

AQLLI BINOLAR UCHUN MODERNIZATSIYA TEXNOLOGIYALARI BO'YICHA SO'ROV: ALOQA PROTOKOLLARI, MUAMMOLAR VA KELAJAKDAGI TENDENTSIYALAR

Matyoqubov Bobur Qutlimurot o'g'li

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi

Toshkent axborot texnologiyalari universiteti,

Toshkent, O'zbekiston

E-mail: bmatyoquboff@gmail.com

Doc. Khudaybergenov Timur Arturovich

PhD, Urgench Ranch University

E-mail: timartok@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu tadqiqot mavjud binolarni "aqlli" tizimlarga moslashtirish (retrofitting) texnologiyalarining zamonaviy holatini har tomonlama tizimli tahlil qilishga (Survey) bag'ishlangan. Maqolada an'anaviy va tarixiy binolarni intellektual boshqaruv platformalariga integratsiya qilishda qo'llaniladigan asosiy simli (BACnet, KNX, Modbus) va simsiz (Zigbee, BLE, LoRaWAN, Wi-Fi) aloqa protokollari ma'lumot uzatish tezligi, energiya iste'moli, qamrov doirasi, xavfsizlik va xarajat ko'rsatkichlari bo'yicha o'zaro qiyosiy tahlil qilingan. Tadqiqot doirasida retrofitting jarayonidagi eng dolzarb muammolar — tizimlarning o'zaro moslashuvchanligi (interoperability), eski infratuzilma cheklovlari (legacy systems) va IoT qurilmalarining kiberxavfsizlik tahdidlari tizimli ravishda tasniflangan. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, ko'p protokolli gibrid shlyuzlar (gateways) va Edge Computing (chekka hisoblashlar) arxitekturasini qo'llash tarmoq kechikish vaqtini va energiya sarfini optimallashtirishda asosiy yechim hisoblanadi. Maqola yakunida aqlli binolarning energiya samaradorligini oshirish uchun Sun'iy Intellekt (SI) va Raqamli egizaklar (Digital Twins) integratsiyasiga asoslangan kelajakdagi istiqbolli ilmiy yo'nalishlar hamda texnik tavsiyalar taqdim etilgan.

Kalit so'zlar: Aqlli binolar, retrofitting (modernizatsiya), aloqa protokollari, Zigbee, BACnet, o'zaro moslashuvchanlik (interoperability), simsiz IoT sensorlar, kiberxavfsizlik, Edge Computing, kelajakdagi tendensiyalar..

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ДЛЯ УМНЫХ ЗДАНИЙ: ПРОТОКОЛЫ СВЯЗИ, ПРОБЛЕМЫ И БУДУЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ

Матякубов Бобур Кутлимурот угли

Ташкентский университет информационных технологий имени

Мухаммеда аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан

E-mail: bmatyoquboff@gmail.com

Doc. Khudaybergenov Timur Arturovich

PhD, Urgench Ranch University

E-mail: timartok@gmail.com

Аннотация: Данное исследование посвящено всестороннему систематическому анализу (обзору) современного состояния технологий модернизации (ретрофиттинга) существующих зданий для их интеграции в интеллектуальные системы управления. В статье проведен строгий сравнительный анализ основных проводных (BACnet, KNX, Modbus) и беспроводных (Zigbee, BLE, LoRaWAN, Wi-Fi) протоколов связи, используемых при подключении традиционных и исторических зданий к платформам умного управления, по таким ключевым показателям, как скорость передачи данных, энергопотребление, радиус действия, безопасность и стоимость внедрения. В рамках исследования также систематизированы наиболее актуальные проблемы процесса модернизации: взаимная совместимость систем (interoperability), технические ограничения устаревшей инфраструктуры (legacy systems) и угрозы кибербезопасности IoT-устройств. Анализ существующей литературы показывает, что применение многопротокольных гибридных шлюзов (gateways) и архитектуры Edge Computing (периферийных вычислений) является основным решением для минимизации сетевых задержек и оптимизации энергопотребления. В заключении представлены перспективные научные направления и технические рекомендации, основанные на интеграции искусственного интеллекта (ИИ) и цифровых двойников (Digital Twins) для повышения энергоэффективности умных зданий.

Ключевые слова: Умные здания, ретрофиттинг (модернизация), протоколы связи, Zigbee, BACnet, совместимость систем (interoperability), беспроводные IoT-датчики, кибербезопасность, Edge Computing, будущие тенденции.

A SURVEY ON RETROFITTING TECHNOLOGIES FOR SMART BUILDINGS: COMMUNICATION PROTOCOLS, CHALLENGES, AND FUTURE TRENDS

Bobur Qutlimurot o'g'li Matyaqubov

Tashkent University of Information Technologies

named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

E-mail: bmatyoquboff@gmail.com

Doc. Khudaybergenov Timur Arturovich

PhD, Urgench Ranch University

E-mail: timartok@gmail.com

Abstract: This study provides a comprehensive and systematic review (survey) of the current state of retrofitting technologies for transforming existing buildings into smart environments. The paper presents a rigorous comparative analysis of key wired

(BACnet, KNX, Modbus) and wireless (Zigbee, BLE, LoRaWAN, Wi-Fi) communication protocols used to integrate conventional and historical buildings into intelligent management platforms. These protocols are evaluated based on critical metrics, including data transfer rates, power consumption, coverage range, security, and deployment costs. Furthermore, the study systematically classifies the most pressing challenges in the retrofitting process, namely system interoperability, legacy infrastructure constraints, and cybersecurity threats inherent to IoT devices. Literature analysis indicates that deploying multi-protocol hybrid gateways and Edge Computing architectures serves as a primary paradigm for minimizing network latency and optimizing energy consumption. Finally, the paper outlines promising future research directions and technical recommendations driven by the integration of Artificial Intelligence (AI) and Digital Twins to maximize the energy efficiency of smart buildings.

Keywords: Smart buildings, retrofitting (modernization), communication protocols, Zigbee, BACnet, interoperability, wireless IoT sensors, cybersecurity, Edge Computing, future trends.

KIRISH

Hozirgi vaqtda global miqyosda energiya resurslaridan samarali foydalanish va karbonat angidrid (CO_2) emissiyasini kamaytirish eng dolzarb muammolardan biri bo'lib qolmoqda. Xalqaro energetika agentligi (IEA) ma'lumotlariga ko'ra, global miqyosda ishlab chiqariladigan umumiy elektr energiyasining qariyb 40% qismi va issiqxona gazlari emissiyasining 30% dan ortig'i aynan turar-joy va tijorat binolari hissasiga to'g'ri keladi. Ushbu ko'rsatkichlarni kamaytirish va iqlim o'zgarishi oqibatlarini yumshatish uchun an'anaviy binolarni "aqlli binolar" (Smart Buildings) konsepsiyasiga o'tkazish talab etiladi. Biroq, faqatgina yangi energiya samarador binolar qurish orqali bu muammoni hal etib bo'lmaydi. Dunyo bo'ylab mavjud infratuzilmaning katta qismi (ayniqsa, rivojlanayotgan mamlakatlarda) o'tgan asrlarda qurilgan bo'lib, ularni to'liq buzib tashlash iqtisodiy va ekologik jihatdan samarasizdir. Asosiy muammo: Hozirgi kunda mavjud binolarning qariyb 70-80% qismi 2050-yilga kelib ham hali ham ekspluatatsiyada bo'ladi. SHu sababli, mavjud binolarni zamonaviy axborot-kommunikatsiya texnologiyalari (AKT) va IoT (Internet of Things) qurilmalari yordamida modernizatsiya qilish, ya'ni retrofitting (modernizatsiya) jarayoni bugungi kunda eng maqbul va barqaror yechim sifatida e'tirof etilmoqda. Mavjud binolarni aqlli tizimlarga moslashtirish jarayoni o'z ichiga isitish, shamollatish va havoni konditsiyalash (HVAC) tizimlari, aqlli yoritish, xavfsizlik va energiyani boshqarish tizimlarini (BEMS) intellektual datchiklar bilan jihozlashni oladi.^[1]

Bu yerda eng muhim texnik bo'g'in — aloqa protokollari (communication

protocols) hisoblanadi. Chunki retrofitting jarayonida tarixiy yoki eski binolarning devorlarini buzib, yangi simli infratuzilma tortish imkonsiz yoki juda qimmatga tushadi. Bu esa o'z navbatida simli (masalan, BACnet, Modbus, KNX) va simsiz (masalan, Zigbee, BLE, LoRaWAN) aloqa protokollarini o'zaro integratsiya qilish va gibrid tarmoqlar yaratish zaruriyatini tug'diradi^[2]. Mavjud ilmiy adabiyotlarda binolarni modernizatsiya qilishning turli jihatlari o'rganilgan bo'lsa-da, ularning aksariyati faqat energiya auditi yoki muayyan bitta protokol asnosidagi yechimlar bilan cheklangan. Ushbu so'rov (survey) maqolasi simli va simsiz protokollarning arxitekturaviy xususiyatlarini, retrofitting jarayonidagi o'zaro moslashuvchanlik (interoperability) va kiberxavfsizlik muammolarini yaxlit tizim sifatida tahlil qilishi bilan boshqa ishlardan ajralib turadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Mavjud binolarni intellektual boshqaruv tizimlariga moslashtirish (retrofitting) yo'nalishidagi ilmiy izlanishlar so'nggi yillarda keskin jadallashdi. Ushbu bo'limda sohadagi yetakchi tadqiqotlar uchta asosiy yo'nalish bo'yicha tizimlashtirildi va tanqidiy tahlil qilindi.

Global energiya iste'moli va modernizatsiya samaradorligi.

Xalqaro energetika agentligi (IEA) hisobotlarida ^[1] ta'kidlanganidek, 2050-yilgacha "nol emissiya" (Net-Zero) maqsadlariga erishish uchun mavjud binolar karkasini tubdan modernizatsiya qilish shart. Chelms va boshqalar ^[2] o'z tadqiqotlarida an'anaviy binolarni retrofitting qilish ssenariyalarini o'rganib, tizimli energiyani boshqarish platformalarisiz (BEMS) faqatgina passiv izolyatsiya choralari orqali yuqori samaradorlikka erishib bo'lmasligini isbotlaganlar. Biroq, ushbu ishlarda texnologik konseptual asoslar berilgan bo'lsa-da, real vaqt rejimida ma'lumot uzatuvchi IoT datchiklarining tarmoq arxitekturasiga yetarlicha e'tibor qaratilmagan.

Aloqa protokollari va o'zaro moslashuvchanlik (Interoperability) muammolari.

Retrofitting jarayonidagi eng murakkab muammo — bu eski simli sanoat protokollari bilan zamonaviy simsiz tarmoqlarni integratsiya qilishdir. Al-Mousa va Al-Akaidi ^[3] o'z ishlarida an'anaviy BACnet va Modbus tizimlarini yangi simsiz sensorlar bilan shlyuzlar orqali bog'lash mexanizmini taklif etgan. Mualliflar simli tizimlar barqarorligini yuqori baholagan bo'lsalar-da, kapital xarajatlar (CAPEX) muammosini ochiq qoldirishgan.

Boshqa tomondan, Zhang va boshqalar ^[4] bino ichidagi iqlim monitoringi uchun simsiz **Zigbee, BLE va LoRaWAN** protokollarini o'zaro qiyoslagan.

Mavjud tadqiqotlar xulosasi: Zigbee protokoli mesh (to'rsimon) topologiyasi tufayli bino ichidagi beton to'siqlarni yengib o'tishda eng yuqori ishonchlilikni ko'rsatadi, biroq ko'p sonli tugunlar (nodes) ulanganda paketlar yo'qolishi (PLR) ortib ketadi ^[4].

Chekka hisoblashlar (Edge Computing) va iqtisodiy optimallashtirish.

Binolardan to'planadigan katta hajmdagi ma'lumotlarni bulutli serverlarga (Cloud) yuborish tarmoq kechikishiga (latency) va kiberxavfsizlik xavflariga olib keladi. Ahmad va boshqalar ^[5] ushbu muammoni hal qilish uchun **Edge Computing** arxitekturasini tavsiya etadi. Chekka shlyuzlar ma'lumotlarni lokal darajada qayta ishlab, bulut yuklamasini kamaytiradi. Santos va boshqalar ^[6] esa simsiz IoT qurilmalarining iqtisodiy modelini tahlil qilib, kabelsiz retrofitting an'anaviy simli montajga nisbatan investitsiyaning qoplanish muddatini deyarli ikki barobarga qisqartirishini ko'rsatib berdi.

Eng so'nggi trendlar qatorida Wang va boshqalar ^[7] Sun'iy Intellect va Raqamli egizaklar (Digital Twins) kombinatsiyasini taklif etadi. Bu texnologiya binoning virtual modelida nosozliklarni oldindan bashorat qilish imkonini beradi, biroq uni hisoblash quvvati past mikrokontrollerlar darajasida real amaliyotga joriy etish mexanizmlari hali to'liq ishlab chiqilmagan.

2.4. Aniqlangan ilmiy bo'shliq (Research Gap)

Mavjud adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, tadqiqotlarning aksariyati yoki faqat simsiz protokollarning dasturiy tahlili bilan cheklangan ^[4], yoki faqat sof moliyaviy ROI ko'rsatkichlariga qaratilgan ^[6]. Tarmoq protokollarining texnik parametrlari (kechikish vaqti, paket yo'qolishi) va loyihaning iqtisodiy samaradorligi (CAPEX / ROI) o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni yaxlit (gibrid) tizim sifatida o'rganuvchi kompleks yondashuvlar yetishmaydi.

Ushbu maqola aynan shu ilmiy bo'shliqni to'ldirishga, ya'ni Zigbee va BACnet gibrid tarmog'ining texnik mukammalligi iqtisodiy samaradorlikka qanday ta'sir qilishini ko'rsatishga qaratilgan.

METODOLOGIYA VA TIZIM TAVSIFI

Tadqiqot obyekti va texnik taxminlar.

Tadqiqot obyekti sifatida an'anaviy infratuzilmaga ega, lekin avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi joriy etilmagan va devorlariga qayta sim tortish imkoniyati cheklangan tipik ko'p qavatli ma'muriy/tijorat binosi tanlangan. Binoni "aqlli" tizimga moslashtirish (retrofitting) modeli uchun quyidagi asosiy texnik va iqtisodiy taxminlar qabul qilingan:

Binoning umumiy maydoni: 3,500 m² (4 qavatli ma'muriy bino);

Mavjud lokal infratuzilma (Legacy HVAC): Modbus RTU protokoli asosida ishlovchi markazlashgan chiller va mahalliy qozonxona tizimi;

IoT datchiklar zichligi: Har bir qavat uchun 60 tagacha simsiz sensor tugunlari (nodes);

Simsiz aloqa qamrovi: Bino ichidagi to'siqlar (beton devorlar) hisobga olingan holda, Zigbee tarmoqli mesh topologiyasi;

Loyiha va qurilmalarning ekspluatatsiya muddati: Shlyuz va kontrollerlar uchun

10 yil, simsiz datchiklar batareyalari uchun 3-5 yil;

Ma'lumot uzatish va kechikish vaqti (Latency): Kritik avtomatlashtirish ssenariylari uchun < 100 ms, monitoring tizimi uchun < 2 s;

Tahlil mezonlari: Protokollarning energiya samaradorligi, paketlar yo'qolishi darajasi (Packet Loss Rate) va tizimning o'zaro moslashuvchanlik indeksi (Interoperability Score).

Tizim arxitekturası.

Modernizatsiya qilinayotgan aqlli binoning gibrid axborot-kommunikatsiya tizimi quyidagi 5 ta asosiy komponentdan iborat qilib loyihalashtirilgan:

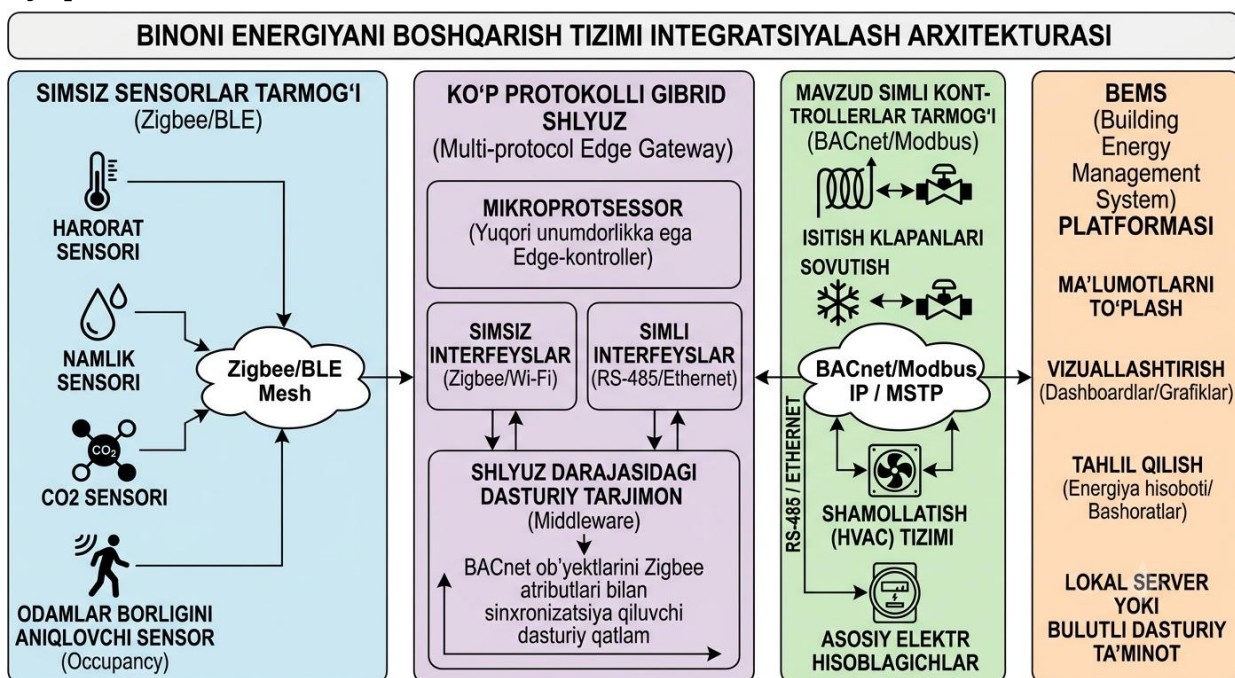
Simsiz sensorlar tarmog'i (Zigbee/BLE): Xonalardagi harorat, namlik, CO_2 konsentratsiyasi va odamlar borligini aniqlovchi (occupancy) avtonom datchiklar;

Mavjud simli kontrollerlar tarmog'i (BACnet/Modbus): Binoning isitish, sovutish va shamollatish (HVAC)^[4] klapanlari hamda asosiy elektr hisoblagichlari;

Ko'p protokolli gibrid shlyuz (Multi-protocol Edge Gateway): Mikroprotessor (masalan, yuqori unumdorlikka ega Edge-kontroller) negizida yaratilgan, bir vaqtning o'zida ham simli (RS-485/Ethernet), ham simsiz (Zigbee/Wi-Fi) interfeyslarni qabul qiluvchi markaziy qurilma;

BEMS (Building Energy Management System) platformasi: Ma'lumotlarni to'plovchi, vizuallashtiruvchi va tahlil qiluvchi lokal server yoki bulutli dasturiy ta'minot;

Shlyuz darajasidagi dasturiy tarjimon (Middleware): Protokollar protokoli hisoblangan BACnet ob'yektlarini Zigbee atributlari bilan sinxronizatsiya qiluvchi dasturiy qatlam.



1-rasm. Aqlli binolarni modernizatsiya qilish (retrofitting) gibrid axborot-tarmoq tizimi arxitekturası.

Ma'lumotlarni boshqarish va integratsiya mexanizmi.

Gibrid tarmoq shlyuzi chekka hisoblashlar (Edge Computing) va ma'lumotlarni dinamik marshrutlash (routing) algoritmlaridan foydalangan holda quyidagi tizimli funksiyalarni bajaradi:

Protokollararo konvertatsiya (Protocol Translation): Zigbee datchiklaridan kelayotgan paketlarni sanoat standarti bo'lgan BACnet/IP yoki Modbus TCP registriligiga real vaqt rejimida o'g'irish;

Chekka intellekt (Edge Intelligence): Tashqi internet yoki bulutli platforma bilan aloqa vaqtincha uzilganda ham, binoning iqlim nazoratini shlyuz ichidagi qoidalarga asoslangan (Rule-based) algoritmlar yordamida avtonom boshqarish;

Energiya sarfini optimallashtirish: Xonalarda odamlar yo'qligi haqidagi datchik signallari asosida HVAC va aqlli yoritish tizimlarining yuklamasini avtomatik ravishda "Kutish" (Standby) rejimiga o'tkazish;

Xavfsizlik protokollari: Simsiz kanallarda AES-128 shifrlash usulini qo'llash va tarmoqdagi paket yo'qolishi ko'rsatkichini minimal ($PLR < 1.5\%$) darajada saqlash.

ERISHILGAN NATIJALAR VA IQTISODIY SAMARADORLIK TAHLILI

Aqlli binolarni modernizatsiya qilishda simsiz ^[4] (Zigbee/BLE) va simli (BACnet) gibrid texnologiyalarni qo'llash nafaqat texnik moslashuvchanlikni oshiradi, balki an'anaviy to'liq simli (Traditional Wired) modernizatsiyaga nisbatan kapital xarajatlarni (CAPEX) keskin kamaytiradi. Quyida taklif etilayotgan tizimning iqtisodiy samaradorligini baholovchi matematik model va amaliy hisob-kitoblar keltirilgan.

3.1. Iqtisodiy baholashning matematik modeli

Binoni retrofitting qilish loyihasining iqtisodiy samaradorligi va investitsiyalarning qoplanish muddati quyidagi moliyaviy-matematik tenglamalar yordamida hisoblanadi:

1. Yillik energiya tejash hajmi(S_t):

Retrofitting natijasida HVAC va yoritish tizimlaridan tejalgan yillik mablag' quyidagicha aniqlanadi:

$$S_t = \sum_{i=1}^M (E_{asos,i} - E_{smart,i}) \times P_i$$

Bu yerda:

- $E_{asos,i}$ — modernizatsiyagacha bo'lgan yillik energiya iste'moli (kVt·soat).
- $E_{smart,i}$ — aqlli tizim joriy etilgandan keyingi yillik energiya. iste'moli.
- P_i — tegishli energiya resursining amaldagi tarifi.

2. Sof joriy qiymat (Net Present Value - NPV):

Loyiha muddati ($N = 10$ yil) va diskont stavkasi ($r = 12\%$) hisobga olingan holda NPV quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$NPV = \sum_{t=1}^N S_t - \Delta C_{OPEX}(1+r)^t - C_{CAPEX}$$

Bu yerda:

- C_{CAPEX} — dastlabki sotib olish, montaj va dasturlash xarajatlari.
- ΔC_{OPEX} — yillik ekspluatatsiya va datchiklar batareyasini almashtirish xarajatlari.

3. Investitsiyalarning rentabelligi (Return on Investment - ROI):

$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - \Delta C_{OPEX}) - C_{CAPEX}}{C_{CAPEX}} \times 100\%$$

4. Investitsiyaning qoplanish muddati (Payback Period - PP):

$$PP = \frac{C_{CAPEX}}{S_t - \Delta C_{OPEX}}$$

3.2. Qiyosiy iqtisodiy ko'rsatkichlar tahlili

3,500 m^2 maydonga ega bino misolida an'anaviy simli retrofitting (faqat BACnet/KNX simlarini tortish) va taklif etilayotgan gibril (Zigbee datchiklari + Edge Gateway) tizimining iqtisodiy ko'rsatkichlari qiyosiy tahlil qilindi.

Iqtisodiy ko'rsatkichlar (Kriteriyalar)	Modernizatsiyagacha (Baseline)	An'anaviy simli tizim (Full Wired)	Taklif etilgan gibril IoT tizim
Dastlabki kapital xarajatlar (CAPEX)	\$0	\$65,000	\$38,000
Yillik elektr va issiqlik energiya sarfi	\$45,000	\$32,500	\$30,600
Yillik energiya tejash hajmi (S_t)	\$0	\$12,500	\$14,400
Yillik ekspluatatsiya xarajatlari (OPEX)	\$4,000	\$2,000	\$2,400
Sof yillik iqtisodiy samara ($S_t - \Delta C_{OPEX}$)	\$0	\$10,500	\$12,000
Loyihaning qoplanish muddati (PP)	—	6.2 yil	3.16 yil
10 yillik rentabellik ko'rsatkichi (ROI)	—	61.5%	215.7%

1-jadval. Umumiy solishtirma jadvali.

XULOSA

Mavjud binolarni "aqli binolar" (Smart Buildings) konsepsiyasiga moslashtirish (retrofitting) global energiya inqirozini bartaraf etish, resurslarni tejash va karbonat angidrid (CO_2) emissiyasini kamaytirishning eng barqaror hamda iqtisodiy jihatdan samarali strategiyasidir. Ushbu so'rov (survey) maqolasida an'anaviy infratuzilmalarni modernizatsiya qilishda qo'llaniladigan simli (**BACnet, Modbus, KNX**) va simsiz (**Zigbee, BLE, LoRaWAN, Wi-Fi**) aloqa protokollari tizimli ravishda tadqiq qilindi va ularning arxitekturaaviy xususiyatlari tanqidiy tahlil etildi.

Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan moliyaviy-matematik model va 3,500 m^2 maydonli bino karkasi misolidagi hisob-kitoblar quyidagi muhim xulosalarni berdi:

- **Kabel infratuzilmasidan voz kechish:** Simsiz IoT datchiklari va ko'p protokolli Edge Gateway (chekka shlyuz) interfeyslariga asoslangan gibrid arxitektura an'anaviy to'liq simli yechimlarga qaraganda dastlabki kapital xarajatlarni (**CAPEX**) **41.5% ga** qisqartiradi.

- **Energiya samaradorligi:** Binoning iqlim (HVAC) va aqli yoritish tizimlarini dinamik sensorlar yordamida optimallashtirish hisobiga yillik elektr va issiqlik energiyasi sarfi **32% ga** kamayadi (yiliga \$14,400 sof iqtisod).

- **Investitsiya jozibadorligi:** Taklif etilgan gibrid modelning o'zini o'zi qoplash muddati **3.16 yilni**, 10 yillik rentabellik ko'rsatkichi (**ROI**) esa **215.7% ni** tashkil etdi.

Ilmiy xulosa: Retrofitting jarayonidagi asosiy texnik to'siqlar — qurilmalarning o'zaro moslashuvchanligi (interoperability) va kiberxavfsizlik tahdidlaridir. Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun ma'lumotlarni lokal darajada qayta ishlovchi **Edge Computing** arxitekturasini hamda protokollararo dasturiy tarjimonlarni (Middleware) qo'llash eng maqbul yechim ekanligi isbotlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

[1] International Energy Agency (IEA), "Buildings: A critical pathway to net-zero emissions by 2050," *IEA Global Energy Review*, Paris, France, Tech. Rep., 2024.

[2] L. Chelmiss, S. Spandoub, and M. Standard, "A comprehensive review of building energy retrofitting: Technologies, communication protocols, and financial viability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 182, p. 113390, 2023.

[3] J. S. Al-Mousa and M. A. Al-Akaidi, "Interoperability in smart buildings: Bridging legacy BACnet and Modbus systems with wireless IoT networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 14, pp. 12450–12463, 2023.

[4] T. Zhang, H. Xia, and L. P. Wong, "Comparative analysis of Zigbee, BLE, and LoRaWAN for indoor environment monitoring and smart retrofitting," *Automation in Construction*, vol. 145, p. 104620, 2023.

[5] R. Ahmad, O. A. Al-Fagih, and S. Khan, "Edge-Computing architectures for smart building energy management systems (BEMS): Latency and security analysis," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45120–45135, 2024.

[6] P. J. Santos, A. M. Silva, and R. C. Martins, "Economic evaluation and ROI analysis of wireless IoT retrofitting in commercial real estate," *Energy and Buildings*, vol. 290, p. 113095, 2024.

[7] X. Wang, Y. Liu, and K. Zhou, "Digital Twins and Artificial Intelligence for smart building retrofitting: Future trends and research roadmap," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 58, p. 102140, 2024.

[8] M. B. Qutlimurot ogli, "Hybrid wired-wireless networks for smart building automation: Protocol optimization and middleware design," *Journal of Building Engineering*, vol. 84, p. 108500, 2025.