytirish, muhim sensor qiymatlarini tezkor uzatish va sanoat IoT tizimining resurslardan foydalanish samaradorligini baholash imkonini berdi.

TAHLIL VA NATIJALAR

Taklif etilgan LoRaWAN–MQTT arxitekturasida asosidagi intellektual ma'lumot yig'ish va qayta ishlash algoritmining samaradorligini baholash uchun ikki xil uzatish rejimi qiyoslandi. Birinchi rejimda sensorlardan olingan barcha ma'lumotlar belgilangan davriylik asosida uzluksiz uzatildi. Ikkinchi rejimda esa ma'lumotlarning o'zgarish darajasi, chegaraviy qiymatlardan chetga chiqishi va ustuvorligi hisobga olinib, faqat axborot ahamiyatiga ega bo'lgan qiymatlar MQTT brokeriga yuborildi.

Tajriba modelida to'rtta parametr — harorat, namlik, vibratsiya va elektr energiyasi sarfi kuzatildi. Sensor qiymatlari 30 soniyalik intervalda qayd etildi. Har bir yangi qiymat oldingi kuzatuv natijasi bilan taqqoslandi. Harorat uchun ± 2 °C, namlik uchun ± 5 %, vibratsiya uchun 15 % va elektr energiyasi sarfi uchun 10 % dan ortiq o'zgarish muhim holat sifatida qabul qilindi. Belgilangan diapazondan tashqariga chiqqan qiymatlar esa anomal ma'lumot sifatida yuqori ustuvorlik darajasida uzatildi.

24 soatlik model tajribasi davomida oddiy davriy uzatish rejimida jami 11 520 ta sensor xabari shakllantirildi. Intellektual filtrlash algoritmi qo'llanilganda esa MQTT brokeriga 7 026 ta xabar uzatildi. Demak, ma'lumotlarni mazmuniga qarab saralash natijasida uzatilgan xabarlar soni 4 494 taga, ya'ni taxminan 39,0 % ga kamaydi. Bunda muhim va anomal qiymatlarning uzatilishi cheklanmagan holda saqlab qolindi.

1-jadval. An'anaviy va intellektual ma'lumot yig'ish usullarining qiyosiy natijalari

Ko'rsatkich	Oddiy davriy uzatish	Taklif etilgan algoritim	O'zgarish
-------------	----------------------	--------------------------	-----------

Jami shakllangan sensor qiymatlari	11 520	11 520	–
MQTT orqali uzatilgan xabarlar soni	11 520	7 026	–39,0 %
Paketlarni yetkazib berish koeffitsienti	91,8 %	96,4 %	+4,6 foiz band
O‘rtacha ma’lumot uzatish kechikishi	1,86 s	1,21 s	–34,9 %
Nisbiy tarmoq yuklamasi	100 %	61,0 %	–39,0 %
Takroriy yoki kam ahamiyatli ma’lumotlar ulushi	37,6 %	5,8 %	–31,8 foiz band
Anomal holatlarni ustuvor uzatish darajasi	mavjud emas	98,2 %	–

Olingan natijalar taklif etilgan algoritmning asosiy ustunligi tarmoq orqali uzatiladigan ma’lumotlar hajmini kamaytirish bilan bog‘liqligini ko‘rsatdi. Oddiy rejimda sensor qiymati o‘zgarmagan yoki juda kam o‘zgargan holatlarda ham har bir o‘lchov alohida xabar sifatida uzatilgan. Intellectual rejimda esa bunday qiymatlar lokal ravishda qayta ishlandi va faqat belgilangan o‘zgarish chegarasi oshirilganda yangi MQTT xabari shakllantirildi. Natijada tarmoq yuklamasi 100 % dan 61,0 % gacha kamaydi.

Tarmoq yuklamasining pasayishi paketlarni yetkazib berish ishonchligiga ham ijobiy ta’sir ko‘rsatdi. Oddiy uzatish rejimida paketlarni yetkazib berish koeffitsienti 91,8 % ni tashkil etgan bo‘lsa, taklif etilgan algoritm qo‘llanilganda bu ko‘rsatkich 96,4 % ga yetdi. Mazkur natija tarmoqdagi ortiqcha xabarlar soni qisqarganda aloqa kanalidagi to‘qnashuvlar va navbatlarning kamayishi bilan izohlanadi.

Muhim farqlardan biri ma’lumot uzatish kechikishida kuzatildi. An’anaviy rejimda sensor qiymatining MQTT brokerigacha yetib borishiga ketgan o‘rtacha vaqt 1,86 soniyani tashkil etdi. Intellectual yig‘ish algoritmi qo‘llanilganda ushbu

ko'rsatkich 1,21 soniyagacha kamaydi. Shunday qilib, o'rtacha kechikish 34,9 % ga qisqardi. Bu, ayniqsa, vibratsiyaning keskin oshishi, haroratning ruxsat etilgan chegaradan chiqishi yoki energiya sarfining anomal o'zgarishi kabi tezkor javob talab qiluvchi holatlarda muhim ahamiyatga ega.

Sensorlar kesimida ham intellektual filtrlash samaradorligi turlicha namoyon bo'ldi.

2-jadval. Sensor turlari bo'yicha uzatilgan ma'lumotlar sonining o'zgarishi

Sensor turi	Dastlabki ma'lumotlar soni	Algoritmdan keyingi xabarlar	Kamayish
Harorat	2 880	1 670	42,0 %
Namlik	2 880	1 520	47,2 %
Vibratsiya	2 880	2 090	27,4 %
Elektr energiyasi sarfi	2 880	1 746	39,4 %
Jami	11 520	7 026	39,0 %

Eng katta qisqarish namlik sensorlarida kuzatildi. Buning sababi ushbu parametrlarning tajriba davomida nisbatan barqaror o'zgarishi bilan bog'liq. Vibratsiya sensori bo'yicha uzatilgan xabarlar soni esa nisbatan kam qisqardi. Chunki vibratsiya qiymatlari texnologik uskunaning ishlash rejimiga qarab tez-tez o'zgarib turgan va algoritmlar ularning katta qismini axborot ahamiyatiga ega ma'lumot sifatida baholagan. Mazkur holat algoritmlarning barcha sensorlarga bir xil filtr qo'llamasdan, parametrlarning o'zgarish xususiyatiga qarab ishlashini ko'rsatadi.

Tajriba davomida 56 ta chegaraviy yoki anomal holat sun'iy ravishda shakllantirildi. Taklif etilgan algoritmlar ulardan 55 tasini yuqori ustuvorlikdagi MQTT xabari sifatida uzatdi. Shunga ko'ra, anomal holatlarni ustuvor uzatish darajasi 98,2 % ni tashkil etdi. Normal sensor qiymatlari umumiy navbat bo'yicha uzatilgan bo'lsa,

anomal qiymatlarga ustuvorlik berilishi ularni serverga tezroq yetkazish imkonini berdi.

Taklif etilgan algoritmnining ishlash samaradorligini umumlashtiruvchi asosiy natija shundaki, sensorlardan olinadigan barcha ma'lumotlarni markaziy serverga uzluksiz yuborish zarurati kamayadi. Tizim ma'lumotni dastlab lokal darajada baholaydi, faqat muhim o'zgarishlar yoki anomal qiymatlar mavjud bo'lganda uzatishni faollashtiradi. Bunday yondashuv LoRaWAN kanalining cheklangan resurslaridan samarali foydalanish bilan bir qatorda MQTT brokeriga tushadigan ortiqcha xabarlar oqimini ham kamaytiradi.

Natijalar LoRaWAN va MQTT texnologiyalarini intellektual filtrlash va ustuvorlashtirish algoritmi bilan birlashtirish sanoat IoT tizimlarida ma'lumotlar oqimini samarali boshqarish imkonini berishini ko'rsatdi. Model tajribasida uzatiladigan ma'lumotlar hajmining 39,0 % ga, o'rtacha kechikishning 34,9 % ga kamayishi hamda paketlarni yetkazib berish koeffitsientining 91,8 % dan 96,4 % gacha oshishi taklif etilgan algoritmnining an'anaviy davriy uzatish usuliga nisbatan samaraliroq ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, tizimda anomal holatlarga ustuvorlik berilishi sanoat monitoringida tezkor javob berish imkoniyatini yaxshilaydi.

XULOSA

O'tkazilgan tadqiqot natijalari LoRaWAN va MQTT texnologiyalarini yagona sanoat IoT arxitekturasida integratsiyalash ma'lumotlarni yig'ish va uzatish jarayonlarini samarali tashkil etish imkonini berishini ko'rsatdi. Taklif etilgan algoritm sensorlardan olinadigan ma'lumotlarni ularning o'zgarish darajasi, chegaraviy qiymatlardan chetga chiqishi va ustuvorlik holatiga ko'ra filtrlash hamda qayta ishlashga asoslandi.

Eksperimental model natijalariga ko'ra, intellektual filtrlash mexanizmi qo'llanilganda MQTT orqali uzatiladigan xabarlar soni 39,0 % ga kamaydi, tarmoq yuklamasi 61,0 % darajagacha pasaydi. Shu bilan birga, paketlarni yetkazib berish

koeffitsienti 91,8 % dan 96,4 % gacha oshdi, oʻrtacha uzatish kechikishi esa 1,86 soniyadan 1,21 soniyagacha kamaydi. Bu esa taklif etilgan algoritmning oddiy davriy uzatish usuliga nisbatan tarmoq resurslaridan samaraliroq foydalanishini koʻrsatadi.

Sensorlar kesimidagi tahlil maʼlumotlarni filtrlash samaradorligi kuzatilayotgan parametrlarning oʻzgaruvchanlik xususiyatiga bogʻliq ekanligini aniqladi. Nisbatan barqaror koʻrsatkichlarda ortiqcha uzatishlar sezilarli darajada qisqargan boʻlsa, tez oʻzgaruvchi vibratsiya maʼlumotlarining katta qismi axborot ahamiyatiga ega xabar sifatida saqlab qolindi. Bundan tashqari, tajribada shakllantirilgan 56 ta anomal holatning 55 tasi yuqori ustuvorlikda uzatilib, anomal maʼlumotlarni tezkor yetkazish darajasi 98,2 % ni tashkil etdi.

Shunday qilib, LoRaWAN–MQTT arxitekturasiga intellektual filtrlash, ustuvorlashtirish va anomal holatlarni ajratish mexanizmlarini kiritish sanoat IoT tizimlarida ortiqcha trafikni kamaytirish, aloqa ishonchliligini oshirish va real vaqt monitoringini takomillashtirish imkonini beradi. Taklif etilgan yondashuvni keyingi tadqiqotlarda mashinali oʻqitish algoritmlari, adaptiv uzatish intervallari va Edge Computing vositalari bilan boyitish sanoat obyektlarining prediktiv monitoringi hamda avtomatlashtirilgan qaror qabul qilish tizimlarini rivojlantirish uchun istiqbolli yoʻnalish hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios // IEEE Wireless Communications. – 2016. – Vol. 23, No. 5. – P. 60–67. – DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743.

2. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiró P., Martínez B., Melià-Seguí J., Watteyne T. Understanding the Limits of LoRaWAN // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, No. 9. – P. 34–40. – DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613.

3. Sherazi H.H.R., Grieco L.A., Imran M.A., Boggia G. Energy-Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17, No. 2. – P. 891–902. – DOI: 10.1109/TII.2020.2984549.

4. Magrin D., Capuzzo M., Zanella A., Vangelista L., Zorzi M. Performance Analysis of LoRaWAN in Industrial Scenarios // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17, No. 9. – P. 6241–6250. – DOI: 10.1109/TII.2020.3044942.
5. Ballerini M., Polonelli T., Brunelli D., Magno M., Benini L. NB-IoT Versus LoRaWAN: An Experimental Evaluation for Industrial Applications // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 16, No. 12. – P. 7802–7811. – DOI: 10.1109/TII.2020.2987423.
6. Mishra B., Kertész A. The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 201071–201086. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
7. Veeramanikandan M., Sankaranarayanan S. Publish/Subscribe Based Multi-Tier Edge Computational Model in Internet of Things for Latency Reduction // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2019. – Vol. 127. – P. 18–27. – DOI: 10.1016/j.jpdc.2019.01.004.
8. Gamazo-Real J.-C., Torres Fernández R., Murillo Armas A. Comparison of Edge Computing Methods in Internet of Things Architectures for Efficient Estimation of Indoor Environmental Parameters with Machine Learning // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 126, Part D. – Article 107149. – DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107149.
9. Alipio M., Bureš M. Current Testing and Performance Evaluation Methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT Applications: Classification, Issues, and Future Directives // Internet of Things. – 2024. – Vol. 25. – Article 101053. – DOI: 10.1016/j.iot.2023.101053.