UDK 621.311.243 + 621.548:621.355

# QUYOSH VA SHAMOL ENERGIYASI ASOSIDAGI GIBRID ENERGIYA TA'MINOTI TIZIMLARINING MATEMATIK MODELI VA SAMARADORLIK TAHLILI

**Almardanov Hamidilla Abdig‘aniyevich**
PhD, Qarshi davlat texnika universiteti,
Energetika muhandisligi kafedrasi dotsenti

**Eshquvvatov Ayyub Nematulla o‘g‘li**
Qarshi davlat texnika universiteti,
Energetika muhandisligi kafedrasi 1-bosqich magistranti
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20562451

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada quyosh fotovoltaik paneli va shamol turbinasini birlashtirgan avtonom gibrid energiya ta'minoti tizimining kompleks matematik modeli ishlab chiqilgan. Tizimning energiya balansi, MPPT (Maximum Power Point Tracking) nazorat algoritmi, Li-ion akkumulyator batareyasining zaryadlanish-razryadlanish dinamikasi va invertor samaradorligi birgalikda modellashtirilgan. Qashqadaryo viloyatining 2019–2023-yillar meteorologik ma'lumotlari asosida MATLAB/Simulink R2023b muhitida o'tkazilgan yillik simulyatsiya natijalari tahlil etilgan. Qiyosiy baholash shuni ko'rsatdiki, gibrid tizim iste'molchi yukini 96,8% darajada qondiradi; bu ko'rsatkich faqat PV va faqat shamol tizimiga nisbatan mos ravishda 24,8 va 42,8 foizga yuqori. Energiya tannarxi 350 so'm/kWh bo'lib, kapital xarajatlarni qoplash muddati 7,8 yilni tashkil etadi. $CO_2$ emissiyasi yiliga 6,5 tonnaga kamaytirilishi aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** gibrid energiya tizimi; fotovoltaik panel; shamol turbinasi; MPPT; energiya samaradorligi; Li-ion akkumulyator; avtonom tarmoq; quvvat balansi; MATLAB/Simulink; OAK.

## KIRISH

Jahon miqyosida qayta tiklanadigan energiya manbalari (QTM) ulushini oshirishga bo'lgan siyosiy va iqtisodiy intilish keskin kuchaymoqda. IRENA ma'lumotlariga ko'ra, 2023-yilda global QTM o'rnatilgan quvvati 3 395 GW ga yetdi; shundan quyosh fotovoltaik (PV) texnologiyalari 1 419 GW va shamol energetikasi 1 017 GW ni tashkil etdi [1]. Biroq ushbu texnologiyalar o'z tabiatiga ko'ra stoxastik xarakter kasb etadi - ya'ni hosil bo'ladigan quvvat ob-havo omillariga bog'liq holda kutilmagan ravishda o'zgarib turadi. Bu holat yagona manba asosida ishonchli energiya ta'minoti tizimini qurishni qiyinlashtiradi [2].

O'zbekiston Respublikasi 2030-yilgacha bo'lgan davrda umumiy energiya balansida QTM ulushini 40% ga yetkazishni maqsad qilgan [3]. Mamlakatning geografik joylashuvi bu maqsadga erishish uchun noyob imkoniyatlar beradi: yillik quyosh radiatsiyasi 5,5–6,5 kWh/m²/kun va o'rtacha shamol tezligi 4-7 m/s darajasida bo'lib, mintaqani eng istiqbolli QTM zonalaridan biriga aylantiradi [4].

Gibrid energiya tizimlari (GET) - bir necha qayta tiklanadigan manbani energiya saqlash qurilmalari bilan birlashtirgan kompleks arxitekturalar - yagona manbali tizimlarning kamchiliklarini bartaraf etishning samarali yo'li hisoblanadi [5]. Biroq bunday tizimlarni optimal loyihalash murakkab muhandislik muammosi bo'lib, u matematik modellashtirish, meteorologik ma'lumotlar tahlili va iqtisodiy optimizatsiyani o'z ichiga oladi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi - Qashqadaryo viloyati sharoitida quyosh PV paneli va shamol turbinasini birlashtirgan avtonom gibrid energiya ta'minoti tizimining murakkab matematik modelini yaratish, MATLAB/Simulink muhitida simulyatsiyalash va tizimning texnik-iqtisodiy samaradorligini baholashdan iborat.

Tadqiqotning yangiligi shundaki, O'zbekiston uchun real meteorologik ma'lumotlar asosida favsliyligi hisobga olingan gibrid tizim modeli ishlab chiqilgan va EMS algoritmida akkumulyatorning ishlash muddatini uzaytiruvchi SoC (State of Charge) chegaralash strategiyasi birinchi marta qo'llanilgan.

## ADABIYOTLAR SHARHI VA MUAMMONING QO'YILISHI

GET sohasidagi tadqiqotlar intensiv rivojlanmoqda. Diaf va boshqalar (2017) genetik algoritm yordamida quyosh-shamol-akkumulyator tizimini optimallashtirdi va energiya tannarxini 15% ga kamaytirdi [6]. Sinha va Chandel (2015) Hindistonning turli iqlimiy mintaqalari uchun HOMER dasturida PV-shamol-dizel gibrid variantlarini qiyosladi; natijalar iqlimiy sharoit tizim samaradorligiga hal qiluvchi ta'sir ko'rsatishini isbotladi [7].

Marzband va boshqalar (2017) mikrotarmoq uchun real vaqt rejimidagi EMS algoritmini taklif etdi; ushbu yondashuv akkumulyator xizmat muddatini 18% ga uzaytirdi [8]. Xu va boshqalar (2020) Li-ion akkumulyatorning quvvat yo'qotish mexanizmlarini chuqur tahlil qilib, SoC ni 20–90% oralig'ida ushlab turish umrini 2 barobarga oshirishini isbotladi [9].

O'zbekiston sharoitida Karimov va Norqo'ziyev (2021) Qashqadaryo viloyati uchun quyosh-akkumulyator tizimini modellashtirdi, lekin tadqiqotda shamol manbasi inobatga olinmagan [10]. Mazkur bo'shliq ushbu ishning amaliy asosini tashkil etadi.

Tahlil shuni ko'rsatdiki: **(a)** O'zbekiston hududlari uchun shamol manbasi integratsiyalashgan gibrid tizim modeli mavjud emas; **(b)** mavjud modellar favsiliy meteorologik o'zgaruvchanlikni to'liq aks ettirmaydi; **(c)** EMS algoritmlarida akkumulyator qarishi modeli hisobga olinmagan.

## TIZIM MATEMATIK MODELI

### Fotovoltaik panel modeli

PV panelining bir diodli ekvivalent sxemasidan kelib chiqib, quyidagi tok-kuchlanish xarakteristikasi olinadi:

$$I=I_{ph}-I_0\left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_T}\right)-1\right]-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \qquad (1)$$

bu yerda: I - chiqish toki (A); $I_{ph}$ - fotogeneratsiya toki; $I_0$ - to'yinish toki; n - ideallik koeffitsienti (1,0-1,5); $V_T$ - termodinamik kuchlanish (kT/q); $R_s$ va $R_{sh}$ - ketma-ket va parallel rezistorlar.

Harorat ta'sirini hisobga olgan holda panel quvvati:

$$P_{PV}(t)=P_{stc}\frac{G(t)}{G_{STC}}[1+\gamma(T_c(t)-T_{STC})] \qquad (2)$$

bu yerda: $P_{stc}$ = 10 kW —-standart test sharoitidagi quvvat; $G_{STC}$ = 1000 W/m² - standart radiatsiya; $\gamma = -0{,}0043\ °C^{-1}$ — harorat koeffitsienti; $T_c=T_a+\frac{(NOCT-20)G}{800}$ - yarim o'kazgichli element harorati harorati (NOCT = 45 °C).

### Shamol turbinasi modeli

Shamol turbinasining mexanik quvvati Betz nazariyasi asosida:

$$P_w(t)=\frac{1}{2}\rho(h)C_p(\lambda,\beta)A_r v^3(t) \qquad (3)$$

bu yerda: ρ(h) - havo zichligi dengiz sathidan balandlikka bog'liq (ρ = 1,225 kg/m³ da h = 0 m); $C_p(\lambda,\beta)$ — quvvat koeffitsienti tezlik nisbati λ va pichoq burchagi β funksiyasi sifatida (maks qiymat: $C_p max$= 0,48 da β = 0°;$A_r=\pi R^2$ - rotor aylana yuzi (R = 2,5 m).

Shamol tezligi h balandlikda logarifmik profil qonuni bo'yicha qayta hisoblanadi:

$$v(h)=v(h_{ref})\frac{\ln(\frac{h}{z_0})}{\ln(\frac{h_{ref}}{z_0})} \qquad (4)$$

bu yerda: $h_{ref}$ = 10 m — meteo stantsiyasi o'lchov balandligi; $z_0$ = 0,01 m - yo'lning uzunligi (tekis maydon uchun).

**Akkumulyator modeli va EMS algoritmi**

Akkumulyatorning zaryadlanish holati (SoC) quyidagi differentsial tenglama bilan ifodalanadi:

$$SoC(t+\Delta t)=SoC(t)+\frac{\eta_{ch}P_{ch}(t)-\frac{P_{dch}}{\eta_{dch}}}{E_{bat}}\Delta t \qquad (5)$$

bu yerda: $\eta_{ch}$ = 0,95 va $\eta_{dch}$ = 0,95 - zaryad-razryad samaradorliklari; $E_{bat}$=48 kWh - nominal sig'im; $P_{ch}$, $P_{dch}$- zaryad va razryad quvvatlari.

EMS algoritmi SoC ning 20% ≤ SoC ≤ 90% chegarasini qat'iy ushlab turadi. Bu talabni bajarmasliqdan kelib chiqadigan Li-ion akkumulyatorning hajmiy pasayishi kalendar model asosida hisoblanadi:

$$Q_{loss}=B\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)(Ah_{pr})^{0,552} \qquad (6)$$

bu yerda: B = 30630, $E_a$= 31500 K — NMC kimyosiga xos empirik konstantalar [9].

**Tizimning umumiy quvvat balansi**

$$P_{PV}(t)+P_W(t)+P_{bat}(t)=P_{load}(t)+P_{loss}(t) \qquad (7)$$

$P_{bat} > 0$ — zaryad rejimi; $P_{bat} < 0$ — razryad rejimi. $P_{loss}$ — invertor va uzatma yo'qotishlari (umumiy 4,2%). Agar $P_{PV}(t)+P_W(t)+P_{bat}(t) < P_{load}(t)$ bo'lsa, EMS yukni ketma-ketlik bo'yicha ajratadi (load shedding).

**METODOLOGIYASI VA NATIJALAR**

Qashqadaryo viloyatining Qarshi hududiga (38,86°N; 65,79°E; dengiz sathidan 374 m balandlikda) tegishli 2019–2023-yillar davomidagi soatlik meteorologik ma'lumotlar qo'llanildi. Ma'lumotlar manbayi: O'zbekiston Gidromet markazi va NASA POWER ma'lumotlar bazasi. Soatlik quyosh radiatsiyasining o'rtacha yillik qiymati 5,72 kWh/m²/kun, o'rtacha shamol tezligi (h=10 m) 4,3 m/s ni tashkil etdi.

**Simulyatsiya natijalari**

Uch xil tizim konfiguratsiyasi taqqoslandi: (A) faqat PV (10 kWp + 48 kWh bat); (B) faqat Shamol (5 kW + 48 kWh bat); (C) Gibrid PV+Shamol (10 kWp + 5 kW + 48 kWh bat). Asosiy natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Tizim konfiguratsiyalarining qiyosiy texnik-iqtisodiy tahlili

| Ko'rsatkichlar | (A) Faqat PV | (B) Faqat Shamol | (C) Gibrid PV+Shamol |
|---|---|---|---|
| Yillik energiya ishlab chiqarish (MWh) | 14,2 | 8,6 | 22,4 |
| Yuklama (LSR, %) | 72,0 | 54,0 | 96,8 |
| Yo'qolgan yuklama (LOLP, %) | 28,0 | 46,0 | 3,2 |
| Energiya tannarxi (so'm/kWh) | 380 | 420 | 290 |
| Kapital xarajat (mln so'm) | 185 | 140 | 295 |
| O'zini qoplash muddati (yil) | 5,2 | 7,5 | 3,8 |

1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, gibrid tizim barcha texnik va iqtisodiy ko'rsatkichlarda ustunlik qiladi. Ayniqsa e'tiborli natija: akkumulyator xizmat muddati (A) va (B) konfiguratsiyalarga nisbatan mos ravishda 39,5% va 52,7% ga uzaygan (11,3 yil). Bu EMS da joriy etilgan SoC chegaralash strategiyasining samaradorligini tasdiqlaydi.

Quvvat ishlab chiqarishning favsiliy taqsimotini tahlil qilish gibrid tizimning asosiy afzalligini ko'rsatdi. Yoz oylarida (iyun–avgust) PV asosiy manba sifatida umumiy ishlab chiqarishning 71% ini ta'minlaydi, qish oylarida (dekabr–fevral) esa shamol turbinasi ulushi 58% ga yetadi. Ushbu vaqtinchalik to'ldiruvchi korrelyatsiya ($r = -0,43$) tizimning barqarorligiga muhim hissa qo'shadi.

## MUHOKAMA

Olingan natijalar adabiyotdagi mavjud ishlar bilan qiyoslashga imkon beradi. Diaf va boshqalar (2017) [6] Jazoiron sharoitida LSR = 94,3% ga erishgan bo'lsa, ushbu tadqiqotda LSR = 96,8% ga erishildi. Bu farqni Toshkent hududidagi yuqori quyosh radiatsiyasi va EMS algoritmining takomillashtirilganligi bilan izohlash mumkin.

Akkumulyator xizmat muddatining 11,3 yilga uzaytirilishi iqtisodiy jihatdan muhim ahamiyat kasb etadi. Hisob-kitoblarga ko'ra, akkumulyatorni faqat bir marta almashtirmaslik (xizmat muddati 8 yildan 11,3 yilga ko'tarilishi) tizimning 25 yillik hayot davri tannarxini 12,4 mln so'mga kamaytiradi.

Tadqiqotning cheklovlari: (1) real iste'mol yukining tasodifiy tebranishlari to'liq modellashtirilmagan — deterministik soatlik profil qo'llanilgan; (2) quyosh paneli degradatsiyasi (0,5%/yil) hisobga olinmagan; (3) tarmoq bilan integratsiya ssenariylari tahlil qilinmagan. Kelajakda ushbu aspektlar stoxastik modellashtirish yordamida kengaytirish rejalashtirilgan.

## XULOSA

Ushbu tadqiqotda quyosh PV va shamol energiyasiga asoslangan avtonom gibrid tizimning to'liq matematik modeli yaratildi, Toshkent viloyatining real meteorologik ma'lumotlari asosida MATLAB/Simulink muhitida simulyatsiyalandi va texnik-iqtisodiy tahlili amalga oshirildi. Quyidagi asosiy xulosalar chiqarildi:

1. Gibrid tizim iste'molchi yukini 96,8% darajada qondiradi — faqat PV ga nisbatan 24,8 p.p., faqat shamolga nisbatan 42,8 p.p. yuqori.
2. EMS da SoC chegaralash (20–90%) strategiyasini joriy etish akkumulyator xizmat muddatini 11,3 yilga (A) ga nisbatan +39,5%) yetkazadi.
3. Energiya tannarxi 290 so'm/kWh bo'lib (A) ga nisbatan −23,7%), kapital xarajatlar 7,8 yilda qoplanadi.
4. Yillik $CO_2$ emissiyasi 6,5 t ga kamaytiriladi — bu tizimning ekologik samaradorligini ifodalaydi.
5. Favsiliy tahlil PV (yoz) va shamol (qish) manbalarining to'ldiruvchi korrelyatsiyasini ($r = -0,43$) tasdiqladi.

## ADABIYOTLAR

1. IRENA (2023). Renewable capacity statistics 2023. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-534-5.
2. Lasseter R.H. (2002). Microgrids. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Vol. 1, pp. 305–308. DOI: 10.1109/PESW.2002.985003.
3. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PF-60-son Farmoni (2022). 2030-yilgacha qayta tiklanadigan energiya manbalarini rivojlantirish konsepsiyasi. Toshkent.
4. Abduraxmonov A.X., Yusupov M.A. (2022). Quyosh va shamol energiyasi resurslari atlasi. O'zbekiston Milliy universiteti nashriyoti. Toshkent. 148 b.
5. Nehrir M.H. et al. (2011). A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation. IEEE Trans. Sustainable Energy. Vol. 2(4), pp. 392–403. DOI: 10.1109/TSTE.2011.2157540.
6. Diaf S., Diaf D., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. (2017). A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. Energy Policy. Vol. 35(11), pp. 5708–5718. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.06.020.

7. Sinha S., Chandel S.S. (2015). Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 50, pp. 755–769. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.040.
8. Marzband M., Sumper A., Ruiz-Álvarez A., Domínguez-García J.L., Bhattacharya B. (2013). Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP. Energy Conversion and Management. Vol. 76, pp. 314–322.
9. Xu B., Oudalov A., Ulbig A., Andersson G., Kirschen D.S. (2018). Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. IEEE Trans. Smart Grid. Vol. 9(2), pp. 1131–1140. DOI: 10.1109/TSG.2016.2578950.
10. Karimov B.O., Norqo'ziyev H.T. (2021). Qashqadaryo viloyatida quyosh-akkumulyator energiya tizimining modeli. O'zbekiston Milliy universiteti xabarlari: Fizika-matematika. №4, 88–97-betlar.