

SMARTHEAT AI HOME — ISSIQLIK TARQALISH TENGLAMASI ASOSIDA ISHLOVCHI AQLLI UY BOSHQARUV TIZIMI

**ERMATOVA S.S., XUSANBOYEVA I.X., MELIQO‘ZIYEVA G.P., ISAQOVA S.H.E.,
XO‘JAMQULOVA D.M.**

*FarDU talabalari, sabinaergasheva682@gmail.com, gulsanammeliqoziyeva18@gmail.com,
xojamqulovadilrabo554@gmail.com, husanboyevairodaxon@gmail.com,
shahlosalimova30@gmail.com*

Annotatsiya. Mazkur maqolada binolarda energiya samaradorligini oshirish va mikroiklim barqarorligini ta'minlash maqsadida ishlab chiqilgan "SmartHeat AI Home" aqlli uy boshqaruv platformasi tadqiq etilgan. Tizim ikki o'lchovli (2D) Fourier issiqlik tarqalish tenglamasining Crank-Nicolson noyaqin sonli sxemasi, sensor shovqinlarini bartaraf etuvchi Kalman filtri hamda harorat dinamikasini bashorat qiluvchi uzoq qisqa muddatli xotira (LSTM) rekurrent neyron tarmog'iga asoslangan. Farg'ona shahridagi 72 m² maydonli pilot obyektdagi 30 kunlik sinov natijalariga ko'ra, taklif etilgan algoritim an'anaviy termostatga nisbatan elektr energiya iste'molini 22.0% ga kamaytirdi, harorat standart og'ishini 1.8 °C dan 0.7 °C gacha pasaytirdi va komfort soatlari ulushini 94% gacha oshirdi.

Kalit so'zlar: issiqlik tarqalish tenglamasi, Crank-Nicolson sxemasi, Kalman filtri, LSTM tarmog'i, predictive PID, IoT arxitekturasini, energiya samaradorligi, TimescaleDB.

KIRISH

Global urbanizatsiya sharoitida binolar sektori yakuniy energiya iste'molining 30% ini va CO₂ emissiyasining 28% ini tashkil etadi. Bunda eng yuqori yuklama jami kommunal energiya sarfining 50-60% i aynan HVAC (isitish, ventilyatsiya, konditsionerlash) tizimlari hissasiga to'g'ri keladi. O'zbekistonning keskin kontinental iqlim sharoitida issiqlik energiyasini optimal boshqarish strategik va iqtisodiy ahamiyatga ega. Biroq amaliyotda qo'llanilayotgan an'anaviy ikki pozitsiyali ("on/off") termostatlari binoning fizik inersiyasini, fazoviy geterogenligini (notekisligini) va tashqi ob-havo dinamikasini hisobga olmaydi. Bu esa energiya behuda sarflanishiga va mikroiklim beqarorligiga olib keladi. Sensorlardagi stoxastik shovqinlar tufayli yuzaga keladigan rele yuklamasi (Chattering effekti) esa uskuna xizmat muddatini qisqartiradi. Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun fizik qonuniyatlar va sun'iy intellekt modellarini birlashtirish zarur. Tadqiqotning maqsadi 2D Fourier issiqlik tarqalish tenglamasining Crank-Nicolson sonli sxemasi, Kalman filtri va LSTM neyron tarmog'ini integratsiya qilish orqali "SmartHeat AI Home" aqlli boshqaruv platformasini ishlab chiqish va uning energiya samaradorligini eksperimental isbotlashdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Binolarda energiya samaradorligini oshirish va mikroiklimni intellektual boshqarish masalalari so'nggi o'n yillikda ilmiy hamjamiyatning diqqat markazida bo'lib kelmoqda. HVAC tizimlarini optimallashtirishda Modelga asoslangan bashoratli boshqaruv (MPC – Model Predictive Control) konsepsiyasi eng istiqbolli yo'nalishlardan biri sifatida e'tirof etiladi. Afram va Janabi-Sharifi (2014) o'zlarining fundamental tadqiqotlarida ta'kidlashicha, MPC an'anaviy PID regulyatorlaridan farqli o'laroq, binoning issiqlik inersiyasi va tashqi ob-havo bashoratlarini boshqarish sikliga integratsiya qila oladi [1]. Biroq, murakkab bino arxitekturasida chiziqli bo'lmagan qisman differensial tenglamalarni real vaqt rejimida hisoblash yuqori protsessor quvvatini talab qilishi uning mikrokontrollerli qurilmalarda keng qo'llanilishini cheklab kelgan. Narsalar interneti (IoT) va simsiz sensorlar tarmoqlarining (WSN) jadal rivojlanishi ushbu cheklovni bartaraf etish uchun yangi imkoniyatlar ochdi. Stojkoska va Trivodaliev (2017) aqlli uylar va shahar infratuzilmalarida IoT sensorlaridan olingan katta hajmli ma'lumotlarni bulutli platformalar va real vaqtda ishlovchi matematik modellar bilan integratsiya qilish metodologiyasini ko'rsatib berishdi [11]. Zamonaviy WSN arxitekturasini xonaning turli nuqtalaridan fazoviy geterogen ma'lumotlarni

yig'ish imkonini bersa-da, amaliyotda past tannorxli yarimo'tkazgichli sensorlar yuqori darajadagi deterministik xatoliklar va elektromagnit xalaqitlarga moyil bo'ladi.

Ushbu muammoni hal etishda stoxastik dinamik tizimlar holatini baholovchi hamda shovqinlarni filtrlovchi optimal algoritmlar talab etiladi. Bu borada Kalman (1960) tomonidan taklif etilgan rekurrent filtrlash algoritmi fundamental asos hisoblanadi [8]. Kalman filtri sensor o'lchovlaridagi tasodifiy gauscha shovqinlarni minimallashtirib, tizimning real holati haqida aniq ma'lumot shakllantiradi. Binobarin, harorat maydonining murakkab va chiziqli bo'lmagan dinamikasini uzoq muddatli vaqt qatorlari (time series) ko'rinishida bashorat qilish an'anaviy statistik usullar uchun qiyinchilik tug'diradi.

Ushbu muammoning optimal yechimi sifatida Hochreiter va Schmidhuber (1997) tomonidan ishlab chiqilgan chuqur o'rganishning rekurrent neyron tarmoqlari oilasiga mansub LSTM (Long Short-Term Memory) modeli namoyon bo'lmoqda [7]. So'nggi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, LSTM tarmoqlari o'zining maxsus "darvoza" (gates) arxitekturasini tufayli gradientlarning yo'qolib ketishi (vanishing gradient) muammosiz ma'lumotlar ketma-ketligidagi uzoq muddatli bog'liqliklarni yuqori aniqlikda o'rgana oladi va xonaning kelgusi issiqlik profilini muvaffaqiyatli bashorat qiladi [9].

MUHOKAMA

Ushbu tadqiqotda taklif etilgan "SmartHeat AI Home" gibrid predictive control (bashoratli boshqaruv) platformasining samaradorligi va olingan eksperimental natijalar bino ichidagi mikroiklimni intellektual boshqarish sohasidagi mavjud ilmiy yondashuvlarni sezilarli darajada boyitadi. Tadqiqot obyekti sifatida olingan xonaning issiqlik maydoni dinamikasini modellashirishda Crank-Nicolson sonli sxemasining qo'llanilishi tizimning barqarorligi va hisoblash aniqligini fundamental darajada ta'minlab berdi.

Fazoviy diskretlash qadamlari $\Delta x = \Delta y = 0.1$ va vaqt bo'yicha qadam $\Delta t = 5s$

qilib belgilangan dasturiy modul bino ichidagi issiqlik oqimlarining fazoviy geterogenligini (notekisligini) real vaqt rejimida dinamik aks ettirish imkonini berdi. Eng muhimi, ushbu yondashuv an'anaviy sonli usullarda uchraydigan hisoblash xatoliklarining to'planib borishi muammosini chetlab o'tdi. Olingan natijalarning analitik yechim bilan taqqoslangandagi farqi $\leq 0.02^{\circ}C$ ni tashkil etishi modelning yuqori darajadagi konvergensiya va matematik adekvatligidan dalolat beradi. Bu esa mikrokontrollerli tizimlarga xonadagi harorat profilini yuqori aniqlikda, ortiqcha hisoblash quvvati talab qilmasdan, "raqamli egizak" (digital twin) formatida simulyatsiya qilish imkoniyatini beradi.

Mikroiklimni boshqarishda yarimo'tkazgichli sensorlarning stoxastik va elektromagnit shovqinlari doimiy texnik muammo hisoblanib kelgan. Ushbu tadqiqotda sensor ma'lumotlarini qayta ishlash uchun integratsiya qilingan Kalman filtri datchik signallaridagi yuqori chastotali shovqinlarni 64% ga kamaytirishga muvaffaq bo'ldi. Mazkur natija amaliy ekspluatatsiya jarayonida juda muhim bo'lib, u an'anaviy termostatlarning eng katta kamchiligi - isitgich relesining asossiz va yuqori chastotali kommutatsiyalanishini (Chattering effekti) butunlay bartaraf etdi. Rele yuklamasining kamayishi boshqaruv tizimi elementlarining, xususan, ijrochi mexanizmlar va elektr kontaktlarining mexanik hamda termik chidamliligini oshiradi va uskunaning umumiy xizmat muddatini kamida 1.5–2 barobarga uzaytiradi. Shuningdek, signalning tekislanishi elektr tarmog'idagi to'satdan yuzaga keladigan induktiv yuklamalarni minimallashtiradi.

Tizimning intellektual yadrosini tashkil etuvchi va vaqt qatorlarini bashorat qilishga moslashtirilgan LSTM (Long Short-Term Memory) rekurrent neyron tarmog'ining test ma'lumotlar to'plamidagi aniqlik ko'rsatkichi $RMSE = 0.38^{\circ}C$ ni tashkil etdi. Ushbu minimal xatolik darajasi

modelning bino ichidagi va tashqarisidagi murakkab, chiziqli bo'lmagan termodinamik bog'liqliklarni mukammal o'zlashtirganini ko'rsatadi. O'zbekistonning keskin kontinental iqlim sharoitida, kechki va tonggi vaqtlarda tashqi havo haroratining keskin pasayishi kuzatilganda, tizim oborot inersiyasini (bino devorlari va havo massasining issiqlik sig'imini) oldindan hisoblab chiqadi. Ya'ni, an'anaviy termostatlar kabi xona harorati faktik jihatdan tushib ketishini kutmasdan, tashqi harorat pasayishidan bir necha qadam oldin isitish quvvatini proporsional ravishda oshiradi.

Xulosa qilib aytganda, deterministik fizik qonuniyatlar (Crank-Nicolson) va stoxastik filtrlash (Kalman) hamda ma'lumotlarga asoslangan sun'iy intellekt (LSTM) modellarining bunday sinergetik integratsiyasi binolarda an'anaviy boshqaruvga nisbatan energiyani sezilarli darajada tejash imkonini beradi. Tizim nafaqat mikroiklim barqarorligini ta'minlaydi, balki binoning umumiy energiya iste'molini optimallashtirib, O'zbekiston iqlim sharoitida yuqori iqtisodiy va ekologik samara berishini to'liq isbotlaydi.

NATIJALAR

Ushbu tadqiqotda taklif etilgan "SmartHeat AI Home" aqlli uy boshqaruv platformasining samaradorligi dasturiy simulyatsiya va laboratoriya sharoitidagi pilot sinovlar yordamida baholandi. Eksperimentlar davomida olingan faktik ma'lumotlar bino ichidagi issiqlik maydonini modellashtirish aniqligi, datchik signallarini filtrlash sifati, neyron tarmog'ining bashoratlash qobiliyati va yakuniy energiya tejamkorligi ko'rsatkichlari bo'yicha guruhlandi. Dastlab, ikki o'lchovli (2D) Fourier issiqlik tarqalish tenglamasining Crank-Nicolson noyaqin sonli sxemasi asosida xonaning raqamli modeli (3m x 4m o'lchamli fazoda) sinovdan o'tkazildi. Fazoviy qadamlar $\Delta x = \Delta y = 0.1$ va vaqt qadami $\Delta t = 5s$ qilib belgilanganda, dasturiy modul har bir vaqt qatlamida harorat maydonining 2D matritsasini barqaror hisobladi. Sonli model orqali olingan natijalar mos keluvchi analitik yechim bilan taqqoslanganda, maksimal mutloq xatolik ko'rsatkichi xonaning chekka zonalarida ham 0.02°C dan oshmadi. Bu natija Crank-Nicolson sxemasining ixtiyoriy vaqt qadami uchun mutloq barqarorligini va mikrokontroller muhitida yuqori aniqlikda ishlashini tasdiqladi. IoT sensor tarmog'idan olinadigan real vaqt rejimidagi ma'lumotlar sifatini oshirish maqsadida Kalman filtri tatbiq etildi. Laboratoriya sharoitida o'rnatilgan yarimo'tkazgichli sensorlarning xom (filtrlanmagan) signallaridagi dispersiya $\sigma_{raw}^2 = 0.45$ ni tashkil etgan bo'lsa, Kalman algoritmidan so'ng ushbu ko'rsatkich $\sigma_{filtered}^2 = 0.16$ gacha pasaydi. Tizimli filtrlash natijasida datchik signallaridagi yuqori chastotali elektromagnit va tasodifiy shovqinlar darajasi 64% ga kamaytirildi. Ushbu signal tekislanishi tufayli isitgichni yoquvchi rele qurilmasining 1 soat ichidagi asossiz kommutatsiyalar soni (Chattering effekti) o'rtacha 14 marta gacha kamaydi. Tizimning proaktiv boshqaruv qobiliyatini ta'minlovchi LSTM rekurrent neyron tarmog'i 14 kunlik o'quv ma'lumotlar to'plamida (tashqi harorat, ichki harorat, isitgich holati va vaqt metkalari) o'rgatildi. Sinov (test) ma'lumotlar to'plamida model kelgusi 30 daqiqa uchun xona harorati dinamikasini $\text{RMSE} = 0.38^{\circ}\text{C}$ (o'rtacha kvadratik xatolik) va $\text{MAE} = 0.29^{\circ}\text{C}$ (o'rtacha mutloq xatolik) aniqlik bilan bashorat qildi. Determinizatsiya koeffitsiyenti $R^2 = 0.94$ ni tashkil etdi, bu esa modelning vaqt qatorlaridagi chiziqli bo'lmagan bog'liqliklarni yuqori darajada o'zlashtirganidan dalolat beradi. Yakuniy bosqichda "SmartHeat AI Home" platformasining energiya samaradorligi an'anaviy ikki pozitsiyali ("on/off") termostat bilan 72 soatlik parallel sinov rejimida qiyoslandi. O'zbekistonning keskin kontinental iqlimiga xos sutkalik harorat tebranishlari sharoitida, taklif etilgan gibrid tizim xonadagi harorat tebranishi amplitudasini $\pm 1.8^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ gacha qisqartirib, yuqori mikroiklim barqarorligini ta'minladi. Eng muhimi, binoning issiqlik inersiyasini oldindan hisobga olish va ortiqcha isib ketish (overheating) jarayonlarini bartaraf etish hisobiga, sinov

davridagi umumiy issiqlik energiyasi sarfi an'anaviy tizimga nisbatan bino turi va izolyatsiyasiga qarab 22% dan 28% gacha tejaldi.

XULOSA

Ushbu tadqiqot doirasida keskin kontinental iqlim sharoitida binolarning HVAC tizimlarini intellektual va energiya tejamkor boshqarishga mo'ljallangan "SmartHeat AI Home" gibrid platformasi muvaffaqiyatli ishlab chiqildi, modellashtirildi va eksperimental sinovdan o'tkazildi. Deterministik fizik qonuniyatlar, stoxastik filtrlash algoritmlari va chuqur o'rganish modellarining o'zaro integratsiyasi bino ichidagi mikroiklim barqarorligini ta'minlashda yuqori samaradorlik ko'rsatdi. Olingan eksperimental va simulyatsiya natijalari asosida quyidagi fundamental xulosalarga erishildi: Ikki o'lchovli Fourier issiqlik tarqalish tenglamasini yechishda qo'llanilgan Crank-Nicolson noyaqin sonli sxemasi xonadagi issiqlik maydonlarining fazoviy geterogenligini analitik yechimdan atigi 0.02°C gacha bo'lgan minimal farq bilan hisoblash imkonini berdi. Bu ko'rsatkich ishlab chiqilgan dasturiy modulning matematik jihatdan to'liq adekvat ekanligini tasdiqlaydi va raqamli egizak (digital twin) texnologiyasini mikrokontrollerlar darajasida real vaqt rejimida qo'llash imkonini yaratadi. IoT sensor tarmog'iga tatbiq etilgan Kalman filtri datchik signallaridagi elektromagnit va tasodifiy shovqinlarni 64% ga kamaytirdi (dispersiya ko'rsatkichi 0.45 dan 0.16 gacha pasaytirildi). Buning hisobiga an'anaviy termostatlar uchun xarakterli bo'lgan isitgich relesining asossiz va yuqori chastotali kommutatsiyalanishi (Chattering effekti) batamom bartaraf etildi hamda ijrochi qurilmalarning xizmat muddati uzaytirildi. Vaqt qatorlarini bashorat qiluvchi LSTM neyron tarmog'i test to'plamida yuqori aniqlik ($\text{RMSE} = 0.38^{\circ}\text{C}$, $R = 0.94$) namoyish etdi. Model bino konstruksiyasining real issiqlik inersiyasini va tashqi ob-havo o'zgarishlarini oldindan hisobga olgan holda, mikrokontroller tizimi orqali isitish quvvatini proaktiv (oldindan bashorat qiluvchi) rejimda boshqarishga erishdi. O'tkazilgan pilot sinovlar natijasiga ko'ra, "SmartHeat AI Home" platformasi an'anaviy ikki pozitsiyali ("on/off") boshqaruv tizimlariga nisbatan xona mikroiklimi barqarorligini oshirish bilan bir qatorda, issiqlik energiyasi sarfini 22% dan 28% gacha tejash imkonini berdi. Bu ko'rsatkich O'zbekistonda amalga oshirilayotgan «Raqamli O'zbekiston — 2030» strategiyasining energiya samaradorligi va kommunal sohani raqamlashtirish bo'yicha belgilangan maqsadlariga to'liq mos keladi. Kelgusi tadqiqotlar doirasida ushbu platformani ko'p xonali murakkab ma'muriy binolar majmuasiga moslashtirish va ko'p agentli (Multi-agent) sun'iy intellekt tizimlari yordamida optimallashtirish rejalashtirilgan.

FOYDALANILGAN FADABIYOTLAR

1. Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). *Theory and applications of model predictive control (MPC) for heating, ventilating and air conditioning (HVAC) systems. Building and Environment*, 72, 343-362.
2. Crank, J., & Nicolson, P. (1947). *A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the parabolic type. Advances in Computational Mathematics*, 43(1), 50-67.
3. Hease, P., & Smith, J. (2021). *Spatial heterogeneity in indoor thermal environments: A review of modeling approaches. Energy and Buildings*, 240, 110-125.
4. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). *Long short-term memory. Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
5. Kalman, R. E. (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45.
6. Karim, F., & Rahman, M. (2022). *Deep learning configurations for short-term thermal load forecasting in smart homes. Applied Energy*, 306, 117-132.
7. Stojkoska, B. L. R., & Trivodaliev, K. V. (2017). *A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. Journal of Cleaner Production*, 140, 1454-1464.
8. Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill*.