QUYOSH ENERGIYASI BILAN TA’MINLANADIGAN TASHQI YORITISH TIZIMIDA «TUNGI ENERGIYA BYUDJETI» ASOSIDAGI ADAPTIV BOSHQARUV ALGORITMI

UO‘K 621.311.243:628.971

Toshpo‘latov I.K.[1], Ismanov M.A.[2]

[1]Namangan davlat texnika universiteti magistranti; [2]Namangan davlat texnika universiteti, t.f.f.d. (PhD), dotsent

E-mail:ismanovm91@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada quyosh fotovoltaik panellari va $LiFePO_4$ akkumulyatorlaridan ta’minlanadigan, tarmoqdan zaxira manbaiga ega tashqi yoritish tizimi uchun akkumulyator zaryad darajasi va PV generatsiya prognozini hisobga oluvchi «tungi energiya byudjeti» usuli taklif etilgan. Usul tun boshida bazaviy yoritish sathini shunday tanlaydiki, akkumulyatordagi foydali energiya tong otguncha yetadi va ertangi kun uchun zaxira qoladi. Namangan shahri iqlim sharoiti uchun yillik imitatsion modellashtirish natijalariga ko‘ra taklif etilgan algoritm qat’iy jadval bo‘yicha boshqaruvga nisbatan tarmoqdan iste’molni 14,4 % ga kamaytiradi va o‘rtacha yorug‘likni 74,7 % dan 78,4 % gacha oshiradi.

Kalit so‘zlar: tashqi yoritish, quyosh energiyasi, $LiFePO_4$ akkumulyator, adaptiv dimming, energiya byudjeti, zaryad darajasi, modellashtirish.

Аннотация. В статье предложен метод «ночного энергетического бюджета» для системы наружного освещения с питанием от фотоэлектрических панелей и $LiFePO_4$-аккумуляторов и резервом от сети. Метод в начале ночи выбирает базовый уровень освещённости с учётом степени заряда аккумулятора и прогноза ФЭ-генерации. По результатам годового моделирования для условий г. Наманган предложенный алгоритм снижает потребление из сети на 14,4 % по сравнению с управлением по жёсткому графику и повышает среднюю освещённость с 74,7 % до 78,4 %.

Ключевые слова: наружное освещение, солнечная энергия, $LiFePO_4$-аккумулятор, адаптивное диммирование, энергетический бюджет, моделирование.

Abstract. The paper proposes a “night energy budget” method for an outdoor lighting system powered by photovoltaic panels and $LiFePO_4$ batteries with grid backup. At dusk the method selects the base dimming level from the battery state of charge and a PV generation forecast. Annual simulation for Namangan shows that the proposed algorithm reduces grid consumption by 14.4 % compared with fixed-schedule control while raising the average light level from 74.7 % to 78.4 %.

Keywords: outdoor lighting, solar energy, $LiFePO_4$ battery, adaptive dimming, energy budget, state of charge, simulation.

Kirish

Tashqi yoritish har kecha 8–14 soat ishlaydigan doimiy iste’molchi bo‘lib, mahalliy byudjetlarning elektr energiyasi xarajatlarida sezilarli ulushga ega. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-4422 va PQ-5063-son qarorlarida energiya samaradorligini oshirish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini joriy etish ustuvor vazifa sifatida belgilangan [1, 2].

Avtonom quyosh yoritgichlarining asosiy kamchiligi shundaki, ular odatda yoritish quvvatini qat’iy jadval bo‘yicha boshqaradi va akkumulyatordagi energiya miqdorini hisobga olmaydi. Natijada qishda, eng uzun kechalarda generatsiya eng kam bo‘lganda akkumulyator tun yarmida zaryadsizlanadi, yozda esa ortiqcha PV energiyasi foydalanilmay qoladi [3, 4]. Ushbu maqolaning maqsadi — akkumulyator zaryadi va PV generatsiya prognoziga moslashuvchi tungi yoritish sathini tanlash usulini ishlab chiqish va uning samaradorligini baholash.

Tadqiqot ob’ekti va usullari

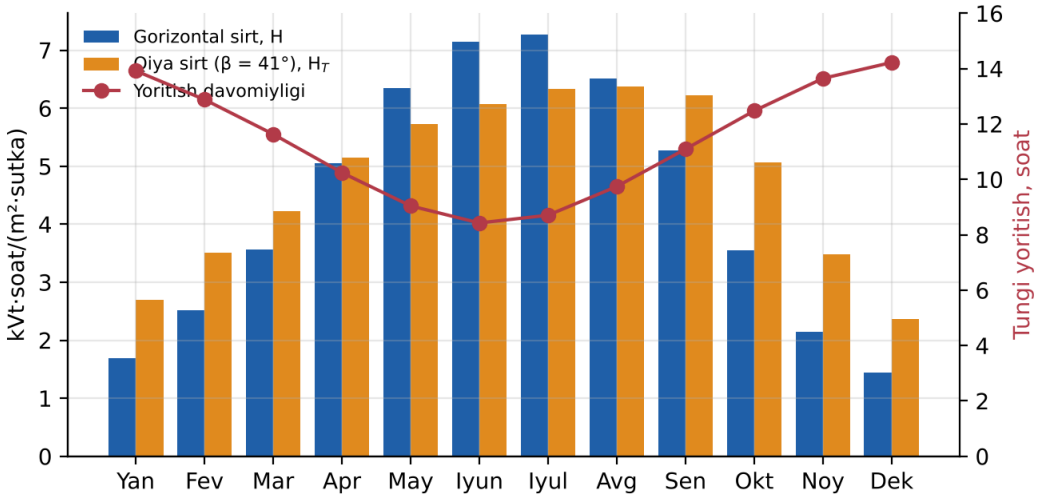
Tadqiqot ob’ekti — 30 ta 50 Vt LED yoritgichdan iborat (jami 1,5 kVt) ko‘cha uchastkasi. Energiya manbai — 8 × 455 Vt fotovoltaik modul (3,64 kVt), ikkita MPPT kontroller, 21,3 kVt·soat sig‘imli $LiFePO_4$ akkumulyator bloki va tarmoqdan

zaxira kirishiga ega invertor. Boshqaruv ESP32 mikrokontrolleri asosida amalga oshiriladi [5].

Namangan shahri (φ = 41,0° sh.k.) uchun gorizontal sirtga tushadigan oylik o‘rtacha kunlik radiatsiya Angstrom–Prescott tenglamasi bo‘yicha hisoblandi [6]:

$$H = H_0 \cdot (a + b \cdot S / N), \qquad (1)$$

bu yerda H_0 — atmosferadan tashqaridagi radiatsiya; S/N — quyoshli soatlarning nisbiy davomiyligi; a, b — empirik koeffitsiyentlar. Qiya sirtga o‘tish Liu–Jordan modeli bo‘yicha bajarildi. Natijada yillik radiatsiya gorizontal sirtda 1 601 kVt·soat/m², 41° qiyalikda 1 743 kVt·soat/m² ni tashkil etdi, PV massivning yillik generatsiyasi 5 452 kVt·soat, yoritish davomiyligi yiliga 4 139 soat (1-rasm).



1-rasm. Namangan shahri uchun oylik quyosh radiatsiyasi va tungi yoritish davomiyligi

1-rasmdan ko‘rinadiki, dekabrda kunlik radiatsiya atigi 1,45 kVt·soat/m², tun davomiyligi esa 14,2 soat, iyunda mos ravishda 7,15 kVt·soat/m² va 8,4 soat. Ana shu qarama-qarshilik qat’iy jadvalli boshqaruvning asosiy kamchiligini keltirib chiqaradi.

Tungi energiya byudjeti usuli. Yoritgichlar yoqilgan paytda kontroller tun bo‘yi kerak bo‘ladigan energiyani bazaviy sath d ning funksiyasi sifatida hisoblaydi:

$$E_{tun}(d) = P_{yuk} \cdot [t_k + (d \cdot (1 - k_h) + k_h) \cdot (T_{tun} - t_k - t_t) + d_t \cdot t_t], \qquad (2)$$

bu yerda $P_{yuk} = 1{,}5$ kVt — to‘liq quvvat; T_{tun} — tun davomiyligi; t_k — kechki to‘liq quvvat davri (23:00 gacha); t_t — tonggi davr; $d_t = 0{,}7$ — tonggi sath; $k_h = 0{,}25$ — harakat datchiklari tufayli to‘liq quvvatda ishlash ulushi.

Keyingi kun uchun PV generatsiya so‘nggi uch kunlik o‘rtacha qiymat bo‘yicha bashorat qilinadi va ertalab uchun zarur zaxira aniqlanadi:

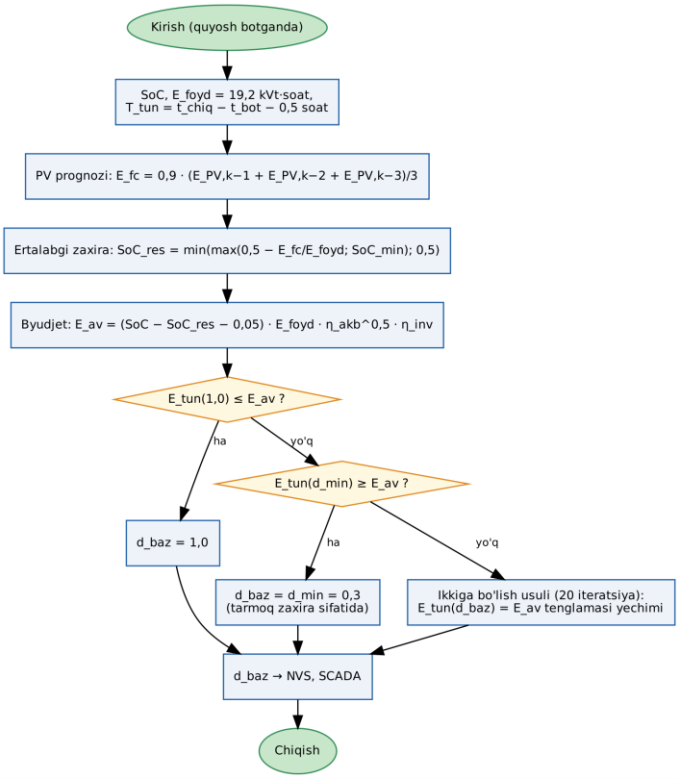
$$E_{fc} = 0{,}9 \cdot (E_{PV,k-1} + E_{PV,k-2} + E_{PV,k-3}) / 3, \quad (3)$$

$$SoC_{res} = \min\{\, \max[0{,}5 - E_{fc}/E_{foyd};\, SoC_{min}];\, 0{,}5 \,\}. \quad (4)$$

Tun uchun mavjud energiya akkumulyator va invertor FIK hisobga olingan holda topiladi:

$$E_{av} = (SoC - SoC_{res} - 0{,}05) \cdot E_{foyd} \cdot \sqrt{\eta_{akb} \cdot \eta_{inv}}, \quad (5)$$

bu yerda $E_{foyd} = 19{,}18$ kVt·soat — akkumulyatorning foydali sig‘imi. Bazaviy sath $E_{tun}(d_{baz}) = E_{av}$ tenglamasidan ikkiga bo‘lish usuli bilan $0{,}3 \le d_{baz} \le 1$ oralig‘ida topiladi (2-rasm). Akkumulyator chuqur razryadlanishining oldini olish uchun SoC ≤ 10 % da yuk tarmoqqa o‘tkaziladi, SoC ≥ 30 % da esa quyosh-akkumulyator rejimiga qaytiladi.

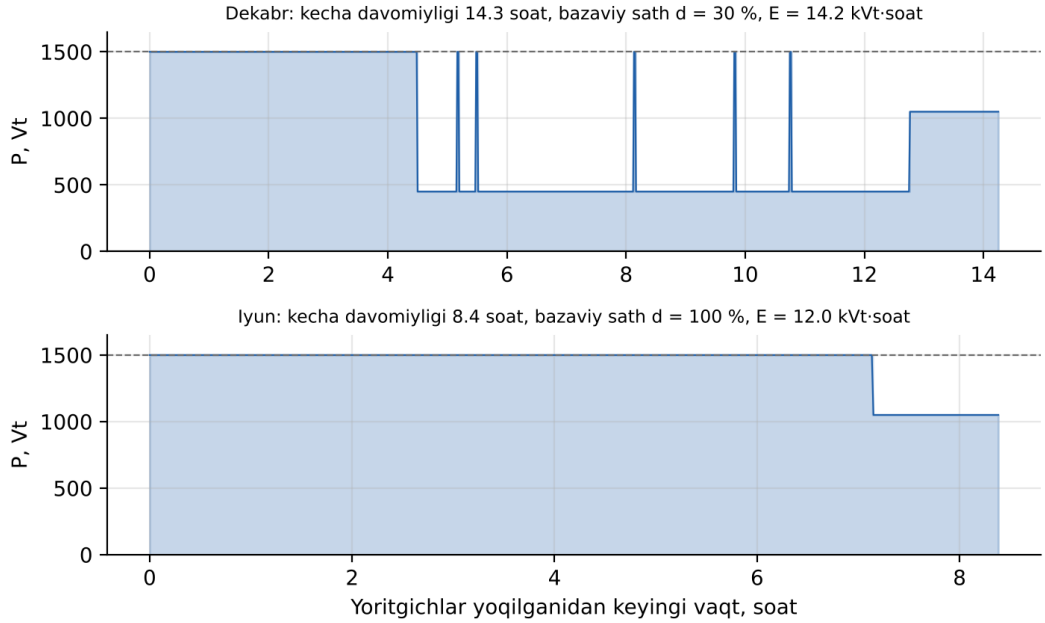


2-rasm. «Tungi energiya byudjeti» kichik dasturining blok-sxemasi

Algoritm samaradorligini baholash uchun Python/NumPy muhitida bir soatlik qadam bilan yillik imitatsion model tuzildi. Uch boshqaruv rejimi taqqoslandi: doimiy 100 % quvvat; qat’iy jadval (23:00–05:00 da 30 %); taklif etilgan adaptiv algoritm.

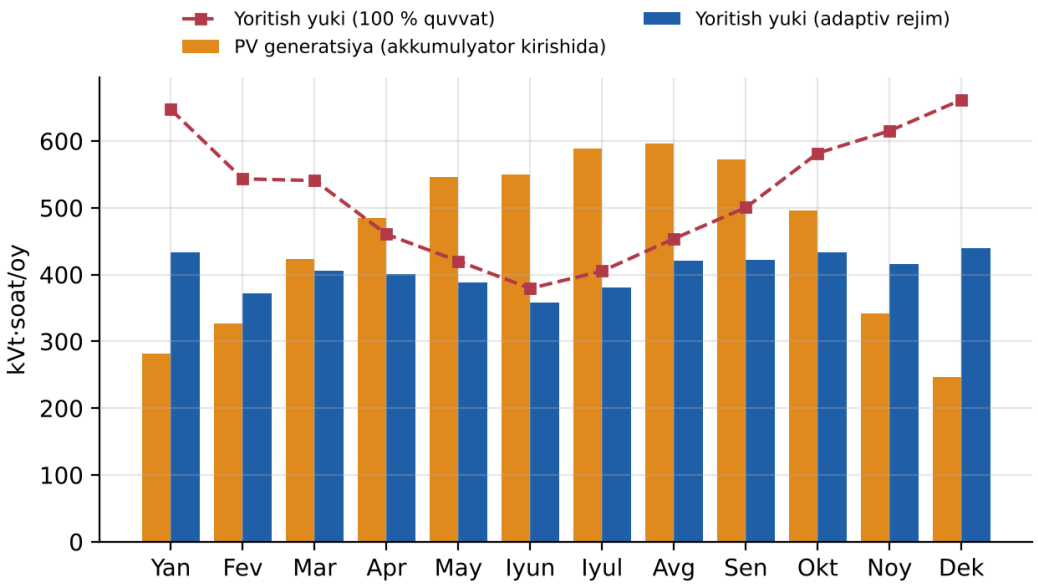
Natijalar va muhokama

3-rasmda adaptiv algoritmning dekabr va iyun kechalaridagi quvvat profili keltirilgan. Dekabrda energiya byudjeti yetarli bo‘lmagani uchun tun o‘rtasida sath 30 % gacha pasaytiriladi, harakat aniqlanganda esa vaqtincha 100 % ga ko‘tariladi. Iyunda byudjet yetarli bo‘lib, yoritish butun tun to‘liq quvvatda ishlaydi.



3-rasm. Adaptiv algoritmda bir kechalik quvvat profili: dekabr va iyun

Oylik energetik balans (4-rasm) adaptiv rejimda yoritish yukining PV generatsiyaga moslashishini ko‘rsatadi: bazaviy sath noyabr–fevralda 0,30, may–avgustda esa 0,91–0,97 ni tashkil etadi.



4-rasm. Oylik energetik balans: PV generatsiya va yoritish yuki

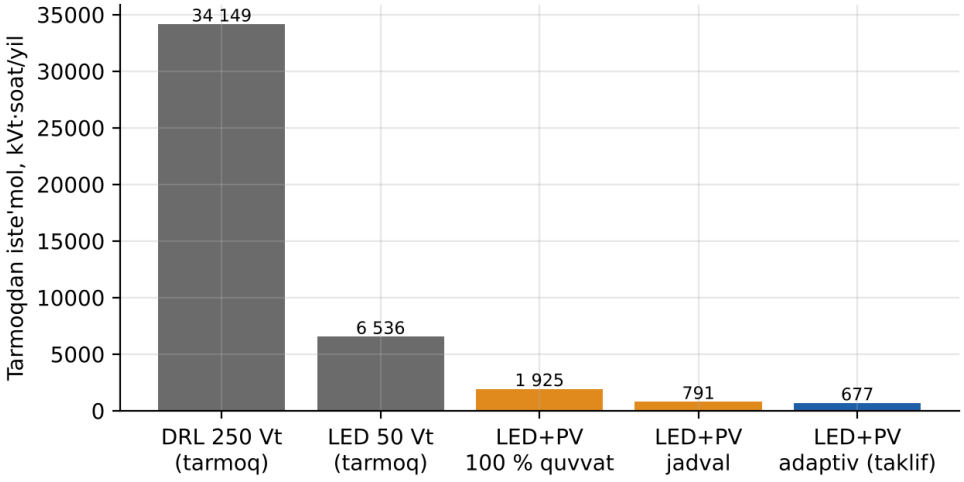
1-jadval

Boshqaruv rejimlarini taqqoslash (yillik ko‘rsatkichlar)

Ko‘rsatkich	Doimiy 100 %	Qat’iy jadval	Adaptiv (taklif)
Tarmoqdan iste’mol, kVt·soat	1 925	791	677
O‘rtacha yorug‘lik darajasi, %	100,0	74,7	78,4
Quyosh energiyasi ulushi, %	70,9	84,0	86,9
Kontaktor kalitlanishlari, marta	497	297	299
Yoritish yuki, kVt·soat	6 209	4 637	4 870

1-jadvaldan ko‘rinadiki, adaptiv algoritm qat’iy jadvalga nisbatan tarmoqdan iste’molni 791 dan 677 kVt·soatgacha, ya’ni 14,4 % ga kamaytiradi va bir vaqtda o‘rtacha yorug‘likni 3,7 punktga oshiradi. Bu natija energiyaning qishda tejalib, yozda to‘liq ishlatilishi hisobiga erishiladi. Doimiy rejimga nisbatan kontaktor kalitlanishlari 39,8 % ga kamayadi.

DRL lampali an’anaviy tizim bilan solishtirganda (5-rasm) tarmoqdan yillik iste’mol 34 149 kVt·soatdan 677 kVt·soatgacha (98 %) kamayadi, bu esa yiliga taxminan 20,1 t CO_2 chiqindilarining oldini olishga teng.



5-rasm. Turli variantlarda tarmoqdan yillik elektr iste’moli

Xulosa

1. Akkumulyator zaryad darajasi va PV generatsiya prognozini hisobga oluvchi «tungi energiya byudjeti» usuli taklif etildi; u tun boshida bazaviy yoritish sathini 0,3–1,0 oralig‘ida avtomatik tanlaydi.

2. Namangan sharoiti uchun yillik modellashtirish adaptiv algoritm qat’iy jadvalga nisbatan tarmoqdan iste’molni 14,4 % ga kamaytirishini va o‘rtacha yorug‘likni 74,7 % dan 78,4 % gacha oshirishini ko‘rsatdi; quyosh energiyasi ulushi 86,9 % ni tashkil etdi.

3. Usul ESP32 kabi arzon mikrokontrollerlarda amalga oshirilishi mumkin va mavjud avtonom quyosh yoritgichlarini modernizatsiya qilishda qo‘llanilishi mumkin. Keyingi bosqichda tajriba uchastkasida dala sinovlarini o‘tkazish va ob-havo prognozi ma’lumotlaridan foydalanish rejalashtirilgan.

Adabiyotlar

1. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son qarori. — lex.uz/docs/4486125.
2. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 9-apreldagi PQ-5063-son qarori. — lex.uz/docs/5362032.
3. Masters G.M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013.

4. International Energy Agency. Solar Energy Policy in Uzbekistan: A Roadmap. — Paris: IEA, 2022.
5. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. — Shanghai: Espressif Systems.
6. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. — Hoboken: Wiley, 2013.
7. Kodirov D., Tursunov O., Zhou Y., Li G., Yu Q. Study on the assessment of solar energy potential for production of electricity: a case study of Uzbekistan // Clean Energy. — 2025. — Vol. 9, No. 6.
8. Villalva M.G., Gazoli J.R., Ruppert Filho E. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2009. — Vol. 24, No. 5. — P. 1198–1208.
9. CIE 115:2010. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. — Vienna: CIE, 2010.
10. Ismanov M.A., Raximov R.G‘. Avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari. — Namangan, 2023.