



# Taqsimlovchi tarmoqlar samaradorligini oshirish uchun metaevristik usullar

Muzaffar B. Xudayarov

DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Toshkent, O'zbekiston; [muzaffar\\_hb@mail.ru](mailto:muzaffar_hb@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

**Dolzarbli:** Taqsimlovchi elektr tarmoqlari (TET) asosan radial (ochiq) konfiguratsiyaga ega bo'lib, odatda markazlashtirilgan tarzda elektr energiyasini ishlab chiqarib, uni ta'minot markazlaridan iste'molchilarga yetkazib berishga asoslangan. Shu bilan birga, ular bir qator muammolarga duch kelmoqdalar, shu jumladan elektr yo'qotishlarining ko'payishi, elektr energiyasining sifatining yomonlashishi, xususan, kuchlanishning nominal qiymatlardan ogishi, quvvat koeffitsientining pasayishi, uskunaning haddan tashqari yuklanishi. Shu nuqtai nazardan, fotoelektrik stantsiyalar (FES) kabi taqsimlangan generatsiya (TG) va kondensator batareyalari (KB) kabi kompensatsiya uskunarining (KU) integratsiyasi, TETda samaradorlikni oshirish va elektr sifatini yaxshilashning eng istiqbolli yo'nalishlaridan biridir. TG elementi sifatida FES asosan iste'molchiga yaqin joyda o'rnatiladi va aktiv quvvat manbai bo'lib tarmoqning bosh shahobchasidagi yuklamani kamaytiradi, KB esa reaktiv quvvatni qoplashning an'anaviy vositasi bo'lib, tokning reaktiv tashkil etuvchisini kamaytiradi va kuchlanish profilini yaxshilaydi. Agar ular elektr tarmog'iga to'g'ri ulangan bo'lsa, EE yo'qotishlarining pasayishiga, kuchlanish profilining yaxshilanishiga va boshqa ijobiy xolatlariga olib keladi, ammo agar ular noto'g'ri ulangan bo'lsa, ular teskari ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, TG va KB elementlarini o'rnatilish joyini va quvvatini tanlash masalasi juda muhim va dolzarb vazifa bo'lib, birinchi navbatda TETning energiya samaradorligini oshirishga ta'sir qiladi.

**Maqsad.** Radial taqsimlovchi elektr tarmoqlarida ulardagi yo'qotishlarni kamaytirish uchun TG va KU ni optimal joylashtirish uchun metaevristik usullarni tahlil etish va tanlash.

**Usullar.** TG va Kuning o'rnatish joylari va quvvatini tanlash uchun 35 xil metaevristik usullar ko'rib chiqilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, maqbul echimni olish ehtimoli juda yuqori bo'lgan usullar aniqlangan. Taklif etilayotgan metodologiya quyidagi bosqichlarni o'z ichiga oladi: usullarni tanlash; tanlangan usullar asosida o'rnatish joylari va elementlarning quvvatini tanlash; qo'shimcha sozlash orqali ko'rsatkichlarni yaxshilash. O'rnatishning uchta varianti ko'rib chiqilgan: IEEE 33 va 69 tugunli test taqsimlash tarmoqlarida ikkita, uchta va to'rtta FES va KB o'rnatilgan. TET ning barqaror holatini hisoblash teskari va to'g'ri yurishdan iborat ikki bosqichli usulda amalga oshirilgan. Maqsad funktsiyasi aktiv quvvat yo'qotishlarini minimallashtirish, kuchlanish profilini yaxshilash, shuningdek kuchlanish sezgirliги va quvvat yo'qotish omillarini yaxshilashga qaratilgan.

**Natijalar.** Olingan natijalarni tahlil qilish maqbul echimni topish uchun taklif etilayotgan metodologiyaning samaradorligini, shuningdek yo'qotishlarni kamaytirish, elektr energiyasi sifatini yaxshilash, tarmoqlarni modernizatsiya qilishni kechiktirish va iqtisodiy rentabellikni oshirish uchun TG va KU sinergiyasining katta salohiyatini ko'rsatadi.

**Kalit so'zlar:** taqsimlovchi elektr tarmoqlari, taqsimlangan generatsiya, kompensatsiya qurilmalari, fotoelektrik stantsiya, reaktiv quvvat kompensatsiyasi, elektr energiyasini yo'qotish, kuchlanish profili.

## Метаэвристические методы для повышения эффективности распределительных сетей

Музаффар Б. Худаяров

DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [muzaffar\\_hb@mail.ru](mailto:muzaffar_hb@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

**Актуальность.** Распределительные сети (РС) в основном имеют радиальную (разомкнутую) конфигурацию, традиционно, опирались на централизованное производство и отпуск электроэнергии от центров питания к потребителям. При этом они сталкиваются с рядом вызовов, включая рост потерь электроэнергии, ухудшение качества электроэнергии, в частности отклонения напряжения от номинальных значений, низкому коэффициенту мощности, перегрузке оборудования. В этом контексте интеграция элементов распределённой генерации (РГ), таких как фотоэлектрические станции (ФЭС), а также компенсирующих устройств (КУ), например, конденсаторных батарей (КБ), представляет собой одно из наиболее перспективных направлений повышения эффективности и улучшения качества электроэнергии в РС. ФЭС как элемент РГ генерируют, в основном, активную мощность в непосредственной близости к потребителю, снижая нагрузку на головные участки сети, а КБ в свою очередь, являются классическим средством компенсации реактивной мощности, снижая реактивную составляющую тока и улучшая профиль напряжения. При правильном их подключении к электросети они приводят, напри-

**For citation:** M.B. Khudayarov. Metaheuristic methods for improving the efficiency of distribution networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 3, pp. 195-205.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17010869>

Received: 14.02.2025

Revised: 18.05.2025

Accepted: 22.07.2025

Published: 23.08.2025

**Copyright:** © Muzaffar B. Khudayarov, 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/>).



мер, к снижению потерь ЭЭ, улучшению профиля напряжения и др. Но при неправильном их подключении они дают обратный эффект. Поэтому задача выбора места установки и мощности РГ и КБ является весьма важной и актуальной задачей, влияющей в первую очередь на повышение энергоэффективности РС.

**Цель.** Анализ и выбор метаэвристических методов для оптимального размещения элементов РГ и КУ в радиальных распределительных сетях с целью снижения потерь в них.

**Методы.** Для выбора мест установки и мощности РГ и КУ рассматриваются 35 различных метаэвристических методов. По результатам анализа определяются методы, при использовании которых вероятность получения оптимального решения весьма высока. Предлагаемая методика включает следующие 2 этапа: выбор методов; выбор мест установки и мощности элементов на основе выбранных методов; улучшение показателей дополнительной настройкой. Рассматриваются три варианта установки: с двумя, тремя и четырьмя ФЭС и аналогичным количеством КБ для 33 и 69 узловой тестовой распределительной сети IEEE. Расчёт установившегося режима РС выполняется по двухэтапному методу с обратным и прямым ходом. Целевая функция направлена на минимизацию потерь активной мощности, улучшению профиля напряжения, а также факторов чувствительности напряжения и потерь мощности.

**Результаты.** Анализ полученных результатов показывают эффективность предлагаемой методики по поиску оптимального решения, а также значительный потенциал синергии РГ и КУ для снижения потерь, улучшения качества электроэнергии, отсрочки модернизации сетей и повышения экономической рентабельности.

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, распределённая генерация, компенсирующие устройства, фотоэлектрическая станция, компенсация реактивной мощности, потери электрической энергии, профиль напряжения.

## Metaheuristic methods for improving the efficiency of distribution networks

Muzaffar B. Khudayarov

DSc, Prof., Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, Uzbekistan; [muzaffar\\_hb@mail.ru](mailto:muzaffar_hb@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

**Relevance.** Distribution networks (RS), mainly having a radial (open) configuration, traditionally relied on centralized production and supply of electricity from power centers to consumers. At the same time, they face a number of challenges, including increased electricity losses, deterioration in electricity quality, in particular voltage deviations from nominal values, low power factor, and equipment overload. In this context, the integration of distributed generation (RG) elements, such as photovoltaic power plants (FES), as well as compensating devices (CU), such as capacitor banks (CB), is one of the most promising areas for increasing efficiency and improving the quality of electricity in the RS. FES, as an element of the RG, mainly generate active power in close proximity to the consumer, reducing the load on the head sections of the network, and CB, in turn, are a classic means of compensating for reactive power, reducing the reactive component of the current and improving the voltage profile. When properly connected to the power grid, they lead, for example, to a reduction in EE losses, an improvement in the voltage profile, etc. But if they are connected incorrectly, they have the opposite effect. Therefore, the task of choosing the installation location and capacity of the RG and KB is a very important and urgent task, affecting primarily the improvement of the energy efficiency of the RS.

**Goal.** Analysis and selection of metaheuristic methods for optimal placement of RG and CU elements in radial distribution networks in order to reduce losses in them.

**Methods.** 35 different metaheuristic methods are considered to select the installation locations and the capacity of the RG and CU. Based on the results of the analysis, methods are determined, using which the probability of obtaining an optimal solution is very high. The proposed methodology includes the following steps: selection of methods; selection of installation locations and capacity of elements based on the selected methods; improvement of indicators by additional configuration. Three installation options are being considered: with two, three and four FES and a similar number of KB for the IEEE 33 and 69 node test distribution network. The steady-state PC mode is calculated using a two-stage method with reverse and forward running. The objective function is aimed at minimizing active power losses, improving the voltage profile, as well as voltage sensitivity and power loss factors.

**Results.** An analysis of the results obtained shows the effectiveness of the proposed methodology for finding the optimal solution, as well as the significant potential for synergy between RG and KU to reduce losses, improve electricity quality, delay grid modernization and increase economic profitability.

**Keywords:** distribution networks, distributed generation, compensating devices, photovoltaic plant, reactive power compensation, electric energy loss, voltage profile.



## 1. Введение (Introduction)

Распределительные сети (РС) в основном имеют радиальную (разомкнутую) конфигурацию, традиционно, опирались на централизованный отпуск электроэнергии от центров питания к потребителям. При этом они сталкиваются с рядом вызовов, включая рост потерь электроэнергии, ухудшение качества электроэнергии, в частности отклонения напряжения от номинальных значений, низкому коэффициенту мощности, перегрузке оборудования. В этом контексте интеграция элементов распределённой генерации (РГ), таких как фотоэлектрические станции (ФЭС), а также компенсирующих устройств (КУ), например, конденсаторных батарей (КБ), представляет собой одно из наиболее перспективных направлений повышения эффективности и улучшения качества электроэнергии в РС.

ФЭС как элемент РГ позволяют генерировать активную мощность в непосредственной близости к потребителю, снижая нагрузку на головные участки сети, а КБ в свою очередь, являются классическим средством компенсации реактивной мощности, снижая реактивную составляющую тока и улучшая профиль напряжения. Несмотря на то, что эффекты от применения этих элементов по отдельности хорошо изучены, их совместное воздействие на параметры РС требует системного анализа и обобщения.

Далее представим литературный обзор по совместному применению этих элементов в РС.

Правильный выбор количества РГ и КУ, а также их расположения и мощности являются очень важными вопросами при проектировании и эксплуатации РС. Чем больше установлено данных элементов, тем меньше потери ЭЭ, лучше профиль напряжения и меньше нагрузка элементов сети, но тем выше инвестиционные и эксплуатационные затраты.

В последние десятилетия для решения данной задачи применялось множество различных методов, в том числе детерминированные методы, метаэвристические методы и их модификации, а также гибридные методы, которые учитывают преимущества разных методов.

В ранних работах в основном применялись детерминированные методы, где результаты, не меняются при разных запусках алгоритма решения. Основным недостатком детерминированных методов является то, что они применимы только для небольших РС. Для преодоления этого недостатка детерминированных методов, были разработаны альтернативные приближенные методы, в частности, метаэвристические и гибридные методы. В отличие от детерминированных метаэвристические и гибридные методы могут применяться в ситуациях, когда практически полностью отсутствует информация о характере и свойствах исследуемой функции. Они также позволяют найти решение высокого качества за приемлемое время.

Наиболее популярными метаэвристическими методами к решению этой задачи являются методы роя частиц (PSO) и их модификации. В частности, в [1] использован метод роя частиц с улучшенным весом (WIPSO), а также самоадаптивный дифференциальный эволюционный алгоритм (SADE). В работе оптимальное расположение РГ и КБ определяется методом ранжирования индекса размещения распределённой генерации (DGSI). Анализ методики выполнен на тестовых схемах IEEE 33 и IEEE 69.

В [2] с целью определения оптимального расположения и размера РГ и КБ предложена нечеткая многоцелевая оптимизация роя частиц (MOPSO) с решениями по Парето. Предложенный метод реализован на тестовой схеме IEEE 33 и реальной 94 узловой РС. Результаты сравниваются с методами SPEA, NSGA, MODE, ICA/GA.

В [3] для определения местоположения и мощности источников распределённой генерации и конденсаторных батарей также использован алгоритм MOPSO. Целевая функция учитывает несколько целей: первая — снижение потерь, вторая — улучшение профиля напряжения и третья — сокращение расходов. Исследования проводились на тестовой схеме IEEE 33 в трёх сценариях. В первом сценарии целью является снижение потерь и улучшения профиля напряжения. Во втором сценарии - снижение потерь и затрат, при этом учитывались ограничения в профиле напряжения. В третьем сценарии учитывались все три цели.

В [4] с помощью алгоритма стохастического фрактального поиска (SFSSOA), реализованы три варианта установки: с одним, двумя, тремя КБ и одной РГ (PV система) с активной мощностью 20% от общей мощности нагрузки, а также с меньшей активной мощностью чем общая мощность нагрузок. Для расчётов использованы 33- и 69- узловые схемы.

В [5] оптимизация роя частиц (PSO) и метод Ньютона-Рафсона интегрированы для определения оптимального расположения и размера РГ и КБ. Предложенный метод протестирован на 14 узловой РС острова Вавау в Тонге. Были протестированы три варианта оптимального размещения и размеров, а именно: только РГ, только КБ и РГ & КБ.

В [6] представлено применение алгоритма империалистической конкуренции (ICA). Рассматриваются три сценария: интеграция РГ, интеграция КБ, интеграция РГ и КБ. В каждом сценарии учитываются три различных режима нагрузки: номинальная (100 %), пониженная (50 % от номинальной) и повышенная (150 % от номинальной). Моделирование тестовой системы



IEEE 69 выполняется на ETAP.

**Таблица 1.** Обзор основных исследований, посвященных совместному использованию РГ и КБ

**Table 1.** Overview of the main studies on the joint use of DG and CB

Статья (Год)	Метод	ЦФ	Схемы	РГ Узел/кВт	КБ Узел/кВар	APL (кВт) Без/С эл.	Vmin (кВ) Без/С эл.
1(2016)	SADE	APL	IEEE 33 IEEE 69	30(1589) 61(1841)	29(1286) 62(1232)	213,4/68,2 223,3/23,3	- -
1(2016)	WIPSO	APL	IEEE 33 IEEE 69	30(1583) 61(1819)	29(1286) 62(1288)	213,4/68,4 223,3/23,4	- -
2(2015)	MOPSO	APL, VSI, SCI	IEEE 33  PC 94	9(911), 23(669), 30(1423) 21(557), 56(1823), 74(1693)	10(1050), 21(1200)  33(300) 42(600)	232,3/80,8  362,6/39,8	-  -
3(2021)	MOPSO	APL, VDI, CF	IEEE 33	28 (1370), 13 (1100)	25 (730) 30 (1340)	211/41,3	0,900/ 0,991
4(2020)	SFSOA	APL, VDI, ID	IEEE 33  IEEE 69	6 (2517)  63 (1767)	14 (335), 24 (539), 30 (1050) 11 (412), 21 (230), 61 (1232)	211/47,2  225/17,1	-  -
5(2018)	PSO	APL, VDI	PC 14	4 (495)	4 (242)	70.8/29.8	0,887/ 0,967
6(2023)	ICA	APL, VDI	IEEE 69	61 (1500) 16 (350)	61 (1040) 16 (300)	224,6/ 12,6	0,909/ 0,989
7(2021)	POA, LSF	APL, VDI	IEEE 33	14 (750), 24 (1084), 30 (1012)	14 (351), 24 (620), 30 (1003)	202,7/ 11,1	0,913/ 0,998
8(2021)	AREP- EGWO- PSO	APL, VDI, VSI, CF, EF	IEEE 33  IEEE 69	14 (782), 24 (1109), 32 (909) 20 (492), 60 (1304), 65 (444)	11 (524), 23 (693), 29 (1000) 61 (1000), 64 (413), 69 (476)	202,5/ 16,35  225/ 13,64	0,913/ 0,994  0,909/ 0,994
9(2019)	AQiEA	APL	PC 85	32 (1000), 57 (1000)	32 (1000)	316,1/ 67,9	0,871/ 0,956
10(2014 )	DICA	APL	IEEE 33  IEEE 69	6 (2500)  61 (3075)	13 (275), 24 (300), 30 (750) 17 (350), 64 (450), 66 (550)	211/ 47,5  224,9/ 38,7	0,904/ 0,966  0,909/ 0,967

**Показатели:**

APL (active power loss) – Потери активной мощности  
VDI (bus voltage deviation index) – индекс отклонения напряжений узлов  
ID (branches current violation) - нарушение тока в ветвях  
VSI (voltage stability index) – индекс стабильности напряжения  
CF (Cost function) – функция затрат системы (затраты на РГ, КБ и потери)  
EF (Emissions function) – функция эмиссии  
Vmin (minimum value of the buses voltage) – минимальное значение напряжения узлов

**Методы:**

DGSI (distributed generation sitting index) - индекс размещения распределенной генерации  
WIPSO (weight improved particle swarm optimization) - оптимизация роя частиц с улучшенным весом  
SADE (self-adaptive differential evolution) - самоадаптивная дифференциальная эволюция  
MOPSO (multi objective particle swarm optimization) - многоцелевая оптимизация роя частиц  
SFSOA (stochastic fractal search optimization algorithm) - алгоритм стохастической фрактальной поисковой оптимизации  
ICA (imperialist competitive algorithm) - алгоритм империалистической конкуренции  
POA (Political Optimization Algorithm) - алгоритм политической оптимизации  
AQiEA (Adaptive Quantum-inspired Evolutionary Algorithm) - адаптивный эволюционный алгоритм, основанный на квантах  
DICA (Discrete Imperialistic Competition Algorithm) – алгоритм дискретной империалистической конкуренции

В [7] несколько РГ и КБ распределяются с целью минимизации потерь мощности, улучшения индекса стабильности напряжения и профиля напряжения. Для решения задачи предлага-



ется комбинированный подход, учитывающий коэффициент чувствительности к потерям (LSF) и алгоритм политической оптимизации (РОА). Для расчётов использована 33 узловая схема с учетом 9 различных сценариев.

В [8] демонстрируется применение гибридного метода оптимизации, основанного на использовании доступного потенциала возобновляемых источников энергии, гибридного оптимизатора «серых волков» и «алгоритма роя частиц» (AREP-EGWO-PSO) для оптимального размещения и определения размеров РГ и КБ. Для проверки эффективности предложенного алгоритма рассмотрены пять различных сценариев, которые были реализованы в двух РС с 33 и 69 шинами.

Для оптимизации мест установки и мощности РГ и КБ, с целью минимизации потерь мощности, в [9] используется адаптивный эволюционный алгоритм, основанный на квантах (AQiEA). Эффективность предложенного алгоритма проверена на РС с 85 шинами, с учётом 4 сценариев.

В [10] представлен метод, основанный на алгоритме дискретной империалистической конкуренции (DICA) для оптимального размещения РГ и КБ. Целевая функция определена на основе снижения потерь активной мощности. Для расчётов использованы 33- и 69- узловые схемы.

Так в Табл.1 обобщены ключевые показатели, которые учитываются при совместном использовании РГ и КБ. В частности, по каждой публикации учитываются: метод, показатели целевой функции, схемы для анализа, места установки и мощности элементов, потери активной мощности в РС без и с элементами и улучшение, минимальное напряжение в узлах РС без и с элементами и улучшение.

Как показали результаты обзора литературы, основной проблемой практического использования метаэвристических методов является отсутствие гарантии нахождения глобального оптимума. Каждый из методов находит "лучшее" решение, но при этом невозможно доказать, является ли это решение истинным глобальным оптимумом. Учитывая данное в работе, для выбора количества, мест установки и мощности РГ и КУ, рассматриваются 35 различных метаэвристических методов. При этом основная цель это анализ и выбор ряда основных метаэвристических методов, а также поиск "наиболее лучшего" решения по размещению РГ и КУ в радиальных РС с целью снижения потерь и повышения их энергоэффективности.

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

### А. Используемые метаэвристические методы.

Метаэвристические это класс методов, предназначенных для поиска приближенных, но достаточно близких к оптимальным, решений сложных вычислительных задач, для которых нахождение точного глобального оптимума за разумное время является практически невозможным. В работе рассматриваются 35 различных типов которые представлены в Табл.2.

**Таблица 2.** Метаэвристические алгоритмы для решения задачи  
**Table 2.** Metaheuristic algorithms for solving the problem

№	Название	Категория	Вдохновение
1	ABC Искусственные пчелиные колонии (Artificial Bee Colony)	PI	Поведение медоносных пчел при поиске пищи
2	AEO Искусственная Экосистема (Artificial Ecosystem-based Optimization)	PI	Поток энергии и круговорот материи в естественной экосистеме
3	AGWOCS Метод серых волков и поиск кукушки (Grey Wolf Optimizer & Cuckoo Search)	Г(PI)	Синергетическое сочетание двух метаэвристик
4	AHA Алгоритм искусственного колибри (Artificial Hummingbird Algorithm)	PI	Поведение колибри для поиска пищи
5	ALO Оптимизатор муравьиного льва (Ant Lion Optimizer)	PI	Охота муравьиных львов в природе
6	ARO Оптимизация искусственных кроликов (Artificial Rabbits Optimization)	PI	Стратегия выживания кроликов в дикой природе
7	BAT Алгоритм летучих мышей (Bat Algorithm)	PI	Способность летучих мышей к эхолокации
8	BWO Оптимизация белухи (Beluga Whale Optimization)	PI	Стратегия белух в океане
9	BWOA Оптимизация черной вдовы (Black Widow Optimization Algorithm)	PI	Социальное взаимодействие черных вдов
10	CBO Оптимизация птиц-лысух (Coot Bird Optimization)	PI	Стратегия движения и взаимодействия лысух
11	CRSA Алгоритм поиска ворон (Crow Search Algorithm)	PI	Способность ворон поиска пищи



12	CSA	Алгоритм поиска кукушки (Cuckoo Search Algorithm)	РИ	Поведение кукушек, откладывающие яйца в гнезда других птиц
13	DOA	Оптимизация собак Динго (Dingo Optimization Algorithm)	РИ	Стратегия выживания и охоты собак динго
14	EEFO	Поиск пищи электрическим угрем (Electric Eel Foraging Optimization)	РИ	Стратегия поиска пищи электрических угрей
15	FHO	Оптимизация огненного ястреба (Fire Hawk Optimizer)	РИ	Стратегия охоты огненных ястребов
16	GA	Генетический Алгоритм (Genetic Algorithm)	ЭА	Биологическая эволюция и естественный отбор
17	GAPSO	Генетический Алгоритм и рой частиц (Genetic Algorithm & Particle Swarm Optimization)	Г (ЭА/РИ)	Синергетическое сочетание двух метаэвристик
18	GSA	Гравитационный Поисковый Алгоритм (Gravitational Search Algorithm)	ФЯ	Закон всемирного тяготения Ньютона и законы движения
19	GWO	Оптимизатор Серых Волков (Grey Wolf Optimizer)	РИ	Социальная иерархия и групповое охотничье поведение серых волков
20	HBO	Оптимизатор на основе толпы (Hear-Based Optimizer)	ЧП	Иерархическая структура толпы и влияние лидера
21	HSA	Алгоритм Гармонического Поиска (Harmony Search Algorithm)	ЧП	Импровизация музыкантов, стремящихся к гармонии
22	ICGO	Улучшенная Оптимизация Игры Хаоса (Improved Chaos Game Optimization)	М	Математическая "Игра Хаоса" для генерации фракталов
23	KOA	Алгоритм Оптимизации Кеплера (Kepler Optimization Algorithm)	ФЯ	Законы движения планет Кеплера
24	MFO	Оптимизация Мотыльков и Пламени (Moth-Flame Optimization)	РИ	Навигация ночных мотыльков
25	MVO	Оптимизатор Мультивселенной (Multi-Verse Optimizer)	ФЯ	Космологическая теория мультивселенной
26	PO	Политический Оптимизатор (Political Optimizer)	ЧП	Процесс между политиками, избирателями и партиями
27	PSO	Оптимизация Роем Частиц (Particle Swarm Optimization)	РИ	Социальное поведение стаи птиц или косяка рыб
28	PSOGSA	Рой частиц и гравитационный поиск (PSO & GSA)	Г (РИ/ФЯ)	Синергетическое сочетание двух метаэвристик
29	PSOSF	Рой частиц и факторы чувствительности (PSO & Sensitivity Factors)	РИ	Модификация оригинального метода
30	SA	Имитация Отжига (Simulated Annealing)	ФЯ	Процесс отжига в металлургии
31	SCA	Алгоритм Синусов и Косинусов (Sine Cosine Algorithm)	ФЯ	Математические функции синуса и косинуса
32	SSA	Алгоритм Рассеянного Поиска (Scatter Search Algorithm)	ЭА	Систематическое комбинирование решений и векторизации
33	TLSBO	Преподавание-Обучение-Изучение (Teaching-Learning-Studying-based Optimization)	ЧП	Обучения от учителя ученикам, ученики друг у друга, и самостоятельно
34	TOA	Оптимизация Тираннозавра Рекса (Tyrannosaurus Optimization Algorithm)	РИ	Поведение и стратегия выживания тираннозавра Рекса
35	WCA	Алгоритм Водного Цикла (Water Cycle Algorithm)	ФЯ	Процесс круговорота воды в природе

РИ - Роевой интеллект, ЧП - Человеческое поведение, Г – Гибридная, ЭА - Эволюционные Алгоритмы, ФЯ - Физические явления, М - Математические

### Б. Методика расчёта установившегося режима в распределительных сетях.

В работе расчёт установившегося режима решается с помощью метода обратного и прямого хода (англ., backward-forward sweep method), которая является итерационным численным методом [11]. Метод состоит из двух основных этапов, которые итерационно повторяются до достижения заданной точности:

Обратный ход (Backward Sweep): Расчет токов (или потерь мощности) в ветвях, начиная с узлов нагрузок обратно к источнику, где используются предварительно рассчитанные напряжения в узлах.

Прямой ход (Forward Sweep): Расчет напряжений в узлах, начиная от источника к узлам нагрузок. На этом этапе используется информация о токах (или мощностях) нагрузки в узлах.

По результатам расчёта режима определяются потери мощности в ветвях  $\Delta P_v$  и напряжения в узлах  $U_j$ .

### В. Математическая модель задачи

Целевая функция при использовании метаэвристических методов направлена на минимизацию потерь активной мощности, а также улучшению профиля напряжения:

$$F_1 = \min(\Delta P_\Sigma) = \min(\sum_{v=1}^{Nbr} |I_v|^2 \cdot R_v) \quad (1)$$



$$F_2 = \min(VDI_{\Sigma}) = \min\left(\sum_{j=1}^{N_{bus}} (U_j - 1)^2\right) \quad (2)$$

$$\min(F) = \omega_1 \cdot F_1 + \omega_2 \cdot F_2 \quad (3)$$

где  $I_v$  — ток, протекающий по ветви  $v$ ;  $R_v$  — активное сопротивление ветви  $v$ ;  $U_j$  — напряжение узла  $j$ ;  $\omega_1 = 1$  и  $\omega_2 = 1$  — весовые коэффициенты, определяющие относительную важность каждой цели.

#### Ограничения:

по балансу активной мощности:

$$P_{Sbus} + \sum_{k=1}^{N_{dg}} P_{k dg} = \Delta P_{\Sigma} + \sum_{j=1}^{N_{bus}} P_{j bus} \quad (4)$$

по балансу реактивной мощности:

$$Q_{Sbus} + \sum_{v=1}^{N_{br}} Q_{v line} + \sum_{k=1}^{N_{dg}} Q_{k dg} + \sum_{l=1}^{N_{cb}} Q_{l cb} = \Delta Q_{\Sigma} + \sum_{j=1}^{N_{bus}} Q_{j bus} \quad (5)$$

где  $P_{Sbus}$  и  $Q_{Sbus}$  — мощности балансирующего узла;  $Q_{v line}$  — реактивная мощность, генерируемая линией (ветвью)  $v$ ;  $P_{k dg}$  и  $Q_{k dg}$  — мощности  $k$ -го РГ;  $Q_{l cb}$  — реактивная мощность  $l$ -го КБ;  $\Delta P_{\Sigma}$  и  $\Delta Q_{\Sigma}$  — суммарные потери мощности в РС;  $P_{j bus}$  и  $Q_{j bus}$  — мощность, потребляемая нагрузкой в узле  $j$ .

#### Граничные условия:

по напряжению в узлах:  $U_i^{min} \leq |U_i| \leq U_i^{max} \rightarrow 0.95 \text{ о. е.} \leq |U_i| \leq 1.05 \text{ о. е.}$  (6)

по потоку в ветвях:  $I_v \leq I_v^{max} \rightarrow I_v \leq 300 \text{ А}$  (7)

по активной мощности для  $i$ -го РГ:  $P_{k dg}^{min} \leq P_{k dg} \leq P_{k dg}^{max} \rightarrow 0 \leq P_{k dg} \leq 1300 \text{ кВт}$  (8)

по реактивной мощности для для  $j$ -го КБ:  $Q_{l cb}^{min} \leq Q_{l cb} \leq Q_{l cb}^{max} \rightarrow 0 \leq Q_{l cb} \leq 1300 \text{ кВар}$  (9)

где  $P_{k dg}$  и  $Q_{l cb}$  — активная и реактивная мощность каждого РГ и КБ, которые находятся в диапазоне между максимальным и минимальным значениями.

#### Г. Схемы для расчётов

Для выполнения экспериментальных расчётов используются тестовые схемы IEEE-33 и IEEE-69, представленные на рисунках 1 и 2 соответственно.

Тестовая схема IEEE-33 состоит из 33 узлов и 32 ветвей. Суммарная комплексная нагрузка составляет  $3,715 \text{ МВт} + j 2,3 \text{ МВАр}$  [12]. Базовые значения мощности и напряжения составляют  $100 \text{ МВА}$  и  $12,66 \text{ кВ}$ . Значение максимально допустимого тока в ветвях принято равным  $300 \text{ А}$ . В схеме узлы 2, 3, и 6 имеют по два ответвления, остальные - одно ответвление.

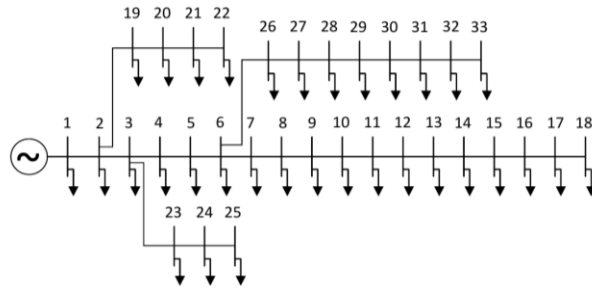


Рис. 1. Тестовая схема распределительной сети IEEE-33.

Fig. 1. The IEEE 33-bus standard distribution network.

Тестовая схема IEEE-69 состоит из 69 узлов, 68 ветвей и суммарной комплексной нагрузкой  $(3,709 \text{ МВт} + j 2,624 \text{ МВАр})$  [11]. Базовые значения мощности, напряжения, а также максимально допустимого тока в ветвях аналогичны принятым для схемы IEEE-33. В схеме узлы 4, 8, 9, 11 и 12 имеют по два ответвления, а узел 3 — три ответвления, остальные - одно ответвление.

В работе для каждой схемы рассматриваются четыре варианта: 1 — без установки ФЭС и КБ (базовый вариант); 2 — с 2 ФЭС и 2 КБ; 3 — с 3 ФЭС и 3 КБ; 4 — с 4 ФЭС и 4 КБ.

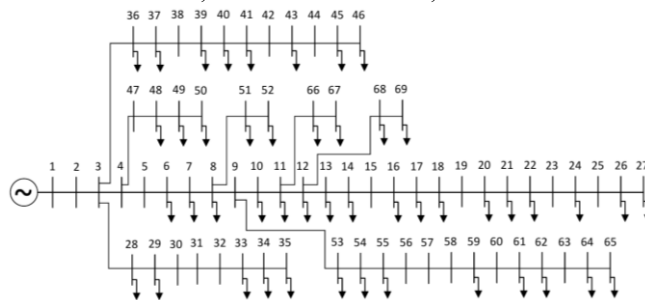


Рис. 2. Тестовая схема распределительной сети IEEE-69.

Fig. 2. The IEEE 69-bus standard distribution network.



### 3. Результаты и обсуждения (Results and discussion)

Одной из основных целей данной работы является анализ и выбор ряда основных метаэвристических методов из 35 рассматриваемых позволяющих получить "наиболее лучшие" решения по размещению РГ и КУ в РС и их мощности. С этой целью по каждому из вариантов 2, 3 и 4 для двух тестовых схем проведены по 150 расчётов (всего 900). По завершению каждого цикла расчёта, выполняется сортировка рассматриваемых методов по значению суммарных потерь активной мощности  $\Delta P_{\Sigma}$ . Лучшей моделью (№ 1) является модель с минимальным значением  $\Delta P_{\Sigma}$ , а наихудшей (№ 35) – с максимальным значением  $\Delta P_{\Sigma}$ . В Табл.3. представлены обобщённые результаты по 900 циклам расчёта по выбору мест установки и мощности РГ и КУ.

Как показали результаты анализа лучшей моделью является модель под № 33 TLSBO. Вероятность получения "наиболее лучшего" решения при использовании данного метода составляет 13,22 %. При использовании метода № 20 HBO или № 21 HSA - составляет около 12 %. Совместное использование указанных трёх методов увеличивает вероятность получения "наиболее лучшего" решения до 36,7 %.

**Таблица 3.** Обобщённые результаты по 900 циклам расчёта

**Table 3.** Generalized results for 900 calculation cycles

№	№ сорг	Метод	Min	Max	Всего min	Доля	Нараст
1	33	TLSBO	1	24	119	13,22%	13,22%
2	20	HBO	1	32	107	11,89%	25,11%
3	21	HSA	1	27	104	11,56%	36,67%
4	17	GAPSO	1	31	89	9,89%	46,56%
5	16	GA	1	31	81	9,00%	55,56%
6	9	BWOA	1	31	70	7,78%	63,33%
7	19	GWO	1	29	62	6,89%	70,22%
8	34	TOA	1	35	50	5,56%	75,78%
9	32	SSA	1	26	42	4,67%	80,44%
10	1	ABC	1	30	32	3,56%	84,00%
11	11	CRSA	1	31	31	3,44%	87,44%
12	27	PSO	1	30	25	2,78%	90,22%
13	29	PSOSF	1	34	17	1,89%	92,11%
14	15	FHO	1	35	16	1,78%	93,89%
15	14	EEFO	1	33	11	1,22%	95,11%
16	22	ICGO	1	35	9	1,00%	96,11%
17	3	AGWOCS	1	35	7	0,78%	96,89%
18	4	AHA	1	34	7	0,78%	97,67%
19	25	MVO	1	35	6	0,67%	98,33%
20	12	CSA	1	30	6	0,67%	99,00%
21	26	PO	1	35	3	0,33%	99,33%
22	5	ALO	1	35	2	0,22%	99,56%
23	2	AEO	1	35	1	0,11%	99,67%
24	13	DOA	1	32	1	0,11%	99,78%
25	31	SCA	1	35	1	0,11%	99,89%
26	35	WCA	1	35	1	0,11%	100,00%
27	6	ARO	3	35	0	0,00%	100,00%
28	7	BAT	2	35	0	0,00%	100,00%
29	8	BWO	8	35	0	0,00%	100,00%
30	10	CBO	3	35	0	0,00%	100,00%
31	18	GSA	8	35	0	0,00%	100,00%
32	23	KOA	3	35	0	0,00%	100,00%
33	24	MFO	3	35	0	0,00%	100,00%
34	28	PSOGSA	2	35	0	0,00%	100,00%
35	30	SA	2	35	0	0,00%	100,00%

При использовании первых пяти моделей вероятность получения "наиболее лучшего" решения увеличивается до 55,6 %, а при использовании 10 моделей - увеличивается до 84 % (Рис.3), при использовании 20 моделей - составляет 99 %.

Как показали результаты анализа для выбора мест установки и мощности РГ и КУ в РС достаточно использования 20 методов, что позволило сократить время расчёта для каждого из вариантов на 35 - 40 % относительно использования 35 методов.

Далее в Табл. 4 и 5 представлены результаты расчётов для каждого из вариантов. В таблицах в дополнении к таким параметрам как потери активной и реактивной мощности, целевая функция, а также минимальное значение напряжения также рассматриваются:

среднее отклонение напряжений по всем узлам

$$VD_{mean} = \frac{1}{N_{bus}} \sum_{j=1}^{N_{bus}} |U_j - 1| \quad (10)$$

максимальное значение загрузки ветвей



$$k_{load} = \max \left( \frac{I_{v \text{ fact}}}{I_{v \text{ max}}} \right) \quad (11)$$

где  $I_{v \text{ fact}}$  – фактическое значение тока по каждой ветви;  $I_{v \text{ max}}$  - максимально допустимое значение тока в ветвях.

суточные потери электроэнергии

$$\Delta W_d = k_f^2 \cdot \Delta P_{\Sigma} \cdot 24 \quad (12)$$

где  $k_f = 1.05$  — коэффициент формы графика нагрузки.

Для выполнения сравнительного анализа в качестве базового варианта используется вариант без установки РГ и КБ.

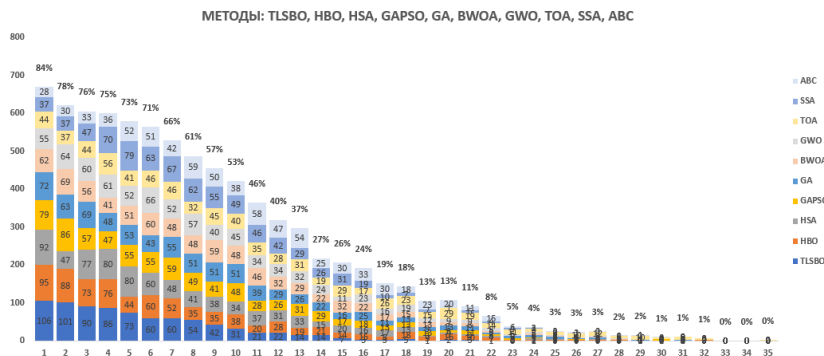


Рис. 3. Результаты анализа при использовании 10 моделей.

Fig. 3. The results of the analysis using 10 models.

Таблица 4. Результаты расчётов для тестовой схемы IEEE – 33

Table 4. Calculation results for the IEEE - 33 test scheme

		без РГ и КБ	2 РГ и 2 КБ	3 РГ и 3 КБ	4 РГ и 4 КБ
Мощность ГУ	акт, кВт	3917.671	1732.83	776.44	722.73
	реак, кВАр	2435.137	631.82	450.56	207.63
Мощность РГ	акт, кВт		2010 (54.10 %)	2950 (79.41 %)	3010 (81.02 %)
	реак, кВАр		408 (17.74 %)	598 (26 %)	611 (26.57 %)
РГ в узлах			12, 30	13, 24, 30	7, 14, 25, 30
Мощность РГ	акт, кВт		1010, 1000	810, 1120, 1020	750, 610, 800, 850
	реак, кВАр		205, 203	164, 227, 207	152, 124, 162, 173
Мощность КБ	реак, кВАр		1280 (55.65 %)	1260 (54.78%)	1490 (64.78 %)
КБ в узлах			7, 30	6, 11, 30	8, 18, 23, 31
Мощность КБ	реак, кВАр		580, 700	440, 170, 650	350, 80, 500, 560
Потери мощности	акт, кВт	202.6762	27.8397	11.44	7.7296
	реак, кВАр	135.1403	19.9742	9.58	6.8169
Целевая функция Снижение:		0.1198	0.0021	0.0006	0.0004
Мин. значение напряжений		0.913 (18)	0.981(25)	0.994(18)	0.994(22)
Ср. отклонение напряжений Снижение:		0.052	0.006	0.003	0.002
Макс. загрузка ветви, % Снижение		70	28	14	11
Суточные потери ЭЭ, кВт·ч Снижение:		5362.812	736.637	302.724	204.428
			4626.2 (86.3 %)	506.1 (94.4 %)	5158.4 (96.2 %)

Как показали результаты сравнительного анализа для тестовой схемы IEEE – 33 относительно вариант без установки РГ и КБ:

при использовании 2 РГ и 2 КБ – целевая функция понижается на 98,3%, среднее отклонение напряжений по всем узлам уменьшается на 88,8%, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 60%, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 736,6 кВт·ч или на 86,3%.

при использовании 3 РГ и 3 КБ – целевая функция понижается на 99,5 %, среднее отклонение напряжений по всем узлам уменьшается на 94 %, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 80 %, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 302,7 кВт·ч или на 94,4%.

при использовании 4 РГ и 4 КБ – целевая функция понижается на 99,7%, среднее отклонение напряжений по всем узлам уменьшается на 96,6%, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 84,2%, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 204,4 кВт·ч или на 96,2%.

Наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности (уменьшения потерь ЭЭ) является вариант с 3 РГ и 3 КБ так как потери ЭЭ уменьшаются более чем в 2 раза относительно 2-го варианта, а в случае с 4 РГ и 4 КБ эффект незначительный относительно 3-го варианта.

Как показали результаты сравнительного анализа для тестовой схемы IEEE – 69 относительно вариант без установки РГ и КБ:

при использовании 2 РГ и 2 КБ – целевая функция понижается на 98,3 %, среднее отклонение



ние напряжений по всем узлам уменьшается на 84,2 %, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 51,3 %, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 234 кВт·ч или на 95,1 %.

**Таблица 5.** Результаты расчётов для тестовой схемы IEEE – 69

**Table 5.** Calculation results for the IEEE - 69 test circuit

		Без РГ и КБ	2 РГ и 2 КБ	3 РГ и 3 КБ	4 РГ и 4 КБ
Мощность ГУ	акт, кВт	3889.843	2017.734	1614.188	1213.970
	реак, кВАр	2706.764	1115.558	994.807	361.981
Мощность РГ	акт, кВт		1700 (45.84 %)	2100 (56.62 %)	2500 (67.41 %)
	реак, кВАр		346 (13.19 %)	427 (16.27 %)	508 (19.36 %)
РГ в узлах			61, 62	11, 61, 62	11, 16, 62, 63
Мощность РГ	акт, кВт		1500, 200	530, 1220, 350	550, 380, 1270, 300
	реак, кВАр		305, 41	108, 248, 71	112, 77, 258, 61
Мощность КБ	реак, кВАр		1172 (44.66 %)	1210 (46.11%)	1760 (67.07 %)
КБ в узлах			11, 61	21, 61, 68	28, 50, 53, 61
Мощность КБ			380, 792	190, 830, 190	130, 520, 380, 730
Потери мощности	акт, кВт	180.9604	8.8446	5.2983	5.0804
	реак, кВАр	82.6674	8.6586	7.1302	5.5278
Целевая функция Снижение:		0.0647	0.0011 0.0636(98.31%)	0.0005 0.0642(99.28%)	0.0003 0.0644 (99.53 %)
Мин. значение напряжения		0.916(65)	0.993(69)	0.994(50)	0.997(65)
Ср. отклонение напряжений Снижение:		0.017	0.003 0.014 (84.16 %)	0.002 0.015 (90.11 %)	0.001 0.016 (93.75 %)
Макс. загрузка ветви, % Снижение		72	35 37 (51.39 %)	29 43 (59.72 %)	19 53.000 (73.61 %)
Суточные потери ЭЭ, кВт·ч Снижение:		4788.211	234.028 4554.2(95.11%)	140.192 4648.0 (97.07%)	134.428 4653.8 (97.19 %)

при использовании 3 РГ и 3 КБ – целевая функция понижается на 99,3 %, среднее отклонение напряжений по всем узлам уменьшается на 90,1 %, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 59,7 %, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 140,2 кВт·ч или на 97,1 %.

при использовании 4 РГ и 4 КБ – целевая функция понижается на 99,5 %, среднее отклонение напряжений по всем узлам уменьшается на 93,8 %, максимальное значение загрузки ветвей - уменьшается на 73,6 %, а суточные потери ЭЭ уменьшаются до 134,4 кВт·ч или на 97,2 %.

Наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности является вариант с 3 РГ и 3 КБ так как потери ЭЭ уменьшаются на 40 % относительно 2-го варианта, а в случае с 4 РГ и 4 КБ эффект незначительный (4 %) относительно 3-го варианта.

#### 4. Заключение (Conclusions)

Анализ полученных результатов показывают эффективность предлагаемой методики по поиску оптимального решения, а также значительный потенциал синергии РГ и КУ для снижения потерь мощности и ЭЭ, улучшения качества ЭЭ, отсрочки модернизации сетей и повышения экономической рентабельности.

Для выбора мест установки и мощности РГ и КУ в РС достаточно использования 20 методов представленных в Табл.3, что позволило сократить время расчёта для каждого из вариантов на 35 - 40 % относительно использования 35 методов.

Для схемы IEEE – 33 наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности является вариант с 3 РГ и 3 КБ так как потери ЭЭ уменьшаются до 302,7 кВт·ч или на 94,4 % относительно базового варианта (без РГ и КБ) и уменьшаются более чем в 2 раза относительно 2-го варианта (с 2 РГ и 2 КБ).

Для схемы IEEE – 69 наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности является вариант с 3 РГ и 3 КБ так как потери ЭЭ уменьшаются до 140,2 кВт·ч или на 97,1 % относительно базового варианта (без РГ и КБ) и уменьшаются на 40 % относительно 2-го варианта (с 2 РГ и 2 КБ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rajeswaran, S. and Nagappan, K. Optimum Simultaneous Allocation of Renewable Energy DG and Capacitor Banks in Radial Distribution Network. Circuits and Systems, 7 (2016) 3556-3564. <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.711302>
2. Arash Zeinalzadeh, Younes Mohammadi, Mohammad H. Moradi. Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach. Electrical Power and Energy Systems 67 (2015) 336–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.010>



3. Mehrdad Ahmadi Kamarposhti, Giulio Lorenzini| Ahmed, Amin Ahmed Solyman. Locating and Sizing of Distributed Generation Sources and Parallel Capacitors Using Multiple Objective Particle Swarm Optimization Algorithm. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* Vol. 8, No. 1, February, 2021, pp. 10-24. <https://iieta.org/journals/mmep/paper/10.18280/mmep.080102>
4. Thuan Thanh Nguyen, Bach Hoang Dinh, Thai Dinh Pham, Thang Trung Nguyen. Active Power Loss Reduction for Radial Distribution Systems by Placing Capacitors and PV Systems with Geography Location Constraints. *Sustainability* 2020, 12, 7806; doi:10.3390/su12187806; <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/18/7806>
5. Mingu Kang and Ramon Zamora. Optimal placement and sizing of DG and Shunt Capacitor for Power Loss Minimization in an Islanded Distribution. *System Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, P. H. J. Chong et al. (Eds.): *SmartGIFT 2018, LNICST 245*, pp. 43–52, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94965-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94965-9_5)
6. Venkatesan, C., Kannadasan, R., Ravikumar, D., Loganathan, V., Alsharif, M.H., Choi, D., Hong, J., Geem, Z.W. Re-Allocation of Distributed Generations Using Available Renewable Potential Based Multi-Criterion-Multi-Objective Hybrid Technique. *Sustainability* 2021, 13, 13709. <https://doi.org/10.3390/su132413709>
7. Manikanta, G., Mani, A., Singh, H.P., Chaturvedi, D.K. (2019). Simultaneous Placement and Sizing of DG and Capacitor to Minimize the Power Losses in Radial Distribution Network. In: Ray, K., Sharma, T., Rawat, S., Saini, R., Bandyopadhyay, A. (eds) *Soft Computing: Theories and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 742. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4\\_56](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4_56)
8. M.B. Khudayarov, N.N. Normamatov. Analysis of Steady-State Conditions in 110/35 kV Power Networks with Distributed Generation and Compensating Equipment. *Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving*, 2025, no. 2, pp. 19–28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15743046>

## REFERENCES

1. Rajeswaran, S. and Nagappan, K. Optimum Simultaneous Allocation of Renewable Energy DG and Capacitor Banks in Radial Distribution Network. *Circuits and Systems*, 7 (2016) 3556-3564. <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.711302>
2. Arash Zeinalzadeh, Younes Mohammadi, Mohammad H. Moradi. Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach. *Electrical Power and Energy Systems* 67 (2015) 336–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.010>
3. Mehrdad Ahmadi Kamarposhti, Giulio Lorenzini| Ahmed, Amin Ahmed Solyman. Locating and Sizing of Distributed Generation Sources and Parallel Capacitors Using Multiple Objective Particle Swarm Optimization Algorithm. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* Vol. 8, No. 1, February, 2021, pp. 10-24. <https://iieta.org/journals/mmep/paper/10.18280/mmep.080102>
4. Thuan Thanh Nguyen, Bach Hoang Dinh, Thai Dinh Pham, Thang Trung Nguyen. Active Power Loss Reduction for Radial Distribution Systems by Placing Capacitors and PV Systems with Geography Location Constraints. *Sustainability* 2020, 12, 7806; doi:10.3390/su12187806; <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/18/7806>
5. Mingu Kang and Ramon Zamora. Optimal placement and sizing of DG and Shunt Capacitor for Power Loss Minimization in an Islanded Distribution. *System Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, P. H. J. Chong et al. (Eds.): *SmartGIFT 2018, LNICST 245*, pp. 43–52, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94965-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94965-9_5)
6. Venkatesan, C., Kannadasan, R., Ravikumar, D., Loganathan, V., Alsharif, M.H., Choi, D., Hong, J., Geem, Z.W. Re-Allocation of Distributed Generations Using Available Renewable Potential Based Multi-Criterion-Multi-Objective Hybrid Technique. *Sustainability* 2021, 13, 13709. <https://doi.org/10.3390/su132413709>
7. Manikanta, G., Mani, A., Singh, H.P., Chaturvedi, D.K. (2019). Simultaneous Placement and Sizing of DG and Capacitor to Minimize the Power Losses in Radial Distribution Network. In: Ray, K., Sharma, T., Rawat, S., Saini, R., Bandyopadhyay, A. (eds) *Soft Computing: Theories and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 742. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4\\_56](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4_56)
8. M.B. Khudayarov, N.N. Normamatov. Analysis of Steady-State Conditions in 110/35 kV Power Networks with Distributed Generation and Compensating Equipment. *Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving*, 2025, no. 2, pp. 19–28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15743046>