Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

MUSTAQIL ELEKTR TOKI GENERATSIYASI VA O‘ZGARMAS TOK DVIGATELINI BOSHQARUV TIZIMI

Irnasov Abduhalim Abdakim o'g'li
Toshkent davlat texnika universiteti mustaqil izlanuvchisi
https://doi.org/10.5281/zenodo.22809556

Annotatsiya: Maqolada mustaqil elektr toki generatsiyasi hamda o‘zgarmas tok (DC) dvigatelini boshqarish tizimlarining nazariy va amaliy asoslari tahlil qilinadi. Mustaqil elektr ta’minoti tizimlari elektr tarmog‘idan mustaqil ravishda energiya ishlab chiqarish, uni o‘zgartirish, saqlash va iste’molchiga uzatish imkonini beruvchi texnik majmua sifatida qaraladi. Bunday tizimlarda quyosh fotoelektrik panellari, akkumulyatorlar, DC–DC o‘zgartirgichlar, invertorlar va elektron boshqaruv qurilmalaridan foydalanish kengayib bormoqda. Xalqaro energetika agentligi ma’lumotlariga ko‘ra, taqsimlangan energiya resurslari, jumladan, quyosh panellari va energiya saqlash tizimlari elektr energiyasini ishlab chiqarish va iste’mol qilish tuzilmasini o‘zgartirmoqda [1]. 2025-yilda global qayta tiklanuvchi elektr energetikasi quvvati 800 GW ga oshgan bo‘lib, quyosh fotoelektrik texnologiyasi yangi quvvatlarning asosiy qismini tashkil etgan [2]. Maqolada mustaqil DC manbadan o‘zgarmas tok dvigatelini quvvatlantirish, PWM boshqaruvi, DC–DC konvertorlar, yopiq konturli tezlik boshqaruvi, PID regulyator va maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) algoritmlarining o‘zaro bog‘liqligi ko‘rib chiqiladi. Alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatelining elektr-mexanik modeli asosida kuchlanish, tok, elektromagnit moment va aylanish tezligi o‘rtasidagi munosabatlar tahlil qilinadi. Natijalar mustaqil generatsiya manbasi va boshqariladigan DC yuritmani yagona avtomatlashtirilgan tizimga integratsiya qilish energiya resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish uchun muhim ekanligini ko‘rsatadi.
Kalit so‘zlar: mustaqil elektr generatsiyasi, o‘zgarmas tok dvigateli, DC motor, DC–DC konvertor, PWM, PID boshqaruv, MPPT, quyosh fotoelektrik tizimi, akkumulyator, elektr yuritma, yopiq kontur, energiya samaradorligi.

Kirish

Elektr energiyasiga bo‘lgan talabning ortishi, markazlashgan elektr tarmoqlarining ayrim hududlarda mavjud emasligi yoki ishonchliligi pastligi mustaqil elektr energiyasi ishlab chiqarish tizimlariga bo‘lgan ehtiyojni kuchaytirmoqda. Mustaqil yoki taqsimlangan generatsiya tizimlari elektr energiyasini iste’molchiga yaqin joyda ishlab chiqarish imkonini beradi. Xalqaro energetika agentligi taqsimlangan generatsiyani iste’molchi obyektida yoki mahalliy taqsimlash tarmog‘i yaqinida elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi tizimlar sifatida tavsiflaydi. Bunday texnologiyalarga fotoelektrik panellar, kichik turbinalar, yonilg‘i elementlari va boshqa generatorlar kiradi [1].

Bugungi kunda mustaqil energiya tizimlarining muhim tarkibiy qismlaridan biri quyosh fotoelektrik qurilmalaridir. IEA ma’lumotlariga ko‘ra, 2025-yilda dunyoda qayta tiklanuvchi energiya quvvati qo‘shimchalari 800 GW ga yetgan va quyosh fotoelektrik qurilmalari ushbu qo‘shimchalarning 75% dan ortig‘ini tashkil qilgan. Shu yili global quyosh PV quvvati qo‘shimchasi 600 GW dan oshgan va yig‘indi o‘rnatilgan quvvat taxminan 2800 GW ga yetgan [2].

Quyosh panellaridan olinadigan elektr energiyasi beqaror xarakterga ega. Quyosh nurlanishi, modul harorati va yuklama o‘zgarishi natijasida kuchlanish va tok qiymatlari doimiy ravishda o‘zgaradi. Shu sababli quyosh manbasi bilan bevosita ishlaydigan elektr dvigatel tizimida energiya oqimini boshqarish zarur. Fotoelektrik suv nasoslari bo‘yicha tadqiqotlarda MPPT algoritmlari yordamida PV tizimining maksimal quvvat nuqtasida ishlashini ta’minlashga alohida e’tibor qaratilgan [3]. Ushbu tizimlarda DC dvigatellar, DC–DC konvertorlar va elektron boshqaruv qurilmalari o‘zaro integratsiyalangan holda ishlatilishi mumkin.

O‘zgarmas tok dvigatellari tezlikni boshqarishning soddaligi, momentni boshqarish imkoniyati va matematik modelining nisbatan qulayligi sababli avtomatik boshqaruv tizimlarini tadqiq qilishda muhim obyekt hisoblanadi. Alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatelida yakor va qo‘zg‘atish chulg‘amlari alohida manbalardan ta’minlanadi, bu esa tezlik va momentni mustaqil boshqarish imkoniyatlarini kengaytiradi [4; 5].

Shu nuqtai nazardan, mustaqil elektr energiyasi generatsiyasi va DC dvigatelini boshqarish tizimini yagona kompleks sifatida o‘rganish amaliy ahamiyatga ega. Bunday yondashuv quyosh energiyasi, akkumulyator va elektr yuritma o‘rtasidagi energiya almashinuvini optimallashtirish imkonini beradi.

Metodologiya

Tadqiqotda tizimli tahlil, matematik modellashtirish, elektr-mexanik jarayonlarni nazariy tahlil qilish, boshqaruv tizimlarini strukturaviy taqqoslash va ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish usullaridan foydalanildi. Tadqiqot obyekti sifatida mustaqil DC energiya manbai bilan ta’minlangan alohida qo‘zg‘atishli o‘zgarmas tok dvigateli qabul qilindi.

Mustaqil generatsiya tizimining umumiy strukturasi quyidagi asosiy qismlardan tashkil topadi:

energiya manbai → DC–DC konvertor → DC shina → DC dvigatel → mexanik yuklama.

Energiya manbai sifatida fotoelektrik panel, akkumulyator yoki boshqa DC generator ishlatilishi mumkin. Fotoelektrik manbada kuchlanish va tokning o‘zgaruvchanligi sababli DC–DC konvertor energiya oqimini moslashtirish vazifasini bajaradi. Quvvat elektronikasida o‘zgartirgichning asosiy vazifalaridan biri manba va yuklama o‘rtasidagi kuchlanish hamda tok nisbatini boshqarishdir [6]. Erickson va Maksimović o‘zgartirgichlarning barqaror holatdagi tahlili, yo‘qotishlari, dinamik modeli va boshqaruv usullarini batafsil yoritgan [6; 7].

Alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatelining yakor zanjiri uchun asosiy tenglama quyidagicha yoziladi:

$$V_a=R_aI_a+L_a\frac{dI_a}{dt}+E_a$$

bu yerda V_a— yakor kuchlanishi, R_a— yakor qarshiligi, I_a— yakor toki, L_a— yakor induktivligi, E_a— qarshi elektr yurituvchi kuch.

Qarshi EYuK:

$$E_a=K_e\Phi\omega$$

ko‘rinishida ifodalanadi. Elektromagnit moment esa:

$$T_e=K_t\Phi I_a$$

bilan aniqlanadi. Mexanik harakat tenglamasi:

$$J\frac{d\omega}{dt}=T_e-T_L-B\omega$$

ko‘rinishida ifodalanadi. Bu yerda J— umumiy inertsiya momenti, T_L— yuklama momenti, B— viskoz ishqalanish koeffitsiyenti, ω— aylanish tezligi.

Ushbu tenglamalar DC dvigatelining elektr va mexanik qismlarini yagona matematik modelda ifodalash imkonini beradi. Alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatelining modelida yakor qarshiligi va induktivligi, qo‘zg‘atish zanjiri, qarshi EYuK, elektromagnit moment, yuklama momenti va mexanik inertsiya asosiy parametrlar hisoblanadi [8].

Boshqaruv tizimida asosiy parametr sifatida dvigatelning aylanish tezligi qabul qilinishi mumkin. Belgilangan tezlik ω_{ref}bilan haqiqiy tezlik ωorasidagi xatolik:

$$e(t)=\omega_{ref}(t)-\omega(t)$$

orqali aniqlanadi.

PID regulyatorining umumiy ko‘rinishi:

$$u(t)=K_pe(t)+K_i\int e(t)dt+K_d\frac{de(t)}{dt}$$

bilan ifodalanadi. Bu yerda K_p , K_i va K_d mos ravishda proporsional, integral va differensial koeffitsiyentlardir. PID boshqaruvning nazariy asoslari, jumladan Ziegler–Nichols sozlash usullari va boshqa parametr tanlash yondashuvlari boshqaruv tizimlari adabiyotlarida keng yoritilgan [9].

Natijalar

Tadqiqot natijasida mustaqil generatsiya manbai va DC dvigatelini birlashtiruvchi boshqaruv tizimining asosiy funksional tuzilishi aniqlandi. Tizimda energiya ishlab chiqarish, energiyani o‘zgartirish, saqlash va mexanik energiyaga aylantirish jarayonlari ketma-ket va o‘zaro bog‘langan holda amalga oshiriladi.

Quyosh PV tizimida asosiy muammo — manba quvvatining doimiy emasligidir. Fotoelektrik modulning chiqish quvvati quyosh nurlanishi va haroratga bog‘liq. Shuning uchun dvigatel yuklamasi bilan PV manbaning ish nuqtasi har doim bir xil bo‘lavermaydi. MPPT boshqaruvining maqsadi PV modulni mavjud sharoitda maksimal quvvatga yaqin ish nuqtasida ushlab turishdir. PV suv nasoslari bo‘yicha sharh tadqiqotlarida MPPT algoritmlari, DC–DC konvertorlar va DC dvigatelli nasos tizimlari o‘zaro bog‘liq holda o‘rganilgan [3; 10].

Amaliy jihatdan eng ko‘p qo‘llanadigan MPPT usullaridan biri Perturb and Observe — P&O algoritmidir. Ushbu algoritm PV kuchlanishi yoki konvertorning ish koeffitsiyentini kichik qadam bilan o‘zgartirib, chiqish quvvatining ortishi yoki kamayishini kuzatadi. Boshqa keng tarqalgan usullardan biri Incremental Conductance usuli bo‘lib, u PV panelning tok-kuchlanish xarakteristikasidagi hosila munosabatlaridan foydalanadi.

DC–DC konvertorning PWM orqali boshqarilishi dvigatelga uzatiladigan o‘rtacha kuchlanishni o‘zgartirish imkonini beradi. PWM signalining ish koeffitsiyenti D o‘zgarishi bilan konvertor chiqish kuchlanishi o‘zgaradi. Natijada dvigatelning tezligi va momenti boshqariladi. DC yuritmalarda PWM boshqaruvi bo‘yicha tadqiqotlar ushbu usulni tezlikni boshqarish uchun amaliy va samarali vosita sifatida ko‘rsatadi [11].

O‘zgarmas tok dvigatelining tezlik boshqaruvida ikki asosiy usul ajratiladi: yakor kuchlanishini boshqarish va magnit oqimini boshqarish. Yakor kuchlanishini boshqarishda qo‘zg‘atish oqimi deyarli o‘zgarmas saqlanadi va tezlik yakor kuchlanishini o‘zgartirish orqali rostlanadi. Magnit oqimni boshqarishda esa yakor kuchlanishi ma’lum qiymatda saqlanib, qo‘zg‘atish toki o‘zgartiriladi [4; 5].

Zamonaviy elektr yuritmalarda yopiq konturli boshqaruvning afzalligi shundaki, tizim dvigatel tezligini o‘lchaydi va uni berilgan qiymat bilan taqqoslaydi. Xatolik mavjud bo‘lsa, regulyator konvertorga yangi boshqaruv signalini beradi. Mohan va Raju elektr yuritmalarida feedback boshqaruv tizimi odatda quvvat elektronikasini qayta ishlovchi qurilma, dvigatel va mexanik yuklamadan tashkil topishini ko‘rsatadi [12].

Alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatellarini PID yordamida boshqarish bo‘yicha eksperimental va modellashtirish ishlari ham mavjud. Masalan, Salas-Cabrera va hammualliflar alohida qo‘zg‘atishli DC dvigatel rotorining holatini yopiq konturda boshqarish uchun diskret holat feedbacki, integrator va kuzatuvchi elementlardan foydalanilgan eksperimental tizimni tavsiflagan [13].

Mustaqil generatsiya tizimining energiya manbasi sifatida akkumulyator qo‘shilganda tizimning ish rejimlari yanada kengayadi. Quyosh energiyasi yetarli bo‘lgan davrda PV manba dvigatelni ta’minlashi va ortiqcha energiyani akkumulyatorga uzatishi mumkin. Quyosh energiyasi kamayganida esa akkumulyator DC shinadagi kuchlanishni qo‘llab-quvvatlaydi. IEA taqsimlangan energiya resurslari tarkibida quyosh PV va energiya saqlash tizimlarining birgalikdagi qo‘llanilishi elektr ta’minoti chidamliligini oshirish imkoniyatini ta’kidlaydi [1].

Tahlil va muhokama

Mustaqil elektr generatsiyasi va DC dvigatel boshqaruvini birlashtirishning asosiy afzalligi — energiya oqimini markazlashtirilgan elektr tarmog‘iga to‘liq bog‘lanmasdan boshqarish imkoniyatidir.

Bunday tizimlar chekka hududlar, qishloq xo‘jaligi nasoslari, kichik ishlab chiqarish obyektlari, avtonom transport vositalari va boshqa maxsus yuklamalarda qo‘llanishi mumkin.

Shu bilan birga, mustaqil tizimning asosiy muammosi manba quvvatining o‘zgaruvchanligidir. Quyosh nurlanishi keskin kamayganda PV chiqish quvvati pasayadi. Agar dvigatel yuklamasi o‘zgarmasa, DC shina kuchlanishida pasayish yuz berishi mumkin. Buni bartaraf etish uchun akkumulyator, DC–DC konvertor va quvvatni boshqarish algoritmlaridan foydalanish zarur.

2025-yilda global elektr energiyasi ishlab chiqarishida qayta tiklanuvchi manbalar ulushi 34% ga yetgan, quyosh va shamolning jami ulushi esa 17% ni tashkil qilgan. Shu yili quyosh PV ishlab chiqarishi qariyb 600 TWh ga oshgan [14]. Ushbu raqamlar mustaqil va taqsimlangan elektr tizimlari uchun quyosh energetikasining strategik ahamiyati ortib borayotganini ko‘rsatadi.

IEA prognoziga ko‘ra, 2025–2030-yillarda dunyoda qayta tiklanuvchi elektr energiyasi quvvati qariyb 4600 GW ga oshishi kutilmoqda. Ushbu o‘sishda quyosh PV texnologiyasi asosiy o‘rin egallaydi va taqsimlangan quyosh loyihalari umumiy PV kengayishining 42% ini tashkil etishi prognoz qilinmoqda [2].

DC dvigatelini boshqarishda esa asosiy masala faqat tezlikni o‘zgartirish emas, balki o‘zgaruvchan manba sharoitida dvigatelning barqaror ishlashini ta’minlashdir. Masalan, yuklama momenti oshganda yakor toki ortadi. Elektromagnit moment tokka proporsional bo‘lgani uchun:

$$T_e=K_t\Phi I_a$$

munosabatiga ko‘ra dvigatel qo‘shimcha moment hosil qiladi. Biroq yakor tokining ortishi quvvat elektronikasiga, dvigatel chulg‘amlariga va energiya manbaiga qo‘shimcha yuklama beradi.

Shu sababli boshqaruv tizimida tokning maksimal qiymatini cheklash mexanizmi ham bo‘lishi kerak. Zamonaviy yopiq konturli DC yuritmalarda tezlik konturi va ichki tok konturidan foydalanish mumkin. Bunda tashqi kontur kerakli yakor tokini belgilaydi, ichki tok konturi esa konvertorning PWM signalini boshqaradi. Mohan va Raju elektr yuritmalarda feedback boshqaruvi va quvvat protsessorining tezkor ishlashi motor boshqaruvining muhim elementi ekanini ko‘rsatadi [12].

DC dvigatelini boshqarishda to‘rt kvadrantli konvertorlar ham muhim imkoniyat beradi. Bunday tizimlarda dvigatelning aylanish yo‘nalishi va moment yo‘nalishini mustaqil boshqarish, shuningdek regenerativ tormozlashni amalga oshirish mumkin. Rashid tomonidan yoritilgan DC yuritmalarda bir fazali va uch fazali boshqariladigan to‘g‘rilagichlar, DC–DC konvertorlar, regenerativ tormozlash hamda yopiq konturli boshqaruv usullari alohida ko‘rib chiqilgan [15].

Wildi tomonidan keltirilgan elektr yuritma tizimlarida DC motorlarni birinchi kvadrant, ikki kvadrant va to‘rt kvadrant rejimlarida boshqarish, DC–DC kommutatsion konvertorlardan foydalanish va elektron boshqaruv tamoyillari batafsil bayon qilingan [16].

Mustaqil generatsiya tizimida yana bir muhim masala — umumiy tizim samaradorligidir. Energiya PV moduldan DC–DC konvertorga, undan dvigatelga va nihoyat mexanik yuklamaga o‘tadi. Har bir bosqichda elektr va kommutatsion yo‘qotishlar mavjud. Shuning uchun yuqori samarali yarimo‘tkazgichlar, mos PWM chastotasi, to‘g‘ri tanlangan konvertor topologiyasi va optimal boshqaruv algoritmi umumiy samaradorlikka ta’sir qiladi.

So‘nggi tadqiqotlarda quyosh PV asosidagi suv nasos tizimlarida P&O va Incremental Conductance kabi an’anaviy MPPT usullari bilan bir qatorda adaptiv va gibrid boshqaruv strategiyalarining rivojlanayotgani ko‘rsatilgan. 2026-yildagi keng qamrovli sharhda PV manbaning o‘zgaruvchanligi sababli kuchlanish, tok, moment, tezlik, quvvat va oqim kabi parametrlarni birgalikda boshqarish zarurligi qayd etilgan [17].

Shunday qilib, mustaqil elektr generatsiyasi va DC dvigatel boshqaruvini yagona tizim sifatida loyihalashda uchta asosiy boshqaruv darajasini ajratish maqsadga muvofiq: birinchisi — energiya manbasini optimallashtirish, ikkinchisi — DC shinadagi kuchlanishni barqarorlashtirish, uchinchisi —

dvigatel tezligi va momentini boshqarish. Ushbu darajalar o‘zaro muvofiqlashtirilsa, tizimning barqarorligi va energiya samaradorligi oshadi.

Xulosa

O‘tkazilgan nazariy va adabiyot tahlili shuni ko‘rsatadiki, mustaqil elektr toki generatsiyasi va o‘zgarmas tok dvigatelini boshqarish tizimlarini integratsiyalash avtonom elektr yuritmalarni yaratishning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Quyosh fotoelektrik tizimlari va energiya saqlash qurilmalarining jadal rivojlanishi bunday tizimlarning amaliy ahamiyatini oshirmoqda.

DC dvigatelining boshqariladigan elektr yuritmasida yakor kuchlanishini PWM orqali rostlash, tokni cheklash, tezlikni feedback orqali nazorat qilish va PID regulyatoridan foydalanish samarali boshqaruv strukturasini shakllantiradi. PV manbali tizimlarda esa MPPT algoritmi energiya manbasining o‘zgaruvchan sharoitida mavjud quvvatdan imkon qadar samarali foydalanishga xizmat qiladi.

Tahlil natijalariga ko‘ra, mustaqil generatsiya tizimining optimal arxitekturasi energiya manbai, DC–DC konvertor, energiya saqlash qurilmasi, DC shina, yopiq konturli motor boshqaruvi va mexanik yuklamaning o‘zaro muvofiqlashtirilgan ishlashiga asoslanishi kerak. Bunday tizimlarda boshqaruv algoritmining vazifasi faqat dvigatel tezligini barqarorlashtirish emas, balki energiya manbasi va yuklama o‘rtasidagi quvvat balansini ham ta’minlashdan iborat.

2025-yilda global qayta tiklanuvchi quvvat qo‘shimchalarining 800 GW ga yetgani, quyosh PV quvvatining 600 GW dan ortiq qo‘shilgani va quyosh elektr energiyasi ishlab chiqarishining 600 TWh ga oshgani mustaqil va taqsimlangan elektr energetikasining jadal rivojlanayotganini ko‘rsatadi [2; 14]. Shu sababli kelgusida mustaqil generatsiya va elektr yuritma tizimlarida adaptiv boshqaruv, raqamli nazorat, MPPT, energiya saqlash va aqlli quvvat boshqaruvi algoritmlarini birlashtirish muhim ilmiy-amaliy yo‘nalish bo‘lib qoladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. International Energy Agency. Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power System Opportunities and Best Practices. Paris: OECD Publishing, 2022. **116 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 7–18, 27–40.**
2. International Energy Agency. Renewables 2025: Analysis and Forecasts to 2030. Paris: IEA, 2025. **Foydalanilgan bo‘lim: “Renewable electricity”, pp. 27–45.**
3. Periasamy, C., Jain, N. K., Singh, I. P. “A review on development of photovoltaic water pumping system.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, 2015, pp. **918–925**.
4. Chapman, S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012. **680 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 427–455.**
5. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. **688 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 293–342, 559–607.**
6. Erickson, R. W., Maksimović, D. Fundamentals of Power Electronics. 2nd ed. New York: Springer, 2001. **883 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 13–61, 265–375.**
7. Erickson, R. W., Maksimović, D. Fundamentals of Power Electronics. 3rd ed. Cham: Springer, 2020. **1084 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 15–66, 277–405.**
8. Salas-Cabrera, R., Mayo-Maldonado, J. C., Rendón-Fraga, E. Y., Salas-Cabrera, E. N., González-Rodríguez, A. “On the Experimental Control of a Separately Excited DC Motor.” Electronic Engineering and Computing Technology, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 60, 2010, pp. **1–12**.
9. Ogata, K. Modern Control Engineering. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. **790 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 567–614.**

10. Chandel, S. S., Nagaraju Naik, M., Chandel, R. “Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and domestic applications.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **Foydalanilgan sahifalar: 398–408.**
11. “The PWM speed regulation of DC motor based on intelligent control.” Systems Engineering Procedia, Vol. 3, 2012, pp. **259–267**.
12. Mohan, N., Raju, S. “Control in Electric Drives.” In: Analysis and Control of Electric Drives: Simulations and Laboratory Implementation. Hoboken: Wiley, 2020, pp. **129–161**.
13. Alim, A., Talukdar, M. A. “Control of Separately Excited DC Motor.” Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 4, No. 1, 2011, pp. **7–10**.
14. International Energy Agency. Global Energy Review 2026. Paris: IEA, 2026. **Foydalanilgan bo‘limlar: “Electricity supply” va “Technology: Solar PV and wind”, pp. 34–47, 83–98.**
15. Rashid, M. H. (ed.). Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. 4th ed. Harlow: Pearson, 2014. **Foydalanilgan sahifalar: pp. 699–749.**
16. Wildi, T. Electrical Machines, Drives, and Power Systems. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2006. **Foydalanilgan sahifalar: pp. 555–585.**
17. Kumar, R., Naik, M. V. “A comprehensive review of control and energy management strategies for solar PV-based water pumping systems.” Discover Electronics, Vol. 3, Article 34, 2026. **Foydalanilgan sahifalar: maqola bo‘yicha 1–24.**
18. Nisha, R., Sheela, K. G. “Review of PV fed water pumping systems using BLDC Motor.” Materials Today: Proceedings, Vol. 24, Part 3, 2020, pp. **1874–1881**.
19. International Energy Agency. Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. Paris: OECD/IEA, 2002. **125 p.; foydalanilgan sahifalar: pp. 7–18, 25–48.**
20. Pal, P., Dey, R., Biswas, R. K., Bhakta, S. “Optimal PID Controller Design for Speed Control of a Separately Excited DC Motor: A Firefly Based Optimization Approach.” International Journal of Soft Computing, Mathematics and Control, Vol. 4, No. 4, 2015, pp. **39–48**.