



Murakkab energetika tizimlarining holatlarini sun'iy intellekt usullarida optimallashtirish samaradorligining tadqiqi

Tulkin Sh. Gayibov¹, Alisher E. Shanazarov^{1a}, Afzalbek T. Bozorov^{1b}

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

^{1a} PhD, katta o'qituvchi, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; alisher.shanazarov90@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

^{1b} assistent. Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; afzalbozorov8@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-7581-7170>

Dolzarblik: hozirgi davrda butun Jahonda elektr energiyasiga bo'lgan talabning doimiy tarzda oshib borishi va an'anaviy resurslarning cheklanganligi, ekologik xavfsizlik va barqarorlikni ta'minlash zaruriyati energetika ishlab chiqarish jarayonida resurslardan samarali foydalanish, jumladan energetika tizimlarining ish holatlarini optimallashtirishning usul va algoritmlarini yanada takomillashtirishni talab etadi. Ushbu holatlarni e'tiborga olib, mazkur maqolada energetika tizimlari holatlarini optimallashtirishda 5 ta sun'iy intellekt usullari va algoritmlari, xususan genetik algoritmi (GA), zarralar galasi algoritmi (PSO), differensial evolyutsiya (DE), sun'iy asalarilar koloniyasi algoritmi (ABC) va chumolilar koloniyasi (ACO) algoritmlarini qo'llash imkoniyatlarini tadqiqi va ularning samaradorligini taqqoslash natijalari keltirilmoqda. Ushbu yondashuv, nafaqat nazariy jihatdan, balki amaliy tadqiq va energetika tizimi barqarorligini oshirish maqsadida ham ahamiyatlidir.

Maqsad: ushbu tadqiqotning maqsadi zamonaviy murakkab energetika tizimlarining holatlarini optimallashtirishda sun'iy intellekt usullaridan foydalanish samaradorligini tadqiq qilish asosida ularning qisqa muddatli holatlarini rejalashtirish va operativ holatlarini boshqarish modellari va algoritmlarini takomillashtirishdan iborat.

Usullar: tadqiqot jarayonida elektr energetika tizimlarining barqarorlashgan holatlarini hisoblash va ularni optimallashtirishga doir zamonaviy nazariy yondashuvlar, shuningdek, nochiqliq matematik dasturlash, tizimli tahlil va sun'iy intellekt usullari qo'llanildi.

Natijalar: umumiy hollarda ko'p sonli oddiy, funksional, integral xarakterdagi tenglik va tengsizlik ko'rinishidagi ko'p ekstremumli murakkab masala hisoblanuvchi energetika tizimlarining holatlarini optimallashtirish masalasini yechishda an'anaviy usullardan foydalanish ayrim hollarda ularni approksimatsiyalash zarurligi va mos holda aniqlikning pasayishi, iterativ hisoblash jarayonining ishonchsizligi kabi faktorlar bog'liq qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi. Ushbu quyinchiliklarni bartaraf etish uchun sun'iy intellekt usullaridan foydalanish muhim sanaladi. Ularning samaradorligini qiyosiy tahlili muayyan misolda amalga oshirildi. Natijalar zarralar galasi algoritmi (PSO), differensial evolyutsiya (DE), sun'iy asalarilar koloniyasi (ABC) va chumolilar koloniyasi (ACO) algoritmlarining samaradorligi taxminan bir xil bo'lib, ularning boshqalariga nisbatan yuqori ekanligi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: elektr energetika tizimlari, Optimal quvvat taqsimoti, Nisbiy o'sishlar tengligi usuli, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Differential Evolution, Artificial Bee Colony, Ant Colony Optimization.

For citation: T.Sh. Gayibov, A.E. Shanazarov, A.T. Bozorov. Study of the Efficiency of Optimizing the States of Complex Power Systems Using Artificial Intelligence Methods. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 32-41.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19703735>

Received: 21.09.2025
Revised: 16.10.2025
Accepted: 22.02.2026
Published: 26.03.2026

Copyright: © Tulkin Sh. Gayibov, Alisher E. Shanazarov, Afzalbek T. Bozorov, 2026. 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/>).

Исследование эффективности оптимизации состояний сложных энергетических систем с использованием методов искусственного интеллекта

Тулкин Ш. Гайибов¹, Алишер Э. Шаназаров^{1a}, Афзалбек Т. Бозоров^{1b}

¹DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; tulgayibov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

^{1a} к.т.н., старший преподаватель Ташкентского государственного технического университета, 100095, Узбекистан; alisher.shanazarov90@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

^{1b} ассистент. Ташкентского государственного технического университета, 100095, Узбекистан; afzalbozorov8@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-7581-7170>

Актуальность. в настоящее время во всём мире наблюдается устойчивый рост спроса на электрическую энергию, а также ограниченность традиционных ресурсов, необходимость обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития. С учётом вышеизложенного, в



данной статье представлены результаты исследования возможностей применения и сравнительного анализа эффективности пяти методов и алгоритмов искусственного интеллекта для оптимизации состояний энергетических систем, а именно: генетического алгоритма (GA), алгоритма роя частиц (PSO), дифференциальной эволюции (DE), алгоритма колонии искусственных пчёл (ABC) и алгоритма колонии муравьёв (ACO). Данный подход имеет значение не только с теоретической точки зрения, но и с позиции практического применения и повышения устойчивости энергетических систем.

Цель: совершенствование моделей и алгоритмов краткосрочного планирования и оперативного управления режимами современных сложных энергетических систем на основе анализа эффективности применения методов искусственного интеллекта, при оптимизации их состояний.

Методы: в процессе исследования были использованы современные теоретические подходы к расчёту установившихся режимов электроэнергетических систем и их оптимизации, а также методы нелинейного математического программирования, системного анализа и искусственного интеллекта.

Результаты: задача оптимизации состояний энергетических систем представляет собой сложную многоэкстремальную задачу с большим числом ограничений равенств и неравенств функционального и интегрального характера. Применение традиционных методов её решения в ряде случаев приводит к необходимости аппроксимации, что, в свою очередь, сопровождается снижением точности, а также трудностями, связанными с ненадёжностью итерационных вычислительных процессов. Для устранения указанных недостатков целесообразным является использование методов искусственного интеллекта. Сравнительный анализ их эффективности был проведён на конкретном примере. Полученные результаты показали, что эффективность алгоритмов роя частиц (PSO), дифференциальной эволюции (DE), колонии искусственных пчёл (ABC) и колонии муравьёв (ACO) является приблизительно одинаковой и превосходит эффективность других рассмотренных методов.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, оптимальное распределение мощности, метод равенства относительных приращений, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Differential Evolution, Artificial Bee Colony, Ant Colony Optimization.

Study of the Efficiency of Optimizing the States of Complex Power Systems Using Artificial Intelligence Methods

Tulkin Sh. Gayibov¹, Alisher E. Shanazarov^{1a)}, Afzalbek T. Bozorov^{1b}

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

^{1a)} PhD, Head teacher., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; alisher.shanazarov90@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

^{1b)} Assistant, Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; afzalbozorov8@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-7581-7170>

Relevance. at present, a steady increase in global demand for electrical energy, the limited availability of conventional resources, and the necessity to ensure environmental safety and sustainability require more efficient use of resources in the energy production process. Taking these considerations into account, this paper presents the results of a study on the applicability and comparative performance of five artificial intelligence–based methods and algorithms for power system state optimization, namely the Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE), Artificial Bee Colony (ABC), and Ant Colony Optimization (ACO). This approach is significant not only from a theoretical perspective but also in terms of practical implementation and enhancing the stability of power systems.

Aim: the objective of this study is to improve models and algorithms for short-term planning and operational control of modern complex power systems based on an analysis of the effectiveness of artificial intelligence methods in optimizing their operating states.

Methods: the research employed modern theoretical approaches to the calculation and optimization of steady-state operating conditions of electric power systems, as well as nonlinear mathematical programming, system analysis, and artificial intelligence methods.

Results: in general, the problem of optimizing power system operating states represents a complex multi-extremal problem involving a large number of equality and inequality constraints of simple, functional, and integral types. In certain cases, the use of traditional solution methods leads to the necessity of approximation, which results in reduced accuracy and difficulties associated with the



unreliability of iterative computational processes. To overcome these difficulties, the application of artificial intelligence methods is considered essential. A comparative analysis of their performance was conducted using a representative case study. The results demonstrate that the Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE), Artificial Bee Colony (ABC), and Ant Colony Optimization (ACO) algorithms exhibit approximately similar performance and show higher efficiency compared to the other considered methods.

Keywords: electric power systems, optimal power dispatch, equal incremental cost method, Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE), Artificial Bee Colony (ABC), Ant Colony Optimization (ACO).

1. Kirish (Introduction)

Hozirgi davrda elektr energiyasiga bo'lgan talabning yuqori suratlarda oshib borayotganligi, an'anaviy yoqilg'i resurslarining cheklanganligi, shuningdek, ekologik muammolarni keskinlashuvi energetikada ishlab chiqarish quvvatlarini samarali taqsimlash va boshqarishning zamoniy usullarini yaratish masalasining dolzarbligini oshirmoqda. Optimal quvvat taqsimoti nafaqat umumiy yoqilg'i sarfini minimallashtirish va boshqarish sarf xarajatlarini kamaytirish, balki tizim barqarorligini ta'minlash, ishlab chiqarish jarayonlaridagi noaniqliklarni kamaytirish va atrof-muhitga salbiy ta'sirlarni kamaytirish imkonini beradi.

Shu bilan birga, qayta tiklanadigan energetika manbalarining keng qo'llanilishi tizimning nohiziqi xarajat funksiyalari va turli operativ cheklovlari bilan ishlashni talab qiladi, bu esa an'anaviy optimal boshqaruv usullarining samaradorligini pasaytiradi. An'anaviy usullar, masalan keng tarqalgan nisbiy o'sishlar tengligi usuli, ishlab chiqarish quvvatlarini analitik tarzda taqsimlash imkonini beradi va kichik tizimlarda tez va ishonchli yechim topadi. Biroq, murakkab tizimlarda, xususan, nohiziqi yoqilg'i sarf funksiyalari, ishlab chiqariluvchi aktiv va reaktiv quvvatlar, elektr uzatish liniyalarida minimal va maksimal quvvat oqimlari bo'yicha cheklovlar hamda yuklamalardagi noaniqliklar mavjud bo'lganda, an'anaviy usullar global optimal nuqtaga yetarli darajada yaqin yechimni aniqlash imkoni bermaydi. Shu sababli, zamonaviy murakkab energetika tizimlari holatlarini optimallashtirishda sun'iy intellekt va metayevristik algoritmlardan foydalanish muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi. Sun'iy intellekt usullaridan, xususan xususan genetik algoritmi (GA), zarralar galasi algoritmi (PSO), differensial evolyusiyasi (DE), sun'iy asalarilar koloniyasi algoritmi (ABC) va chumolilar koloniyasi (ACO) algoritmlari murakkab va nohiziqi optimizatsiya masalalarini hal etishda yuqori samaradorlikni namoyish qiladi. Ular global optimal yechimga yaqin natijalarni topish, ko'p o'lchamli cheklovlar va noaniqliklar mavjud bo'lgan tizimlarda quvvatni samarali taqsimlash imkonini beradi. Maqsad funksiyasi va cheklovlarning uzluksizligi yoki bitta ekstremumga ega bo'lishi kabi shartlarni talab qilmaydi. Bu esa murakkab tizimlarda optimal yechim topish imkoniyatini sezilarli darajada oshiradi. Ushbu jihatlarni e'tiborga olib, mazkur maqolada murakkab energetika tizimlarini holatlarini genetik algoritmi (GA), zarralar galasi algoritmi (PSO), differensial evolyusiyasi (DE), sun'iy asalarilar koloniyasi algoritmi (ABC) va chumolilar koloniyasi (ACO) algoritmlari yordamida optimallashtirish imkoniyatlarining tadqiq qilingan va ularning natijalari keltirilmoqda.

MATLAB muhitida simulyatsiya qilinadigan natijalar IES aktiv quvvati, umumiy yoqilg'i sarfi va tizimning optimal ishlash strategiyasini aniq ko'rsatib beradi. Shu bilan birga, SI algoritmlarining murakkab sharoitlarda global optimal yechim topish qobiliyati ilmiy asosda namoyon qilinadi. Tadqiqot natijalari energetika tizimlarini boshqarishda amaliy tavsiyalar ishlab chiqishga, resurslardan samarali foydalanishga va barqaror energetika boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqishga yordam beradi.

Shu jihatlari bilan, tadqiqot nafaqat nazariy jihatdan, balki amaliy va strategik boshqaruv nuqtai nazaridan ham dolzarbdir. U energetika tizimlarida optimal quvvat taqsimotini aniqlash, umumiy yoqilg'i sarfini kamaytirish va tizim barqarorligini oshirishga qaratilgan kompleks yondashuvni taklif qiladi. Shu bilan birga, an'anaviy va sun'iy intellekt algoritmlarini birlashtirish orqali zamonaviy energetika tizimlarida samarali va ishonchli boshqaruvni amalga oshirish imkoniyati yaratadi.

2. Usullar va materiallar (Methods and Materials)

Tadqiqotda elektr energetika tizimlarida ishlab chiqarish aktiv quvvatlarini optimal taqsimlash masalasi asosiy ilmiy muammo sifatida ko'riladi. Tizimning har bir IES ishlab chiqaradigan minimal va maksimal quvvat chegaralari, yuklama miqdori va yoqilg'i sarf funksiyalari hisobga olingan. An'anaviy usul sifatida Nisbiy o'sishlar tengligi usuli tanlangan bo'lib, u tizim balansini saqlagan holda ishlab chiqarish quvvatini analitik tarzda taqsimlashga imkon beradi. Bundan tashqari, beshta sun'iy intellekt algoritmi – Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE), Artificial Bee Colony (ABC) va Ant Colony Optimization (ACO) – qo'llanilgan.

Issiqlik elektr stantsiyalarining ulardagi umumiy yoqilg'i sarfi bilan bog'liq bo'lgan xarajatlar funksiyasi:

$$B = \sum_{i \in T} B_i(P_i) \rightarrow \min ; \quad (1)$$



Tizimning barcha tugunlarda har bir vaqt intervali uchun aktiv va reaktiv quvvat balanslari bo'yicha chegaraviy shartlar:

$$W_i' = P_i - \bar{P}_i = 0, \quad i \in \Gamma + H; \quad (2)$$

$$W_i'' = Q_i - \bar{Q}_i = 0, \quad i \in \Gamma_1 + H; \quad (3)$$

barcha tugunlardagi ruxsat etilgan minimal va maksimal kuchlanish, optimallashtirishda ishtirok etuvchi IESning aktiv va reaktiv quvvatlari, kompensatorlarning reaktiv quvvatlari, rostlanuvchan transformatorlarning transformatsiya koeffitsientlarining haqiqiy va movhim qismlarini ruxsat etilgan minimal maksimal chegaraviy qiymatlari bo'yicha chegaraviy shartlar :

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad i \in \Gamma + H; \quad (4)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad i \in T; \quad (5)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad i \in \Gamma - \Gamma_1; \quad (6)$$

ni hisobga olib minimal bo'lishini ta'minlovchi optimal qiymatlarini topish talab etiladi.

Bu yerda T - optimallashtirishda qatnashuvchi IESlar to'plami; G – generatsiyalovchi tugunlar to'plami; G_l – reaktiv quvvat i rostlanuvchan generatsiyalovchi tugunlar to'plami (hisobiy elektr stansiyalaridan tashqari); $U_i, P_i, Q_i, P_i^{\min}, Q_i^{\min}, U_i^{\min}, P_i^{\max}, Q_i^{\max}, U_i^{\max}$ - i - chi tugunning rostlash hisobiy va berilgan chegaraviy aktiv va reaktiv quvvatlari hamda kuchlanishlari.

Quyilgan masalani bugungi kunda keng tarqilgan Langranj usulida yechish algoritmini ko'rib chiqamiz. Unga ko'ra funksional chegaraviy shartlarni jarima funksiyasi yordamida hisobga olib, hosil bo'luvchi umumlashgan maqsad funksiyasi ekstremumining zaruriy shartidan foydalanilib, masala IESlarning quyidagi shart ta'minlanuvchi quvvatlarini topishga keltiriladi [1]:

$$b_1(P_1) + u_1(P_1) = b_2(P_2) + u_2(P_2) = \dots = b_n(P_n) + u_n(P_n), P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_n; \quad (7)$$

bu yerda P_1, P_2, \dots, P_n – IESlarning optimallashtiriluvchi aktiv quvvatlari; b_1, b_2, \dots, b_n - IESlarda yoqilg'i sarfi bilan bog'liq xarajatlarning nisbiy o'sishlari; P_n - EETning umumiy aktiv yuklamasi.

Oxirgi shartlardan i chi stansiyaning quvvatiga chegaraviy shartning ta'siri uning nisbiy o'sish xarakteristikasini yuqoriga yoki pastga surish orqali hisobga olinishi kelib chiqadi. demak, hisoblash jarayoni ketma-ket yaqinlashshish tartibida amalga oshirilib, uning har bir qadamida

- har bir stansiya uchun maqsad funksiyasi (1) ning hosilasi hisoblanadi;

- stansiyalarning nisbiy o'sish xarakteristikalariga jarima funksiyasining mos hosilalarini qo'shish orqali ular qayta quriladi;

- energetika tizimining yuklamasini stansiyalari o'rtasida (7) shart bo'yicha optimal taqsimlash natijasida ularning yangi qadamdagi quvvatlari topiladi. Ushbu tartibdagi hisoblash jarayoni barcha funksional chegaraviy shartlar bajarilguncha davom ettiriladi.

Ushbu usulda foydalanish uchun tavsiya etilgan kvadrat ko'rinishdagi maqsad funksiyasi tenglik ko'rinishidagi chegaraviy shartlarni hisobga olish uchun mo'ljallangan. Chunki, u chegaralanuvchi funksiya o'zining chegaraviy qiymatiga teng bo'lgandagina nulga tengdir. Shu sababli u yordamida tengsizlik ko'rinishidagi chegaraviy shartni hisobga olish uchun har bir qadamdan so'ng chegaraviy shartning bajarilishi tekshirib ko'riladi. Agar bunda chegaraviy shart bajarilsa, navbatdagi qadam bu chegaraviy shartni hisobga olmasdan, agar u bajarilmasa, hisobga olib amalga oshiriladi [4].

Shunday qilib, an'aviy usullar uchun yuqorida bayon etilgan kamchiliklar bilan bir qatorla tengsizlik ko'rinishidagi funksional chegaraviy shartlarni hisobga olish bilan bog'liq kamchiliklar ham xarakterlidir.

Taklif etilayotgan evristik usullardan biri bo'lgan PSO algoritmi yordamida EET holatlarini optimallashtirish masalasini ko'rib chiqamiz:

Genetik algoritm (GA) — ishlash prinsipi va natijalarning tahlili. Genetik algoritm biologik evolyutsiya jarayoniga asoslangan bo'lib, optimallashtirish masalasidagi har bir yechim xromosoma sifatida qaraladi. Xromosoma (ya'ni kodlashtirilgan ketma-ketlik) IES agregati aktiv quvvatlarining vektori $[P_1, P_2, P_3, P_4]$ (Mvt) ko'rinishida ifodalanadi, gen deb optimallashtirilayotgan parameter P (Mvt) ya'ni aktiv quvvat olinadi. Algoritm boshlanishida tasodifiy boshlang'ich populyatsiya (to'plam) shakllantiriladi va har bir to'plam uchun maqsad funksiyasi — umumiy yoqilg'i sarfi B (t.sh.yo./soat) hisoblanadi. GA da yechimlarni yaxshilash quyidagi uchta asosiy evolyutsion operator orqali amalga oshiriladi:

— Tanlash (Selection). Tanlash bosqichida kichikroq B qiymatiga ega bo'lgan yechimlar keyingi avlodga o'tish ehtimoli yuqori bo'ladi. Bu jarayon “kuchlilar omon qoladi” tamoyiliga asoslanadi. Biroq tanlash bosimi noto'g'ri sozlangan, populyatsiya xilma-xilligi tez kamayib ketishi mumkin.

— Chatishtirish (Crossover). Chatishtirish jarayonida ikki ota-ona xromosomadan yangi avlod hosil qilinadi. Bu bosqichda quvvatlar kombinatsiyasi o'zgaradi, ammo iqtisodiy dispetcherlik masalasida balans va cheklovlar ($\sum P = P_n, P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$) qat'iy bo'lganligi sababli, chatishtirishdan so'ng yechimlar ko'pincha qo'shimcha normallashtirishni talab qiladi.

— Mutatsiya (Mutation). Mutatsiya xromosomaning ayrim genlarini tasodifiy o'zgartirib, qidiruv makonida yangi hududlarni tekshirish imkonini beradi. Ammo mutatsiya darajasi kichik bo'lsa, GA



lokal minimumda qolib ketadi yoki katta bo'lsa algoritim beqaror bo'ladi.

Ushbu tadqiqotda GA da umumiy yoqilg'i sarfi $B_{GA}=867.3152$ t.sh.yo./soat va biz o'rgangan boshqa evristik usullarga ga nisbatan kattaroq bo'lib chiqdi.

Buning asosiy sabablari quyidagilar:

1. Cheklovlar bilan ishlashdagi zaiflik. Iqtisodiy dispetcherlik masalasida quvvat balansi ($\sum P_i = P_N$) asosiy cheklov hisoblanadi. GA da chatishtirish va mutatsiya operatorlari bu balansni to'liq saqlab qolmaydi. Natijada normallashtirish orqali tuzatish kiritiladi, bu tuzatish optimal nisbatlarni buzadi va yakuniy yechim PSO yoki DE dagi kabi sozlanmaydi.

2. Eksploatatsiya qobiliyatining pastligi. GA kuchli eksploratsiya (keng qidiruv) imkoniyatiga ega, biroq eksploatatsiya (topilgan yaxshi yechim atrofida aniqlashtirish) jihatidan PSO va DE ga yutqazadi. Shu sababli GA optimal nuqtaga yaqinlashadi, lekin uni aniq topa olmaydi.

3. Erta konvergentsiya (premature convergence) Tanlash bosimi yuqori bo'lsa, populyatsiya tezda bir xil xromosomalarga to'planib qoladi. Bu esa algoritimning global minimumni topishdan oldin lokal minimumda to'xtab qolishiga olib keladi.

Differential Evolution (DE) — DE algoritmining asosiy afzalligi — uning oddiy tuzilishi va parametrlarni sezgirlik bilan moslashuvchan tarzda optimallashtira olishidir. Algoritim quyidagi bosqichlardan iborat:

1. Populyatsiya yaratish: Dastlab populyatsiyada N ta yechim tasodifiy tarzda aniqlanadi. Har bir yechim tizimning cheklovlar doirasida bo'ladi.

2. Mutatsiya: Har bir yechim vektoriga populyatsiyadagi boshqa uchta yechimdan farq olinib, yangi mutant vektor yaratiladi. Bu operator algoritimga diversifikatsiya va global qidiruv imkonini beradi.

3. Krossover: Mutant vektor va mavjud yechim kombinatsiyalash orqali yangi yechim hosil qilinadi, bu esa algoritimga yaxshilash va moslashuvchanlikni ta'minlaydi.

4. Seleksiya: Yangi hosil bo'lgan yechim agar xarajat funksiyasini yaxshilasa, eski yechim o'rni egallaydi. Bu esa optimallashtirishni ta'minlaydi. DE algoritmi energetika tizimlarida optimal quvvat taqsimoti masalasida juda samarali ekanligi tajribada ko'rsatildi.

Zarrachalar to'dasi optimallashtirish algoritmi (PSO). Zarrachalar to'dasi optimallashtirish algoritmi (Particle Swarm Optimization — PSO) tabiiy muhitda qushlar yoki baliqlar to'dasining muvofiqlashgan harakatiga asoslangan metaevristik optimallashtirish usulidir. Ushbu algoritmda har bir ehtimoliy yechim ya'ni P zarracha sifatida qaraladi va u elektr stansiyalarining aktiv quvvatlari vektori $[P_1, P_2, P_3, P_4]$ (Mvt) bilan ifodalanadi. PSO algoritmining asosiy g'oyasi shundan iboratki, har bir zarracha qidiruv makonida harakatlanar ekan, u o'zining eng yaxshi topilgan holatini ($pBest$) hamda butun to'da bo'yicha aniqlangan eng yaxshi holatni ($gBest$) hisobga oladi. Zarrachaning keyingi holati uning avvalgi tezligi, shaxsiy tajribasi va to'da tajribasi asosida yangilanadi. Algoritim iteratsiyalari davomida zarrachalarning tezligi va joylashuvi mos ravishda inertsia yuki, individual va sotsial tashkil etuvchilar orqali o'zgartiriladi. Natijada zarrachalar optimal yechim joylashgan hududga bosqichma-bosqich yaqinlashadi. Har qanday navbatdagi iteratsiyada zarrachalarning yangi holatlari (ya'ni noma'lumlarning navbatdagi iteratsiyadagi qiymatlari) quyidagicha hisoblanadi:

$$x_{ij}^{(t)} = x_{ij}^{(t-1)} + v_{ij}^{(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Bunda tezlikning ushbu iteratsiyadagi yangi qiymatlari quyidagicha topiladi:

$$v_{ij}^{(t)} = \omega v_{ij}^{(t-1)} + c_1 r_{1ij}^{(t)} \cdot (x_{ij.best}^{(t-1)} - x_{ij}^{(t-1)}) + c_2 r_{2ij}^{(t)} \cdot (x_{j.Gbest}^{(t-1)} - x_{ij}^{(t-1)});$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

bu yerda $\omega v_{ij}^{(t-1)}$ - inertsion tashkil etuvchi (shuningdek, ba'zan uchish yo'nalishi) deb yuritilib, u zarraning yo'nalishini keskin o'zgarishini bartaraf etib, oldingi uchish yo'nalishlaridan foydalangan holda zarraga mos impuls berilishini ta'minlaydi;

ω - inertsia yuki bo'lib, uning qiymati 0,5-1 oraliqida qabul qilinadi;

$c_1 r_{1ij}^{(t)} \cdot (x_{ij.best}^{(t-1)} - x_{ij}^{(t-1)})$ - kognitiv tashkil etuvchi bo'lib, u zarraning bundan oldingi individual eng yaxshi holati haqida xotirani belgilaydi;

$c_2 r_{2ij}^{(t)} \cdot (x_{j.Gbest}^{(t-1)} - x_{ij}^{(t-1)})$ - sotsial tashkil etuvchi bo'lib, u bundan oldingi global eng yaxshi holat bilan bog'liq joriy unumdorlikni belgilaydi;

c_1, c_2 - musbat sonlar bo'lib, ular individual eng yaxshi holat va global eng yaxshi holat yo'nalishida yaqinlashishni tezlashtiruvchi koeffitsiyentlardir;

$r_{1ij}^{(t)}, r_{2ij}^{(t)}$ - oraliq 0-1 da bir tekis taqsimlangan tasodifiy sonlar bo'lib, ular galaning turli tumanligini tasdiqlash uchun kiritiladi [5].

Ushbu tartibdagi hisoblash jarayoni uni to'xtatish sharti bajarilguncha davom ettiriladi.

PSO algoritmining iqtisodiy dispetcherlik masalasidagi afzalliklari. Mazkur tadqiqotda PSO algoritmi iqtisodiy dispetcherlik masalasini yechishda yuqori samaradorlikni namoyon etdi. Buning asosiy sabablari quyidagilardan iborat:

Birinchidan, PSO algoritmi topilgan yaxshi yechimlar atrofida aniqlashtirilgan qidiruv olib borish qobiliyatiga ega. Bu xususiyat yoqilg'i sarfi funksiyasining minimumi tor hududda joylashgan



holatlarda ayniqsa muhim ahamiyatga ega.

Ikkinchidan, PSO algoritmidagi quvvatlar balansini ta'minlash jarayoni nisbatan sodda va barqaror amalga oshiriladi. Har bir iteratsiyadan so'ng zarracha pozitsiyasini normallashtirish orqali $\sum P_i = P_N$ sharti samarali tarzda bajariladi. Bu esa optimal nisbatlarning buzilishini kamaytiradi.

Uchinchidan, PSO algoritmi kam sonli va mantiqan tushunarli parametrlar (inertsia koeffitsiyenti, kognitiv va ijtimoiy tezlashtirish koeffitsiyentlari)ga ega bo'lib, ular noto'g'ri tanlangan taqdirda ham algoritim barqaror ishlash xususiyatini saqlab qoladi.

Nihoyat, inertsia koeffitsiyenti yordamida PSO algoritmi eksploratsiya va ekspluatatsiya jarayonlari o'rtasida muvozanatni ta'minlaydi. Bu holat algoritimning lokal minimumlarda to'xtab qolish ehtimolini sezilarli darajada kamaytiradi.

Sun'iy asalarilar koloniyasi algoritmi (ABC). Sun'iy asalarilar koloniyasi (Artificial Bee Colony — ABC) algoritmi tabiiy asalarilar koloniyasining oziq-izlash (asosan nektar) yig'ish xatti-harakatiga asoslangan metaevristik optimallashtirish usulidir. Avvalo, uya ichidan tasodifiy yo'nalishlarga bir qancha qidiruvchi asalarilar uchib chiqadi va mavjud nektar bilan ta'minlangan hududlarni aniqlashga harakat qiladi. Ma'lum bir vaqt o'tib, bu asalarilar uyaga qaytib, boshqa asalarilarga o'zlarining qayerda va qancha nektar topgani haqidagi ma'lumotni yetkazadilar. Shundan so'ng, aniqlangan hududlarga boshqa asalarilar ham yo'l olishadi. Aniqlangan hududda nektar miqdori qancha ko'p bo'lsa, shuncha ko'p asalarilar ushbu yo'nalishga yo'naltiriladi. Shu bilan birga, qidiruvchi asalarilar boshqa hududlarni ham tekshirish maqsadida uchib chiqadi. Ushbu jarayon keyingi iteratsiyalarda takrorlanadi.

Tasodifiy tanlangan nuqtalarning pozitsiyalari (yechim variantlari) quyidagi tenglama orqali:

$$x_{ij} = x_j^{\min} + R \cdot (x_j^{\max} - x_j^{\min}); \quad (9)$$

bu yerda; $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}\}$; $i = 1, 2, \dots, N_s, j = 1, 2, \dots, D$; N_s -yechim variantlar soni; D - noma'lum o'zgaruvchilar soni. R - $[0, 1]$ oraliqdagi teng taqsimlangan tasodifiy son. x_j^{\min}, x_j^{\max} - noma'lum o'zgaruvchining chegaraviy qiymatlari. Shakllantirilganidan so'ng, nuqtalar populyatsiyasi (yechimlar to'plami) ishchi asalarilar, kuzatuvchi asalarilar va qidiruvchi asalarilar tomonidan qayta tekshiriladi. Shundan so'ng, har bir nuqtaning (yechim variantining) moslik darajasi (maqsad funksiyasi qiymati asosida) baholanadi.

-Yangi nuqtalar shakllangach, ularning nektar miqdori (maqsad funksiyasi qiymati) baholanadi. Agar yangi nuqta oldingi holatdan yaxshiroq bo'lsa, ishchi asalari o'z joyini yangisiga almashtiradi; aks holda dastlabki pozitsiyasida qoladi. Shu tarzda yangi populyatsiya hosil bo'ladi.

-Kuzatuvchi asalarilar ishchi asalarilardan olingan ma'lumotlar asosida yechim variantini tanlaydi. Har bir manbaning tanlanish ehtimoli quyidagicha aniqlanadi:

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{N_s} F_j}. \quad (10)$$

Bu yerda, F_i, F_j -maqsad fuksiyalari i -chi va j - pozitsiyalardagi qiymat.

- Agar bir pozitsiya berilgan iteratsiyalar davomida yaxshilanmasa, u tashlab yuboriladi va ushbu ishchi asalari qidiruvchi asalarilar qatoriga o'tadi. Qidiruvchi asalari yangi nuqtani tasodifiy aniqlaydi.

-Agar to'xtatish mezoni bajarilsa (masalan, maksimal iteratsiya soni), eng ko'p nektarga ega nuqta ya'ni maqsad funksiyasi eng yaxshi yechim — optimal natija sifatida qabul qilinadi. Aks holda jarayon 1-bosqichdan takrorlanadi.

Ant Colony Optimization (ACO). Chumolilar koloniyasi optimallashtirish (ACO) algoritmi — bu chumolilarning oziq izlash jarayonida eng qisqa yo'lni topish xatti-harakatini modellashtiruvchi metaevristik optimallashtirish usulidir. Ushbu algoritim asosan murakkab optimallashtirish masalalarini yechishda qo'llaniladi, jumladan kombinatorik va uzluksiz optimallashtirish masalalarida samarali ishlaydi. Algoritim ishga tushirilishidan oldin asosiy parametrlar aniqlanadi: chumolilar soni m , maksimal iteratsiyalar soni n , feromonning bug'lanish koeffitsiyenti ρ , shuningdek, feromon va evristik axborot ta'sirini belgilovchi empirik koeffitsiyentlar α va β . Har bir mumkin bo'lgan yechim joylashuvi uchun boshlang'ich feromon miqdori τ_0 o'rnatiladi. Agar k -chi chumoli joriy vaqtda i -chi tugunda joylashgan bo'lsa, u keyingi j -chi tugunni ruxsat etilgan N_i tugunlar to'plami ichidan tanlaydi:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{j \in N_i^k} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}, & \text{agar } j \in N_i^k \text{ bo'lsa;} \\ 0, & \text{agar } j \notin N_i^k \text{ bo'lsa.} \end{cases} \quad (11)$$

Keyingi tugunni tanlash jarayoni ehtimollik asosida amalga oshiriladi va bu ehtimollik feromon miqdori hamda evristik axborotga bog'liq bo'ladi. Har bir chumoli yechimni bosqichma-bosqich quradi, har bir bosqichda u mavjud imkoniyatlar to'plamidan bitta holatni tanlaydi. Tanlash ehtimoli feromon izi intensivligi va evristik axborot qiymati bilan aniqlanadi, bu esa eng yaxshi yechim tomon yo'naltirilgan qidiruvni ta'minlaydi. Shunday qilib, vaqtning $t+1$ lahzasida i - j qirra qadida shakllangan feromon miqdori quyidagi aniqlanadi:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \Delta \tau_{ij}^k(t). \quad (12)$$



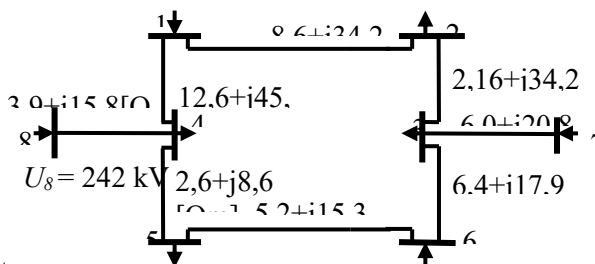
Chumoli algoritmda jarayonni to'xtatish mezonini sifatida quyidagi shartlar biri foydalanilishi mumkin:

- amalga oshirilgan iteratsiyalar soni uning oldindan belgilangan qiymatga teng;
- ruxsat etilgan aniqlikdagi yechim hosil bo'lgan, ya'ni $f(x^k(t)) \leq \varepsilon$ shart bajarilgan;
- barcha (yoki ko'pchilik) chumolilar bir xil yo'l orqali o'tgan. Umumiy holatda $x^k(t)$ vaqtning t lahzasidagi yechimni ifoda etsa, u holda $f(x^k(t))$ yechimning sifatini ifoda etadi.

3. Natijalar (Results)

Elektr energetika tizimlarining holatlarini SI algoritmlari asosida optimallashtirish masalasining keltirilgan modeli va u asosda yechish algoritmining samaradorligi, jumladan, sxemasi 2- rasmda keltirilgan EET holatini optimallashtirish misolida tadqiq qilindi.

1, 6, 7 va 8-tugunlardagi IESlarning aktiv quvvatlari, 2,3,4,5-tugunlardagi yuklamalar :



1-rasm. 8 tugunli test sxema

Fig.1. 8-node test circuit

1-jadval. Tugunlar haqidagi ma'lumotlar

Table 1. Information about electrical nodes

No	1	2	3	4	5	6	7
P_i, MVt	-450	350	550	230	470	-450	-450
Q_i, MVar	-228,7	169,5	266,4	111,4	227,6	-358,6	-246,8

IESlarning shartli yoqilg'i sarf xarakteristikalarini, t.sh.yo./soat: $B_1 = 90 + 0,1P_1 + 0,0007P_1^2$; $B_6 = 70 + 0,11P_6 + 0,0004P_6^2$; $B_7 = 80 + 0,15P_7 + 0,0005P_7^2$; $B_8 = 60 + 0,12P_8 + 0,00055P_8^2$

IESlarning minimal va maksimal aktiv quvvatlari bo'yicha chegaraviy qiymatlar, MVt:

$$200 \leq P_1 \leq 800, \quad 150 \leq P_6 \leq 700, \quad 100 \leq P_7 \leq 900, \quad 100 \leq P_8 \leq 1000.$$

IESlarning minimal va maksimal reaktiv quvvat bo'yicha chegaraviy qiymatlar, MVar:

$$100 \leq Q_1 \leq 400, \quad 50 \leq Q_7 \leq 450, \quad 50 \leq Q_8 \leq 600.$$

Ushbu tadqiqotda IESlarning shartli yoqilg'i sarf xarakteristikalarini berilganligi sababli maqsad funksiyasi EETda umumiy shartli yoqilg'i sarfi funksiyasi hisoblanadi. Solishtirish asosida optimallashtirish samaradorligini baholash uchun avvalo EETning dastlabki barqarorlashgan holati hisoblandi. Uning natijalari jadvalda keltirilgan.

2-jadval. EETning dastlabki barqarorlashgan holati parametrlari.

Table 2. Parameters of the initial stabilized state of electrical energy systems.

No	U_i, kV	$\delta_i, \text{rad.}$	P_i, MVt	Q_i, MVar
1	232,22	0,0390	-450,00	-228,70
2	195,40	-0,1564	350,00	169,50
3	206,23	-0,1052	550,00	266,40
4	220,031	-0,0816	230,00	111,40
5	212,90	-0,1183	470,00	227,60
6	228,12	-0,0564	-450,00	-358,60
7	236,63	0,0570	-450,00	-246,80
8	242,00	0,0000	-339,71	-263,84

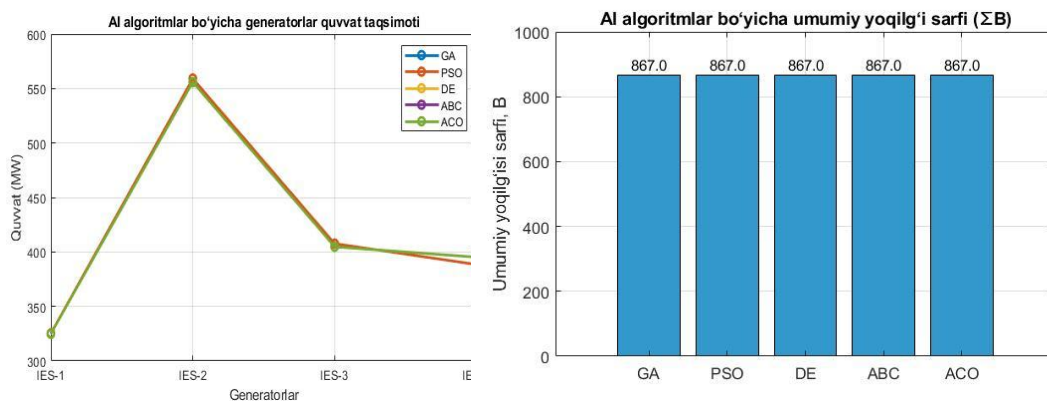
Umumiy aktiv quvvat isrofi: $\pi = 89,71 \text{ MVt}$,

Dastlabki holatda maqsad funksiyasining qiymati, ya'ni umumiy shartli yoqilg'i sarfi $B = 890,24$ t.sh.yo./soat ni tashkil etadi. Taklif etilayotgan matematik model va hisoblash algoritmidan foydalanib, EET holatini barcha berilgan cheklovchi faktorlarni hisobga olib optimallashtirishda quyidagi natijalar hosil bo'ldi:



3-jadval. Turli evristik algoritmlar yordamida olingan optimal quvvat taqsimoti natijalari
Table 3. Results of optimal power distribution obtained using various heuristic algorithms

Usul	(P ₁) (MVt)	(P ₂) (MVt)	(P ₃) (MVt)	(P ₄) (MVt)	(B) (t.sh.yo./soat)
GA	338.8644	541.7344	413.5195	386.4996	867.3152
PSO	324.7996	555.8994	404.7195	395.1995	867.0162
DE	324.7996	555.8994	404.7195	395.1995	867.0162
ABC	324.7956	555.8954	404.7241	395.2029	867.0162
ACO	324.7996	555.8993	404.7195	395.1995	867.0162
NO'T	330,9500	550,4200	416,2980	382,9500	867.2100



2-rasm. Metaevristik usullar asosida Matlab dasturiy muhitida topilgan yechimlar diagrammasi
Fig.2. Diagram of solutions found in the Matlab software environment based on metaevristic methods

4. Munozara (Discussion)

Ushbu tadqiqotda elektr energetika tizimi (EET) holatini optimallashtirish masalasi sun'iy intellekt (SI) asosidagi evristik algoritmlar yordamida yechildi va ularning samaradorligi Nisbiy o'sishlar tengligi (NO'T) usuli bilan solishtirildi. Taqqoslash uchun avvalo EETning dastlabki barqarorlashgan holati hisoblandi. Ushbu holatda umumiy aktiv quvvat isrofi 89,71 MVt ni, maqsad funksiyasi qiymati – umumiy shartli yoqilg'i sarfi esa $B = 890,24$ t.sh.yo./soat ni tashkil etdi.

NO'T usuli yordamida EET holatini optimallashtirish natijasida maqsad funksiyasining qiymati $B = 867,2100$ t.sh.yo./soat ga teng bo'ldi. Bu natija dastlabki holatga nisbatan sezilarli darajada yaxshilanishni ko'rsatadi va yoqilg'i sarfining kamayishini ta'minlaydi.

Shu bilan birga, SI algoritmlari yordamida olingan natijalar NO'T usuliga nisbatan yanada samaraliroq ekanligi aniqlandi. Xususan, genetik algoritmi (GA), zarralar to'dasi optimallashtirish (PSO), differensial evolyutsiya (DE), sun'iy asalari koloniyasi (ABC) va chumolilar koloniyasi optimallashtirish (ACO) algoritmlari uchun maqsad funksiyasining qiymati $B \approx 867,0162-867,3152$ t.sh.yo./soat oralig'ida bo'ldi. Eng yaxshi natijalar PSO, DE, ABC va ACO algoritmlarida deyarli bir xil bo'lib, $B = 867,0162$ t.sh.yo./soat ni tashkil etdi. Bu qiymat NO'T usulida olingan natijaga nisbatan 0,1938 t.sh.yo./soat ga kam bo'lib, SI algoritmlarining iqtisodiy jihatdan yanada foydali ekanligini ko'rsatadi. Natijalarni chuqur tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, SI algoritmlarining o'zaro farqi juda kichik bo'lib, bu ularning barqarorligi va global optimumga yaqin yechimlarni topish qobiliyatini tasdiqlaydi. NO'T usuli bilan solishtirilganda, SI algoritmlarining ustunligi ularning murakkab nohiziqli bog'lanishlar va ko'p sonli cheklovlar mavjud bo'lgan optimallashtirish masalalarida qidiruv fazosini kengroq qamrab olishi bilan izohlanadi.

Shunday qilib, olingan natijalar elektr energetika tizimlari holatini optimallashtirishda SI algoritmlaridan foydalanish yoqilg'i sarfini yanada kamaytirish, quvvatlarni optimal taqsimlash va tizim samaradorligini oshirish imkonini berishini ko'rsatadi. Tadqiqot natijalari amaliy EETlar uchun SI asosidagi optimallashtirish usullarini joriy etish maqsadga muvofiqligini tasdiqlaydi.

5. Xulosa(Conclusion)

1) Mazkur tadqiqotda elektr energetika tizimining holatini optimallashtirish masalasi uchun ishlab chiqilgan matematik model va hisoblash algoritmining adekvatligi hamda hisoblash aniqligi 8 tuginli test sxema misolida kompleks ravishda tekshirildi. Hisoblash natijalari dastlabki barqarorlashgan



holatda umumiy shartli yoqilg'ı sarfi $B = 890,24$ t.sh.yo./soat ni tashkil etishini, optimallashtirish jarayonida esa ushbu ko'rsatkichning sezilarli darajada kamaytirilishini tasdiqladi.

2) Nisbiy o'sishlar tengligi (NO'T) usuli asosida olingan optimal yechimda maqsad funksiyasining qiymati $B = 867,2100$ t.sh.yo./soat ga teng bo'ldi. Shu bilan birga, sun'iy intellekt asosidagi evristik algoritmlar (GA, PSO, DE, ABC va ACO) qo'llanilganda yanada past qiymatlarga erishildi va eng yaxshi natija $B = 867,0162$ t.sh.yo./soat ni tashkil etdi. Bu holat SI algoritmlarining EETdagi noxiziqli bog'lanishlar va ko'p omilli cheklovlar sharoitida global optimumga yaqin yechimlarni topish qobiliyati yuqori ekanligini ilmiy jihatdan asoslaydi.

3) Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, sun'iy intellekt asosidagi optimallashtirish usullari elektr energetika tizimlarining ish rejimlarini iqtisodiy jihatdan samarali boshqarish, yoqilg'ı sarfini minimallashtirish va aktiv quvvatlarni optimal taqsimlash masalalarini yechishda an'anaviy usullarga nisbatan ustunlikka ega. Tadqiqot natijalari SI algoritmlarini real elektr energetika tizimlari holatini optimallashtirishda qo'llash uchun nazariy va amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOT

1. Ю.Н. Руденко, В.А. Семенов. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. –М.: Изд-во МЭИ, 2000.
2. Гаиров Т.Ш. Методы и алгоритмы оптимизации режимов электроэнергетических систем. // Т.: Ташкентский государственный технический университет, 2014.4.
3. Т. Гаиров, Б. Узаков, А. Шаназаров. Алгоритм оптимизации режима энергосистемы с учетом потерь в сетях и функциональных ограничений. // Материалы конференции AIP 2612, 050011 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0117667>.
4. Тулкин Гаиров. Оптимизация режимов энергосистем с учетом влияния электрических сетей. // Труды конференции AIP 2552, 040016 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0130726>.
5. Т. Гаиров, Б. Пулатов, Ш. Латыпов. Метод выбора оптимального состава рабочих агрегатов электростанций с помощью генетического алгоритма. // Конференция AIP. Труды. 2612, 050012 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0118005>.
6. Фархат, И.А. и Эль-Хавари, Миссури. (2009). Методы оптимизации, применяемые для решения задачи краткосрочной гидротермальной координации. // Исследования электроэнергетических систем. 79. 1308-1320. DOI:10.1016/j.epr.2009.04.001.
7. К. Карпенъев: Оптимальные потоки мощности: использование, методы и разработки. / В: Сборник трудов IFAC. 18(7), стр. 11-21 [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)60410-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)60410-5). (1985).
8. Уткараш Пандей, Аншумаан Патхак, Адеш Кумар, Сураджит Мондал, Применение искусственного интеллекта в эксплуатации, управлении и планировании энергосистем: обзор, // Чистая энергия, том 7, выпуск 6, декабрь 2023 г., страницы 1199–1218, <https://doi.org/10.1093/ce/zkad061> (обзор применения методов искусственного интеллекта в управлении и планировании ЭЭС).
9. Вильяррубия, Г., Де Пас, Хуан, Чамосо, Пабло, Де Ла Приета, Фернандо. (2017). Искусственные нейронные сети, используемые в задачах оптимизации. // Нейрокомпьютинг. 272. 10.1016/j.neucom.2017.04.075.
10. Б. Шоу, С. Гошал, В. Мукерджи и С. П. Гошал. Решение задач 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.
11. Аль-Сумаит Дж. С., Сыкульски Дж. К. и Аль-Осман А. К. 2008. Решение различных типов задач экономичного распределения нагрузки с использованием метода поиска шаблонов. // Электроэнергетические компоненты и системы 36(3). нет. 250-265. doi:10.1080/15325000701603892
12. Юрьевич Дж., Вонг К. П. 1999. Алгоритм оптимального потока мощности на основе эволюционного программирования. // Труды IEEE по энергосистемам 14(4)
13. Гайиров Т., Пулатов Б., Турманова Г. Оптимальное планирование краткосрочных режимов гидротермальных энергосистем с использованием генетического алгоритма. // Труды конференции AIP 3152, 060014 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218971>.
14. Алябышева Т.М., Моржин Ю.И., Протопопова Т.Н., Светков Е.В. О методах оптимизации режимов энергосистемы и энергоинтеграции. // Электростанции. – Москва, 2005. № 1 –С. 44-49.
15. Баринов В.А., Мамиконянс Л.Г., Строев В.А. Разработка математических моделей и методов решения задач управления режимами работы и развития энергосистем // Электричество. – Москва, 2005. – № 7. – С. 8-21.
16. Тулкин Гаиров, Алишер Шаназаров. Алгоритм комплексной оптимизации режимов электрических сетей. // УЗБЕКГИДРОЭНЕРГЕТИКА. – Ташкент, 2021. № 2. –С. 55-57.
17. Насиров Т.Х., Бердияров У.Н. Комплексная оптимизация режимов энергосистемы. //



«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ФОКУС» - <https://doi.org/10.5281/zenodo.8377339>.

18. Гаибов Т.Ш., Шаназаров А.Э. Алгоритм комплексной оптимизации кратковременных режимов электроэнергетических систем //Международный журнал перспективных исследований в области науки, техники и технологий. Том 11, выпуск 3, 2024. - стр. 21524-21530.

19. Гаибов Т.Ш., Шаназаров А.Э. Оптимизация режимов работы энергосистем на основе использования искусственных нейронных сетей. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2024, выпуск 4, -С. 18-28.

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. Tulkin Gayibov. Optimization of power systems modes taking into account the influence of electrical networks. // AIP Conference Proceedings 2552, 040016 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0130726>.

5. T. Gayibov, B. Pulatov, Sh. Latipov. Method for selection of optimal composition of operating units in power plants by genetic algorithm. // AIP Conf. Proceedings. 2612, 050012 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0118005>.

6. Farhat, I.A. & El-Hawary, Mo. (2009). Optimization methods applied for solving the short-term hydrothermal coordination problem. // Electric Power Systems Research. 79. 1308-1320. [DOI:10.1016/j.epsr.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.04.001).

7. C. Carpentier: Optimal Power Flows: Uses, Methods and Developments. / In: IFAC Proceedings Volumes. 18(7), pp. 11-21 [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)60410-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)60410-5). (1985).

8. Utkarsh Pandey, Anshuman Pathak, Adesh Kumar, Surajit Mondal, Applications of artificial intelligence in power system operation, control and planning: a review, // Clean Energy, Volume 7, Issue 6, December 2023, Pages 1199–1218, <https://doi.org/10.1093/ce/zkad061> EES.

9. Villarrubia, G. & De Paz, Juan & Chamoso, Pablo & De La Prieta, Fernando. (2017). Artificial neural networks used in optimization problems. // Neurocomputing. 272. 10.1016/j.neucom.2017.04.075.

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. Gayibov, T., Pulatov, B., Turmanova, G. Optimal Planning of Short-Term Modes of Hydrothermal Power Systems by Genetic Algorithm. // AIP Conference Proceedings 3152, 060014 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218971>.

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. Barinov V.A., Mamikonyans L.G., Stroyev V.A. The development of mathematical models and methods for the solution of problems of the control regime and the development of the energy system // Elektrichestvo. - Moscow, 2005. - #7. - S. 8-21.

16. Tulkin Gayibov, Alisher Shanazarov. Algorithm of complex optimization of regimes of electric networks. // UZBEKHYDROENERGY. - Tashkent, 2021. #2. -S. 55-57.

17. Nasirov T.Kh., Berdiyarov U.N. Kompleksnoy optimization of regimes of electroenergetic system. // "RESEARCH FOCUS" - <https://doi.org/10.5281/zenodo.8377339>

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.

19. Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. "Optimization of operational operating conditions of power systems based on the use of artificial neural networks" // Journal of Energy and Resource Saving Problems, issue 4, 2024, -pp.18-28.