



# Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida kichik quvvatli generatsiya manbalarini joylashtirish va quvvatini optimallashtirish

Abduraxim D. Taslimov<sup>1</sup>, A'zam I. Turayev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; ataslimov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>2</sup> Bo'lim boshlig'i, O'zbekiston Respublikasi Mudofaa vazirligi Davlat texnik nazorati organi hududiy bo'limi, Qarshi, 180101, O'zbekiston; azam21044@gmail.com <https://orcid.org/0009-0008-6861-6991>

**Dolzarbli:** Hozirgi kunda elektr energetika tizimlarida kichik quvvatli generatsiya manbalarini integratsiya qilish masalasi jahon miqyosida dolzarb ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Bu energiya manbalari elektr ta'minotining ishonchligini oshirish, markazlashgan tarmoqlar yuklamasini kamaytirish hamda energiya yo'qotishlarini qisqartirish imkonini beradi. Shuningdek, qayta tiklanuvchi va ekologik toza energiya manbalaridan foydalanish mamlakat energetika siyosatining ustuvor yo'nalishlaridan biri bo'lib, energetika tizimini barqaror va samarali boshqarishda muhim ahamiyat kasb etadi.

**Maqsad:** Tadqiqotning asosiy maqsadi — taqsimlovchi elektr tarmoqlarida kichik quvvatli generatsiya manbalarining optimal joylashuv nuqtalarini va ularning quvvat miqdorini aniqlash orqali elektr energiyasi yo'qotishlarini minimallashtirishdir. Shu orqali taqsimlovchi tizimning ish rejimini barqarorlashtirish, kuchlanish darajalarini normallashtirish hamda umumiy energetik samaradorlikni oshirish maqsad qilingan.

**Usullar:** Tadqiqotda aralash chiziqli bo'lmagan-butun sonli dasturlash modelidan foydalanilgan bo'lib, optimal yechimni topish uchun Kellining kesuvchi tekisliklar modifikatsiyalangan usuli va genetik algoritmlar qo'llanildi. Hisoblash va modellashtirish ishlari GAMS (General Algebraic Modeling System) hamda RASTR dastur muhitlarida amalga oshirildi. 30 tugunli radial-taqsimlovchi elektr tarmog'i asosida eksperimental model qurilib, tarmoqning kuchlanish parametrlari va quvvat yo'qotishlari tahlil qilindi.

**Natijalar:** Tadqiqot natijalariga ko'ra, taqsimlovchi tarmoqda kichik quvvatli generatsiya manbasini 7-tugunda 2,055 MVt quvvatda joylashtirish elektr energiyasi yo'qotishlarini 218 kVt dan 113,7 kVt gacha kamaytirgani aniqlandi. Bu esa taklif etilgan optimallashtirish usulining samaradorligini hamda elektr tarmoqlarining ish rejimini yaxshilashdagi amaliy ahamiyatini tasdiqladi. Shu bilan birga, modellashtirish natijalari to'liq variantli hisoblashlar bilan muvofiq kelgani taklif etilgan yondashuvning ishonchligini ko'rsatadi.

**Kalit so'zlar:** Taqsimlangan generatsiya, taqsimlovchi tarmoq, joylashtirish va quvvatni optimallashtirish, yo'qotishlar.

**For citation:** Taslimov A.D., Turayev A.I. Optimization of the Placement and Capacity of Small-Scale Generation Sources in Distribution Power Networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 113-121.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18516109>

Received: 02.04.2025

Revised: 16.04.2025

Accepted: 08.07.2025

Published: 27.12.2025

**Copyright:** © Abduraxim D. Taslimov, A'zam I. Turayev, 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/>).

## Оптимизация размещения и мощности источников малой генерации в распределительных электрических сетях

Абдурахим Д. Таслимов<sup>1</sup>, Аъзам И. Тураев<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; ataslimov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>2</sup> Начальник отдела, территориального подразделения органа Государственного технического надзора Министерства обороны Республики Узбекистан, Карши, 180101, Узбекистан; azam21044@gmail.com <https://orcid.org/0009-0008-6861-6991>

**Актуальность:** В настоящее время интеграция маломощных источников генерации в системы электроэнергетики является одним из актуальных научных направлений в мировой практике. Использование таких источников позволяет повысить надежность электроснабжения, снизить нагрузку на централизованные сети и уменьшить потери электроэнергии. Кроме того, применение возобновляемых и экологически чистых источников энергии является приоритетным направлением энергетической политики страны и имеет важное значение для обеспечения устойчивого и эффективного функционирования энергосистемы.

**Цель:** Основная цель исследования — минимизация потерь электрической энергии за счёт определения оптимальных точек размещения и мощности маломощных источников генерации в распределительных электрических сетях. Достижение этой цели позволяет стабилизировать режим работы распределительных систем, нормализовать уровни напряжения и повысить общую энергетическую эффективность сети.

**Методы:** В работе использована модель смешанного нелинейного целочисленного программирования. Для нахождения оптимального решения применены модифицированный метод сечений Келли и генетические алгоритмы. Расчёты и моделирование выполнены в программных средах GAMS (General Algebraic Modeling System) и RASTR. На основе радиальной распределительной сети с 30 узлами построена экспериментальная модель, по которой проведён анализ напряжений и потерь мощности.

**Результаты:** По результатам моделирования установлено, что размещение маломощного источника генерации мощностью 2,055 МВт в узле №7 позволяет снизить активные потери мощности с 218 кВт до 113,7 кВт. Это подтверждает эффективность предложенного метода оптимизации и его практическую значимость для улучшения рабочих режимов электрических сетей. Полученные результаты хорошо



согласуются с полными вариантными расчётами, что свидетельствует о достоверности предложенного подхода.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, распределительная сеть, оптимизация размещения и мощности, потери.

# Optimization of the placement and capacity of small-scale generation sources in distribution power networks

Abdurakhim D. Taslimov<sup>1</sup>, A'zam I. Turayev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; ataslimov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>2</sup> Head of Department, Territorial Division of the State Technical Supervision Authority under the Ministry of Defense of the Republic of Uzbekistan, Karshi, 180101, O'zbekistan; azam21044@gmail.com <https://orcid.org/0009-0008-6861-6991>

**Relevance:** At present, the integration of low-power generation sources into electrical power systems is one of the most relevant research areas worldwide. The use of such sources enhances the reliability of power supply, reduces the load on centralized grids, and decreases energy losses. Furthermore, the application of renewable and environmentally friendly energy sources is a priority direction of the national energy policy, playing a crucial role in ensuring the stability and efficiency of power systems.

**Aim:** The main objective of the research is to minimize electrical energy losses by determining the optimal placement points and power capacities of low-power generation sources in distribution networks. Achieving this goal allows for stabilizing the operation mode of distribution systems, normalizing voltage levels, and improving the overall energy efficiency of the grid.

**Methods:** The study employs a mixed nonlinear integer programming model. To obtain the optimal solution, a modified Kelley cutting-plane method and genetic algorithms were applied. Computational modeling was carried out using the GAMS (General Algebraic Modeling System) and RASTR software environments. An experimental model based on a 30-node radial distribution network was developed to analyze voltage parameters and power losses.

**Results:** Modeling results indicate that installing a 2.055 MW distributed generation source at node No. 7 reduces active power losses from 218 kW to 113.7 kW. This confirms the efficiency of the proposed optimization approach and its practical significance for improving the operating conditions of electrical distribution networks. The obtained results show good agreement with full-variant calculations, which validates the reliability of the proposed methodology.

**Keywords:** distributed generation, distribution network, optimization of placement and capacity, power losses.

## 1. Kirish (Introduction)

So'nggi yillarda taqsimlangan generatsiyani (TG) elektr tizimlariga integratsiya qilish masalasi tobora dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Elektr energetika tizimida kichik quvvatli manbalarni qo'llash iste'molchilarning elektr ta'minoti ishonchligini oshirishga, magistral tarmoqlarning yuklamasini kamaytirishga hamda mas'ul taqsimlovchi tarmoqlarning ish rejimiga ijobiy ta'sir ko'rsatishga xizmat qiladi. Xususan, bu yo'l bilan elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish va kuchlanishning nominal qiymatdan og'ishlarini qisqartirish mumkin bo'ladi.

Biroq kichik quvvatli generatsiya texnologiyalarini joriy etish bir qator ilmiy-texnik hamda tashkiliy masalalarni keltirib chiqaradi, bu esa ularni kompleks tarzda hal etishni talab etadi [1]. Ushbu yo'nalishdagi asosiy tadqiqot mavzulariga quyidagilar kiradi:

- turli turdagi taqsimlangan generatsiya manbalarining optimal joylashuvi va quvvatini aniqlash uchun matematik va optimallashtirish modellarini ishlab chiqish;
- taqsimlangan generatsiya qurilmalaridan foydalanish orqali kuchlanish darajasini boshqarish;
- taqsimlangan generatsiya manbalari mavjudligini hisobga olgan holda past kuchlanishli taqsimlash tarmoqlarini qayta konfiguratsiya qilish;
- taqsimlovchi tarmoqlarning iqtisodiy samaradorligi va boshqaruv jihatlarini o'rganish;
- qayta tiklanuvchi va ekologik toza energiya manbalarini rivojlantirish va amaliyotga joriy etish;
- taqsimlangan generatsiya manbalarining asosiy elektr tarmog'i bilan barqaror parallel ishlashini ta'minlash;
- taqsimlovchi tarmoqlarda rele himoyasi va avtomatika tizimlarini tashkil etish;
- aqilli boshqaruv tizimlarini (Smart Grid) tatbiq etish;
- shahar elektr tarmoqlarini loyihalash va boshqarish usullarini takomillashtirish.

Bugungi kunda energiya tizimiga kichik quvvatli generatsiya manbalarini integratsiya qilish g'oyasi bir nechta sabablarga ko'ra nihoyatda muhim ahamiyat kasb etmoqda. O'zbekistonning turli xalqaro dasturlarda ishtirok etishi va "zararli" chiqindilarni kamaytirish bo'yicha global



tendensiyalarda va soha rivojiga oid qarorlar qabul qilishda ekologik omilni hisobga olish zarurligini belgilaydi. Ko'plab biznes sohaslarida aynan ekologiya omillar muayyan texnologiyalarni qo'llash zaruratini yuzaga keltirmoqda.

Energetika kompaniyalarining tartibga solinishini qisqartirish va bozorlarning liberallasuvi ham kichik energetika sohasining rivojlanishiga turtki bermoqda. Kichik generatsiyani tarmoqlarga samarali integratsiya qilishda maksimal natijaga erishish uchun ularning joylashuvi va ishlab chiqariladigan quvvat hajmiga alohida e'tibor qaratish lozim.

Chet el adabiyotlari tahlili shundan dalolat beradiki, bu masalani hal etish uchun turli mezonlar taklif etilgan. Aksariyat hollarda mualliflar taqsimlovchi tizimdagi energiya yo'qotishlarini kamaytirishga urg'u berishadi. Ba'zi tadqiqotlarda esa iqtisodiy, ekologik va huquqiy mezonlar hamda cheklovlar ham ko'rib chiqilgan. Ushbu maqsadda turli matematik modellar va usullar taklif etilgan.

Chet el tadqiqotlarini tahlil qilish shundan dalolat beradiki, ushbu masalani hal etishda keng turdagi mezonlardan foydalaniladi. Eng keng tarqalgan yondashuv — taqsimlovchi tarmoqlardagi quvvat yo'qotishlarini minimallashtirishdir. Shu bilan birga, ba'zi ishlarda iqtisodiy, ekologik va normativ omillar ham ko'rib chiqiladi hamda kichik generatsiya manbalarini joylashtirish muammosini kompleks hal qilishga qaratilgan turli matematik modellar va optimallashtirish usullari taklif etiladi.

Tahlil shundan dalolat beradiki, taqsimlangan generatsiya manbalarini joylashtirish masalasini hal etishda ko'pincha analitik usullardan foydalaniladi [2, 3], ular boshlang'ich masalaning ma'lum matematik ifodalanishi asosida maqsadli funksiyaning birinchi hosilasini hisoblash orqali uning minimal qiymatini topish imkonini beradi. Shuningdek, an'anaviy optimallashtirish usullari, masalan, chiziqli va chiziqli bo'lmagan dasturlash metodlaridan ham foydalaniladi. Biroq amaliyotda quvvat va joylashuvni optimallashtirish masalasini hal etishda yuqorida ta'kidlangan usullarni qo'llash cheklanganligi aniqlangan. Sababi shundaki, energiya tizimida ob'ektni joylashtirish masalasi nafaqat chiziqli bo'lmagan, balki butun sonli masala hisoblanadi. Shu sababli, masalaning murakkabligi analitik va an'anaviy optimallashtirish usullarini qo'llashning to'g'riligini shubha ostiga qo'yadi.

Zamonaviy amaliy matematikaning yetakchi yo'nalishlaridan biri — ilm-fan va texnikadagi optimallashtirish masalalarini samarali hal etish uchun tabiiy evolyusion jarayonlarni modellashtirishdir. Bu sohada "genetik" algoritmlar qo'llaniladi. An'anaviy optimallashtirish algoritmlariga nisbatan GA afzalliklari yuqori hisoblanadi [4]

O'tkazilgan tahlil shundan dalolat beradiki, taqsimlangan generatsiya manbalarini optimal joylashtirish masalasini hal etishda ko'pincha analitik usullardan foydalaniladi [2, 3], ular to'g'ri matematik ifodalanish ta'minlanganda maqsadli funksiyaning birinchi hosilasini hisoblash va uning ekstremumini aniqlash imkonini beradi.

Ba'zi hollarda esa klassik optimallashtirish usullari, jumladan chiziqli va chiziqli bo'lmagan dasturlash metodlari qo'llaniladi. Biroq, quvvat va generatorlarning joylashuv parametrlarini tanlashda ushbu usullarni amaliy qo'llashda sezilarli cheklovlar mavjud. Buning sababi shundaki, ko'rib chiqilayotgan masala nafaqat chiziqli bo'lmagan, balki butun sonli xarakterga ega. Shu sababli an'anaviy analitik yondashuvlarni qo'llash har doim to'g'ri va barqaror yechimni ta'minlamaydi.

## 2. Usullar va materiallar (Methods and materials)

So'nggi yillarda amaliy matematikaning eng samarali yo'nalishlaridan biri — tabiiy evolyusion jarayonlarni modellashtirishga asoslangan usullardan foydalanish bo'ldi. Bunday usullarga tabiiy tanlanish va moslashuv jarayonlarini imitatsiya qiluvchi genetik algoritmlar (GA) kiradi. Klassik optimallashtirish metodlari bilan solishtirganda, genetik algoritmlar bir qator muhim afzalliklarga ega [4], murakkab, ko'p parametrlil va chiziqli bo'lmagan optimallashtirish masalalarini yechishda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi.

Genetik algoritmlar quyidagi bir qator xususiyatlari bilan ajralib turadi, bu ularni an'anaviy optimallashtirish usullaridan farq jihati hisoblanadi:

- GA masalani yechishda parametrlar bilan emas, balki ularning kodlangan ifodalari bilan ishlanadi;
- optimal yechimni izlash bir yechimni ketma-ket yaxshilash orqali emas, balki ko'plab alternativlarni parallel tahlil qilish orqali amalga oshiriladi;
- qarorlarning sifatini baholashda hosilalar yoki o'zgarishlar emas, maqsadli funksiya qiymati qo'llaniladi;
- algoritmnning asosida tanlash va saralashning ehtimollik asosidagi qoidalari yotadi, bu uni deterministik usullardan ajratib turadi.

Aniq afzalliklariga qaramay, genetik algoritmlarni qo'llash bir qator qiyinchiliklar bilan bog'liq [5]:

1. Asosiy kamchiliklardan biri — lokal optimumga erta yaqinlashish, bu esa har doim global eng yaxshi yechimga erishishni kafolatlamaydi.
2. Har bir konkret masala uchun populyatsiya hajmi va avlodlar sonini optimallashtirish talab eti-



ladi, bu odatda eksperimental yo‘l bilan aniqlanadi va katta o‘lchamli masalalarni yechishda qiyinchilik tug‘diradi.

3. Genetik algoritmlar stoxastik izlash usullari hisoblanadi va genetik jarayonni boshqarishning ko‘plab yondashuvlari mavjud bo‘lsa-da, ularning amaliy tatbiqi ko‘pincha murakkab bo‘ladi.

Taqsimlangan generatsiya manbalarining joylashuvi va quvvatini aniqlash masalasida optimal yechim izlash samaradorligini oshirish maqsadida olimlar Kellining kesuvchi tekisliklar modifikatsiyalangan usulidan foydalanishni taklif qilgan, bu usul aralash chiziqli bo‘lmagan-butun sonli masalalarni yechishga mo‘ljallangan. Shu bilan birga, maqsadli funksiya shunday shakllantiriladiki, taqsimlovchi elektr tarmog‘idagi quvvat yo‘qotishlarini minimallashtirish ta‘minlanadi.

$$f = \min(\Delta P_{\Sigma}) = \sum_{k=1}^n 3I_k^2 r_k, \quad (1)$$

bu yerda  $k$  — elektr tarmog‘ining tugun tartib raqami;  $I_k$  —  $k$ -tugun bo‘yicha oqib o‘tuvchi tokning aktiv qiymati, kA;  $r_k$  —  $k$ -tugunning aktiv qarshiligi, Om.

Cheklovlar tizimi tenglamalar shaklida quyidagicha ifodalanadi:

$$P_i = \lambda_i P_{P\Gamma,i} - P_{nagr.i} = U_i \sum_{j=1}^n [U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]], \quad (2)$$

$$Q_i = -Q_{nagr.i} = U_i \sum_{j=1}^n [U_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]],$$

bu yerda  $P_i$  —  $i$ -tugun ulanish nuqtasining ekvivalent aktiv quvvati, MVt;  $P_{yuk.i}$  —  $i$ -tugun ulanish nuqtasidagi yuklama (nagruzka)ning aktiv quvvati, MVt;  $Q_i$  —  $i$ -tugun ulanish nuqtaning ekvivalent reaktiv quvvati, MVAr;  $Q_{yuk.i}$  —  $i$ -tugun ulanish nuqtadagi yuklama reaktiv quvvati, MVAr;  $U_i, U_j$  —  $i$  va  $j$  tugun ulanish nuqtalardagi kuchlanish modullari, kV;  $\delta_i, \delta_j$  —  $i$  va  $j$  tugun ulanish nuqtalardagi kuchlanish burchaklari, rad.;  $G_{ij}, B_{ij}$  —  $ij$ -chi liniyaning aktiv va reaktiv o‘tkazuvchanliklari, Sm;  $P_{TG,i}$  —  $i$ -tugun ulanish nuqtadagi generatsiya manbasining aktiv quvvati, MVt;  $\lambda_i$  — binar o‘zgaruvchi.

Kelgusida binar o‘zgaruvchilar vektori qaror qabul qilish vektori sifatida qaraladi, u orqali tarmoqda kichik generatsiya manbalari joylashtiriladigan aniq ulanish tugunlari tanlanadi:

$$\lambda = [\lambda_1; \lambda_2 \dots \lambda_n], \lambda_i \{0;1\}. \quad (3)$$

Agar tarmoqda bir nechta taqsimlangan generatsiya (TG) manbalari o‘rnatilsa, quyidagi tenglik ko‘rinishidagi cheklov belgilanadi:

$$\sum \lambda_i = N_{TG}, \quad (4)$$

bu yerda  $N_{TG}$  — o‘rnatiladigan generatsiya agregatlarining soni.

Notenglik ko‘rinishidagi cheklovlar esa quyidagicha ifodalanadi:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}, \quad (5)$$

bu yerda  $U_i$  —  $i$ -tugunlardagi kuchlanish moduli, kV;  $U_{i \min}, U_{i \max}$  — kuchlanishning nominal qiymatidan minimal va maksimal ruxsat etilgan og‘ish chegaralari, kV.

$$P_{TG} \leq P_{TG \max}, \quad (6)$$

bu yerda  $P_{TG}$  —  $i$ -tugunga o‘rnatilgan generatsiya agregatining birlamchi (bir dona) o‘rnatilgan quvvati, MVt;  $P_{TG \max}$  — generatsiya manbai uchun ruxsat etilgan eng yuqori quvvat chegarasi, MVt.

Tuzilgan optimallashtirish modeli aralash noaniq butunsonli dasturlash masalalari sinfiga kiradi, chunki ayrim o‘zgaruvchilar (masalan, generatsiya quvvati) uzluksiz kattalik bo‘lsa, boshqalari (ma‘lum tugunga o‘rnatish fakti) diskret xarakterga ega.

Bunday masalalarni hal qilish uchun olimlar Kellining kesuvchi tekisliklar modifikatsiyalangan usulidan foydalanishgan, bu usul uzluksiz hamda butunsonli o‘zgaruvchilar mavjudligida optimumni samarali topishni ta‘minlaydi. Ushbu usul quyidagi turdagi masalalarni hal qilish imkonini beradi [6, 7]:

$$\begin{aligned} \min c^T z \\ g(z) \leq 0, \\ Az \leq a, \\ Bz = b, \\ z \in X \times Y, \end{aligned} \quad (7)$$

bu yerda  $c$  — konstantalar vektori;  $z = (x, y)$  —  $x$  uzluksiz o‘zgaruvchilar vektori haqiqiy sonlar jamiyati  $R^n$  da va  $y$  butunsonli o‘zgaruvchilar vektori butun sonlar jamiyati  $Z^m$  da joylashgan; shuning-

dek,  $g(z) : R^n \times Z^m \rightarrow R^p$  – bu uzluksiz, hosila olinishi mumkin bo‘lgan kvazievqir (yarim qavariq) funksiyalar vektori,  $X \times Y$  bu funksiyalar jamiyatida aniqlangan bo‘lib, ruxsat etilmagan yechimlar sohasida gradientlari nolga teng emas.

Kellining modifikatsiya qilingan kesuvchi yopiqliklar usuli klassik Kelli usuli prinsiplariga asoslangan [8]. U neliney va aralash (smeshannyy) dasturlash vazifalarini hal qilishda qo‘llaniladi. Usulning mohiyati — ruxsat etilgan yechimlar sohasini qadamma-qadam aniqlash va cheklovchi (kesuvchi) yopiqliklarni qo‘shish orqali uni optimallashtirishdan iborat.

Usulning ish jarayoni quyidagicha tavsiflanishi mumkin:

1. Ruxsat etilgan qiymatlar tarmoq hududining boshlang‘ich chegaralarini belgilash:

$$Z^0 = \{x | a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, n}\}, \quad (8)$$

shu tarzda  $X \in Z^0$  va masalani yechish aniqligi  $\varepsilon > 0$  ni belgilash.

2. Chiziqli dasturlash (ChD) masalasini yechish:

$$\max \{F(x) = c^T x | x \in Z^0\}. \quad (9)$$

Faraz qilaylikki,  $x^{1*}$  – masala uchun optimal yechim (rasm 1 ga qarang).

3. Shunday  $p$  ni topish kerakki:

$$-g_p(x^{1*}) = \max[-g_j(x^{1*}), 0], j = \overline{1, m} \quad (10)$$

ya’ni eng katta buzilishga ega bo‘lgan noaniq cheklovni tanlash.

Agar  $g_p(x^{k*}) > -\varepsilon$  bo‘lsa, hisoblashlarni to‘xtatish; aks holda, keyingi qadamga o‘tish.

4. Qo‘shimcha cheklovni belgilaydigan kesuvchi tekislikni qurish, quyidagi ifodadan foydalanish:

$$\widetilde{g}_p(x, x^{k*}) = g_p(x^{k*}) + \nabla g_p(x^{k*})^T [x - x^{k*}]. \quad (11)$$

Yangi majburiy yechimlar sohasi  $Z_k$  ni aniqlash.

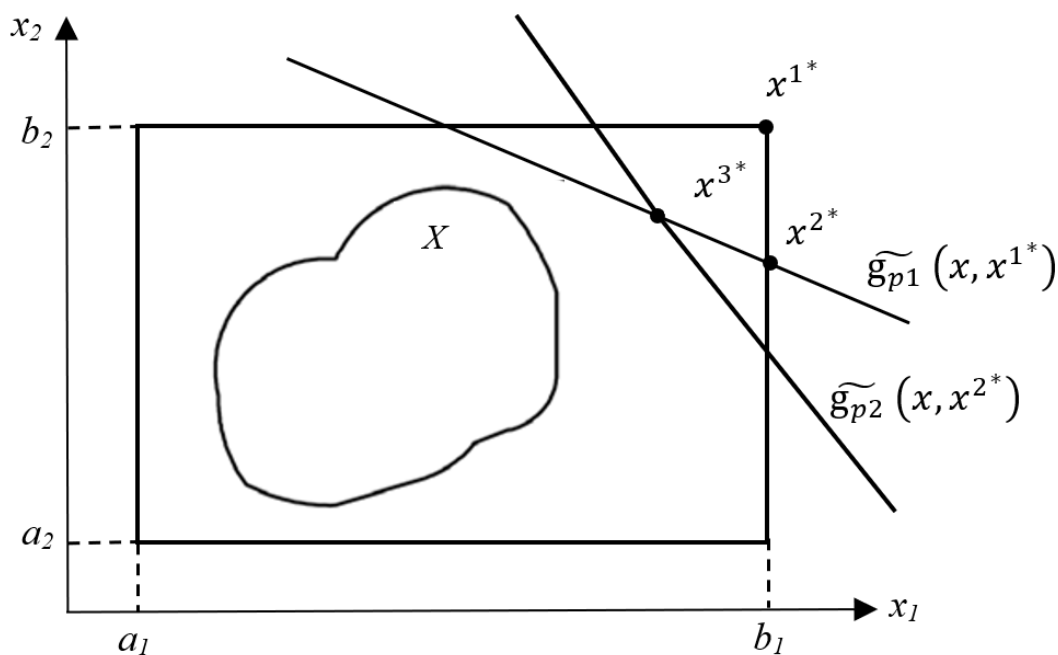
5. Liney dasturlash (LP) masalasini yechish.

$$\max \{F(x) = c^T x | x \in Z^k\} \quad (12)$$

6.  $k = k + 1$  deb belgilash va 3-punktga o‘tish.

Kelli usulining asosiy afzalliklaridan biri shundaki, u boshqa linearizatsiya usullari kabi, boshlang‘ich masalaning liney tuzilishi saqlanishiga imkon beradi. Bu hisoblash jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi hamda usulni amaliyotda qo‘llashni qulay qiladi.

Bundan tashqari, har bir iteratsion qadamda yordamchi liney dasturlash vazifasi hal qilinadi, bu uchun keng tarqalgan va samarali algoritmlar mavjud. Bu esa murakkab aralashgan chiziqli bo‘lmagan-butunsonli dasturlash masalalarida ham usulning yuqori hisoblash barqarorligini ta’minlaydi.



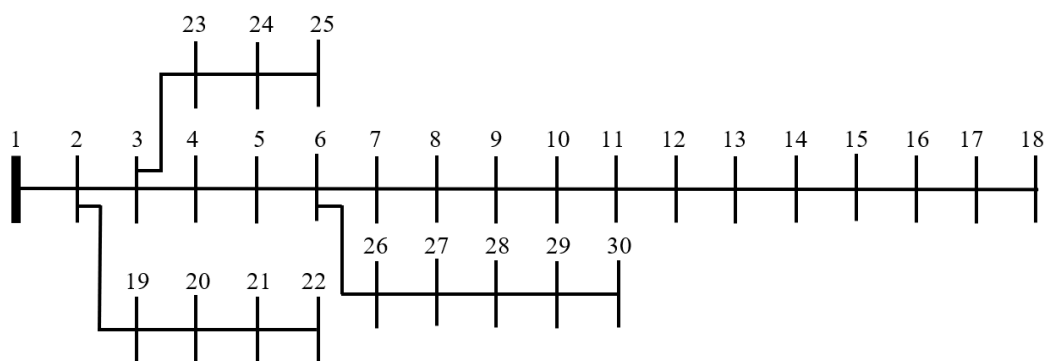
1-rasm. Kellining kesuvchi yopiqliklar usulining ishlash prinsipini sxemali ko‘rsatilishi.

Fig.1. Schematic illustration of the working principle of Kelly's method of intersecting closures.

Amaliyotda taklif etilgan optimallashtirish yondashuvini tatbiq etish uchun GAMS (General Algebraic Modeling System) [9] matematik modellashtirish muhiti qo'llanildi. Bu muhit turli xil optimallashtirish masalalarini, jumladan aralash noliney va butun sonli modellarni tasvirlash va yechish uchun qulay vositalarni taqdim etadi.

Ushbu usulning samaradorligini baholash maqsadida 30 ta tugundan iborat sinov radial-taqsimlash elektr tarmog'i asosida hisoblash tajribasi o'tkazildi, uning tuzilishi tegishli manbada bayon etilgan [10].

Tadqiqot ob'ekti bo'lgan tizimning bir chiziqli sxemasi 2-rasmda keltirilgan bo'lib, unda asosiy tarmoq shoxlari, yuklama tugunlari va taqsimlangan generatsiya manbalarini joylashtirish uchun ehtimoliy nuqtalar ko'rsatilgan.



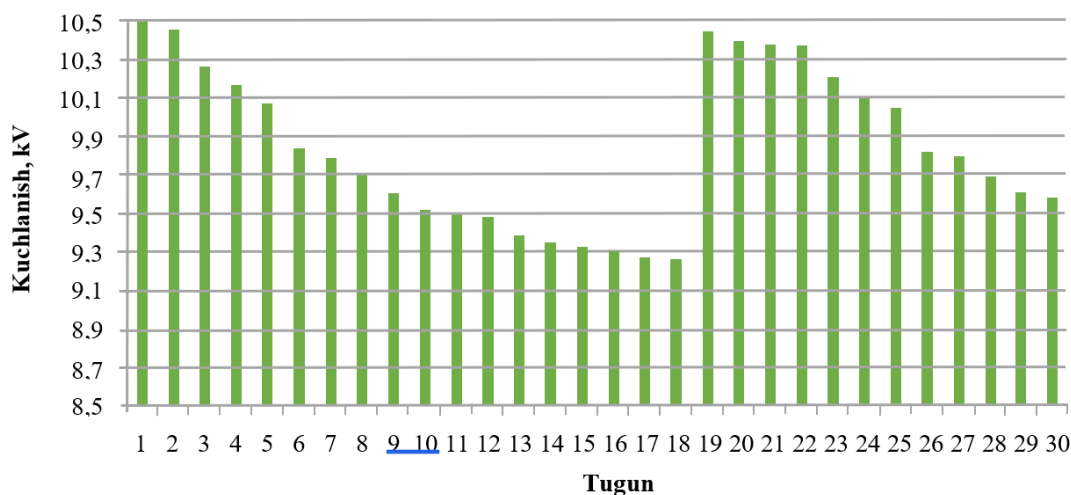
**2-rasm.** Taqsimlovchi radial-taqsimlash elektr tarmog'i tizimning sxemasi.

**Fig.2.** Diagram of a radial-distribution power grid system.

Tadqiq etilayotgan tizimning umumiy yuklamasi  $S_{yuk}=3,295+j2,09$  MVA ni tashkil etadi, balanslovchi (tayanch) tugunning kuchlanishi esa  $U_b=10,5$  kV ga teng.

Tahlilning birinchi bosqichida taqsimlangan generatsiya manbalari ulanmagan holda elektr tarmog'ining barqaror ishlash rejimi ko'rib chiqildi. Bu holda taqsimlash tizimidagi aktiv quvvat yo'qotishlari  $\Delta P=218$  kVt ni tashkil etdi.

Tarmoqning ishlash rejimini baholash maqsadida har bir tugun bo'yicha kuchlanishlarning nominal qiymatlardan og'ishini aks ettiruvchi gistogramma tuzildi. Ushbu natijalar 3-rasmda keltirilgan.



**3-rasm.** Tugunlar bo'yicha tizimdagi kuchlanishlarning tarqalishi gistogrammasi.

**Fig.3.** Histogram of the distribution of voltages in the system by nodes.

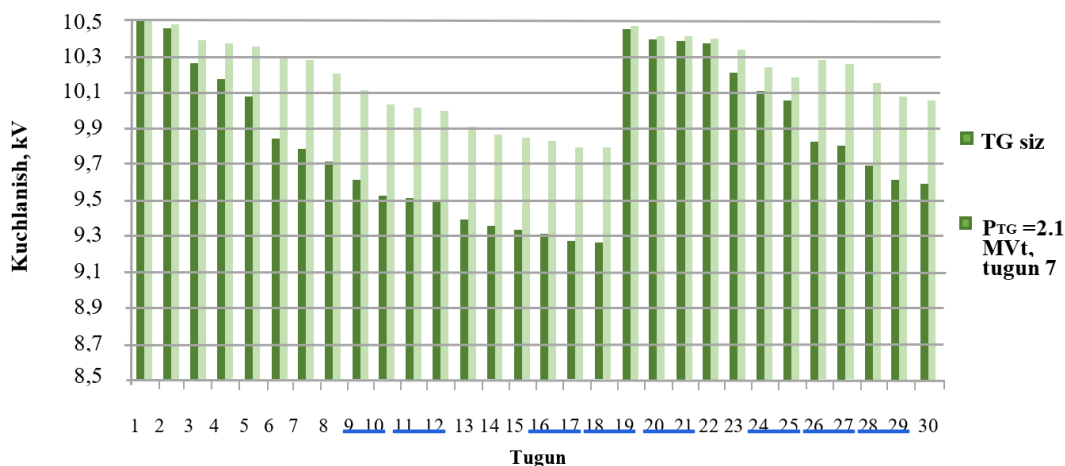
Rasmda ko'rsatilgan ma'lumotlarni tahlil qilish shundan dalolat beradiki, tarmoqning ayrim tugunlarida kuchlanish darajasi ruxsat etilgan qiymatdan oshib ketadi, bu esa tizimning ish rejimini to'g'rilash zarurligini ko'rsatadi.

Keyingi tadqiqotlarda tugunlardagi kuchlanish darajalariga oid cheklovlarni hisobga olgan holda

quvvat yo'qotishlarini tavsiflovchi maqsadli funktsiyaning global minimumini izlash bajarilgan.

Taklif etilgan algoritmnining to'g'ri ishlashini tekshirish maqsadida dastlab RASTR programmalar kompleksida hisob-kitob olib borilgan, bu kompleks elektr tarmoqlarining barqaror rejimlarini tahlil qilishda qo'llaniladi [11].

Modellashtirish natijalari ko'rsatdiki, 30 ta tugunli tarmoq tadqiq etilgan tizimda minimal aktiv quvvat yo'qotishlari taqsimlangan generatsiya manbasini 7-uzelda, o'rnatilgan quvvati 2,1 MVt bo'lganda kuzatiladi. Bu holatda aktiv quvvat yo'qotishlari  $\Delta P = 113,76$  kVt ni tashkil qiladi. Tarmoqdagi tugunlardagi kuchlanishlar taqsimotining gistogrammasi, 2,1 MVt quvvatli kichik generatsiya manbasi ulangan holda, 4-rasmda keltirilgan.



**4-rasm.** Bitta generatsiya manbasi o'rnatilganda tizimdagi uzellar bo'yicha kuchlanishlar taqsimotining gistogrammasi.

**Fig.4.** Bitta generatsiya manbasi o'rnatilganda tizimdagi uzellar bo'yicha kuchlanishlar taqsimotining gistogrammasi.

Keyingi bosqichda taklif etilgan optimallashtirish algoritmgiga muvofiq GAMS muhitida hisob-kitob olib borildi. Modellashtirish natijasida taqsimlangan generatsiya manbasining optimal quvvati va uning tarmoqdagi joylashuvi aniqlandi.

GAMSDa olib borilgan hisob-kitob natijalariga ko'ra, minimal aktiv quvvat yo'qotishlari generatsiya manbasi 2,055 MVt quvvatga ega bo'lib, 7-tugunda joylashtirilganda erishiladi, bu vaqtda  $\Delta P=113,7$  kVt ni tashkil qiladi.

Olingan ma'lumotlar to'liq tahlil usuli bilan olingan natijalar bilan muvofiq keladi va taklif etilgan algoritmnining to'g'ri ishlashiga tasdiq bo'lib xizmat qiladi. Kichik farq generatsiya manbasi quvvati diskretizatsiyasi sababli yuzaga kelgan xato bilan izohlanadi.

Keyingi hisob-kitoblarda tarmoqdagi tugunlardan kelib chiqadigan kuchlanishning nominaldan og'ishlari, o'rnatilgan quvvat va ulanadigan generatsiya manbalarining soni bo'yicha cheklovlar hisobga olindi.

### 3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)

Yakka va bir necha taqsimlangan generatsiya manbalari bo'lgan variantlar uchun olingan yakun natijalar 1-jadvalda taqdim etilgan.

Jadvaldagi ma'lumotlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, taqsimlangan generatsiyani joriy etish taqsimlash tarmog'ida quvvat yo'qotishlarni sezilarli darajada kamaytiradi. Biroq real sharoitlarda asoslangan qarorlarni qabul qilish uchun yo'qotishlarni minimallashtirish mezonini generatsiya bloklarini o'rnatish va ekspluatatsiya qilish xarajatlarini inobatga olgan iqtisodiy samaradorlik ko'rsatkichlari bilan birgalikda ko'rib chiqilishi zarur.

Hisob-kitob natijalari shuni ko'rsatadiki, manbaning quvvatini 1,0 MVt dan 1,5 MVt gacha oshirish yo'qotishlarni sezilarli darajada kamaytirmaydi, bu esa texnik va iqtisodiy omillarni inobatga olgan holda quvvatning optimal tanlanishi zarurligini ko'rsatadi.

Shunday qilib, kichik quvvatli generatsiyani joriy qilish samaradorligini nafaqat energetik, balki iqtisodiy parametrlar bo'yicha baholash imkonini beruvchi kompleks me'yorlar tizimini ishlab chiqish zarur. Taqsimlangan generatsiya manbalarini joylashtirishni rejalashtirishda tizimli yondashuvni qo'llash ularni tarmoqqa integratsiya qilishdan maksimal samarani olish imkonini beradi.

**1-jadval.** GAMSda avtomatik hisoblangan natijalar**Table 1.** Automatically calculated results in GAMS

TG ning optimal joylashuvi	TG ning optimal quvvati, MVt	TG bilan tizimdagi $\Delta P$ , kVt/o'.ye.	TG siz tizimdagi $\Delta P$ , kVt/o'.ye.	Maksimal quvvat bo'yicha chek, MVt
Generatsiya manbalari soni – 1				
uzel 7	2,055	113,7/0,522	218/1	-
uzel 15	0,5	149,02/0,684	218/1	0,5
uzel 12	1,0	125,06/0,574	218/1	1,0
uzel 9	1,5	118,39/0,543	218/1	1,5
uzel 7	2,0	113,78/0,522	218/1	2,0
Generatsiya manbalari soni-2				
uzel 14	0,62	113,9/0,522	218/1	1,0
uzel 30	0,38			
uzel 11	0,75	104/0,477	218/1	1,5
uzel 26	0,75			
Generatsiya manbalari soni – 3				
uzel 14	0,71	82/0,376	218/1	2,0
uzel 25	0,66			
uzel 29	0,63			

O'tkazilgan tadqiqotlar ko'rsatdiki, kichik generatsiya manbalarini o'rnatish taqsimlovchi tizimlarning rejim parametrlariga ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Shuningdek, to'liq variantlar usuli orqali, hamda GAMS va RASTR muhitlarida olingan modellashtirish natijalari o'zaro muvofiq keldi, bu esa taklif qilingan optimizatsiya usulining ishonchligi va qo'llanish imkoniyatini tasdiqlaydi, xususan generatsiyaning optimal joylashuvi va quvvati masalalarini hal etishda o'z ahamiyatini ko'rsatdi.

**4. Xulosa (Conclusion)**

1. Kichik quvvatli generatsiya manbalarining joylashuvi va quvvatini optimallashtirish taqsimlovchi tarmoqlarni rejalashtirishda asosiy vazifalardan biri bo'lib, loyiha bosqichida diqqatli tahlilni talab qiladi.

2. Generator o'rnatiladigan tugun va uning quvvati to'g'ri tanlanganida, tarmoqning o'rnatilgan rejimlari sifatini oshirish, elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish va taqsimlovchi tizimdagi kuchlanish ko'rsatkichlarini yaxshilash mumkin.

**ADABIYOTLAR**

1. Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Кокин С.Е., Паздерин А.В. Научные проблемы распределенной генерации // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 11-12. С. 126-133.
2. Kashem M.A., Le A. D. T., Negnevitsky M., and Ledwich G. Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems // IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 8, 2006.
3. Griffin T., Tomsovic K., Secrest D., and Law A. Placement of dispersed generation systems for reduced losses // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 9, 2000.
4. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования // М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 432 с.
5. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского // М.: Горячая линия. Телеком, 2006. 452 с.
6. Taslimov A., Rakhimov F., Rakhimov F. Economic interval analysis of loads for selection of cross-section surfaces of electrical transmission lines // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 384. – С. 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401037>
7. Westerlund T. and Pörn R. Solving Pseudo-Convex Mixed Integer Optimization Problems by Cutting Plane Techniques // Optimization and Engineering, 2002, 3, pp. 253-280.
8. Raximov, F., Taslimov, A., Majidov, A., Norqulov, A. Optimization of losses by switching to higher voltage in distribution networks // E3S Web of Conferences 525, 03009 (2024). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452503009>
9. Brooke A, Kendrick D, Meeraus A, Raman R. GAMS: A User's Guide // South San Francisco, 2003.



10. Baran M.E. and Wu F.F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, 1989.
11. Taslimov A. D., Rakhmonov I. U. 2019 Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // Journal of Physics: Conference Series 1399 doi:10.1088/1742-6596/1399/5/055046.

## REFERENCES

1. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Scientific problems of distributed generation. // Izvestiya VUZov. Problems of Energy, 2011, No. 11–12, pp. 126–133.
2. Kashem M.A., Le A.D.T., Negnevitsky M., and Ledwich G. Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems // IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 8, 2006.
3. Griffin T., Tomsovic K., Secret D., and Law A. Placement of dispersed generation systems for reduced losses // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 9, 2000.
4. Emelyanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Theory and practice of evolutionary modeling // Moscow: FIZMATLIT, 2003, 432 p.
5. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems // Translated from Polish by I.D. Rudinsky. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2006, 452 P.
6. Taslimov A., Rakhimov F., Rakhimov F. Economic interval analysis of loads for selection of cross-section surfaces of electrical transmission lines // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 384. – C. 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401037>
7. Westerlund T., Pörn R. Solving Pseudo-Convex Mixed Integer Optimization Problems by Cutting Plane Techniques // Optimization and Engineering, 2002, Vol. 3, pp. 253–280.
8. Raximov, F., Taslimov, A., Majidov, A., Norqulov, A. Optimization of losses by switching to higher voltage in distribution networks // E3S Web of Conferences 525, 03009 (2024). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452503009>
9. Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R. *GAMS: A User's Guide* // South San Francisco, 2003.
10. Baran M.E., Wu F.F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407, 1989.
11. Taslimov A D, Rakhmonov I U 2019 Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // Journal of Physics: Conference Series 1399 doi:10.1088/1742-6596/1399/5/055046.