

## Анализ подходов к оптимизации структуры и состава генерирующего комплекса в задачах распределенной генерации

*А.О. Парамзин, В.З. Ковалев*

*Югорский государственный университет*

**Аннотация:** В работе рассматриваются подходы к оптимизации состава и структуры комплекса распределенной генерации при различных критериях, таких, как себестоимость электрической энергии и надежность электроснабжения. На основании отечественного и мирового опыта осуществляется наиболее перспективный метод оптимизации, применительно к задачам распределенной генерации. Дается сравнительная оценка традиционным методам оптимизации и методам, в основе которых лежат вариации популяционных (эволюционных) алгоритмов.

**Ключевые слова:** Распределенная генерация, методы оптимизации, структура объектов распределенной генерации, себестоимость электроэнергии, надежность электроснабжения.

Существующий потенциал солнечной и ветровой энергетики, а также высокий потенциал биоэнергетики [1,2] открывает перед возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) большие перспективы. Однако, они по-прежнему обладают рядом недостатков: большие капитальные затраты на строительство, последующую эксплуатацию и, как следствие, долгие сроки окупаемости. Причина этого связывается с отсутствием в России необходимой теоретической, материально-технической базы и механизмов в области ВИЭ, в том числе с малым количеством предприятий, специализирующихся на производстве генерирующего оборудования [3,4]. На сегодняшний день, самым оптимальным видом энергетической установки малой мощности в задачах распределенной генерации представляется комплекс, включающий в свой состав традиционный источник электрической энергии на углеводородном топливе, например, дизель-генераторная установка (ДГУ), возобновляемый источник электрической энергии и накопитель электрической энергии с целью ее максимального аккумулирования и, как следствие, замещения дизельного топлива. Также имеет место быть сохранение связи объекта распределенной генерации (РГ) с

энергосистемой [5]. Кроме того, согласно прогнозу международного энергетического агентства (МЭА) до 2040 года [6], ключевыми игроками мирового энергетического сектора по-прежнему будут являться углеводородные запасы, доля которых будет составлять до 48%.

В работе [7] среди наиболее важных энергетических задач выделяются задачи планирования нагрузок и реактивной мощности, а также управление потоками мощности, выбор конфигурации сети, которые принято относить к категории оптимизационных задач в энергетике. Также отмечается, что поскольку любые энергосистемы, в т.ч. и автономные, являются нелинейными системами с большим количеством распределенных устройств и рядом особенностей у каждого из них, то задача оптимизации таких комплексов требует ввода допущений и упрощений определенных свойств объектов.

Благодаря проектному определению параметров энергосистемы, становится возможным обоснование оптимальной структуры и состава генерирующего комплекса, и, кроме того, учёт потенциала таких источников электрической энергии в конкретной локации. При этом, согласно [4], в процессе разработки конкурентоспособного генерирующего оборудования с использованием возобновляемых источников необходимо решить комплекс задач:

- Разработать универсальные методики, применимые для различных регионов с учетом индивидуальных особенностей, при помощи которых представилось бы возможным выполнять расчет режимов работы генерирующего комплекса.

- Осуществить достоверную оценку потенциала и технико-экономическую оценку от внедрения возобновляемых источников энергии в регионах предполагаемого размещения генерирующих установок.

---

- Разработать методику повышения ремонтпригодности систем распределенной генерации за счет их блочно-модульного проектирования [4].

Обычно, в связи с необходимостью обеспечения объекта РГ не только электрической, но и тепловой энергией [8, 9], возникает проблема многокритериальной оптимизации генерирующего комплекса.

Подход к постановке и решению такой оптимизации в задачах распределенной генерации может быть выстроен различными способами. В данной работе анализируются подходы к оптимизации структуры и состава комплекса распределенной генерации при различных критериях, среди которых можно выделить минимизацию стоимости жизненного цикла комплекса распределенной генерации, распределение капитальных затрат на построение комплекса во времени, а также снижение потерь мощности в процессе работы комплекса распределенной генерации.

С точки зрения инструмента снижения себестоимости электроэнергии, в зарубежных и отечественных моделях оптимизации распределенная генерация может рассматриваться, как средство снижения потерь мощности [10], а также распределения капитальных затрат во времени. Подобный подход демонстрируется в [11], где обобщенная целевая функция модели в статической постановке представлена совокупностью затрат на сооружение объектов распределенной генерации, затрат на подключение к основной сети, капитальных затрат на возведение элементов сети, а также включает в себя затраты на теплоснабжение потребителей:

$$OF = A + B.$$

Здесь  $A$  – суммарные расходы на компенсацию потерь электроэнергии в системе, а  $B$  – стоимость покупки электроэнергии на оптовом рынке. Годовые инвестиционные затраты на оборудование описываются, как:

---

$$AC = \frac{d \cdot CC}{1 - \frac{1}{(1+d)^{LT}}}$$

Тогда расходы на компенсацию представляются в виде:

$$\begin{aligned} A = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{LB}} \beta(IY_{DG_i}) AC_{DG_i} \cdot (SM_{DG_i}^M + BK) \sigma_{DG_i,t} + \\ & + \sum_{t=1}^T \beta(t) \sum_{k=1}^{N_{LL}} LD_k \sum_{i=1}^{N_{LB}} C_{DG} \cdot S_{DG,t,k,i} pf \sigma_{DG_i,t} + \\ & + \sum_{t=1}^T \beta(t) \sum_{k=1}^{N_{LL}} LD_k C_{SSk} \cdot \sum_{i=1}^{N_{LB}} \sum_{j=i+1}^{N_T} Re\{(V_i - V_j) I_{ij}^*\}, \end{aligned}$$

здесь  $\sigma$ - переменная принятия решения: 0 или 1, показывающая наличие дизельной генерации в году,  $SM_{DG_i}^M$  – емкость или переменная состояния принятия решения, которые должны быть определены алгоритмом оптимизации.

В свою очередь, стоимость покупки электроэнергии можно определить, как:

$$\begin{aligned} B = & \sum_{t=1}^T \left( \sum_{l=1}^{N_{SS}} \sum_{i=1}^{N_{LB}} \beta(IY_{l,u}) AC_{l,u} \sigma_{i,u,t} + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{N_{LB}} \sum_{j=i+1}^{N_T} \beta(IY_{f,i,j}) C_{ij} \sigma_{ij,t} \right) + \\ & + \sum_{t=1}^T \beta(t) \sum_{k=1}^{N_{LL}} LD_k C_{SSk} \cdot \sum_{l=1}^{N_{SS}} \sum_{u=1}^{N_U} S_{l,u} pf \sigma_{l,u,t}. \end{aligned}$$

Решение данной задачи предлагается реализовать при помощи генетического алгоритма [12]. Процедура оптимизации в качестве начальной стадии осуществляет создание серии случайных переменных, которая включает расположение ДГУ и трансформаторов, далее происходит выбор оптимальных мощностей установок. Затем, начальные решения ранжируются в соответствии с их значениями пригодности, и некоторые из них отбираются для этапов скрещивания и мутации случайным образом. После операций скрещивания и мутации получается новое поколение, которое поступает в процесс оптимизации для оценки наилучшей производительности и пригодности. Новые решения выбираются путем объединения лучших решений в новой и старой популяциях. Эта процедура повторяется в течение нескольких итераций. Лучший ответ сохраняется в конце каждой итерации. Данный алгоритм принято относить к мета эвристическим популяционным алгоритмам, которые как правило работают по циклу, представленному на рис. 1 с незначительными вариациями:

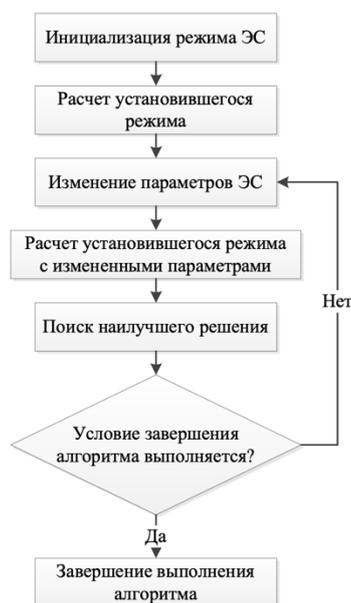


Рис. 1. – Типовая последовательность работы генетического алгоритма (приводится по [7])

К недостаткам генетического алгоритма, один из вариантов которого предложен в [13], принято относить низкую вычислительную скорость и наличие большого количества параметров настройки.

Другим популярным оптимизационным методом, применяемым для минимизации потерь и себестоимости электрической энергии, является метод роя частиц [14, 15], где алгоритм имеет вид, представленный на рис. 2. Данный метод опирается на концепцию роевого взаимодействия насекомых при решении различных проблемных ситуаций.

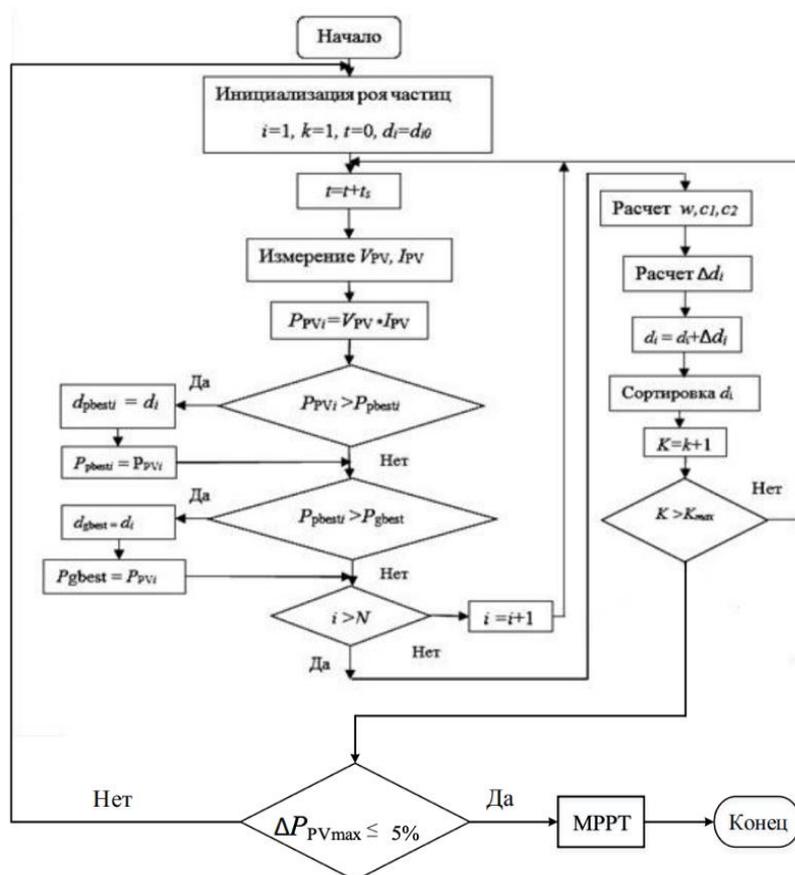


Рис. 2 – Пример реализации метода роя частиц в задачах распределенной генерации (приводится по [17])

Набор переменных в случае данного метода представляет собой одну составляющую роя (частицу), тогда, двигаясь в области пространства решений задачи, наборы переменных взаимодействуют между собой, в

результате чего происходит обмен информацией и каждый элемент роя занимает наилучшее положение для себя с учетом наилучших положений других частиц. В определенных задачах метод роя частиц обладает преимуществом перед генетическим алгоритмом, для которого характерен худший показатель сходимости по причине наличия в каждой итерации операций мутаций и появления новых особей, что иногда отдаляет нас от истинного решения. Траектория поиска решения методом роя частиц на фоне генетического алгоритма при решении тестовых задач плавно приближается к существующему минимуму [15]. Например, в [16] был показан способ определения мощности объектов распределенной генерации и их последующего оптимального размещения на основе метода роя частиц. Также применение данного алгоритма для поиска другой оптимальной позиции можно наблюдать в работе [17]. В данной работе под критерием оптимизации понимается показатель стоимости жизненного цикла установки:

$$LCC = Cap + Min.$$

Здесь переменная  $Cap$  отражает предусмотренные проектом капитальные затраты, а величина  $Min$  определяется из стоимости периодических осмотров и обслуживания установки:

$$Cap = CRF \cdot (N_{WT} \cdot C_{WT} + N_{PV} \cdot C_{PV} + N_{BB} \cdot C_{BB} + C_{DG} + C_{INV}),$$

$CRF$ , в свою очередь, представляет собой коэффициент возврата капитала, и определяется, как:

$$CRF = \frac{i \cdot (i + 1)^T}{(i + 1)^T - 1}$$

здесь  $i$  - процентная ставка;  $T$  – общий срок службы энергетической системы.

К категории методов, опирающихся на имитацию естественных природных процессов, можно отнести метод симуляции отжига, получивший

---

широкое распространение в решении математических задач. Данный метод построен на концепции формирования кристаллической решетки в процессе нагрева и остывания металлов. Имитация отжига хорошо зарекомендовала себя в задачах с большим количеством локальных экстремумов, где другие методы могут ошибочно принимать ее за точку глобального минимума. Главное условие, которое должно выполняться, чтобы избежать таких ситуаций – это необходимость периодического повышения энергии системы. При этом общий тренд к поиску наименьшей энергии сохраняется [18]. При помощи метода отжига решаются проблемы оптимальной реконфигурации системы, планирования графиков обслуживания, планирования и строительства генерирующего оборудования в [19].

Другое применение этих перспективных, инспирированных природой подходов к решению трудных оптимизационных проблем распределенной генерации, демонстрирует [20], где в качестве критерия оптимальности используется минимум расхода топлива, проводится комплекс экспериментов, и предлагаемый автором потоковый генетический алгоритм сравнивается с алгоритмами изложенными выше. На примере данной задачи показано сокращение времени счета предложенным методом более чем на порядок по сравнению с классическим построением генетического алгоритма, представленным в этой же работе.

Эволюционные алгоритмы, опираясь на концепцию природного взаимодействия, достаточно хорошо зарекомендовали себя в процессе решения оптимизационных задач [21], однако, это далеко не все методы, применяемые для поиска экстремумов в задачах с распределённой генерацией. Широко известный в математике и набирающий популярность в подобных задачах метод кукушкиного поиска, основанный на гнездовом паразитизме данного вида птиц, в процессе работы осуществляет случайный

---

поиск и также заслуживает отдельного упоминания. Представителем данного направления можно считать [22].

Стоит отметить, что по-прежнему сохраняют свои позиции такие методы, как градиентный спуск, наискорейший спуск, метод ветвей и границ, методы перебора [23, 24], Ньютона и т.п.

В работе [25] содержится один из сценариев использования математической модели ветряных генераторов в течение суток. Особенностью модели является наличие стохастического характера первичного источника энергии (ветра) при заданном графике нагрузки. Решение осуществляется методами наискорейшего спуска, градиентного поиска (спуска) и методом смежных градиентов.

Характерной чертой метода градиентного поиска служит операция определения вектора направления  $S(x_k)$ :

$$\bar{S}(x_k) = \cos \varphi_k = \frac{\bar{g}_k}{\|\bar{g}_k\|}.$$

Где  $\varphi_k$  – угол наклона градиента. Тогда:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \Delta x_k = \bar{x}_k - \alpha_k \bar{S}_k.$$

Для последнего выражения дробный коэффициент  $\alpha_k$  в работе определяется следующим образом:

$$\alpha_{k+1} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{2}, & \text{при } \varphi_k > 60^\circ \\ \alpha_k, & \text{при } 30^\circ < \varphi_k < 60^\circ \\ 2\alpha_k, & \text{при } \varphi_k < 30^\circ \end{cases}$$

В отличие от метода градиентного спуска, метод наискорейшего спуска подразумевает при нахождении дробного коэффициента находить матрицу Гессе, что требует значительных затрат при вычислении.

---

Если проводить сравнение метода смежных градиентов с методом наискорейшего спуска, то для первого будет характерной возможностью построить более гладкую траекторию поиска глобального минимума на поверхности подобной квадратичной.

В свою очередь, в качестве отправной точки метода смежных градиентов можно считать определение вектора направления:

$$\bar{p}_0 = -\bar{g}_0$$

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_0 + \alpha \bar{p}_0.$$

Для которого дробный коэффициент  $\alpha$  определяется аналогичным способом методу градиентного спуска, а вектор  $p$  для следующих итераций можно вычислить, как:

$$\bar{p}_k = -\bar{g}_k + \beta_k \bar{p}_{k-1}.$$

Скалярный коэффициент  $\beta$  может быть определен различными методами, т.к. Метод Хестенса и Штифеля, Флетчера и Ривза, Полака и Рибье [25].

Выбор метода обуславливается исключительно особенностями задачи оптимизации, которые, как правило, связывают с вероятностью отыскания глобального минимума при сохранении оптимального состояния системы и опирается на опыт и интуицию лица, осуществляющего расчет.

По результатам данной работы можно сделать вывод о том, что, при решении задачи, включающей статичное состояние параметров, наилучших результатов удастся достичь при применении метода смежных градиентов и наискорейшего спуска, тогда как при наличии в задаче оптимизации динамически изменяющихся условий и стохастических параметров, высокой эффективности оптимизации удастся достичь за счет применения метода градиентного поиска.

---

В сравнении трех вышеуказанных методов наименьшими параметрами нормального распределения, такими, как дисперсия  $\sigma$  и математическое ожидание  $\mu$ , обладает вектор ошибки, соответствующий применению метода смежных градиентов, а наибольшие значения у метода градиентного поиска.

В процессе решения задач оптимизации применительно к комплексам распределенной генерации имеет место применение как «традиционных» методов и алгоритмов оптимизации, таких, как метод градиентного спуска, метод наискорейшего спуска, метод прямого перебора и т.п., так и разновидностей и модификаций популяционных алгоритмов. Как правило, это связывается с их широким распространением и реализацией в готовых пакетах прикладных программ, таких, как Matlab, GAMS, Mathematica и др., а также возможностью избавиться от необходимости вычисления производных первого и второго порядка. Стоит также отметить, что метаэвристические популяционные алгоритмы хорошо показывают себя при стохастическом характере переменных. При этом такие методы подразумевают наличие в их составе алгоритмов, позволяющих им избегать локальных оптимумов.

В качестве недостатка популяционных алгоритмов можно отметить их большое разнообразие и невозможность получения абсолютно точного наилучшего решения. Решение будет оптимальным, но всегда может быть уточнено дополнительно, для чего применяется симбиоз (ансамбль) различных методов. Помимо этого, поскольку данные методы изначально предполагали решение небольших оптимизационных задач, некоторые из них требуют специальной интерпретации для решения оптимизационных задач в области распределенной генерации.

## Литература

1. Большаник П.В., Евланов Е.А., Исламутдинов В.Ф., Исламутдинова Д.Ф., Ковалев В.З., Рыбина В.Б., Санников Д.В., Татьянkin В.М., Тей Д.О., Устюжанцева А.Н., Шубина В.И. Исследование эволюции, институциональных условий и факторов развития отраслей экономики северного ресурсодобывающего региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа - Югры). Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2017. 445 с.

2. Ковалев В. З., Архипова О.В. Методика оптимизации структуры парка ветро-дизельных электростанций // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 112-125.

3. Коданева С. И. Перспективы развития топливно-энергетического комплекса России в современных условиях // Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник: материалы XX Национальной научной конференции с международным участием. М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН. 2020. С. 342-348.

4. Денисенко Е.А. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы развития. Краснодар : КубГАУ, 2020. 142 с.

5. Николаева С. И. Микроэнергосистема на основе активного энергетического комплекса // Инженерный вестник Дона, 2022, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7619](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7619).

6. Кулагин В.А., Архипов Н.А., Галкин Ю.В., Галкина А.А., Гимади В.И., Грушевенко Д.А., Грушевенко Е.В., Ивашенко А.С., Гутник А.Л., Елисеева О.А., Капустин Н.О., Козина Е.О., Курдин А.А., Макаров И.А., Макарова А.С., Малахов В.А., Медьникова С.И., Осипова Е.Д., Сурова Е.В., Тарасов А.Э., Урванцева Л.В., Хоршев А.А., Яковлева Д.Д. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 г. М.: Институт энергетических исследований РАН, 2014. 175 с.

---

7. Алехин Р.А., Кубарьков Ю.П., Закамов Д.В., Умяров Д.В. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3(63). – С. 6-19.

8. Ruifeng Shi, Can Cui, Kai Su, Zaharn Zain. Comparison study of two meta-heuristic algorithms with their applications to distributed generation planning // Energy Procedia, 2011. Vol. 12, no. 1. pp. 245–252.

9. Sattianadan D., Sudhakaran M., Dash S.S., Vijayakumar K., Ravindran, P. Optimal Placement of DG in Distribution System Using Genetic Algorithm. // Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2013. Vol 8298, pp. 639-647.

10. Naderi E., Seifi H., Sepasian M.S. A Dynamic Approach for Distribution System Planning Considering Distributed Generation // IEEE Transactions on Power Delivery, 2012. Vol. 27. № 3. pp. 1313-1322.

11. Соколов П. В. Математическая модель оптимизации структуры распределительных сетей в условиях применения распределенной генерации // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права), 2013, № 6 URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_21064493\\_65201852.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_21064493_65201852.pdf)

12. Тарутин А. В., Набатов А.В. Применение методов генетических алгоритмов для построения множества Парето в задачах многокритериальной оптимизации // Инженерный вестник Дона, 2015, № 4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359).

13. Тарасенко В. В. Генетический алгоритм выбора распределённой генерации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2010. №14 (190). С. 15-19.

14. Обухов С. Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии

---



// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 64-76.

15. Горбенко Д. Генетический алгоритм vs алгоритм роя частиц // habr.com, 2021 URL: [habr.com/ru/post/551890](https://habr.com/ru/post/551890).

16. Фаррахов А.Т. Применение алгоритма роя частиц для решения задач оптимизации с распределенной генерацией // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал, 2021, №3. URL: [agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st\\_307.pdf](https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st_307.pdf)

17. Ибрагим А. Применение эволюционных алгоритмов для повышения эффективности гибридных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии: дис. канд. тех. наук: 05.09.03. Томск, 2020. 199 с.

18. Метод имитации отжига // habr.com, 2011 URL: [habr.com/ru/post/112189](https://habr.com/ru/post/112189).

19. Ke Meng Z.Y., Dong Z.Y., Dong Y. Q., Swarm Intelligence in Power System Planning // International Journal of Clean Coal and Energy. 2012. №2. DOI: 10.4236/ijcse.2013.22B001

20. Родзин С.И. Ресурсосберегающее диспетчирование в электроэнергетике: эвристический алгоритм оптимизации // Вестник ЧГУ, 2018, №1. URL: [cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschee-dispetchirovanie-v-elektroenergetike-evristicheskiy-algoritm-optimizatsii](https://cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschee-dispetchirovanie-v-elektroenergetike-evristicheskiy-algoritm-optimizatsii)

21. Шеина С. Г. Тенденции развития альтернативной энергетики в странах мира и России // Инженерный вестник Дона, 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720).

22. Бенза Н. Н., Карпенко А. П. Модифицированный метод кукушки в задаче глобальной оптимизации // Машиностроение и компьютерные технологии, 2013. №9. URL: [cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannyy-metod-kukushki-v-zadache-globalnoy-optimizatsii](https://cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannyy-metod-kukushki-v-zadache-globalnoy-optimizatsii).

---

23. Tran Van Thang, Ha Duc Nguyen, Nguyen Thanh Thuan, Valeev I.M. Changing the topology of the distribution network using cuckoo search algorithm for power loss minimization and voltage profile improvement // Вестник КГЭУ. 2016. №2 (30). P.66-81

24. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Оптимизация состава и режимов работы фото дизельной системы электроснабжения постоянного тока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. No 4. С. 795–809.

25. Захаров А.И., Чижма С.Н. Моделирование системы управления ветровой энергетической установкой малой мощности // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, No 4. С. 36–50.

### References

1. Bol'shanik P.V., Yevlanov YE.A., Islamutdinov V.F., Islamutdinova D.F., Kovalev V.Z., Rybina V.B., Sannikov D.V., Tat'yankin V.M., Tey D.O., Ustyuzhantseva A.N., Shubina V.I. Issledovaniye evolyutsii, institutsional'nykh usloviy i faktorov razvitiya otrasley ekonomiki severnogo resursodobyvayushchego regiona (na primere Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga - Yugry) [The study of the evolution, institutional conditions and factors of development of the sectors of the economy of the northern resource producing region (on the example of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Ugra)]. Khanty-Mansiysk: Yugorskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. 445 s.

2. Kovalev V. Z., Arkhipova O.V. Neftegazovoye delo. 2014. Vol. 12. № 4. pp. 112-125.

3. Kodaneva S. I. Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya : materialy XX Natsional'noy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Moskow, 2020. pp. 342-348.

4. Denisenko YE.A. Vozobnovlyayemye istochniki energii: sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Renewable Energy Sources: Status and Prospects of Development]. Krasnodar: KuBGAU, 2020. 142 p.
  5. Nikolayeva S. I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7619](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7619).
  6. Kulagin V.A., Arkhipov N.A., Galkin YU.V., Galkina A.A., Gimadi V.I., Grushevenko D.A., Grushevenko YE.V., Ivashenko A.S., Gutnik A.L., Yeliseyeva O.A., Kapustin N.O., Kozina YE.O., Kurdin A.A., Makarov I.A., Makarova A.S., Malakhov V.A., Med'nikova S.I., Osipova YE.D., Surova YE.V., Tarasov A.E., Urvantseva L.V., Khorshev A.A., Yakovleva D.D. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 g [Forecast of energy development of the world and Russia until 2040]. Moskva: Institut energeticheskikh issledovaniy RAN, 2014. 175 p.
  7. Alekhin R.A., Kubar'kov YU.P., Zakamov D.V., Umyarov D.V. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki. 2019. № 3(63). pp. 6-19.
  8. Ruifeng Shi, Can Cui, Kai Su, Zaharn Zain. Energy Procedia, 2011. Vol. 12, № 1. pp. 245–252.
  9. Sattianadan D., Sudhakaran M., Dash S.S., Vijayakumar K., Ravindran, P. Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2013. Vol. 8298, pp. 639-647.
  10. Naderi E., Seifi H., Sepasian M.S. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012. Vol. 27. № 3. pp. 1313-1322.
  11. Tarutin A. V., Nabatov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359).
  12. Sokolov P. V. Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii (Baykal'skiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i prava), 2013, № 6. URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_21064493\\_65201852.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_21064493_65201852.pdf)
-

13. Tarasenko V. V. Vestnik YUURGU. Seriya: Energetika. 2010. №14 (190). pp. 15-19.
  14. Obukhov S. G., Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2020. Vol. 20. № 2. pp. 64-76.
  15. Gorbenko D. Geneticheskiy algoritm vs algoritm roya chastits [Genetic algorithm vs. particle swarm algorithm]. Habr.com, 2021. URL: [habr.com/ru/post/551890](https://habr.com/ru/post/551890).
  16. Farrakhov A.T. Primeneniye algoritma roya chastits dlya resheniya zadach optimizatsii s raspredelennoy generatsiyey [Application of particle swarm algorithm for solving optimization problems with distributed generation]. Agroecoinfo: Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal, 2021, № 3. URL: [agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st\\_307.pdf](https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st_307.pdf)
  17. Ibragim A. Primeneniye evolyutsionnykh algoritmov dlya povysheniya effektivnosti gibridnykh sistem elektrosnabzheniya na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Application of evolutionary algorithms to improve the efficiency of hybrid power supply systems based on renewable energy sources]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.09.03. Tomsk, 2020. 199 p.
  18. Metod imitatsii otzhiga [Annealing simulation method]. Habr.com, 2011. URL: [habr.com/ru/post/112189](https://habr.com/ru/post/112189).
  19. Ke Meng Z.Y., Dong Z.Y., Dong Y. Q., International Journal of Clean Coal and Energy. 2012. №2. DOI: 10.4236/ijcce.2013.22B001
  20. Rodzin S.I. Vestnik CHGU, 2018, №1. URL: [cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschee-dispetchirovanie-v-elektroenergetike-evristicheskiy-algoritm-optimizatsii](https://cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschee-dispetchirovanie-v-elektroenergetike-evristicheskiy-algoritm-optimizatsii)
  21. Sheina S. G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720).
-



22. Benza N. N., Karpenko A. P. Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii, 2013. №9. URL: [cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannyy-metod-kukushki-v-zadache-globalnoy-optimizatsii](http://cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannyy-metod-kukushki-v-zadache-globalnoy-optimizatsii).

23. Tran Van Thang, Ha Duc Nguyen, Nguyen Thanh Thuan, Valeev I.M. Vestnik KGEU. 2016. №2 (30). pp.66-81.

24. Lukutin B.V., Murav'yev D.I. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. Vol. 24. № 4. pp. 795–809.

25. Zakharov A.I., Chizhma S.N. Materialovedeniye. Energetika. 2020. Vol. 26, №4. pp. 36–50.