SIMSIZ SENSOR TUGUNLARINING TUZILISHI, ISHLASH PRINSIPI VA ENERGIYA SARFIGA TA'SIR ETUVCHI OMILLAR

Askarov Ulugbek Shavkat o'g'li
Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi TATU tayanch-doktoranti
https://doi.org/10.5281/zenodo.24484962

Annotatsiya. Ushbu maqolada simsiz sensor tugunining asosiy qismlari — sensor, mikrokontroller, xotira, radioaloqa moduli va quvvat manbai — hamda ularning tugun ish siklidagi vazifalari yoritildi. Ilmiy manbalar asosida o'lchash, ma'lumotni qayta ishlash, uzatish, qabul qilish va uyqu rejimlarida energiya sarfiga ta'sir etuvchi omillar tahlil qilindi. Tuproq namligini kuzatuvchi LoRaWAN tuguni bo'yicha e'lon qilingan tajriba ma'lumotlari asosida ish rejimlarining sikl energiyasidagi ulushi hisoblandi. Ko'rib chiqilgan 20 daqiqalik ish siklida radio orqali uzatishga jami energiyaning qariyb 85 foizi sarflangan. Bu qiymat tajribada ishlatilgan qurilma va radio sozlamalariga tegishli. Tahlilda har bir rejimning energiya sarfini baholash uchun tok kuchi bilan birga rejim davomiyligini ham hisobga olish zarurligi ko'rsatildi. Tahlil ko'p bosqichli tarmoqlarda oraliq tugunlar boshqa tugunlardan kelgan paketlarni qabul qilish va keyingi tugunga uzatish uchun sarflaydigan energiyani ham hisobga olish zarurligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar — simsiz sensor tuguni, simsiz sensor tarmog'i, ish sikli, uyqu rejimi, energiya sarfi, LoRaWAN, ko'p bosqichli marshrutlash.

WIRELESS SENSOR NODES: ARCHITECTURE, OPERATING PRINCIPLES, AND FACTORS AFFECTING ENERGY CONSUMPTION

Abstract: This article describes the main components of a wireless sensor node—the sensor, microcontroller, memory, radio module, and power supply—and explains their roles in the node's operating cycle. Based on published research, the article examines the factors affecting energy consumption during sensing, data processing, transmission, reception, and sleep. Published experimental data for a LoRaWAN node used to monitor soil moisture were used to calculate the share of energy consumed in each operating mode. Radio transmission accounted for approximately 85% of the total energy consumed during the 20-minute operating cycle under the hardware configuration and radio settings used in the experiment. The analysis shows that both current draw and the duration of each mode must be considered when assessing energy consumption. The analysis showed that, in multi-hop networks, energy consumption estimates should account for the energy that intermediate nodes use to receive and forward packets from other nodes.

Keywords — wireless sensor node, wireless sensor network, operating cycle, sleep mode, energy consumption, LoRaWAN, multi-hop routing.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ УЗЛОВ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Аннотация: В статье рассмотрены основные компоненты беспроводного сенсорного узла — датчик, микроконтроллер, память, радиомодуль и источник питания — и описаны их функции в рабочем цикле узла. На основе опубликованных исследований проанализированы факторы, влияющие на энергопотребление при измерении, обработке данных, передаче, приёме и работе в спящем режиме. По опубликованным экспериментальным данным для узла LoRaWAN, используемого для мониторинга влажности почвы, рассчитана доля каждого режима в общем расходе энергии за рабочий цикл. При конфигурации оборудования и настройках радиосвязи, использованных в эксперименте, на радиопередачу пришлось около 85 % энергии, израсходованной за 20-минутный рабочий цикл. Анализ показал, что при оценке энергопотребления необходимо учитывать как потребляемый ток, так и продолжительность каждого режима. Анализ показал, что при оценке энергопотребления в многошаговых сетях необходимо учитывать энергию, которую промежуточные узлы расходуют на приём и пересылку пакетов от других узлов.

Ключевые слова — беспроводной сенсорный узел, беспроводная сенсорная сеть, рабочий цикл, спящий режим, энергопотребление, LoRaWAN, многошаговая маршрутизация.

KIRISH

Simsiz sensor tarmog‘ida har bir sensor tuguni kuzatilayotgan muhitdan ma’lumot yig‘adi, uni qayta ishlaydi va radioaloqa orqali uzatadi. Tugun tarkibiga sensor, mikrokontroller, xotira, radio uzatkich-qabul qilgich va quvvat manbai kiradi. Sensor fizik kattalikni o‘lchash uchun signal hosil qiladi, hisoblash bloki bu signalni qayta ishlaydi, xotira ma’lumotni saqlaydi, radio modul esa uni uzatish va qabul qilishni ta’minlaydi [1; 65-b.]. Alisher Xayrullayev ishlab chiqqan elektr uzatish liniyalarini masofadan kuzatish qurilmasida ushbu vazifalar amaliy misolda ko‘rsatilgan. Qurilma sxemasida sensorlar, mikroprotsessor, xotira, ma’lumot uzatish va quvvatni boshqarish bloklari ajratilgan [2; 13-b., 2-rasm].

Batareya bilan ishlaydigan sensor tugunida energiya sarfi bajarilayotgan vazifaga qarab o‘zgaradi. Tugun ma’lumotni o‘lchash, qayta ishlash, uzatish va qabul qilish jarayonida turli miqdorda tok iste’mol qiladi. Ish rejimining umumiy sarfga qo‘shgan hissasini aniqlashda tok kuchi bilan birga shu rejim qancha vaqt davom etishi ham hisobga olinadi. Masalan, tuproq namligini kuzatuvchi ESP32 asosidagi tugun bo‘yicha tajribada chuqur uyqu, sensorni o‘qish va LoRa orqali uzatish rejimlarining tok kuchi hamda davomiyligi alohida qayd etilgan [3; 13-jadval]. Ko‘p bosqichli tarmoqda oraliq tugun o‘z o‘lchovlarini yuborish bilan birga boshqa tugunlardan kelgan paketlarni ham qabul qiladi va keyingi tugunga uzatadi. Shu qo‘shimcha ish radioaloqa uchun sarflanadigan energiyani baholashda hisobga olinadi [1; 34–35-b.].

Maqolaning maqsadi simsiz sensor tugunining asosiy qismlari va ish rejimlarini tavsiflash, energiya sarfiga ta’sir etuvchi omillarni aniqlash hamda e’lon qilingan tajriba ma’lumotlari asosida har bir rejimning bir ish siklidagi energiya ulushini hisoblashdan iborat. Ushbu tahlil ko‘p bosqichli marshrutlashda oraliq tugunlarning qo‘shimcha yukini energiya hisobiga kiritish uchun asos beradi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Simsiz sensor tuguni o‘lchash, hisoblash, simsiz aloqa va quvvat ta’minoti qismlaridan tashkil topadi [4; 14-b.]. Sensor kuzatilayotgan fizik kattalikka mos signal hosil qiladi. Mikrokontroller yoki mikroprotsessor signalni qayta ishlab, o‘lchov natijasini saqlash va uzatish uchun tayyorlaydi. Ushbu qismlarning o‘zaro bog‘lanishi elektr uzatish liniyalarini masofadan kuzatish qurilmasi misolida ko‘rsatilgan. Qurilmada bir nechta sensordan keladigan signallarni tanlash uchun multipleksor, ma’lumotlarni saqlash uchun xotira hamda uzatish va quvvatni boshqarish uchun alohida bloklar qo‘llangan [2; 13-b., 2-rasm].

Tugunning ishlash tartibi monitoring vazifasiga bog‘liq. Davriy kuzatuvda o‘lchovlar belgilangan oraliqda olinadi. O‘lchashlar orasida sensorni uyqu rejimiga o‘tkazish uning faol ishlash vaqtini qisqartiradi. Ma’lumotni tugunning o‘zida dastlabki qayta ishlash esa radio orqali yuboriladigan ma’lumot hajmini kamaytirishi mumkin [4; 15-b.]. Hodisaga asoslangan kuzatuvda sensorning ishga tushishi oldindan belgilangan shartga bog‘lanadi. Masalan, suv quvurini kuzatish tajribasida kam quvvatli akselerometr doimiy kuzatuv olib borgan, sezgirroq akselerometr esa tebranish belgilangan chegaradan oshganda ishga tushirilgan [5; 2.2-bo‘lim]. Shunday qilib, o‘lchash blokining sarfi sensorning xususiyatlari bilan birga o‘lchash davriyligi va faol ishlash vaqtiga ham bog‘liq.

Tugunning bir ish siklidagi energiya sarfini baholashda har bir rejim uchun **ta’minot kuchlanishi, iste’mol toki va rejim davomiyligi** hisobga olinadi. Tuproq namligini kuzatuvchi ESP32 asosidagi tugun tajribasida chuqur uyqu, sensorni o‘qish va LoRa orqali uzatish rejimlari uchun tok kuchi, davomiylik va sarflangan energiya keltirilgan [3; 13-jadval]. Elektr uzatish liniyalarini kuzatuvchi *LoRaBUS* tugunida esa uzatish toki 160 mA, chuqur uyqu toki 7 mA bo‘lgan. Uyqu rejimi uzoq davom etgani sababli aynan shu rejimga bir sikldagi eng katta zaryad sarfi to‘g‘ri kelgan [6; 4.1-bo‘lim, 4-jadval]. Bu natija uzatishdagi eng yuqori tok qiymati sikl bo‘yicha sarfning qayerda to‘planishini yakka o‘zi ko‘rsatmasligini tushuntiradi. [3] manbada energiya millijoulda (mJ), [6] manbada esa elektr zaryadi milliamper-soatda (mAh) berilgan. Shu sababli har bir natija o‘z o‘lchov birligi va tajriba sharoiti doirasida talqin qilinadi.

Radioaloqa sarfi tugunning qancha vaqt uzatish va qabul qilish rejimlarida qolishiga bog‘liq. Kanalni tekshirish, boshqaruv paketlari bilan almashish hamda muvaffaqiyatsiz uzatishni takrorlash radio modulning faol ishlash vaqtini oshirishi mumkin [1; 33–35-b.]. LoRaWAN tuguni uchun taklif etilgan energiya modelida tarmoqdagi tugunlar soni, uzatishlar to‘qnashuvi ehtimoli va takroriy urinishlar hisobga olingan [7; annotatsiya]. IEEE 802.15.4 asosidagi ierarxik sensor tarmog‘i modelida esa o‘lchangan tok qiymatlari va ish rejimlarining davomiyligi topologiyaga bog‘liq yuk hamda takroriy uzatishlar bilan birga baholangan [8; annotatsiya].

Ko‘p bosqichli tarmoqda oraliq tugun o‘z o‘lchovlarini yuborish bilan birga boshqa tugunlarning paketlarini ham qabul qiladi va keyingi tugunga uzatadi. Shu sababli energiya hisobida tugunning o‘zi hosil qilgan paketlar oqimi bilan u orqali qayta uzatiladigan paketlar oqimini alohida ko‘rsatish muhim [1; 35-b., (2.2)–(2.3) ifodalar]. *LoRaHop* tajribasida uzatish va qabul qilish rejimlaridagi radio toki alohida o‘lchangan, radioaloqa sarfi esa belgilangan miqdordagi paketlarni yuborish bo‘yicha hisoblangan [9; muallif nusxasi, 10-b.]. Marshrut tanlovi paketlar qaysi tugunlar orqali o‘tishini belgilaydi. Shuning uchun marshrut o‘zgarganda oraliq tugunlar orasida qabul qilish va uzatish yuki ham qayta taqsimlanishi mumkin.

Mazkur maqolada tuproq namligini kuzatuvchi tugun uchun e’lon qilingan tajriba ma’lumotlari asosida sensorni o‘qish, chuqur uyqu va radio orqali uzatish rejimlarining bir ish siklidagi energiya ulushi hisoblanadi [3; 13-jadval]. Bu hisob alohida sensor tugunining ish siklini tavsiflaydi. Ko‘p bosqichli tarmoqqa tatbiq etilganda esa oraliq tugunning boshqa qurilmalar paketlarini qabul qilish va qayta uzatish sarfi ham hisobga olinadi.

METODOLOGIYA

Tadqiqotda ilmiy manbalarni tahlil qilish va e’lon qilingan tajriba ma’lumotlari asosida hisoblash usullaridan foydalanildi. Sensor tugunining tarkibiy qismlari va ularning vazifalari [1; 65-b.], [2; 13-b., 2-rasm] va [4; 14–15-b.] manbalari asosida o‘rganildi. Ko‘p bosqichli tarmoqda tugunning o‘z paketlarini uzatishi hamda boshqa tugunlardan kelgan paketlarni qabul qilib, keyingi tugunga uzatishi bilan bog‘liq sarflar [1; 34–35-b.] va [9; muallif nusxasi, 10-b.] asosida tahlil qilindi.

Sonli hisoblash uchun [3; 13-jadval] manbasida keltirilgan ESP32 asosidagi tuproq namligini monitoring qilish tugunining **20 daqiqalik ish sikli** olindi. Bluetooth Low Energy (BLE) o‘chirilgan holat uchun uchta rejim — chuqur uyqu, sensor ko‘rsatkichini o‘qish va LoRa orqali ma’lumot uzatish — ko‘rib chiqildi. Har bir rejim bo‘yicha o‘rtacha tok kuchi va rejim davomiyligi olindi. Energiya sarfi manbada qo‘llangan **3,3 V** kuchlanish qiymati asosida quyidagicha hisoblandi:

$$E_i = U I_i t_i$$

Bu yerda Ei — i-rejimda sarflangan energiya, mJ, U — ta’minot kuchlanishi, V, Ii — rejimdagi o‘rtacha tok kuchi, mA, ti — rejim davomiyligi, s. Jami sikl energiyasi uchta rejim energiyasini yig‘ish orqali aniqlandi. Har bir rejimning jami sarfdagi ulushi quyidagi formula bilan hisoblandi:

$$\eta_i = \frac{E_i}{E_{\text{sikl}}} \times 100\%$$

Hisoblangan ulushlar tanlangan tugun va manbada ko‘rsatilgan radio sozlamalari doirasida talqin qilindi. Ular bir ish siklida energiya qaysi bosqichlarga taqsimlanganini ko‘rsatadi. Ko‘p bosqichli marshrutlashda oraliq tugunning paketlarni qabul qilish va qayta uzatish sarfi adabiyotlar asosida izohlandi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Tuproq namligini kuzatish uchun qo‘llangan LoRaWAN sensor tugunining 20 daqiqalik ish siklida energiyaning 85,0 foizi ma’lumot uzatishga sarflangan. Tugun chuqur uyqu rejimida qariyb 20 daqiqa turgan bo‘lsa ham, bu rejimdagi energiya sarfi 1,8 soniyalik uzatish sarfidan ancha past bo‘lgan. Bunga uzatish paytidagi tok kuchining yuqoriligi sabab bo‘lgan. 1-jadvalda Bluetooth Low Energy (BLE) o‘chirilgan holat uchun energiya sarfining ish rejimlari bo‘yicha taqsimoti keltirilgan [3; 13-jadval].

1-jadval

Tuproq namligini kuzatuvchi LoRaWAN tugunining bir ish siklidagi energiya sarfi

Ish rejimi	O‘rtacha tok kuchi, mA	Davomiyligi, s	Energiya, mJ	Jami sarfdagi ulushi, %
Chuqur uyqu	0,028	1198	110,7	13,3
Sensor ko‘rsatkichini o‘qish	42,3	0,1	14,0	1,7
LoRa orqali uzatish (SF12, 11 bayt)	118,7	1,8	705,1	85,0
Jami	—	—	829,8	100,0

Manba. *Tok kuchi, davomiylik va energiya qiymatlari [3; 13-jadval]dan olindi. Ulushlar har bir rejim energiyasini siklning jami energiyasiga bo‘lish orqali hisoblandi.*

Elektr uzatish liniyalarini monitoring qilish uchun ishlab chiqilgan LoRaBUS tugunida sarf boshqacha taqsimlangan. Chuqur uyqudagi tok kuchi 7 mA bo‘lib, bu rejim 300 soniya davom etgan. Manbada keltirilgan qiymatlar asosida hisoblanganda, chuqur uyqu rejimiga bir siklda sarflangan elektr zaryadining 58,6 foizi (0,58 mAh / 0,9891 mAh) to‘g‘ri kelgan [6; 4-jadval]. Ikki tugun bo‘yicha qiyos har bir sikl ichidagi ulushlarga asoslanadi. Tuproq namligini kuzatuvchi tugunda asosiy sarf uzatish rejimiga, LoRaBUS tugunida esa chuqur uyqu rejimiga to‘g‘ri kelgan. Demak, energiya tejamkorligini oshirish uchun qaysi rejimga ustuvor e’tibor berish tugunning har bir rejimdagi tok kuchi va shu rejimda qancha vaqt ishlashiga bog‘liq.

Ko‘p bosqichli tarmoqda tugunning energiya sarfiga uning marshrutdagi vazifasi ham ta’sir qiladi. Oraliq tugun o‘z o‘lchovlarini uzatish bilan birga boshqa tugunlarning paketlarini qabul qiladi va keyingi tugunga uzatadi. LoRaHop sinovlarida tarmoq diametri kattalashgan sari energiya sarfi oshgan [9; 11-rasm]. Bu natija ko‘p bosqichli tarmoqni baholashda oraliq tugunlarning paketlarni qabul qilish va uzatish yuklamasini ham hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. Tuproq namligini kuzatish tizimida bunday tahlil uchun tugunning o‘z o‘lchov paketlari soni va u orqali uzatiladigan boshqa tugunlar paketlari soni alohida qayd etilishi mumkin.

XULOSA

Simsiz sensor tugunining bir ish siklidagi energiya sarfi o‘lchash, ma’lumotni qayta ishlash, radioaloqa va uyqu rejimlaridagi tok kuchi hamda ularning davomiyligiga bog‘liq. Ko‘rib chiqilgan tuproq namligi tugunida sikl energiyasining 85,0 foizi radio orqali uzatishga to‘g‘ri kelgan [3; 13-jadval]. LoRaBUS tugunida esa sikl davomida sarflangan elektr zaryadining 58,6 foizi chuqur uyqu rejimiga to‘g‘ri kelgan [6; 4-jadval]. Bu natijalar energiyani tejash bo‘yicha qaysi ish rejimiga ustuvor e’tibor berish kerakligini har bir tugunning ish sikli asosida aniqlash zarurligini ko‘rsatadi.

Ko‘p bosqichli simsiz sensor tarmog‘ida oraliq tugun o‘z o‘lchovlarini uzatish bilan birga boshqa tugunlarning paketlarini qabul qiladi va keyingi tugunga uzatadi. Shu bois energiya samaradorligiga yo‘naltirilgan marshrutlash modelida tugunning o‘z paketlari va u orqali uzatiladigan paketlar uchun sarflanadigan energiyani alohida hisobga olish maqsadga muvofiq. Bu yondashuv marshrut tanlovi energiya yuklamasini tugunlar o‘rtasida qanday taqsimlashini baholashga imkon beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Xaytbayev, A. F. (2025). *Simsiz sensor tarmog‘ining ishlash samaradorligini oshirish modellari va algoritmlari*. Texnika fanlari bo‘yicha PhD dissertatsiyasi. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti. To‘liq dissertatsiya
2. Xayrullayev, A. F. (2025). *Past kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining simsiz sensor tarmoqlari asosida masofadan monitoringi*. Texnika fanlari bo‘yicha PhD dissertatsiyasi avtoreferati. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti. OAK avtoreferati PDF
3. Abdanan Mehdizadeh, S., Mohammadi Moalezadeh, J., & Ampatzidis, Y. (2026). A LoRaWAN-enabled capacitive sensor network for soil moisture and groundwater monitoring. *Sensors, 26*(20), 6558. https://doi.org/10.3390/s26206558
4. Väänänen, O. (2023). *Lightweight methods to reduce the energy consumption of wireless sensor nodes with data compression and data fusion*. Doktorlik dissertatsiyasi. University of Jyväskylä. *JYU Dissertations*, 645. To‘liq PDF
5. Nkemeni, V., Mieyeville, F., & Tsafack, P. (2023). Energy consumption reduction in wireless sensor network-based water pipeline monitoring systems via energy conservation techniques. *Future Internet, 15*(12), 402. https://doi.org/10.3390/fi15120402
6. Alorda-Ladaria, B., Pons, M., & Isern, E. (2025). A self-configurable BUS network topology based on LoRa nodes for the transmission of data and alarm messages in power line-monitoring systems. *Sensors, 25*(5), 1484. https://doi.org/10.3390/s25051484
7. Maudet, S., Andrieux, G., Chevillon, R., & Diouris, J.-F. (2021). Refined node energy consumption modeling in a LoRaWAN network. *Sensors, 21*(19), 6398. https://doi.org/10.3390/s21196398
8. Ojeda, F., Mendez, D., Fajardo, A., Becker, M. G., & Ellinger, F. (2026). A hybrid deterministic-stochastic cross-layer energy model for hierarchical wireless sensor networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks, 15*(5), 82. https://doi.org/10.3390/jsan15050082
9. Tian, P., Boano, C. A., Ma, X., & Wei, J. (2023). LoRaHop: Multi-hop support for LoRaWAN uplink and downlink messaging. *IEEE Internet of Things Journal, 10*(17), 15376–15392. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3263630