

Электротехника

УДК 621.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е.Е. Миргородская¹, Н.П. Митяшин², И.И. Артюхов³

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru

Аннотация. *Предлагается решение задачи определения оптимального расположения нескольких электростанций в некотором регионе. Эти станции получают первичную энергию от возобновляемых источников, таких как солнечные панели и ветряные турбины. При этом в условие задачи входит наличие информации о нескольких перспективных участках данного региона для размещения таких электростанций, а также о величине и распределении нагрузок. Разработанный алгоритм решения задачи выбора оптимального местоположения электростанций состоит из нескольких этапов. Содержание первого этапа алгоритма заключается в ранжировании возможных площадок для расположения электростанций с помощью локальных критериев, в качестве которых предложены удельная расчетная стоимость создания электростанции, удаленность предполагаемого расположения электростанции от нагрузок и населенных пунктов. Второй этап алгоритма состоит в формировании множества возможных наборов площадок для размещения электростанций. На заключительном этапе алгоритма осуществляется их ранжирование с помощью системных критериев, которые оценивают эти наборы площадок для расположения электростанций как систему электроснабжения. В качестве системных критериев предложены расчетная стоимость создания системы электроснабжения на основе электростанций, обустроенных на площадках оцениваемого набора, удельная расчетная стоимость создания электростанций, примененная к набору электростанций с линиями электропитания как к автономной системе энергоснабжения, а также средний рейтинг площадок. При этом лицо, принимающее решение, после ознакомления со значениями системных критериев устанавливает по каждому из них критические границы. Результатом работы алго-*

¹ Миргородская Екатерина Евгеньевна, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах», к.т.н., доцент.

Митяшин Никита Петрович, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах», д.т.н., профессор.

Артюхов Иван Иванович, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», д.т.н., профессор.

ритма является совокупность перспективных наборов площадок для расположения нескольких электростанций в заданном регионе, оценки которых по системным критериям наилучшим образом соответствуют предпочтениям лица, принимающего решение. Особенностью предлагаемого подхода является участие лица, принимающего решение, во всех этапах проектирования.

Ключевые слова: *многокритериальная оптимизация, местоположение, автономная система электроснабжения, возобновляемая энергия, площадка, центр нагрузки, алгоритм*

Введение

Возобновляемая энергетика на основе солнечной, ветровой, приливной и других источников первичной энергии, заменяющая тепловые и атомные электростанции, вызывает все более возрастающий интерес вследствие экологических проблем, а также необходимости избежать катастроф техногенного происхождения. Одной из важных задач, решение которых связано с этим, является проблема обоснованного выбора альтернативных вариантов местоположения электростанций.

Определение альтернативных вариантов местоположения электростанций должно производиться на основе обоснованных методик, учитывающих большое число факторов. Местоположение электростанции должно удовлетворять требованиям, состоящим в возможности обеспечения безопасности населения и защиты окружающей среды как при нормальной эксплуатации, так и с учетом процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения. При выборе места размещения электростанции большую роль играют также экономические, логистические, культурные, экологические и другие факторы.

Таким образом, выбор площадки для размещения электростанций является многокритериальной задачей. В работах по рассматриваемой тематике большое внимание уделяется выбору критериев и методик оптимизации. В работе [1] в качестве критериев использовались метеорологические характеристики, текущее электропотребление и установленная мощность электростанции, а при оптимизации применялось суммирование критериев с учетом весовых коэффициентов, определяемых на основе экспертных оценок. В работах [2–5] используются методы многокритериальной аксиоматической теории полезности, анализа иерархий, а также их комбинации. В качестве критериев используются требования, перечисленные выше. В частности, в работе [4] при выборе местоположения электростанции учитывались географические и метеорологические особенности местности.

В настоящей работе обсуждаются и решаются задачи определения оптимального расположения гибридных микрогрид (ГМГ) при заданном множестве центров нагрузок в данном регионе. ГМГ строится из нескольких источников генерации, получающих первичную энергию разной физической природы, и прежде всего на основе солнечных батарей, микротурбин и ветрогенераторов [6–9]. При этом в условии задачи входит наличие информации о нескольких перспективных площадках для строительства ГМГ. Считаются известными расчетные значения производительности и стоимости строительства электростанции для каждой такой площадки. Известны также места расположения центров нагрузок и их мощности.

В работе [10] приводится методика оптимального выбора расположения одной ГМГ при заданном множестве центров нагрузок. В случае, когда центры на-

грузок разброшены на достаточно обширной территории, создание единственного центра генерации может быть нецелесообразным, в частности, из-за значительной протяженностей линий передачи генерированной энергии. При этом возникает задача определения оптимального выбора размещения не одного, а нескольких центров расположения.

Постановка основной задачи

Задается множество перспективных площадок Ξ некоторого региона для обустройства ГМГ с целью энергоснабжения множества H центров нагрузок.

Для каждой площадки s_j из Ξ задаются расчетная мощность p_j и расчетная стоимость ρ_j обустройства ГМГ, построенных на данной площадке.

Для каждого центра нагрузок h_i из H задается требуемая мощность g_i .

Кроме этого, должны быть рассчитаны стоимости r_{ji} всех линий электропередачи от каждой площадки s_j до всех центров нагрузки h_i с учетом требуемых мощностей g_i .

Предполагается, что число площадок m существенно превосходит число центров нагрузок n , а их суммарная мощность также превосходит суммарную мощность центров нагрузок.

Необходимо найти оптимальный набор площадок D из Ξ , обеспечивающий электроснабжение центров нагрузок H .

Множество критериев, оценивающих качество наборов площадок из Ξ с точки зрения обеспечения электроснабжения множества нагрузок, в данной оптимизационной задаче целесообразно разделить на две группы: группу локальных критериев (оценивающих отдельные площадки s_j) и группу системных критериев (оценивающих наборы площадок D в целом как потенциальных систем электроснабжения нагрузок H).

Алгоритм решения основной задачи

Алгоритм решения поставленной задачи содержит несколько этапов.

Содержание этапа 1 алгоритма решения задачи состоит в ранжировании возможных пунктов местоположения ГМГ с помощью локальных критериев. Под локальными критериями здесь понимаются критерии, оценивающие степень целесообразности использования каждого пункта s_j для размещения в нем ГМГ для питания нагрузок Ξ . В качестве таких критериев мы рассматриваем следующие показатели.

Критерий φ_1 , рассчитываемый как отношение расчетной стоимости создания ГМГ в данном пункте s_j к ее расчетной производительности:

$$\varphi_{1,j} = \rho_j / p_j,$$

где ρ_j и p_j – стоимость создания и мощность ГМГ, полученные в результате предварительных расчетов или экспертных оценок. Эту величину можно назвать удельной расчетной стоимостью создания ГМГ.

Критерий φ_2 , оценивающий удаленность предполагаемого расположения s_j от нагрузок Ξ . В работе этот критерий рассчитывается как расстояние от точки s_j до медианы «центра мощности» M нагрузок Ξ . Координаты M целесообразно рассчитывать с учетом номинальных значений потребляемых мощностей нагрузок g_i [10].

Наличие в составе ГМГ ветроустановок и микротурбин вводит ограничения на их расположение относительно населенных пунктов. Поэтому введен критерий φ_3 , оценивающий удаленность площадок для обустройства ГМГ от населен-

ных пунктов. Значение этого критерия целесообразно устанавливать экспертно в диапазоне от 0 до 1 с учетом экологических норм, причем $\varphi_3(s_j)$ имеет тем большее значение, чем дальше от населенного пункта находится площадка и чем больше предполагаемая мощность ГМГ.

Введенные локальные критерии φ_1 и φ_2 имеют различный технико-экономический смысл и задаются с помощью различных единиц измерения. Большинство методов многокритериальных задач оптимизации требуют перехода к безразмерным нормализованным аналогам критериев. В настоящей работе применен метод нормализации, описанный в [11] и модернизированный в работах [12, 13]. Этот метод основан на введении некоторых границ в области изменения каждого критерия, задаваемых в результате анализа значений, которые принимаются заданными альтернативами с учетом предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР).

Пусть для некоторого критерия φ_i для всех возможных пунктов s_j из Ξ известны значения $\varphi_{i,j}$, $j = \overline{1, m}$, причем $\varphi_{i,0}$ – наилучшее, а $\varphi_{i,p}$ – наихудшее значения из всех $\varphi_{i,j}$ (т. е. для минимизируемого критерия это соответственно минимальное и максимальное, а для максимизируемого – соответственно максимальное и минимальное). Тогда при нормализации каждое s_j получает оценку $\mu_{i,j}$ из диапазона от 0 до 1 тем большую, чем лучше значение соответствующего ненормализованного критерия $\varphi_{i,j}$, рассчитываемое по формуле

$$\mu_{i,j} = \frac{(\mu_{i,0} - \mu_{i,p})\varphi_{i,j} + \mu_{i,p}\varphi_{i,0} - \mu_{i,0}\varphi_{i,p}}{\varphi_{i,0} - \varphi_{i,p}},$$

где $\mu_{i,0}$ и $\mu_{i,p}$ – назначенные ЛПР нормализованные значения, соответствующие ненормализованным значениям и $\varphi_{i,p}$, причем $0 \leq \mu_{i,p} < \mu_{i,0} \leq 1$.

Оптимальное и критическое значения φ_i^+ и φ_i^- , используемые в [11], для которых их нормализованные аналоги имеют там значения 1 и 0, равны

$$\varphi_i^+ = \frac{(1 - \mu_{i,0})\varphi_{i,0} - (1 - \mu_{i,p})\varphi_{i,p}}{\mu_{i,0} - \mu_{i,p}}, \quad \varphi_i^- = \frac{\mu_{i,0}\varphi_{i,p} - \mu_{i,p}\varphi_{i,0}}{\mu_{i,0} - \mu_{i,p}}.$$

Процесс нормализации поясняется рис. 1.

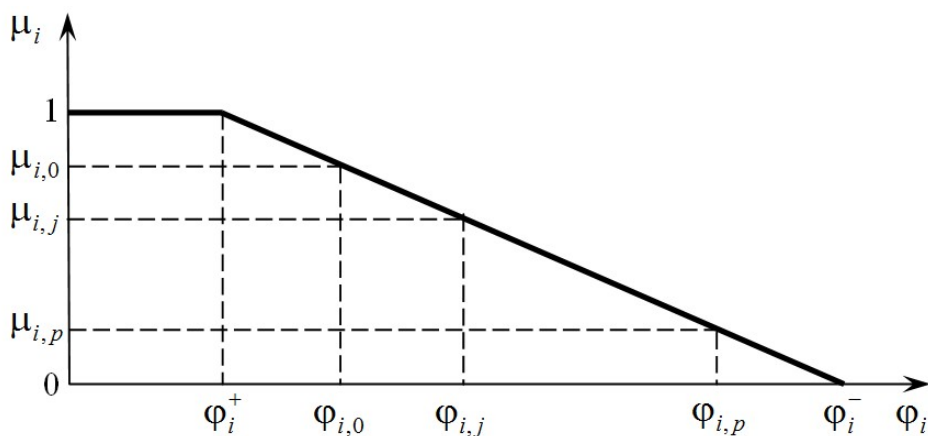


Рис. 1. Нормализация значений минимизируемого критерия φ_i

Рекомендуемое значение величины $\mu_{i,0}$ следует считать равным 0,9, что позволяет при уточнении наилучшего ненормализованного значения воспользоваться первоначальной шкалой нормализации.

Для величины $\mu_{i,p}$ выбирается значение из диапазона 0,3–0,5, причем меньшему значению соответствует более высокое требование к эффективности отбираемых ГМГ.

Поскольку критерий φ_3 по определению имеет нормализованный вид, то с целью унификации обозначений далее полагаем $\mu_3(s_j) = \varphi_3(s_j)$.

Применим эту методику к нормализации критерия φ_1 . Задание нормализованных значений $\mu_{1,0}$ и $\mu_{1,p}$, соответствующих значениям $\varphi_{1,0}$ и $\varphi_{1,p}$, следует согласовать со средней удельной расчетной стоимостью $\varphi_{1,m}$ создания ГМГ в регионах с климатическими, экономическими и экологическими условиями, аналогичными таковыми в рассматриваемой задаче. Поэтому величину $\varphi_{1,0}$ следует выбрать близкой к $\varphi_{1,m}$.

Ранжирование точек множества Σ на основании критериев μ_1 , μ_2 и μ_3 имеет целью выделение наиболее перспективных пунктов для размещения ГМГ и удаление из этого множества наихудших площадок с точки зрения требования ЛППР. Ранжирование производится в предлагаемом алгоритме с помощью следующего обобщенного критерия:

$$\mu(s_j) = \min(\mu_1(s_j), \mu_2(s_j), \mu_3(s_j)),$$

где более высокий ранг получают альтернативы, имеющие большие значения критерия $\mu(s_j)$.

Для удаления наихудших пунктов s_j ЛППР назначается минимально допустимое значение критерия μ , далее обозначаемое через μ_{\min} . Таким образом, из множества Ξ удаляются все пункты, для которых $\mu(s_j) < \mu_{\min}$.

Величина μ_{\min} может корректироваться на последующих этапах выполнения алгоритма.

После возможного удаления число элементов в Ξ изменяется. Для дальнейшего необходимо перенумеровать элементы в Ξ так, чтобы новая нумерация соответствовала результатам ранжирования по локальным критериям. Число элементов во множестве Σ будем по-прежнему обозначать через m .

Этап 2 алгоритма состоит в формировании множества возможных наборов пунктов для размещения ГМГ, питающих нагрузку из Ξ . Очевидно, что число таких наборов равно 2^m .

Каждому такому набору сопоставим m -разрядный двоичный код d_k , j -й разряд которого определяется как

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} 1, & s_j \in \Sigma \\ 0, & s_j \notin \Sigma \end{cases}.$$

В соответствии с принятым обозначением номер разряда j совпадает с рангом элемента s_j во множестве Σ .

Номер k рассматриваемого набора удобно считать равным десятичному значению кода, т. е.

$$k = \sum_{j=0}^{m-1} \delta_{k,j+1} \cdot 2^j,$$

а сам набор обозначить как D_k .

Суммарная расчетная мощность набора площадок D_k равна

$$P(D_k) = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \delta_{k,j}.$$

Нас могут интересовать только те наборы, мощность которых соответствует суммарной расчетной мощности G нагрузок Ξ , равной

$$G = \sum_{i=1}^n g_i.$$

Поскольку расчетные значения мощностей могут содержать погрешности, то целесообразно рассматривать только те наборы, для которых $P(D_k) \geq 1.2G$.

В процессе выполнения алгоритма значение коэффициента может быть изменено.

Этап 3 заключается в ранжировании наборов из Ξ с помощью системных критериев, которые оценивают наборы D_k для расположения ГМГ как систем электроснабжения нагрузки Ξ .

В качестве первого системного критерия Ψ_1 целесообразно использовать расчетную стоимость создания системы электроснабжения нагрузок H на основе ГМГ, обустроенных в пунктах набора, входящих в данный набор.

Очевидно, что значение этого критерия $\Psi_1(D_k)$ является суммой двух слагаемых

$$\Psi_1(D_k) = \Psi_{1,1}(D_k) + \Psi_{1,2}(D_k),$$

где первое слагаемое $\Psi_{1,1}(D_k)$ является суммарной расчетной стоимостью строительства ГМГ набора D_k , т. е.

$$\Psi_{1,1}(D_k) = \sum_{j=1}^m \rho_j \cdot \delta_{k,j},$$

где ρ_j – расчетная мощность строительства ГМГ на площадке s_j . Второе слагаемое $\Psi_{1,2}(D_k)$ является минимальным значением стоимости строительства линий электропередач, соединяющих ГМГ из набора D_k и центры нагрузок H . Для получения значения $\Psi_{1,2}(D_k)$ необходимо определить оптимальное распределение нагрузок из Ξ по пунктам s_j , входящим в этот набор с точки зрения суммарной стоимости соответствующих линий электропередачи. Для нахождения этого оптимального распределения необходимо решать вспомогательную задачу, формулировка и алгоритм решения которой описаны ниже.

В качестве второго системного критерия $\Psi_2(D_k)$ рассмотрим отношение расчетной стоимости создания системы электроснабжения нагрузок H на основе ГМГ набора к ее расчетной мощности

$$\Psi_2(D_k) = \frac{\Psi_1(D_k)}{P(D_k)}.$$

Этот критерий аналогичен локальному критерию ϕ_1 , однако применим к набору ГМГ с ЛЭП для питания нагрузок H как к автономной системе энергоснабжения.

Третий системный критерий $\Psi_3(D_k)$ рассчитывается как сумма рейтингов площадок ГМГ, входящих в набор D_k , деленная на число таких площадок. Таким образом, $\Psi_3(D_k)$ является средним рейтингом площадок из D_k .

Поскольку информация о площадках Σ носит предварительный характер, то выбор единственного оптимального с точки зрения этой информации набора площадок является нецелесообразным.

Ввиду этого результатом работы алгоритма следует считать некоторую совокупность перспективных наборов, оценки которых по системным критериям наилучшим образом соответствуют предпочтениям ЛПР.

Отбор такой совокупности наборов площадок Δ предлагается по ранее упомянутой методике, описанной, например, в [11]. Согласно этой методике ЛПР после ознакомления со значениями системных критериев Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 устанавливает по каждому из них критические значения, обозначаемые далее через $\tilde{\Psi}_1, \tilde{\Psi}_2, \tilde{\Psi}_3$.

Интерес представляют те наборы площадок D_k , для которых для всех трех критериев выполняется условие

$$\Psi_i(D_k) > \tilde{\Psi}_i, i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Рассмотрим случай, когда число площадок, для которых выполняется последнее условие с точки зрения ЛПР, слишком велико.

В этом случае ЛПР предоставляется возможность ужесточить требования, к значениям критических границ. Это может повысить качество отобранных наборов и сократить их число.

В противоположном случае может оказаться, что число наборов площадок, удовлетворяющих требованиям (1), либо пусто, либо мало с точки зрения ЛПР. В этом случае приходится смягчать требования (1), ухудшая значения $\tilde{\Psi}_i$.

В обоих случаях ЛПР добивается приемлемого числа наборов площадок из Δ , перспективных для обустройства на их основе автономной системы электропитания (АСЭ) нагрузок H .

Преимущество такого метода оптимизационного выбора состоит в его интерактивности, т. е. возможности участия ЛПР в процессе отбора альтернатив, а также учета его предпочтений.

Окончательный выбор набора площадок D_{opt} может быть осуществлен после более тщательных исследований площадок, входящих в выделенную совокупность наборов Δ , позволяющих уточнить первоначальные расчетные значения мощностей p_j и стоимостей строительства r_j .

Постановка вспомогательной задачи

При расчете системного критерия Ψ_1 было необходимо предварительно найти для данного набора D_k такое распределение центров нагрузки между питающими их ГМГ, при котором соответствующие ЛЭП имели бы минимальную суммарную стоимость. Для нахождения такого распределения необходимо для каждого D_k решать вспомогательную задачу, состоящую в следующем. Решение такой задачи представляет интерес, если число n центров нагрузок h_i значительно превосходит число m ГМГ, причем суммарная мощность ГМГ существенно выше общей мощности центров нагрузок.

Рассматривается множество D , состоящее из m ГМГ s_j , и множество H , содержащее из n центров нагрузок h_i . Известны номинальные генерируемые мощности p_j и номинальные мощности потребления g_i центров нагрузки, а также стоимости $r_{i,j}$ строительства ЛЭП, связывающих центры нагрузок h_i с ГМГ s_j , обеспечивающих передачу мощности g_i .

Необходимо найти распределение центров нагрузки из H между питающими их ГМГ из D . Это распределение можно задать с помощью матрицы Q , элементы $q_{i,j}$ которой равны 1, если центру h_i назначена ГМГ s_j , 0 – в противном случае.

На распределение Q накладываются следующие условия:

1. Каждый центр нагрузки h_i получает питание от единственной ГМГ, т. е.

$$\sum_{j=1}^m q_{i,j} = 1. \quad (2)$$

2. Для каждого ГМГ s_j выполняется ограничение по мощности

$$\sum_{i=1}^n q_{i,j} g_i \leq p_j. \quad (3)$$

3. Суммарная стоимость ЛЭП имеет минимальное значение

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l q_{i,j} r_{i,j} \rightarrow \min.$$

Эвристический алгоритм решения подобной оптимизационной задачи описан в работе [11]. Он основан на последовательном решении нескольких задач о назначении [12].

Пример решения основной задачи

Рассмотрим сформулированную в начале статьи задачу на примере следующих исходных данных.

В некотором регионе имеется 21 центр нагрузки общей мощностью 2057 кВт. На рис. 2 показано распределение мощностей по этим центрам.

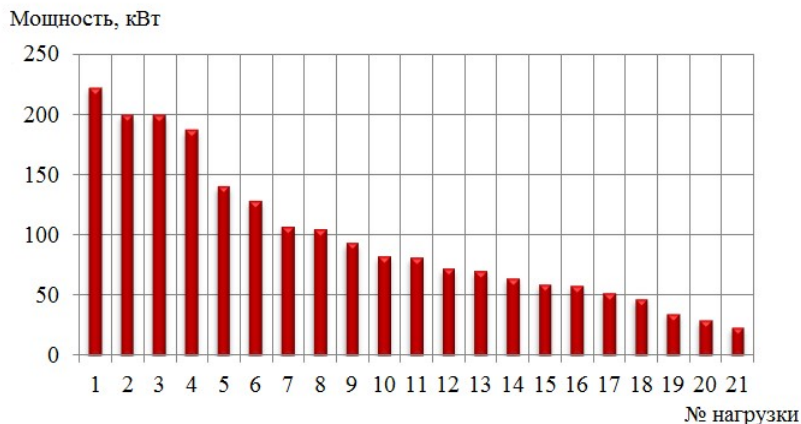


Рис. 2. Распределение мощности центров нагрузки

Для питания этих нагрузок планируется создать несколько электростанций на основе возобновляемых первичных источников энергии. В связи с этим рассмотрено 11 перспективных районов данного региона. Предварительные исследования позволили получить расчетную мощность p и расчетную стоимость ρ размещения станции для каждой из них. В табл. 1 эти значения представлены во втором и третьем столбцах.

В табл. 1 также приведены результаты ранжирования данных 11 площадок по трем рассмотренным в работе локальным критериям, нормированные значения которых представлены в столбцах μ_1 , μ_2 , μ_3 . Интегральный показатель μ по-

звolyает исключить недопустимые области и определить ранги остальных шести областей, представленных в последнем столбце этой таблицы.

На основе шести выбранных площадок можно сформировать всего 56 вариантов распределения 21 центра нагрузок, в каждом из которых выполняются условия (2) и (3), т. е. реализуется соответствие мощностей нагрузок мощностям питающих их ГМГ. Из этого числа допустимых по мощности вариантов с помощью системных критериев, предложенных в работе, выбраны три перспективных варианта реализации систем АСЭ. Каждый из этих вариантов содержит три ГМГ, расположенные на площадках, получивших ранги от 1 до 6.

Номера вариантов определяются десятичными значениями двоичных кодов, разряды которых равны рангам площадок, входящих в соответствующий набор. Таким образом, множество с номером 50 содержит ГМГ и площадки с номерами 10, 7 и 4, которые имеют ранги 2, 5 и 6 в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Рейтинг по территориям

№ п/п	p , кВт	ρ , тыс. руб.	μ_1	μ_2	μ_3	μ	Ранг
1	745	39 040	0,90	0,49	0,60	0,49	3
2	810	50 560	0,76	0,72	0	0	–
3	795	55 680	0,66	0,89	0,90	0,66	1
4	900	52 480	0,82	0,81	0,40	0,40	5
5	750	58 240	0,55	0,63	0	0	–
6	810	56 960	0,65	0,90	0	0	–
7	750	42 880	0,87	0,74	0,35	0,35	6
8	900	70 400	0,62	0,54	0,31	0,31	–
9	600	46 080	0,76	0,56	0,46	0,46	4
10	780	56 960	0,93	0,62	0,52	0,52	2
11	500	45 440	0,30	0,30	0	0	–

В табл. 2 приведены оценки перспективных множеств по системным критериям Ψ_1 , Ψ_2 и Ψ_3 в соответствующих столбцах. Значение критерия Ψ_1 оценивает общую стоимость системы электроснабжения на соответствующем наборе территорий. При отборе наборов по этому критерию ограничение было сделано на уровне 243 200 тыс. руб. В 5-м и 6-м столбцах данной таблицы представлены составляющие этой стоимости, затраченные на оборудование самой электростанции $Pr(S)$ и линии передачи электроэнергии к соответствующим им потребителям $Pr(L)$.

Таблица 2

Полученные результаты

№	Ψ_1 , тыс. руб.	Ψ_2	Ψ_3	$Pr(S)$, тыс. руб.	$Pr(L)$, тыс. руб.	P_f , кВт
50	228 416	1,74	4,33	170 240	58 176	413
26	233 920	1,78	3,67	152 320	81 600	413
49	242 688	1,84	4,00	168 960	73 728	428

Ограничение по удельной стоимости системы электроснабжения (критерий Ψ_2) осуществлялось на уровне 2, а по среднему значению рангов множества областей (критерий Ψ_3) – на уровне 5.

В табл. 2 представлен окончательный выбор с множествами, для которых соблюдаются ограничения по всем трем системным критериям. В последнем столбце данной таблицы приведены значения свободной мощности, т. е. запаса мощности, который оценивает возможность развития нагрузок региона.

Результаты работы алгоритма также содержат оптимальное распределение центров нагрузки по множеству питающих их станций и по стоимости линий передачи. На рис. 3 показано такое распределение для варианта с номером 50. Красным цветом отмечен набор электростанций, зеленым – набор центров нагрузок.

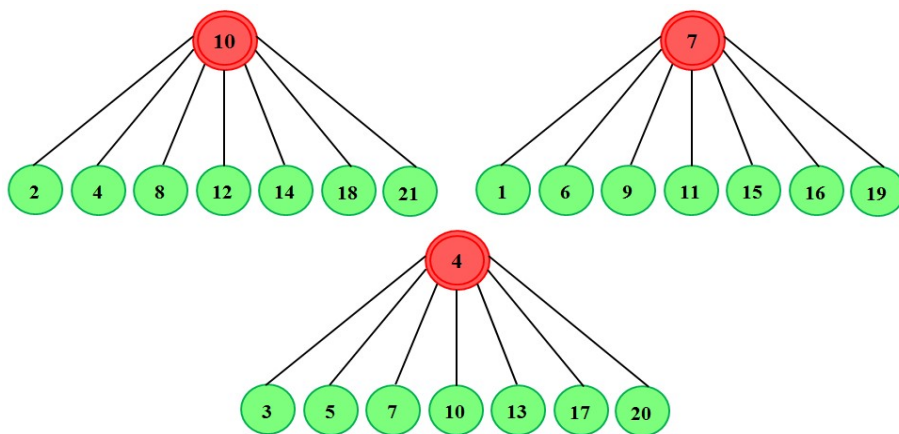


Рис. 3. Распределение нагрузок по питающим их электростанциям

Окончательный выбор можно будет сделать после более тщательного изучения этих трех рекомендуемых наборов.

Выводы

В статье ставится задача многокритериального выбора местоположения в данном регионе электростанций, использующих возобновляемые источники первичной энергии. Исходной информацией являются данные о перспективных площадках для возможного размещения электростанций, величине и распределении нагрузок в рассматриваемом регионе. Для решения задачи предложены критерии оценки отдельных площадок, а также их наборов как основы для организации автономных систем электроснабжения. Разработан алгоритм многокритериального выбора местоположения электростанций и построения систем электроснабжения. Особенностью предлагаемого подхода является возможность участия ЛПР на всех этапах проектирования, а также его применения для решения подобных задач, в том числе при разработке гибких систем электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмед З.А., Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 23 (1). С. 18–32.

2. *Панкратьев П.С.* Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности, с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение // Вестник ИрГТУ. 2019. Т. 23. № 2. С. 320–334.
3. *Артёмьев А.Ю., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н.* Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 116–122.
4. *Панкратьев П.С.* Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением с учетом многих критериев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (38). С. 89–96.
5. *Шакиров В.А., Панкратьев П.С.* Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 141–147.
6. *Ranganathan P., Nygard K.E.* A distributed linear programming models in a smart grid. Cham: Springer, 2017. 213 p.
7. *Jiménez-Fernández S., Camacho-Gómez C., Mallol-Poyato R., Fernández J.C., Ser J.D., Portilla-Figueras A., Salcedo-Sanz S.* Optimal microgrid topology design and siting of distributed generation sources using a multi-objective substrate layer coral reefs optimization algorithm // Sustainability. 2019. Vol. 11 (1). Pp. 169–190.
8. *Saharia B.J., Brahma H., Sarmah N.* A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2018. Vol. 10. Pp. 1–41.
9. *Schütz T., Hu X., Fuchs M., Müller D.* Optimal design of decentralized energy conversion systems for smart microgrids using decomposition methods // Energy. 2018. Vol. 156. Pp. 250–263.
10. *Статников П.Б., Мамусов Н.Б.* Многокритериальное проектирование машин. М.: Знание, 1989. 48 с.
11. *Mirgorodskaya E., Mityashin N., Tomashevskiy Yu., Petrov D., Vasiliev D.* A technique for multicriteria structural optimization of a complex energy system based on decomposition and aggregation // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 337. Pp. 194–208.
12. *Wagner H.M.* Principles of operations research: with applications to managerial decisions. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 p.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2022 г.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL LOCATION OF POWER PLANTS AS A PART OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

*E.E. Mirgorodskaya*¹, *N.P. Mityashin*², *I.I. Artyukhov*³

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Polytechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru

Abstract. *The paper proposes the problem solution of optimal location determining of several power stations in some region. These stations receive primary energy from renewable sources, such as solar panels and wind turbines. At the same time, the condition of the problem includes the availability of information on several perspective areas in this region for the placement of such power stations, as well as information of values and distribution of loads. The developed algorithm for solving of the optimal location selection problem of power stations consists of several stages. The content of the first stage of the algorithm is ranking of possible areas for the location of power stations using local criteria, which are proposed as the specific estimated cost of station arrangement, the remoteness of the proposed location of the power station from loads and settlements. The second stage of the algorithm consists in a set formation of possible areas for the location of stations. And at the final stage of the algorithm, they are ranked using system criteria that evaluate these sets of areas for the location of power stations as a power supply system. The estimated cost of a power supply system arrangement based on power stations, located on areas of the rated set, the specific estimated cost of power stations arrangement, applied to the set of power stations with power lines as an autonomous power supply system, as well as the average rating of areas are proposed as system criteria. In this case, the decision maker, after familiarizing with values of system criteria, sets critical boundaries for each of them. The result of the algorithm is a certain totality of prospective sets for the location of several power stations in a given region, estimates of which according to system criteria are the best correspond to preferences of the decision maker. A feature of the proposed approach is the participation of the decision maker at all stages of design.*

Keywords: *multicriteria optimization, location, autonomous power supply system, renewable energy, area, load center, algorithm*

REFERENCES

1. *Akhmed Z.A., Pavlyuchenko D.A., Less V.M.* Mathematical model of optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2021. no. 23(1). Pp. 18–32 (In Russian).
2. *Pankrat'yev P.S.* Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multi-attribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers // *Vestnik IRGTU*. 2019. Vol. 23, no 2. Pp. 320–334 (In Russian).

¹ *Ekaterina E. Mirgorodskaya (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

² *Nikita P. Mityashin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

³ *Ivan I. Artyukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

3. *Artem'yev A.Yu., Shakirov V.A., Yakovkina T.N.* Criteria-based choice of areas for siting the wind power plants // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2016. no. 3 (31). Pp. 116–122 (In Russian).
4. *Pankrat'yev P.S.* Location of a thermal power plant in a district with decentralized electricity supply taking into account many criteria // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2018. no. 2 (38). Pp. 89–96 (In Russian).
5. *Shakirov V.A., Pankrat'yev P.S.* A choice of the power plant construction site location under conditions of risk with analytic hierarchy process // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2014. no. 4 (44). Pp. 141–147 (In Russian).
6. *Ranganathan P., Nygard K.E.* A distributed linear programming models in a smart grid. Cham: Springer, 2017. 213 p.
7. *Jiménez-Fernández S., Camacho-Gómez C., Mallol-Poyato R., Fernández J.C., Ser J.D., Portilla-Figueras A., Salcedo-Sanz S.* Optimal microgrid topology design and siting of distributed generation sources using a multi-objective substrate layer coral reefs optimization algorithm // *Sustainability*. 2019. Vol. 11 (1). Pp. 169–190.
8. *Saharia B.J., Brahma H., Sarmah N.* A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. Vol. 10. Pp. 1–41.
9. *Schütz T., Hu X., Fuchs M., Müller D.* Optimal design of decentralized energy conversion systems for smart microgrids using decomposition methods // *Energy*. 2018. Vol. 156. Pp. 250–263.
10. *Stanikov R.B., Matusov N.B.* Mnogokriterial'noye proyektirovaniye mashin [Multicriteria machine design]. Moscow, Znaniye, 1989. 48 pp. (In Russian).
11. *Mirgorodskaya E., Mityashin N., Tomashevskiy Yu., Petrov D., Vasiliev D.* A technique for multicriteria structural optimization of a complex energy system based on decomposition and aggregation // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. Vol. 337. Pp. 194–208.
12. *Wagner H.M.* Principles of operations research: with applications to managerial decisions. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 p.