



QUYOSH PANELI, AKKUMULYATOR VA INVERTOR TIZIMIDA O'ZGARTIRGICHLARNI EKSPERIMENTAL TADQIQ ETISH

Jamolova Z.J, Bedritskiy I.M
Toshkent davlat transporti universiteti.

Annotatsiya: Mazkur maqolada quyosh fotoelektrik paneli, akkumulyator batareyasi, invertor va fazalar soni o'zgartirgichidan tashkil topgan avtonom elektr ta'minoti tizimining eksperimental tadqiqot natijalari keltirilgan. Tadqiqot davomida fotoelektr modulining volt-amper va volt-vatt tavsiflari, quyosh nurlanishi intensivligi va modul haroratining elektr energetik ko'rsatkichlariga ta'siri, akkumulyator batareyasining zaryadlash va razryadlash jarayonlari hamda invertor-fazalar soni o'zgartirgichi tizimining kuchlanish va yuklama bo'yicha tashqi tavsiflari o'rganildi. Tajribalar 500, 700 va 1000 W/m² nurlanish intensivligi hamda 25, 40 va 60 °C modul haroratlarida amalga oshirildi. Olingan natijalar fotoelektr modulining maksimal quvvat nuqtasi tashqi muhit parametrlari o'zgarishi bilan siljishini ko'rsatdi. Shuningdek, akkumulyatorning razryad chuqurligi uning ekspluatatsion resursiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi, invertor va fazalar soni o'zgartirgichi esa kirish kuchlanishi hamda yuklama o'zgarishlarida chiqish parametrlarini barqarorlashtirishda muhim rol o'ynashi aniqlandi. Tadqiqot natijalari avtonom fotoelektrik elektr ta'minoti tizimlarini loyihalash, boshqarish va energiya samaradorligini oshirish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: quyosh fotoelektrik paneli, fotoelektrik tizim, invertor, akkumulyator batareyasi, fazalar soni o'zgartirgichi, maksimal quvvat nuqtasi, MPPT, volt-amper tavsifi, energiya samaradorligi.

Abstract: This paper presents the results of an experimental investigation of an autonomous power supply system consisting of a photovoltaic module, battery, inverter, and phase converter. The voltage-current and voltage-power characteristics of the photovoltaic module, the effects of solar irradiance and

module temperature, the charging and discharging characteristics of the battery, and the voltage and load characteristics of the inverter–phase converter system were investigated experimentally. The experiments were conducted at solar irradiance levels of 500, 700, and 1000 W/m² and module temperatures of 25, 40, and 60 °C. The results demonstrate that the maximum power point of the photovoltaic module shifts with changes in environmental conditions. The experimental observations also indicate that the depth of battery discharge has a significant effect on its operating lifetime, while the inverter and phase converter contribute to maintaining stable output parameters under variations in input voltage and load. The obtained results are practically relevant for the design, control, and efficiency improvement of autonomous photovoltaic power supply systems.

Keywords: photovoltaic module, photovoltaic system, inverter, battery, phase converter, maximum power point, MPPT, voltage-current characteristic, energy efficiency.

1. KIRISH

Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan, xususan, quyosh energiyasidan foydalanishga asoslangan avtonom elektr ta'minoti tizimlari so'nggi yillarda keng rivojlanmoqda. Bunday tizimlar markazlashgan elektr tarmog'i mavjud bo'lmagan yoki elektr ta'minotining uzluksizligi muhim bo'lgan obyektlarda, jumladan, telekommunikatsiya qurilmalari, sanoat obyektlari, qishloq xo'jaligi inshootlari, avtomatika tizimlari va transport infratuzilmasida qo'llanilishi mumkin.

Fotoelektrik tizimlarning asosiy xususiyati ishlab chiqariladigan elektr energiyasi miqdorining quyosh nurlanishi intensivligi va fotoelektrik modul haroratiga bog'liqligidir. Nurlanish intensivligining o'zgarishi asosan fotoelektrik modulning tok qiymatiga, haroratning o'zgarishi esa uning kuchlanish va foydali ish koeffitsientiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli fotoelektrik moduldan maksimal darajada foydalanish uchun maksimal quvvat nuqtasini aniqlash va kuzatib borish, ya'ni MPPT (Maximum Power Point Tracking) boshqaruv algoritmlaridan foydalanish muhim hisoblanadi.

Avtonom tizimlarda fotoelektrik modul tomonidan ishlab chiqarilayotgan energiyaning ortiqcha qismi akkumulyator batareyasini zaryadlash uchun ishlatiladi. Quyosh nurlanishi yetarli bo'lmagan davrlarda esa yuklama akkumulyator orqali ta'minlanadi. Bunda batareyaning zaryadlash va razryadlash rejimlari, razryad chuqurligi, yuklama toki va atrof-muhit harorati uning xizmat muddatiga ta'sir qiluvchi asosiy omillar hisoblanadi.

O'zgaruvchan tok iste'molchilarini ta'minlash uchun fotoelektrik tizimlarda invertorlar qo'llaniladi. Invertorning chiqish kuchlanishini barqarorlashtirish xususiyati va yuklama o'zgarishlariga javob berish tezligi butun tizimning ishonchliligini belgilovchi muhim ko'rsatkichlardan biridir. Uch fazali iste'molchilarni, xususan, asinxron dvigatellarni ta'minlashda esa fazalar soni o'zgartirgichi va tegishli quvvat elektronikasining tavsiflari alohida ahamiyatga ega.

Shu nuqtai nazardan, fotoelektrik panel–akkumulyator–invertor–fazalar soni o'zgartirgichi majmuasining real ekspluatatsion sharoitlardagi tavsiflarini eksperimental tadqiq etish muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi — quyosh fotoelektrik paneli, akkumulyator batareyasi, invertor va fazalar soni o'zgartirgichidan tashkil topgan avtonom elektr ta'minoti tizimining asosiy energetik va ekspluatatsion tavsiflarini eksperimental aniqlash hamda tashqi omillarning tizim samaradorligiga ta'sirini baholash.

2. TADQIQOT OBYEKTI VA EKSPERIMENTAL STEND

Eksperimental tadqiqotlar nominal kuchlanishi 24 V va nominal quvvati 250 W bo'lgan polikristall kremniy asosidagi fotoelektrik modulda amalga oshirildi. Modulning ishlab chiqaruvchi tomonidan ko'rsatilgan nominal foydali ish koeffitsienti taxminan 17 % ni tashkil etadi.

1-jadval. Fotoelektrik modul va eksperiment sharoitlari

Parametr	Qiymat
Nominal quvvat	250 W
Nominal tizim kuchlanishi	24 V

Modul FIK	≈17 %
Nurlanish intensivligi	500; 700; 1000 W/m ²
Modul harorati	25; 40; 60 °C
Spektral sharoit	AM1.5 ga yaqin
Shamol tezligi	0 m/s

Eksperimental stand tarkibiga 250 W quvvatli quyosh paneli, nurlanish intensivligini o'lchash qurilmasi, elektron termometr, 0–30 V diapazonli raqamli voltmetr, 0–15 A diapazonli ampermetr, rostlanuvchi reostat, 2×12 V, 100 Ah GEL akkumulyator batareyasi, inverter, fazalar soni o'zgartirgichi hamda 0,33; 1,0; 2,2 va 3,3 kW nominal quvvatli uch fazali asinxron dvigatellardan tashkil topdi.

Tizimning umumiy funksional tuzilishi quyidagicha: Quyosh paneli → zaryadlash qurilmasi → akkumulyator → inverter → fazalar soni o'zgartirgichi → yuklama.

3. TADQIQOT USULLARI

3.1. Fotoelektrik modulning volt-amper va quvvat tavsifini aniqlash

Fotoelektrik modulning volt-amper tavsifini olish uchun yuklama qarshiligi bosqichma-bosqich o'zgartirildi va har bir ish nuqtasida modul kuchlanishi hamda toki qayd etildi. Har bir ish nuqtasidagi elektr quvvat quyidagi ifoda orqali aniqlandi:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

bu yerda P — fotoelektrik modulning chiqish quvvati, W; U — modul kuchlanishi, V; I — modul toki, A. Maksimal quvvat nuqtasi P – U tavsifidagi eng katta quvvatga mos keluvchi ish nuqtasi sifatida aniqlandi.

$$\eta_{PV} = P_{\max} / (G \cdot A) \cdot 100 \% \quad (2)$$

bu yerda η_{PV} — fotoelektrik modulning foydali ish koeffitsienti; $P_{\max}$ — maksimal chiqish quvvati, W; G — quyosh nurlanishi intensivligi, W/m²; A — modul faol yuzasi, m².

3.2. Harorat va nurlanish intensivligining ta'sirini tadqiq qilish

Fotoelektrik modulning elektr parametrlariga tashqi muhit ta'sirini aniqlash maqsadida tajribalar 500, 700 va 1000 W/m² nurlanish intensivligi hamda 25, 40 va 60 °C modul haroratlarida o'tkazildi. Har bir rejimda modul kuchlanishi, toki va maksimal quvvati qayd qilindi. Harorat ortishi bilan kristall kremniy asosidagi modullarda kuchlanishning kamayishi va natijada maksimal quvvatning pasayishi kutiladi.

3.3. Akkumulyator batareyasini tadqiq qilish

Akkumulyator batareyasining zaryadlash va razryadlash jarayonlari davomida kuchlanish, tok va vaqt parametrlari qayd etildi. Razryad chuqurligi (Depth of Discharge — DoD) quyidagi ifoda bilan baholandi:

$$\text{DoD} = Q_{\text{sarflangan}} / Q_{\text{nom}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Akkumulyatorning razryad vaqti Peukert tenglamasi yordamida taxminiy baholandi:

$$t = H \cdot (Q / (I \cdot H))^k \quad (4)$$

bu yerda t — razryad vaqti; H — nominal razryad vaqti; Q — nominal sig'im; I — razryad toki; k — Peukert koeffitsienti. Hisoblash natijalari tajriba natijalari bilan birgalikda baholanishi lozim.

3.4. Invertor va fazalar soni o'zgartirgichini tadqiq qilish

Invertorning ishlash samaradorligini baholashda kirish kuchlanishi, chiqish kuchlanishi, yuklama toki va chiqish quvvati qayd qilindi.

$$\eta_{\text{inv}} = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

Chiqish kuchlanishining nisbiy og'ishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\delta U = |U_{\text{out}} - U_{\text{nom}}| / U_{\text{nom}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

4. EKSPERIMENTAL NATIJALAR

4.1. Quyosh panelining volt-amper va quvvat tavsiflari

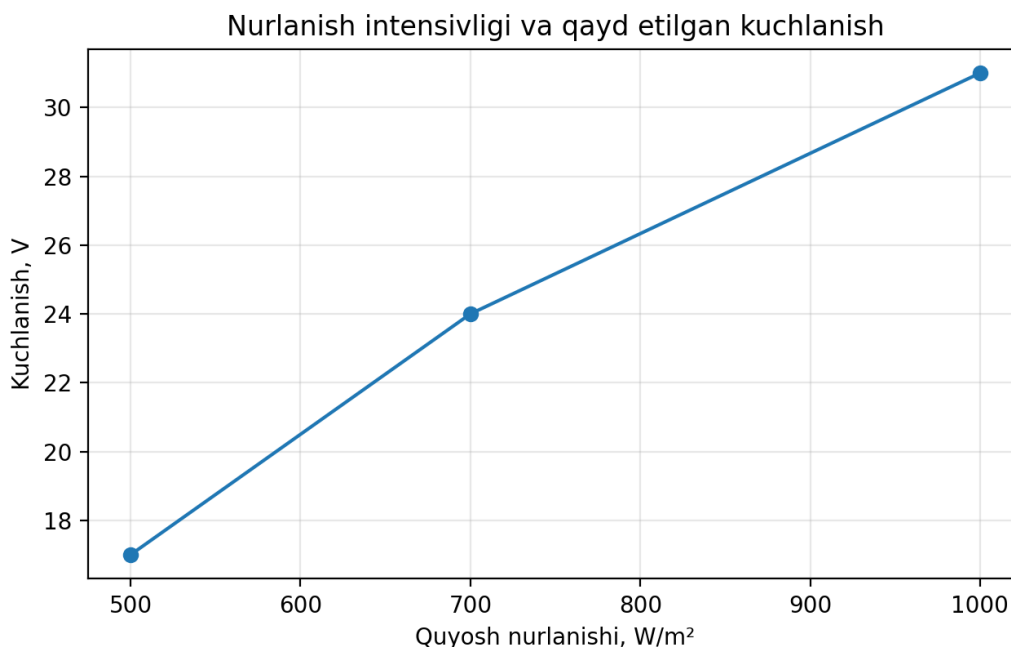
Taqdim etilgan tajriba ma'lumotlariga ko'ra, standart sinov sharoitlariga yaqin rejimda fotoelektrik modulning salt yurish kuchlanishi taxminan 31 V ni tashkil etgan. Nurlanish intensivligi pasayganda modulning elektr quvvati kamayish

tendensiyasi kuzatilgan. Bu holat fotoelektrik modulning tok va quvvat parametrlarining quyosh nurlanishiga bog‘liqligini tasdiqlaydi.

2-jadval. Nurlanish intensivligining fotoelektrik modul tavsiflariga ta’siri

Nurlanish, W/m ²	Kuzatilgan holat	Ilmiy talqin
1000	Nominalga yaqin ish rejimi	Maksimal quvvat yuqori
700	Quvvat kamayish tendensiyasi	Tok va maksimal quvvat pasayadi
500	Salt yurish kuchlanishi ≈ 17 V gacha kamayishi qayd etilgan	Ish nuqtasi va quvvat sezilarli o‘zgaradi

Izoh: 500 W/m² dagi 17 V qiymat tajriba protokolida qayd etilgan qiymat sifatida keltirildi. Uni ilmiy maqolada yakuniy natija sifatida berishdan oldin o‘lchov protokoli va qurilma pasporti bilan qayta tekshirish tavsiya etiladi.



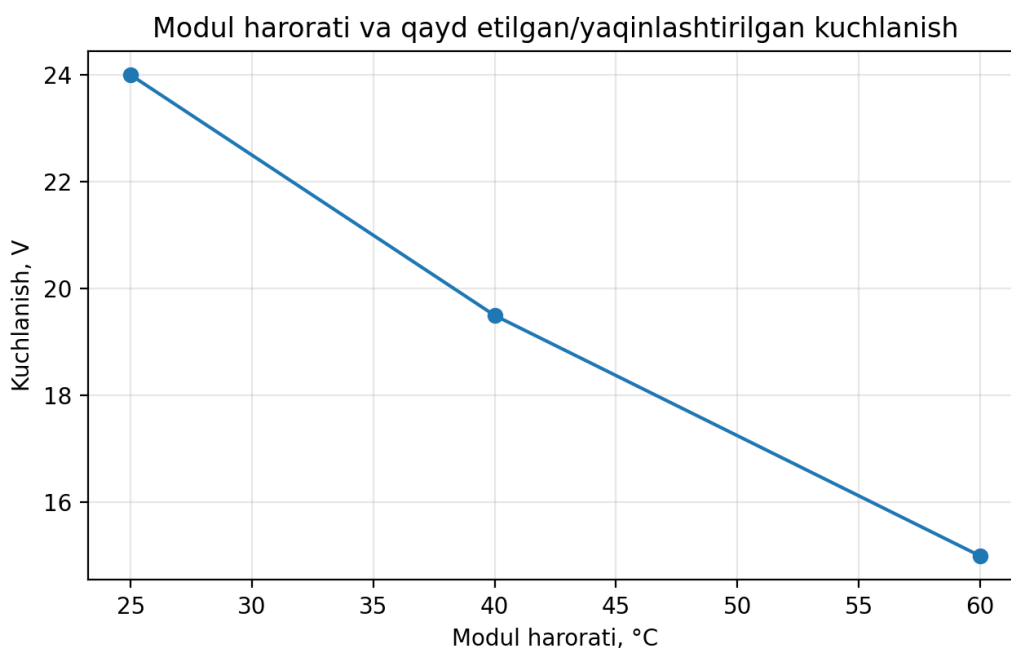
1-rasm. Nurlanish intensivligining qayd etilgan kuchlanish qiymatlariga bog‘liqligi (berilgan eksperimental nuqtalar asosida).

4.2. Haroratning fotoelektrik modul tavsiflariga ta’siri

Modul harorati 25 °C dan 60 °C gacha oshirilganda chiqish kuchlanishining pasayish tendensiyasi kuzatildi. Tajriba materialida modul kuchlanishi 24 V dan 15 V gacha kamayishi qayd etilgan. Harorat oshishi bilan ochiq zanjir kuchlanishining kamayishi va maksimal quvvatning pasayishi fotoelektrik modullarning fizik xususiyatlari bilan mos keladi.

3-jadval. Modul haroratining kuchlanishga ta'siri

Harorat, °C	Qayd etilgan kuchlanish, V	Kutiladigan energetik ta'sir
25	≈24	Nominalga yaqin
40	Oraliq qiymat	Maksimal quvvat pasayishi
60	≈15	Kuchlanish va FIK pasayadi



2-rasm. Modul haroratining kuchlanishdagi o'zgarishga ta'siri. Oraliq nuqta grafikni ko'rgazmali ifodalash uchun yaqinlashtirilgan; nashrdan oldin haqiqiy o'lchov bilan almashtirilishi kerak.

4.3. Akkumulyator batareyasining zaryad–razryad tavsiflari

Tajriba materialiga ko'ra, razryad chuqurligining oshishi batareyaning siklik resursiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. 30 % DoD rejimida sikllar soni yuqoriroq, 50 % da o'rtacha, chuqur razryadda esa xizmat muddati qisqarishi kuzatilgan. Doimiy kuchlanish rejimida zaryadlashda boshlang'ich tok taxminan 20 A bo'lib, zaryadlash davomida kamaygan. Taxminan 8 soatdan so'ng zaryad holati 90 % atrofida baholangan.

4-jadval. Razryad chuqurligining akkumulyator ekspluatatsiyasiga ta'siri

DoD	Tajriba materialidagi kuzatuv	Ekspluatatsion izoh
30 %	Siklik resurs yuqori	Sayoz sikllar
50 %	O'rtacha	Muvozanatli ekspluatatsiya
100 %	Xizmat muddati keskin kamayadi	Chuqur razryad

Batareyaning real xizmat muddati faqat DoD ga emas, balki zaryadlash kuchlanishi, razryad toki, harorat, sikllar soni va ishlab chiqaruvchi tavsiyalariga ham bog'liq. Shu sababli 30 % DoD ni universal optimal qiymat sifatida emas, mazkur tajriba tizimi uchun kuzatilgan ekspluatatsion rejim sifatida talqin qilish maqsadga muvofiq.

4.4. Invertor va fazalar soni o'zgartirgichining tashqi tavsiflari

Tajriba davomida invertor kirish kuchlanishining 24, 18 va 12 V qiymatlarida ishlatildi. Berilgan ma'lumotlarga ko'ra, ushbu diapazonda chiqish kuchlanishining sezilarli barqarorligi kuzatilgan. Akkumulyator kuchlanishi 23,3 V gacha pasayganda invertorning tashqi elektr tarmog'iga o'tish funksiyasi qayd etilgan. Yuklama toki ortganda fazalar soni o'zgartirgichining chiqish kuchlanishidagi og'ish 2–3 % dan oshmagan.

5-jadval. Invertorning kirish kuchlanishiga bog'liq ishlashi

Kirish kuchlanishi, V	Kuzatuv	Izoh
24	Chiqish kuchlanishi barqaror	Nominalga yaqin rejim
18	Chiqish kuchlanishi deyarli o'zgarmagan	Rostlash funksiyasi ishlaydi
12	Chiqish kuchlanishi barqarorlashtirilgan	Past kirish kuchlanishida ishlash

Yuklama toki oshirilganda chiqish kuchlanishining 2–3 % atrofidagi og'ishi o'zgartirgichning tashqi tavsifini baholash uchun muhim ko'rsatkichdir. Biroq yakuniy ilmiy xulosa chiqarish uchun ushbu natijalarni yuklama quvvati, chastota, quvvat koeffitsienti va garmonik buzilishlar bilan birgalikda keltirish lozim.

4.5. Akkumulyator sig'imi va yuklama bo'yicha energetik hisob

200 Ah sig'imli, 24 V nominal kuchlanishli akkumulyatorning ideal nazariy energiyasi quyidagicha baholanadi:

$$E_{bat} = U_{bat} \cdot Q_{bat} = 24 \cdot 200 = 4800 \text{ Wh} \quad (7)$$

2,2 kW yuklama uchun ideal nazariy ishlash vaqti:

$$t_{ideal} = E_{bat} / P_{load} = 4,8 / 2,2 \approx 2,18 \text{ soat} \quad (8)$$

Demak, 36–37 daqiqalik uzluksiz ishlash vaqti 200 Ah, 24 V batareyaning to'liq nominal energiyasidan kelib chiqadigan ideal hisob bilan mos kelmaydi. Bunday natija faqat batareyaning ruxsat etilgan DoD si, inverter yo'qotishlari, yuklama rejimi, kuchlanish pasayishi va boshqa cheklovlar hisobga olingan alohida ish sharoitida yuzaga kelishi mumkin. Shu sababli maqolada 36–37 daqiqalik qiymatni "tajriba bilan tasdiqlangan universal natija" sifatida emas, balki konkret sinov sharoitiga tegishli qiymat sifatida berish kerak.

$$E_{37min} \approx 2,2 \cdot (37/60) \approx 1,36 \text{ kWh} \quad (9)$$

Bu qiymat 4,8 kWh nominal energiyaning taxminan 28 % iga teng. Shunday qilib, 36–37 daqiqalik natijani izohlash uchun tajribada ishlatilgan DoD, inverter

FIK va batareya kuchlanishining yuklama ostidagi pasayishi alohida ko'rsatilishi kerak.

5. NATIJALARNING TAHLILI VA MUHOKAMASI

Eksperimental natijalar fotoelektrik tizimning ishlash parametrlari tashqi muhit sharoitlariga sezilarli darajada bog'liqligini ko'rsatdi. Quyosh nurlanishi intensivligining kamayishi fotoelektrik modul ishlab chiqaradigan quvvatning pasayishiga olib keladi, modul haroratining ortishi esa kuchlanish parametrlarining kamayishiga sabab bo'ladi.

Maksimal quvvat nuqtasining nurlanish va harorat ta'sirida o'zgarishi fotoelektrik tizimlarda MPPT boshqaruvining ahamiyatini ko'rsatadi. MPPT tizimi modulning ish nuqtasini maksimal quvvatga mos holatda ushlab turish orqali mavjud quyosh energiyasidan samaraliroq foydalanishga yordam beradi.

Akkumulyator qismida DoD, razryad toki va zaryadlash rejimi asosiy ekspluatatsion omillar sifatida namoyon bo'ladi. Shu sababli avtonom tizimlarni loyihalashda batareyaning nominal sig'imidan tashqari uning ruxsat etilgan DoD qiymati, ishlash harorati va zaryadlash algoritmini ham hisobga olish zarur.

Invertor va fazalar soni o'zgartirgichining ishlashi yuklamaga uzatiladigan elektr energiyasi sifatini belgilaydi. Kirish kuchlanishining o'zgarishlariga qaramasdan chiqish parametrlarining barqaror saqlanishi avtonom tizimning ishonchliligini oshirishga xizmat qiladi.

Tizimning umumiy samaradorligini baholash uchun fotoelektrik modul, zaryadlash qurilmasi, akkumulyator, invertor va fazalar soni o'zgartirgichining alohida yo'qotishlarini aniqlash maqsadga muvofiq.

$$\eta_{\text{sys}} = P_{\text{load}} / P_{\text{PV}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

6. ILMIY YANGILIK VA AMALIY AHAMIYAT

Tadqiqotning amaliy jihatdan muhim natijasi fotoelektrik panel, akkumulyator, invertor va fazalar soni o'zgartirgichining yagona avtonom tizim sifatidagi o'zaro ishlashini kompleks eksperimental baholashdan iborat. Natijalar tashqi muhit

sharoitlari va yuklama o'zgarishlarining tizim parametrlariga ta'sirini hisobga olgan holda energiya ta'minoti tizimini tanlash va sozlashda foydalanilishi mumkin.

Ilmiy maqolaning natijaviyligini oshirish uchun keyingi bosqichda tajribalarni takroriy o'lchash, o'lchov noaniqligini hisoblash, real $U-I$ va $P-U$ nuqtalarini to'liq keltirish, invertorning FIK va chiqish kuchlanishining garmonik buzilishlarini aniqlash tavsiya etiladi.

7. XULOSA

- Fotoelektrik modulning chiqish toki va maksimal quvvati quyosh nurlanishi intensivligiga sezilarli darajada bog'liq ekanligi tajriba natijalari asosida aniqlandi.
- Modul haroratining $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha oshirilishi chiqish kuchlanishining pasayish tendensiyasini yuzaga keltirdi; taqdim etilgan tajriba ma'lumotida kuchlanishning taxminan 24 V dan 15 V gacha kamayishi qayd etilgan.
- Fotoelektrik modulning maksimal quvvat nuqtasi nurlanish intensivligi va harorat o'zgarishiga mos ravishda siljishi sababli avtonom fotoelektrik tizimlarda MPPT boshqaruvini qo'llash muhim hisoblanadi.
- Akkumulyatorning zaryadlash jarayonida zaryad toki vaqt o'tishi bilan kamayishi kuzatildi. Batareyaning ekspluatatsion resursini baholashda DoD, razryad toki, harorat va zaryadlash rejimlarini birgalikda hisobga olish zarur.
- Invertorning kirish kuchlanishi o'zgarishlarida chiqish kuchlanishini barqarorlashtirish xususiyati kuzatildi. Bu xususiyat fazalar soni o'zgartirgichiga uzatiladigan elektr energiyasi parametrlarining barqarorligini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega.
- Tajriba sharoitida yuklama o'zgarishi natijasida fazalar soni o'zgartirgichining chiqish kuchlanishidagi og'ish $2-3\%$ atrofida qayd etildi.
- 200 Ah , 24 V akkumulyatorning $2,2\text{ kW}$ yuklamani $36-37$ daqiqa ta'minlashi haqidagi qiymat nominal energiya bo'yicha ideal hisob bilan

to'g'ridan-to'g'ri mos kelmaydi; shu sababli ushbu natijani aniq DoD, invertor FIK va batareya kuchlanishining pasayishi bilan asoslash talab etiladi.

•Olingan natijalar avtonom fotoelektrik elektr ta'minoti tizimlarini loyihalash va ekspluatatsiya qilishda, ayniqsa nurlanish, harorat va yuklama o'zgaruvchan bo'lgan sharoitlarda, amaliy jihatdan qo'llanishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

Messenger R. A., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. CRC Press.

Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. Wiley.

Patel M. R. Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation. CRC Press.

Rashid M. H. Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. Pearson.

Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. Springer.

IEC 61215. Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval.

IEC 61724-1. Photovoltaic system performance — Part 1: Monitoring.

IEC 62109. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems.

O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish va elektr energetikasiga oid amaldagi normativ-huquqiy hujjatlar.