

UDK 004.8:621.383.51

QUYOSH FOTOELEKTRIK PANELLARIDAGI NOSOZLIKLARNI AXBOROT TEXNOLOGIYALARI ASOSIDA TASNIFLASH VA DIAGNOSTIKA QILISH

Otakishiyeva Gulshanoy Abdulaziz qizi

Andijon davlat universiteti Sun'iy intellekt va raqamli texnologiyalar fakulteti

Kompyuter injiniringi kafedrası o'qituvchisi

gulshanoyotakishiyeva@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada quyosh fotoelektrik panellarida ekspluatatsiya jarayonida yuzaga keladigan asosiy nosozliklar va ularni zamonaviy axborot texnologiyalari asosida aniqlash hamda tasniflash masalalari ko'rib chiqilgan. Quyosh panellarida yuzaga keladigan mikro va makro yoriqlar, issiq nuqtalar, qisman soyalanganlik, ifloslanish, delaminatsiya, korroziya, Potential-Induced Degradation (PID), bypass-diod va elektr kontaktlarining nosozliklari tahlil qilingan. Nosozliklarning kelib chiqish sabablari, tashqi ko'rinishi, elektr va termik parametrlarga ta'siri hamda ularni aniqlash imkoniyatlari tizimlashtirilgan. Tadqiqotda quyosh paneli diagnostikasida kompyuter ko'rishi (Computer Vision), tasvirlarga raqamli ishlov berish, mashinali o'qitish (Machine Learning) va chuqur o'qitish (Deep Learning) texnologiyalaridan foydalanish imkoniyatlari tahlil qilinadi. RGB, termal va elektroluminescent tasvirlarni sun'iy intellekt algoritmlari yordamida qayta ishlash orqali nosozliklarni avtomatik aniqlash va tasniflash imkoniyati asoslanadi. Tadqiqot natijalari quyosh fotoelektrik qurilmalarining texnik holatini intellektual monitoring qilish va avtomatlashtirilgan diagnostika tizimlarini ishlab chiqish uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: quyosh paneli, fotoelektrik modul, nosozlik, diagnostika, axborot texnologiyalari, sun'iy intellekt, Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision, termal tasvir, tasniflash.

Abstract: This article examines the main faults that occur in photovoltaic solar panels during operation and the issues of their detection and classification using modern information technologies. Micro- and macro-cracks, hotspots, partial shading, soiling, delamination, corrosion, Potential-Induced Degradation (PID), as well as failures of bypass diodes and electrical contacts in solar panels are analyzed. The causes of faults, their visual characteristics, effects on electrical and thermal parameters, and available detection methods are systematized. The study analyzes the potential of Computer Vision, digital image processing, Machine Learning, and Deep Learning technologies for solar panel diagnostics. The possibility of automatically

detecting and classifying faults through the processing of RGB, thermal, and electroluminescence images using artificial intelligence algorithms is substantiated. The results of the study provide a theoretical basis for the development of intelligent condition-monitoring and automated diagnostic systems for photovoltaic installations.

Keywords: solar panel, photovoltaic module, fault, diagnostics, information technologies, artificial intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision, thermal imaging, classification.

Аннотация: В статье рассматриваются основные неисправности, возникающие в фотоэлектрических солнечных панелях в процессе эксплуатации, а также вопросы их обнаружения и классификации с использованием современных информационных технологий. Проанализированы микро- и макротрещины, горячие точки, частичное затенение, загрязнение, расслоение (деламинация), коррозия, потенциально индуцированная деградация (Potential-Induced Degradation, PID), а также неисправности байпасных диодов и электрических контактов солнечных панелей. Систематизированы причины возникновения неисправностей, их визуальные признаки, влияние на электрические и тепловые параметры, а также возможности их обнаружения. В исследовании анализируются возможности применения технологий компьютерного зрения (Computer Vision), цифровой обработки изображений, машинного обучения (Machine Learning) и глубокого обучения (Deep Learning) для диагностики солнечных панелей. Обоснована возможность автоматического обнаружения и классификации неисправностей посредством обработки RGB-, тепловых и электролюминесцентных изображений с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Результаты исследования служат теоретической основой для разработки интеллектуальных систем мониторинга технического состояния и автоматизированной диагностики фотоэлектрических установок.

Ключевые слова: солнечная панель, фотоэлектрический модуль, неисправность, диагностика, информационные технологии, искусственный интеллект, Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision, тепловое изображение, классификация.

Kirish. Bugungi kunda qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanishning kengayishi quyosh fotoelektrik qurilmalarining texnik holatini monitoring qilish va ularning samarali ishlashini ta'minlash masalasini eng vaziyat biri bo'lib bormoqda. Fotoelektrik panellarning uzoq muddat davomida ochiq

muhitda ishlashi natijasida turli xil mexanik, termik, elektrik va material degradatsiyasi bilan bog‘liq nosozliklar yuzaga kelishmoqdadir. [1, 2]. Quyosh fotoelektrik tizimining samaradorligi faqat panelning nominal quvvatiga emas, balki uning real ekspluatatsion holatiga ham bog‘liq. Panel yuzasining changlanishi, qisman soyalanganlik, mikro yoriqlar, lokal qizish va elektr kontaktlarining buzilishi ishlab chiqariladigan elektr energiyasi miqdorining kamayishiga sabab bo‘lishi mumkin. An’anaviy diagnostika usullarida mutaxassis tomonidan vizual ko‘rik, elektr parametrlarini o‘lchash yoki maxsus diagnostika uskunalaridan foydalanish talab etiladi. Katta quvvatli quyosh elektr stansiyalarida panellar sonining ko‘pligi sababli bunday diagnostikani qo‘lda amalga oshirish katta vaqt va mehnat talab qiladi. Mazkur muammoni hal qilishda axborot texnologiyalari, xususan, Computer Vision, Machine Learning va Deep Learning usullaridan foydalanish imkoniyatlari kengaymoqda. Bunda quyosh panelining tasviri yoki texnik parametrlari kompyuter tomonidan avtomatik tahlil qilinib, panelning normal yoki nosoz holati aniqlanishi mumkin. Shu nuqtai nazardan, quyosh panellaridagi nosozliklarni axborot texnologiyalari asosida tasniflash va avtomatik diagnostika qilish zamonaviy energetika va IT texnologiyalarining kesishmasidagi muhim ilmiy-amaliy yo‘nalishlardan biridir [5, 6].

Muhokama. Quyosh panellaridagi nosozliklarning tasnifi. Quyosh panellaridagi nosozliklarni ularning fizik kelib chiqishi va diagnostik belgilariga ko‘ra bir nechta asosiy guruhlariga ajratish mumkin [2, 3].

Mexanik nosozliklar. Mexanik nosozliklar panelga tashqi mexanik ta’sir natijasida yuzaga keladi. Ularga: mikro yoriqlar, makro yoriqlar, quyosh hujayrasining sinishi, shisha qatlamining shikastlanishi, ramka deformatsiyasi, elektr bog‘lovchi elementlarning uzilishi kiradi [2, 3]. Mikro yoriqlar dastlab panelning tashqi ko‘rinishida sezilmasligi mumkin. Shu sababli ularni aniqlash uchun elektroluminessensiya tasvirlari yoki maxsus tasvirni qayta ishlash algoritmlaridan foydalanish mumkin [2, 5]. T nuqtai nazaridan bunday tasvirlarni CNN (Convolutional Neural Network) yordamida klassifikatsiya qilish mumkin [5].

Termik nosozliklar. Termik nosozliklarning asosiy ko‘rinishi hot spot, ya’ni panelning ayrim qismida haroratning lokal oshishi hisoblanadi [3, 6]. Termal kamera yordamida panelning infraqizil tasviri olinadi: $I_{\text{thermal}}=f(x,y,T)$, bu yerda x,y — tasvirdagi koordinatalar, T — sirt harorati. AI modeli ushbu tasvirdan normal va anomal termik zonalarini avtomatik aniqlashi mumkin [6]. Masalan: Termal tasvir $\rightarrow$ preprocessing $\rightarrow$ CNN/YOLO $\rightarrow$ hot spotni aniqlash $\rightarrow$ nosozlik klassi. Bu yondashuv diagnostika jarayonini avtomatlashtirish imkonini beradi [5, 6]. Elektrik nosozliklar. Elektrik nosozliklarga: ochiq zanjir, qisqa tutashuv, bypass-diod nosozligi, kontakt qarshiligining ortishi, kabel shikastlanishi, ground fault kabi holatlar kiradi [3, 4].

Bunday nosozliklarni tok, kuchlanish, quvvat va I – V xarakteristikasi orqali aniqlash mumkin [3, 4]. Elektr parametrlarini vaqt bo‘yicha yig‘ish orqali quyidagi ma’lumotlar shakllantiriladi: $X=\{I,V,P,T,G,t\}$

Bu ma’lumotlarni Machine Learning modeliga berish orqali panelning texnik holatini avtomatik klassifikatsiya qilish mumkin [5].

Tashqi muhit bilan bog‘liq nosozliklar. Quyosh panellari ochiq muhitda ishlagani sababli tashqi omillar ham panel samaradorligiga ta’sir qiladi. Asosiy omillar: chang, qum, qor, qisman soya, namlik, yuqori harorat, kuchli shamol.

Ayniqsa changlanish Markaziy Osiyoning quruq va changli hududlarida alohida ahamiyatga ega. Kompyuter ko‘rishi yordamida panel tasviridagi changlangan yuzani segmentatsiya qilish va uning darajasini baholash mumkin [5, 6].

Axborot texnologiyalari asosida diagnostika. Quyosh panellarini avtomatik diagnostika qilish tizimining umumiy tuzilmasini quyidagicha ifodalash mumkin:

Ma’lumotlarni olish $\rightarrow$ Dastlabki qayta ishlash $\rightarrow$ Belgilarni ajratish $\rightarrow$ AI modeli $\rightarrow$ Nosozlikni aniqlash $\rightarrow$ Natijani vizualizatsiya qilish [5, 6]

Ma’lumotlarni olish, Diagnostika uchun quyidagi ma’lumotlardan foydalanish mumkin: RGB tasvirlar, termal tasvirlar, elektroluminessent tasvirlar, tok, kuchlanish, quvvat, panel harorati, quyosh radiatsiyasi [3, 5, 6].

Bu ma’lumotlar kameralar, sensorlar, IoT qurilmalari va monitoring tizimlari orqali olinishi mumkin.

Tasvirlarga dastlabki ishlov berish. AI modeliga tasvirni to‘g‘ridan-to‘g‘ri berishdan oldin preprocessing amalga oshiriladi.

Jarayon: Image $\rightarrow$ Resize $\rightarrow$ Noise Reduction $\rightarrow$ Normalization. Bunda tasvir o‘lchami bir xil shaklga keltiriladi, shovqinlar kamaytiriladi va piksel qiymatlari normallashtiriladi [5, 6].

Sun‘iy intellekt yordamida tasniflash. Tasvir asosida diagnostikada CNN algoritmlari samarali vositalardan biri hisoblanadi [5, 6]. Modelning umumiy ko‘rinishi: $X \rightarrow \text{CNN} \rightarrow \text{Feature Extraction} \rightarrow \text{Classification}$. Bu yerda X — panel tasviri. Chiqishda quyidagi sinflardan biri aniqlanishi mumkin: $Y = \{\text{Normal}, \text{Crack}, \text{HotSpot}, \text{Soiling}, \text{Shadow}, \text{PID}\}$

Agar nosozlikning paneldagi joylashuvi ham aniqlanishi talab qilinsa, object detection yoki segmentation algoritmlaridan foydalanish mumkin [5, 6].

Masalan: Image $\rightarrow$ YOLO $\rightarrow$ {Class, Confidence, BBox}. Bu yerda Class — nosozlik turi, Confidence — modelning ishonchlik ko‘rsatkichi, BBox — nosozlik joylashgan hudud.

Taklif etilayotgan axborot modeli. Quyosh panelining texnik holatini kompleks baholash uchun bir nechta axborot manbalarini birlashtirish mumkin: $D = \{\text{IRGB}, \text{IThermal}, \text{IEL}, \text{I}, \text{V}, \text{T}, \text{G}\}$

Bu yerda: IRGB — oddiy optik tasvir, IThermal — termal tasvir, IEL — elektroluminescent tasvir, I — tok, V — kuchlanish, T — harorat, G — quyosh radiatsiyasi. Ushbu ma’lumotlar AI modeliga berilib: $D \rightarrow \text{AI} \rightarrow \{C, L, S\}$ natija olinadi.

Bu yerda: C — nosozlik klassi, L — nosozlikning joylashuvi, S — nosozlik darajasi. Mazkur model oddiy “nosoz/nosoz emas” klassifikatsiyasidan farqli ravishda quyosh panelining texnik holatini kompleks baholash imkonini beradi [5, 6].

Sun‘iy intellekt asosidagi diagnostika tizimining afzalliklari. Axborot texnologiyalaridan foydalanish quyidagi imkoniyatlarni beradi: katta miqdordagi panellarni avtomatik monitoring qilish, nosozlikni erta aniqlash, nosozlik joylashuvini avtomatik aniqlash, texnik xizmat ko‘rsatish vaqtini qisqartirish, inson omiliga bog‘liqlikni kamaytirish, diagnostika natijalarini raqamli bazada saqlash, real

vaqt monitoringini tashkil etish, nosozliklar bo'yicha statistik ma'lumotlarni yig'ish [5, 6].

Bundan tashqari, AI modelini IoT tizimi bilan birlashtirish orqali quyosh elektr stansiyasining intellektual monitoring tizimini yaratish mumkin [5].

Natija. Tahlil shuni ko'rsatadiki, quyosh panellaridagi nosozliklarni aniqlashda faqat bitta axborot manbasidan foydalanish ayrim holatlarda yetarli bo'lmisligi mumkin. Masalan, RGB tasvirda ko'rinmaydigan mikro yoriq termal yoki elektroluminessent tasvirda aniqlanishi mumkin [5, 6]. Shuningdek, panelning termal tasvirida aniqlangan harorat anomaliyasi faqat bitta nosozlik bilan bog'liq bo'lmisligi mumkin. Shu sababli AI diagnostika tizimida bir nechta axborot manbalarini birgalikda tahlil qilish maqsadga muvofiq [5, 6]. Taklif etilayotgan yondashuvda: RGB+Thermal+Electrical→Multimodal AI→Fault Diagnosis tamoyilidan foydalanish mumkin. Bunday yondashuv kelgusida quyosh panellarining texnik holatini avtomatik baholash, nosozliklarni lokalizatsiya qilish va ularning rivojlanishini prognozlash imkonini beruvchi intellektual diagnostika tizimini ishlab chiqish uchun asos bo'la oladi [5, 6].

Xulosa. Bu maqolani yozish jarayonida quyidagi holatlar amalga oshirildi, quyosh fotoelektrik panellarida yuzaga keladigan asosiy nosozliklar tizimlashtirildi va ularni mexanik, termik, elektrik, material degradatsiyasi hamda tashqi muhit bilan bog'liq guruhlariga ajratish taklif qilindi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, quyosh panellarining texnik holatini diagnostika qilishda an'anaviy elektr o'lchovlari bilan bir qatorda RGB, termal va elektroluminessent tasvirlardan foydalanish mumkin. Ushbu ma'lumotlarni Computer Vision, Machine Learning va Deep Learning algoritmlari yordamida qayta ishlash diagnostika jarayonini avtomatlashtirish imkonini beradmoqda va jadal rivojlanmoqda. Maqolada taklif etilgan tasnif va axborot modeli kelgusida quyosh panellaridagi nosozliklarni avtomatik aniqlash, lokalizatsiya qilish va texnik holat darajasini baholash uchun sun'iy intellekt modelini ishlab chiqishda metodologik asos sifatida foydalanilishi mumkin. Kelgusidagi tadqiqotlarda real quyosh panellaridan RGB va termal tasvirlar, elektr parametrlar hamda meteorologik ma'lumotlarni yig'ish, tegishli dataset shakllantirish va CNN,

YOLO hamda multimodal Deep Learning modellarini tajribaviy qiyoslash rejalashtiriladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. International Electrotechnical Commission. IEC 61215-1:2021. *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements*. Geneva: IEC, 2021.
2. Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. IEA PVPS Task 13, Report IEA-PVPS T13-01:2014. 2014.
3. Madeti S.R., Singh S.N. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system // *Solar Energy*. 2017. Vol. 158. P. 161–185. DOI: 10.1016/j.solener.2017.08.069.
4. Chine W., Mellit A., Lughi V. Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants // *Renewable Energy*. 2014. Vol. 66. P. 99–110. DOI: 10.1016/j.renene.2013.11.073.
5. Thakfan A., Bin Salamah Y. Artificial-Intelligence-Based Detection of Defects and Faults in Photovoltaic Systems: A Survey // *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 19. Article 4807. DOI: 10.3390/en17194807.
6. Khatri A., Khadka S., Lamichhane N., Ranjit S. A comprehensive review of infrared thermography and deep learning applications for solar photovoltaic systems // *Infrared Physics & Technology*. 2025. Vol. 148. Article 105878. DOI: 10.1016/j.infrared.2025.105878.