



# Yirik quvvatli quyosh elektr stansiyasiga ega bo'lgan energetika tizimlarning barqaror ish holatlarini ta'minlash

Tulkin Sh. Gayibov<sup>1</sup>, Alisher E. Shanazarov<sup>1, a</sup>

<sup>1a)</sup> DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [tulgayibov@gmail.com](mailto:tulgayibov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

<sup>1)</sup> PhD, katta o'qituvchi., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston [alisher.shanazarov90@mail.ru](mailto:alisher.shanazarov90@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

**Dolzarbli:** Hozirgi kunda O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining salmog'i keskin oshib bormoqda, ayniqsa, quyosh elektr stansiyalarining (QES) elektr energetika tizimlariga keng miqyosda integratsiyalashuvi natijasida tizim chastotasi va kuchlanishini real vaqt rejimida boshqarilish bo'yicha yangi muammolar yuzaga kelmoqda. Quyosh energiyasi tabiiy ravishda o'zgaruvchan va uning qavvatini prognozlash qiyin bo'lgani sababli, ishlab chiqarish va yuklama o'rtasidagi muvozanatni saqlash, xususan tizim chastotasini barqaror ushlab turish masalasi tobora dolzarb bo'lib bormoqda. Tizim chastotasi ishlab chiqarilgan va iste'mol qilingan quvvat o'rtasidagi farqqa bevosita bog'liq bo'lib, qayta tiklanuvchi manbaalarning o'zgaruvchanligi muvozanatni buzadi. Bunday sharoitda akkumulyatorli energiya saqlash tizimlari AB chastota rostdashda muhim rol o'ynaydi. AB tizimlari tezkor zaryad va razryadlash xususiyatiga ega bo'lgani sababli, ular chastotadagi og'ishlarga real vaqt rejimida javob bera oladi hamda tizimning barqarorligini yaxshilaydi. Mazkur maqolada quyosh elektr stansiyasi bilan birga ishlovchi AB tizimining elektr energetika tizimi chastotasiga ta'siri tahlil qilinadi.

**Maqsad:** qayta tiklanuvchi energiya manbalarining, xususan quyosh elektr stansiyalari va akkumulyatorli energiya saqlash tizimlarining elektr energetika tizimlariga integratsiyasi natijasida yuzaga kelayotgan chastota og'ishi muammolarini aniqlash, ularning tizimga ta'sirini tahlil qilish hamda chastota barqarorligini ta'minlash uchun zamonaviy boshqaruv usullari va algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

**Usullar:** tadqiqot jarayonida elektr energetika tizimlarining chastota barqarorligini tahlil qilish maqsadida, quyosh elektr stansiyalari va akkumulyatorli energiya saqlash tizimlari integratsiyasi sharoitida tizimning dinamik jarayonini modellashtirish uchun zamonaviy nazariyalar, nochiqliq matematik dasturlash usullaridan foydalanildi. Shuningdek, chastota boshqaruvi masalalarini samarali hal etish uchun mos algoritmlar ishlab chiqildi.

**Natijalar:** elektr energetika tizimlarining qisqa muddatli holatlarini tadqiq qilish asosida, 14-tugunli IEEE test sxemasi misolida tahlil qilindi. Quyosh elektr stansiyalari va AB tizimlarining tizim chastotasiga ta'sirini baholash natijalari keltirilgan.

**Kalit so'zlar:** elektr energetika tizimi, quyosh elektr stansiyasi, akkumulyatorli energiya saqlash tizimi, elektr energetika tizimi, chastota barqarorligi.

## Обеспечение установившихся режимов энергосистем, содержащих крупные солнечные электростанции

Тулкин Ш. Гайибов<sup>1</sup>, Алишер Э. Шаназаров<sup>1, a</sup>

<sup>1a)</sup> DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [tulgayibov@gmail.com](mailto:tulgayibov@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

<sup>1)</sup> PhD, старший преподаватель., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [alisher.shanazarov90@mail.ru](mailto:alisher.shanazarov90@mail.ru) <https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

**Актуальность:** в настоящее время доля возобновляемых источников энергии в Республике Узбекистан стремительно увеличивается. Особенно это касается масштабной интеграции солнечных электростанций (СЭС) в электроэнергетические системы, что приводит к возникновению новых задач по управлению частотой и напряжением системы в режиме реального времени. Поскольку солнечная энергия по своей природе является переменным и трудно прогнозируемым источником, задача поддержания баланса между выработкой и нагрузкой, в частности, обеспечения стабильности частоты системы, становится всё более актуальной. Частота в энергосистеме напрямую зависит от разницы между произведённой и потребляемой мощностью, а переменность возобновляемых источников нарушает этот баланс. В таких условиях аккумуляторные системы накопления энергии (СНЭ) играют важную роль в регулировании частоты. Благодаря своей способности к быстрой зарядке и разрядке, СНЭ могут оперативно реагировать на отклонения частоты в режиме реального времени и способствуют улучшению динамической устойчивости системы. В данной статье рассматривается влияние системы накопления энергии, работающей совместно с солнечной электростанцией, на частоту в электрической энергосистеме.

**Цель:** выявление проблем отклонения частоты, возникающих в результате интеграции возобновляемых источников энергии, в частности солнечных электростанций и аккумуляторных систем хранения энергии, в электроэнергетические системы, анализ их влияния на систему, а также разработка современных методов управления и алгоритмов для обеспечения устойчивости частоты.

**For citation:** Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. Providing steady-state power systems containing large solar power plants. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 3, pp. 31-38.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16936135>

Received: 12.07.2025

Revised: 24.07.2025

Accepted: 10.08.2025

Published: 23.08.2025

**Copyright:** © Tulkin Sh. Gayibov, Alisher E. Shanazarov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



**Методы:** в ходе исследования, с целью анализа устойчивости частоты в электроэнергетических системах, были использованы современные теории и методы нелинейного математического программирования для моделирования динамических процессов системы в условиях интеграции солнечных электростанций и аккумуляторных систем хранения энергии. Кроме того, были разработаны соответствующие алгоритмы для эффективного решения задач управления частотой.

**Результаты:** на основе исследования краткосрочных состояний электроэнергетических систем был проведён анализ на примере 14-узловой тестовой схемы IEEE. Представлены результаты оценки влияния солнечных электростанций и систем аккумуляторные системы накопления энергии (СНЭ) на частоту системы.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, солнечная электростанция, аккумуляторные системы накопления энергии (СНЭ), устойчивость частоты.

## Providing steady-state power systems containing large solar power plants

Tulkin Sh. Gayibov<sup>1</sup>, Alisher E. Shanazarov<sup>1,a</sup>

<sup>1a)</sup> DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [tulgayibov@gmail.com](mailto:tulgayibov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

<sup>1)</sup> PhD., head teacher., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [tstu\\_energy@mail.ru](mailto:tstu_energy@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

**Relevance:** Currently, the share of renewable energy sources in the Republic of Uzbekistan is rapidly increasing. In particular, the large-scale integration of solar power plants (SPPs) into the power system is introducing new challenges related to real-time control of system frequency and voltage. Since solar energy is inherently variable and difficult to predict, maintaining the balance between generation and load—especially ensuring frequency stability—is becoming increasingly critical. System frequency is directly dependent on the difference between generated and consumed power, and the variability of renewable sources disrupts this balance. Under such conditions, battery energy storage systems (BESS) play a vital role in frequency regulation. Due to their rapid charging and discharging capabilities, BESS can respond to frequency deviations in real time and improve the dynamic stability of the system. This article analyzes the impact of a BESS operating in conjunction with a solar power plant on the frequency behavior of the power system.

**Aim:** The objective is to identify the frequency deviation issues arising from the integration of renewable energy sources, particularly solar power plants and battery energy storage systems (BESS), into power systems; to analyze their impact on system performance; and to develop modern control methods and algorithms to ensure frequency stability.

**Methods:** In this study, in order to analyze the frequency stability of power systems, modern theories and nonlinear mathematical programming methods were utilized to model the dynamic behavior of the system under the integration of solar power plants and battery energy storage systems (BESS). Furthermore, appropriate algorithms were developed to effectively address frequency control challenges.

**Results:** Based on the analysis of short-term operating conditions of power systems, the study was conducted using the 14-bus IEEE test system. The results of the evaluation of the impact of solar power plants and battery energy storage systems (BESS) on system frequency are presented.

**Keywords:** electric power system, solar power plant (SPP), battery energy storage system (BESS), frequency stability.

### 1. Kirish (Introduction)

So‘nggi yillarda elektr energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining, ayniqsa quyosh elektr stansiyalarining (QES) ulushi keskin oshib bormoqda. O‘zbekiston Respublikasida ham mazkur jarayon faol bosqichga kirib, yirik quvvatli QESlar bosqichma-bosqich milliy elektr tarmog‘iga integratsiyalashmoqda. Biroq bu holat tizimning an‘anaviy ish faoliyatiga sezilarli o‘zgarishlar kiritib, yangi muammolarni yuzaga keltirmoqda. Xususan, quyosh energiyasi o‘zgaruvchan va qavvatini oldindan bashorat qilish qiyin bo‘lgan tabiiy manba bo‘lib, uning tizimga ulanishi real vaqt jarayonida ishlab chiqarish va yuklama o‘rtasidagi muvozanatni saqlashni murakkablashtiradi. Bu esa, o‘z navbatida, tizim chastotasining o‘zgarishiga, kuchlanish darajasining ruxsat etilgan chegarasidan og‘ishiga, hamda energetik sifat ko‘rsatkichlarining yomonlashuviga olib keladi [1-3].

Ushbu muammolarni yechish va tizim barqarorligini ta‘minlashda akkumulyatorli energiya saqlash tizimlari AB muhim rol o‘ynaydi. AB tizimlari elektr tarmog‘ida ortiqcha energiyani saqlash va uni zarurat tug‘ilganda qayta tarmoqqa uzatish orqali chastotani rostlash, tizimning dinamik barqarorligini oshirish imkonini beradi[4-8].

Mazkur maqolada quyosh elektr stansiyasi bilan birga ishlovchi AB tizimining elektr energetika tizimi chastotasiga ta‘siri modellashirish va tahlil asosida o‘rganiladi. Shuningdek, 14 ta tugunli IEEE test sxemasi misolida tizimning qisqa muddatli holatlari baholanib, tizim barqarorligini ta‘minlashda taklif etilayotgan yondashuvning samaradorligi ko‘rsatilgan.

## 2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Elektr energetika tizimiga ko'p miqdorda quyosh elektr stansiyasi (QES) va akkumulyatorli energiya saqlash tizimi AB integratsiyasi sharoitida uning operativ barqarorlashgan ish holatlarini boshqarish mos modellar asosidagi maxsus usullardan foydalanish orqali amalga oshirilishi mumkin. Jumladan energetika tizimida chastotani real vaqt rejimida boshqarish uchun AB ning ish rejimlari aktiv quvvat balansining o'zgarishiga muvofiq aniqlanadi.

Tizim chastotasining o'zgarishi ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan quvvat o'rtasidagi farqqa bog'liq holda quyidagi ifoda bo'yicha aniqlanadi [7-13]:

$$\Delta f(t) = \frac{1}{2H} (P_G(t) + P_{AB}(t) - P_Y(t)) \quad (1)$$

Bu yerda  $H$  – tizimning inersiya doimiysi,  $P_G$  – generatsiyalovchi tugunlarining umumiy aktiv quvvati,  $P_{AB}$  – akkumulyator batareyasidan berilayotgan yoki uni zaryadlayotgan aktiv quvvat,  $P_Y$  – yuklamaning aktiv quvvati.

AB quvvati chastota og'ishiga bog'liq ravishda quyidagicha boshqariladi

$$P_{AB}(t) = -K_f \cdot \Delta f(t), \quad (2)$$

$K_f$  — AB chastota rostdash koeffitsiyenti.

AB tizimining holati (State of Charge – SoC) esa quyidagi differensial tenglama asosida ifodalangani:

$$\frac{dSoC(t)}{dt} = -\frac{P_{AB}(t)}{W_{AB}} \cdot \eta \quad (3)$$

Bu yerda  $SoC(t)$  – ABning zaryad darajasi (0 - 1 oraliqda)  $W_{AB}$  – ABning nominal elektr energiya sig'imi,  $\eta$  - samaradorlik (zaryad/razryad uchun).

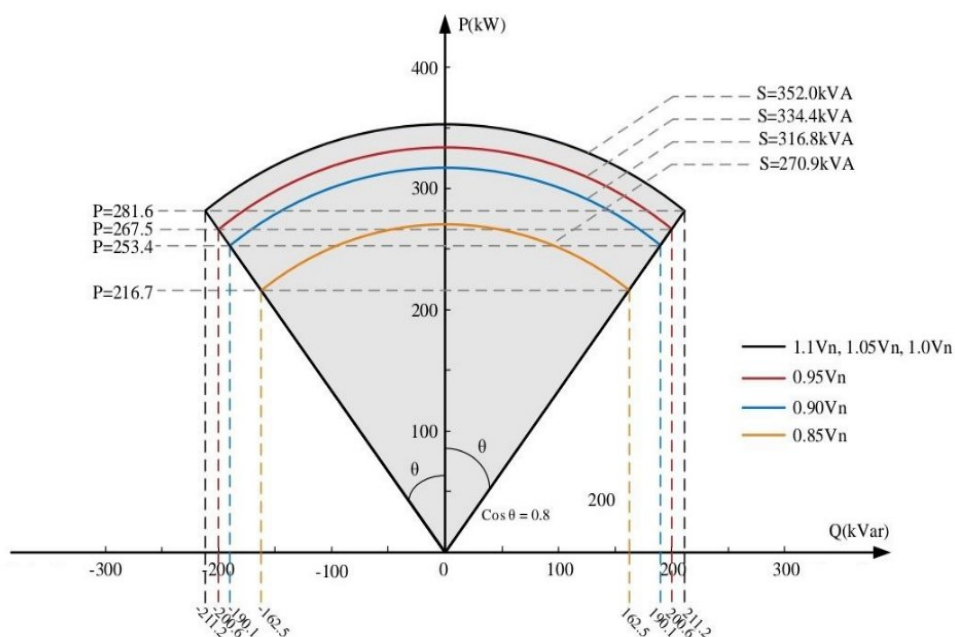
Ushbu matematik model uchun ABning minimal va maksimal chegaraviy qiymatlari hamda chastota og'ishlarining ruxsat etilishi bo'yicha chegaraviy shartlar quyidagi cheklolvar bo'yicha amalga oshiriladi [9-15].

$$P_{AB}^{\min} \leq P_{AB}(t) \leq P_{AB}^{\max}, \quad (4)$$

$$0.2 \leq SoC(t) \leq 0.9, \quad (5)$$

$$|\Delta f(t)| \leq \Delta f_{\max}, \quad (6)$$

1-rasmda AB tizimining turli kuchlanish darajalarida (1.1Vn, 1.05Vn, 1.0Vn, 0.95Vn, 0.90Vn, 0.85Vn) aktiv quvvat (P) va reaktiv quvvat (Q) o'rtasidagi chegaraviy ishchi holatlari keltirilgan. Bu P-Q diagramma  $\cos\phi=0.8$  qiymatida, harorat 30° C da ishlash sharoitlariga mos keladi.



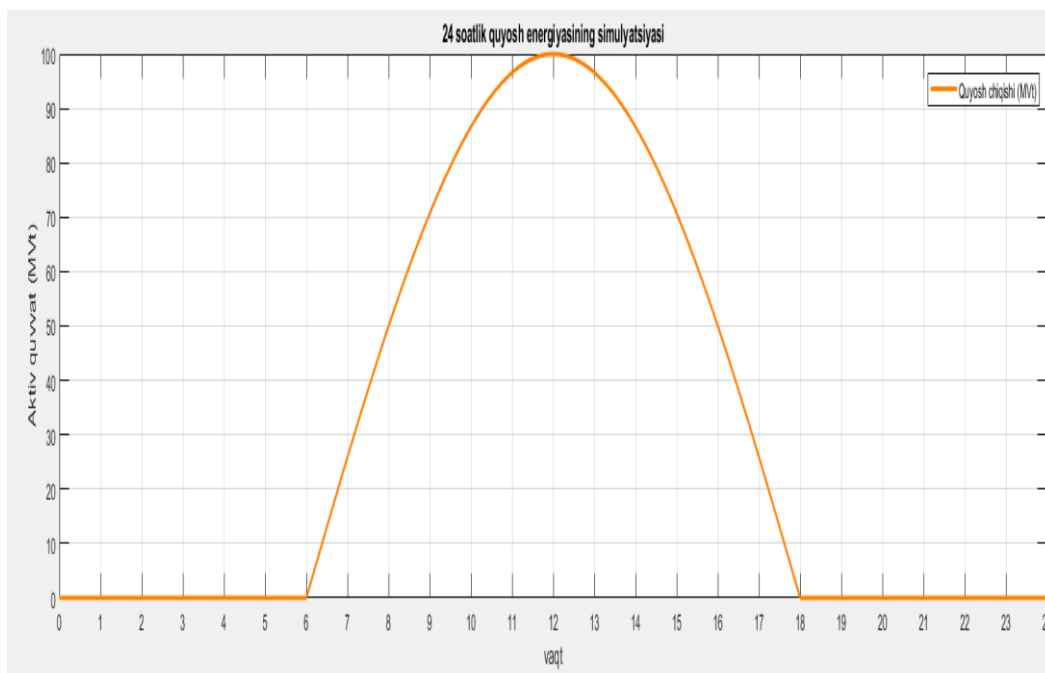
1-rasm. ABning P-Q diagrammasi (turli kuchlanish darajalari uchun).

Fig.1. P-Q diagram of the BESS at different voltage levels.

Ushbu diagramma ABning yuklama balansini saqlash va chastota o'zgarishlariga real vaqt

rejimida hisoblash imkoniyatlarini tahlil qilishda muhim vosita hisoblanadi [16].

Quyosh energiyasining ishlab chiqarilishi asosan kun davomida quyosh nurlanishiga bog'liq bo'lib, bu energiya manbai barqaror bo'lmagan va oldindan bashorat qilishga asoslangan xususiyatlarga ega. 2-rasmdagi 24 soatlik quyosh energiyasi quvvatining matematik modeli (sinusoidal shaklda) quyosh elektr stansiyasining real vaqtidagi o'zgaruvchan ishlashini soddalashtirilgan holda ifodalaydi. Bu grafik asosida elektr tizimida yuzaga keladigan chastota tebranishlari va yuklama balansidagi nomutanosibliklarni aniqlash imkonini beradi. Ayniqsa, quyosh chiqishining keskin pasayishi yoki ortishi vaqtlarida (masalan, ertalabki va kechki soatlarda) tarmoqdagi chastota tebranishlarining o'zgarishi ko'proq seziladi.



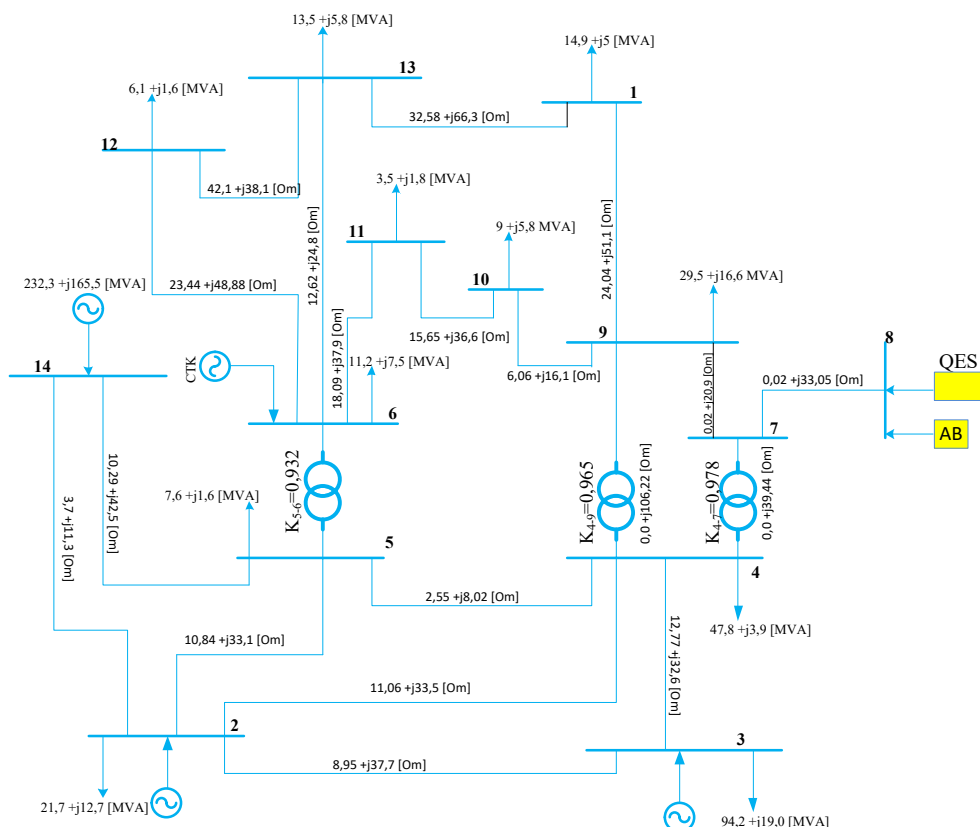
**2-rasm.** Quyosh elektr stansiyasining kunlik aktiv quvvat grafigi.

**Fig.1.** Daily active power output of the solar power plant.

Ushbu grafikda quyosh fotoelektr stansiyasining kunlik ishlab chiqarish quvvatini soddalashtirilgan sinusoidal model asosida tasvirlash orqali, aktiv quvvatning vaqtga bog'liq o'zgarishining matematik ifodasi berilgan. Bu yondashuv orqali quyosh manbaining o'zgaruvchan tabiati hisobga olinib, akkumulyatorli energiya saqlash tizimi bilan integratsiyalashgan holda elektr energetika tizimining chastota barqarorligiga ta'sirini tahlil qilish va tegishli dinamik modellarni shakllantirish imkoniyati yaratiladi [16-18].

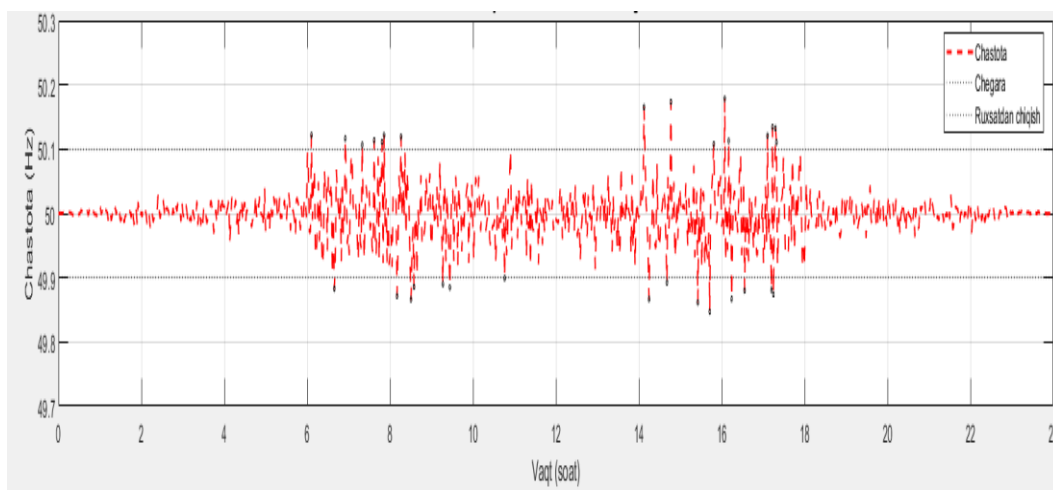
### 3. Natijalar (Results)

Mazkur tadqiqotda quyosh elektr stansiyasi va akkumulyatorli energiya saqlash tizimi integratsiyasi asosida elektr energetika tizimida chastota barqarorligiga ta'siri o'rganildi. Simulyatsiya jarayonida 24 soatlik vaqt oralig'ida quyosh energiyasining sinusoidal modelga asoslangan ishlab chiqarish profili va AB tizimining chastota og'ishlariga tasiri tahlil qilindi. Tadqiqotlar, jumladan, 3-rasmda keltirilgan 14 tugunli test sxemasi misolida amalga oshirildi. Ushbu sxemada 2, 3, 14 tugunlarda IES, 8 tugunda QES va AB mavjud.



**3-rasm.** 14 tugunli test sxema.  
**Fig.3.** 14-node test circuit.

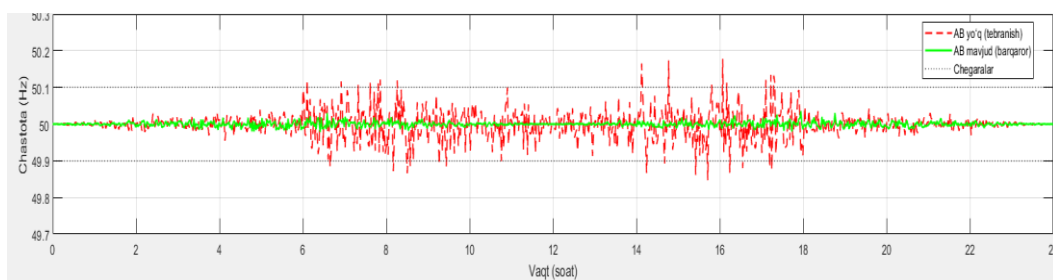
4-rasmdan ko‘rinib turibdiki, Quyosh elektr stansiyasi faqat 6:00 dan 18:00 gacha bo‘lgan vaqt oralig‘ida elektr energiyasi ishlab chiqaradi. Ushbu vaqt oralig‘ida akkumulyatorli energiya saqlash tizimi qatnashmagan holatda tizim chastotasining o‘zgarishi sezilarli darajada oshgan bo‘lib, chastota ruxsat etilgan chegaralardan (49.9–50.1 Hz) tashqariga chiqmoqda. Quyosh energiyasi ishlab chiqarilishi vaqt oralig‘i (taxminan 6:00–18:00) tarmoqdagi yuklama-balans nomutanosibligi kuchayganini ko‘rsatadi. Shu sababli, AB tizimining ishtirokisiz QES integratsiyasi tizim barqarorligiga salbiy ta‘sir ko‘rsatadi.



**4-rasm.** AB mavjud emas holatda chastota o‘zgarishining 24 soatlik grafigi.

**Fig.4.** 24-hour frequency variation graph in the absence of a Battery Energy Storage System (BESS).

5-rasmda elektr energiya tizimida AB mavjud va mavjud emas holatlardagi chastota (Hz) o‘zgarishining 24 soatlik solishtirma grafigi taqdim etilgan. Grafikda ikki holat alohida ranglarda ajratilib keltirilgan, yashil rangda keltirilgan holat AB mavjud holati chastota ruxsat etilgan chegaralardan (49.9–50.1 Hz) chiqmaganligini ko‘rishimiz mumkin.



4-rasm. Chastota o'zgarishining 24 soatlik grafigi.

Fig.4. 24-hour frequency variation graph.

Shunday qilib, EET holati tahlili natijasida akkumulyator batareyasi tizimining chastota barqarorligini ta'minlashdagi samaradorligi yuqori ekanligini ko'rishimiz mumkin. AB tizimi yuklama va ishlab chiqarishdagi tarmoq chastotasini barqaror qilishda muhim rol o'ynaydi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, AB mavjud bo'lgan holatda chastota barqarorligi yuqori darajada saqlanadi, bu esa energiya sifati va tizim ishonchliligini oshiradi.

#### 4. Munozara (Discussion)

Ushbu tadqiqotda shakllantirilgan maqsadga muvofiq holda, quyosh elektr stansiyasi va akkumulyatorli energiya saqlash tizimi integratsiyasining elektr energetika tizimidagi chastota barqarorligiga ta'siri simulyatsion asosda tahlil qilindi. O'tkazilgan tajriba va hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, taklif etilgan model chastota og'ishlariga ABning real ta'sirini ifodalashda yuqori aniqlikka ega bo'lib, 24 soatlik real rejimda tizim dinamikasini ishonchli tarzda aks ettira oldi.

14 tugunli test sxemasi asosida olib borilgan tahlillarda, kunning 6:00 dan 18:00 gacha bo'lgan vaqt oralig'ida faqat quyosh elektr stansiyasi ishtirok etayotgan holatda chastota og'ishlarining ruxsat etilgan chegaralardan chiqish holatlari qayd etildi. Bu esa elektr tarmog'idagi ishlab chiqarish va yuklama balansining buzilishi natijasida yuzaga kelgan bo'lib, AB mavjud emas sharoitda tizim barqarorligining yetarli emasligini ko'rsatdi. Shu bilan birga, AB tizimi integratsiyasi holatida chastota og'ishlari minimallashtirilgan, ruxsat etilgan chastota diapazonidan chiqish kuzatilmagan, bu esa tizimda yuklama balansining real vaqt rejimida barqarorligini isbotlaydi.

Simulyatsiya natijalariga ko'ra, ABning ta'siri tizim chastotasini nominal 50 Hz atrofida ushlab turishga yordam bergan bo'lib, energiya sifati yaxshilash va tarmoq ishonchliligini oshirishga xizmat qilgan. Chastota ruxsat etilgan oraliqdan chiqish ko'rsatkichlari AB mavjud bo'lmagan holatda sezilarli darajada ortgan bo'lsa, AB mavjud holatda bu holatlar deyarli kuzatilmagan.

Ushbu natijalar taklif etilgan model va simulyatsion yondashuvning amaliy qo'llashga yaroqliligini va tizim barqarorligini ta'minlashda AB texnologiyasining muhimligini ko'rsatadi. Mazkur yondashuv elektr energiyasi tizimlarini barqarorlashtirish, tezkor rejalashtirish va dispetcherlik boshqaruv tizimlari uchun samarali vosita sifatida tavsiya etiladi.

#### 5. Xulosa (Conclusion)

1. Elektr energetika tizimlarida quyosh elektr stansiyasi (QES) va akkumulyatorli energiya saqlash tizimi integratsiyasiga asoslangan chastota barqarorligini ta'minlash modeli ishlab chiqildi. Taklif etilgan yondashuv tarmoqdagi yuklama-balans nomutanosibli holatlarini aniqlik bilan modellashtirish va simulyatsiya qilish imkonini berdi.

2. 14 tugunli test sxemasi asosida o'tkazilgan 24 soatlik operatsion simulyatsiya tajribalari asosida shuni aniqlash mumkinki, faqat QES ishtirokida tizim chastotasi ruxsat etilgan chegaralardan (49.9–50.1 Hz) ko'p hollarda chiqib ketgan bo'lsa, AB tizimi bilan integratsiyalangan holatda bu og'ishlar deyarli butunlay bartaraf etildi. Bu esa tizim barqarorligining sezilarli darajada oshganini ko'rsatdi.

3. Tahlil natijalariga ko'ra, AB tizimi ishtiroki bilan chastota og'ishlarining kamayishi tizimda energiya sifati va ishonchlilik darajasini oshirishga xizmat qilgan. Ushbu yondashuvni joriy etish orqali chastota barqarorligini saqlab qolish bilan birga, tizimdagi avariya holatlar va qo'shimcha xarajatlarining oldini olish mumkinligi ko'rsatildi.

Taklif etilgan model va simulyatsion yondashuv elektr energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalari (ayniqsa, quyosh energiyasi) ishtirokida barqaror ishlashni ta'minlash, real vaqt rejimida boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish va dispetcherlik tizimlarida qo'llash uchun samarali vosita sifatida tavsiya etiladi.



## ADABIYOTLAR

1. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике // Под общ. ред –М.: Изд-во МЭИ, 2000.
2. Гайибов Т.Ш. Методы и алгоритмы оптимизации режимов электроэнергетических систем. // Т.: Ред. Ташкентский государственный технический университет, 2014.4.
3. Т. Гайибов, Б. Узаков, А. Шаназаров. Алгоритм оптимизации режима энергосистемы с учетом потерь в сетях и включении отключения. // Материалы конференции AIP 2612, 050011 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0117667>.
4. Hill, C. A., Such, M. C., Chen, D., Gonzalez, J., & Grady, W. M. Аккумуляторное хранение энергии для интеграции распределенной солнечной генерации. // IEEE Transactions on Smart Grid, 3(2), 850–857, 2012. [https:// DOI: 10.1109/TSG.2012.2190113](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2190113)
5. A. Bakeer, A. Chub, Y. Shen и A. Sangwongwanich, «Анализ надежности системы хранения энергии на основе аккумуляторных батарей для различных стационарных приложений», // J. Energy Storage 50, 104217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104217>
6. A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi и Á. Molina-García, «Энергосистемы с высоким содержанием возобновляемых источников энергии: обзор стратегий управления инерцией и частотой с течением времени», //Renew. Sustain. Energy Rev. 115, 109369 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
7. A. Hadavi, M. Tarafdar Hagh и S. Ghassem Zadeh, «Критические пороги инерции для стабильности частоты в интегрированных с возобновляемыми источниками энергии энергосистемах», // SSRN Electron. J. (2024). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5066131>
8. M. Li и J. D. McCalley, «Влияние интеграции возобновляемых источников энергии на динамику частот», // IEEE Trans. Power Syst. 28, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2258047>
9. A. Fernandez-Guillamón, E. Gomez-Lazaro и A. Molina-García, «Анализ обширной частотной характеристики и инерции в сценариях высокой интеграции источников возобновляемой энергии: применение к европейской объединенной энергосистеме», // Appl. Energy 250, 113–125 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>
10. Б. Шоу, С. Гошал, В. Мукерджи и С. П. Гошал. Решение задачи экономичного распределения нагрузки с помощью нового алгоритма оптимизации искателя. // Международный журнал по электротехнике и информатике - Том 3, Номер 1, 2011. [DOI:10.1016/j.eswa.2011.07.041](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.041).
11. Аль-Сумаит Дж. С., Сыкульски Дж. К. и Аль-Осман А. К. 2008. Решение различных типов задач экономического распределения нагрузки с использованием метода определения шаблонов. // Электроэнергетические компоненты и системы 36(3). нет. 250-265. [doi:0.1080/15325000701603892](https://doi.org/10.1080/15325000701603892)
12. Юрьевич Дж., Вонг К. П. 1999. Алгоритм снижения потока на основе эволюционного программирования. // Труды IEEE по энергосистемам 14(4)
13. А. Тайеби, Д. Гросс, А. Анта, Ф. Купцог и Ф. Дёрфлер, «Стабильность частоты синхронных машин и сетевых преобразователей мощности», // IEEE Trans. Система питания 35, 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926182>
14. Алябышева Т.М., Моржин Ю.И., Протопопова Т.Н., Светков Е.В. О методах оптимизации режимов энергосистемы и энергоинтеграции. // Электростанция. – Москва, 2005. – № 1 – С. 44-49.
15. A. Crivellaro et al., «За пределами систем с низкой инерцией: массовая интеграция преобразователей мощности, формирующих сеть, в передающие сети», // IEEE Trans. Power Syst. 35, 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926182>
16. С. А. García-Vázquez, Н. Espinoza-Ortega, F. Llorens-Iborra и L. M. Fernández-Ramírez, «Анализ осуществимости гибридной системы возобновляемой энергии с операциями «транспорт-дом» для дома в автономных и подключенных к сети приложениях», Sustain. Cities Soc. 60, 102275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102275>
17. С. Бхойр, П. Калиандро и К. Брививо, «Влияние предоставления услуг V2G на срок службы батарей», // J. Energy Storage 33, 101980 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101980>
18. Гаибов Т.Ш., Шаназаров А.Э. Алгоритм комплексной оптимизации режимов электроэнергетических систем // Международный журнал перспективных исследований в области науки, техники и технологий. Том 11, выпуск 3, 2024. - стр. 21524-21530.

## REFERENCES

1. Yu.N. Rudenko and V.A. Semenova. Automation of dispatch control in the electric power industry // Under total. ed. -M.: Publishing house of MEI, 2000. (In Russian).
2. Gayibov T.Sh. Methods and algorithms for optimizing the modes of electric power systems. // T.: Ed. Tashkent State Technical University, 2014.4. (In Russian).



3. T. Gayibov, B. Uzakov, A. Shanazarov. Algorithm of power system mode optimization taking into account losses in networks and functional constraints. // *AIP Conference Proceedings* 2612, 050011 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0117667>.
4. Hill, C. A., Such, M. C., Chen, D., Gonzalez, J., & Grady, W. M. Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation. // *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 850–857, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2190113>
5. A. Bakeer, A. Chub, Y. Shen, and A. Sangwongwanich, “Reliability analysis of battery energy storage system for various stationary applications,” // *J. Energy Storage* 50, 104217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104217>
6. A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, and Á. Molina-García, “Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time,” // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115, 109369 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
7. A. Hadavi, M. Tarafdar Hagh, and S. Ghassem Zadeh, “Critical inertia thresholds for frequency stability in renewable energy-integrated power systems,” // *SSRN Electron. J.* (2024). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5066131>
8. M. Li and J. D. McCalley, “Influence of renewable integration on frequency dynamics,” // *IEEE Trans. Power Syst.* 28, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2258047>
9. A. Fernandez-Guillamón, E. Gomez-Lazaro, and A. Molina-Garcia, “Extensive frequency response and inertia analysis under high renewable energy source integration scenarios: Application to the European interconnected power system,” // *Appl. Energy* 250, 113–125 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>
10. B. Shaw, S. Ghoshal, V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal. Solution of Economic Load Dispatch Problems by a Novel Seeker Optimization Algorithm. // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* - Volume 3, Number 1, 2011. [DOI:10.1016/j.eswa.2011.07.041](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.041).
11. Al-Sumait J S, Sykulski J K and Al-Othman A K. 2008. Solution of Different Types of Economic Load Dispatch Problems Using a Pattern Search Method. // *Electric Power Components and Systems* 36(3). no. 250-265. [doi:10.1080/15325000701603892](https://doi.org/10.1080/15325000701603892)
12. Yuryevich J, Wong K P. 1999. Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm. // *IEEE Transactions on Power Systems* 14(4)
13. A. Tayyebi, D. Groß, A. Anta, F. Kupzog, and F. Dörfler, “Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters,” // *IEEE Trans. Power Syst.* 35, 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926182>
14. Alyabisheva T.M., Morzhin Yu.I., Protopopova T.N., Svetkov Ye.V. The method of optimization of energy systems and energy systems. // *Electric station*. - Moscow, 2005. - No. 1 - P. 44-49.
15. A. Crivellaro et al., “Beyond low-inertia systems: Massive integration of grid-forming power converters in transmission grids,” // *IEEE Trans. Power Syst.* 35, 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926182>
16. C. A. García-Vázquez, H. Espinoza-Ortega, F. Llorens-Iborra, and L. M. Fernández-Ramírez, “Feasibility analysis of a hybrid renewable energy system with vehicle-to-home operations for a house in off-grid and grid-connected applications,” *Sustain. Cities Soc.* 60, 102275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102275>
17. S. Bhoir, P. Caliendo, and C. Brivio, “Impact of V2G service provision on battery life,” // *J. Energy Storage* 33, 101980 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101980>
18. Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. Algorithm for Complex Optimization of Short-term Modes of Electric Power Systems // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Volume 11, Issue 3, 2024. -pp.21524-21530.