

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (MICROGRIDS) С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. А. Попов, И. А. Дмитренко, А. В. Сподинская, Я. И. Степанель

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: yanstepanel@gmail.com

Представлены результаты исследований, связанных с разработкой алгоритма выбора оптимальных структуры и параметров генерирующих источников в автономной микросети. Предложенная для данной цели процедура позволяет учесть неопределенность исходной информации, а также многокритериальный характер рассматриваемой задачи. Сравнение предварительно сформированных альтернативных вариантов построения микросети осуществляется на основе построения и анализа модифицированных многомерных платежных матриц с использованием критериев теории игр и подхода Беллмана-Заде к многокритериальному принятию решений. Предложенный алгоритм позволяет эффективно учесть широкий спектр данных относительно технических, экономических, экологических, социальных и т.д. аспектов проекта, получить достаточно гармоничное по всем критериям решение задачи, принадлежащее области компромиссов.

Ключевые слова: микросеть, теория игр, альтернативные источники энергии, многокритериальное принятие решений.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР СТРУКТУРИ І ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ (MICROGRIDS) З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

В.А. Попов, І.А. Дмитренко, А.В. Сподинська, Я.І. Степанель

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: yanstepanel@gmail.com

Наведені результати досліджень, пов'язаних з розробкою алгоритму вибору оптимальних структури і параметрів генеруючих джерел в автономній мікромережі. Запропонована для даної мети процедура дозволяє врахувати невизначеність вихідної інформації, а також багатокритеріальний характер задачі, що розглядається. Порівняння попередньо сформованих альтернативних варіантів побудови мікромережі здійснюється на основі побудови та аналізу модифікованих багатовимірних платіжних матриць з використанням критеріїв теорії ігор і підходу Беллмана-Заде до багатокритеріального прийняття рішень. Запропонований алгоритм дозволяє ефективно враховувати широкий спектр даних щодо технічних, економічних, екологічних, соціальних і т.і. аспектів проекту, отримати достатньо гармонійне за всіма критеріями вирішення задачі, що належить області компромісів.

Ключові слова: мікромережа, теорія ігор, альтернативні джерела енергії, багатокритеріальне прийняття рішень.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одной из особенностей развития современной мировой энергетики является масштабное расширение использования новых технологий генерации и распределения энергии, сопровождаемое созданием интеллектуальных сетей (*smart grid*) и микросетей (*microgrids*), в качестве их важного структурного элемента. Целесообразность формирования микросетей объясняется рядом причин. Прежде всего, в микросетях проще реализовать широкую интеграцию возобновляемых источников энергии, а также источников, использующих местные сырьевые ресурсы. Помимо этого очевидно, что в этих условиях введение в работу нового современного генерирующего оборудования реализуется быстрее, возникает возможность снизить эксплуатационные затраты, уровень выбросов в окружающую среду. Компактное расположение источников и потребителей энергии позволяет сократить потери энергии, связанные с ее передачей и распределением по электрическим и тепловым сетям. Как показывают исследования и уже существующая практика, в микросети обеспечить высокую надежность легче, чем при ориентации исключительно на централизованное электроснабжение. При этом микросеть может работать как в автономном режиме, так и параллельно с соседними микросетями или интегрироваться в электрические сети энергосистем.

Вместе с тем, для того, чтобы микросеть отвечала указанным требованиям, необходимо выполнение ряда условий. Одной из важнейших и первоочередных задач является аргументированный выбор структуры первичных источников энергии и оптимального соотношения номинальных мощностей всех типов генерирующих источников, входящих в состав создаваемой микросети.

Здесь важно подчеркнуть следующее. Решение подавляющего большинства задач, связанных с проектированием любых сложных систем, неизбежно осуществляется в условиях неопределенности в различных ее проявлениях. В связи с этим при построении соответствующих математических моделей корректный и эффективный учет неопределенности (исходной информации, целей, условий) часто является принципиальным требованием, без выполнения которого невозможно обеспечить объективность и фактическую эффективность решений принимаемых на основе их анализа.

В частности, как указывалось в ряде исследований, например [1], важным условием обеспечения оптимальных решений при проектировании сложных систем является необходимость одновременного рассмотрения ряда критериев. Можно указать несколько принципиальных причин, обуславливающих целесообразность такого подхода.

Существует достаточно широкий класс задач, в которых эффективность решения не может быть объективно оценена единственным критерием. Прежде всего, это относится к техническим проблемам. В частности, в электроэнергетике многие из решаемых задач связаны одновременно с изменением потерь мощности и электрической энергии, показателей надежности электроснабжения и качества электрической энергии, пропускной способности элементов электрических сетей и т.д. Оценить все перечисленные факторы единственным (обобщенным) критерием чаще всего не представляется возможным.

Помимо этого даже в тех случаях, когда эффективность принимаемого решения и может быть оценена одним критерием (например, экономического характера), часто возникают ситуации, когда выбор единственного решения невозможен в связи с высоким уровнем неопределенности информации. В подобных ситуациях введение дополнительных критериев (количественного или качественного характера) позволяет эффективно сократить область неопределенности получаемых решений.

Обобщая представленные выше соображения, основную цель данной работы можно сформулировать как разработку метода определения оптимальной структуры и параметров автономной микросети с учетом многокритериальности рассматриваемой задачи и реального уровня неопределенности исходной информации на основе идей математического аппарата теории игр и процедур многокритериального принятия решений.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В общем случае при рассмотрении многокритериальных задач наиболее принципиальными моментами является обоснованное решение таких вопросов, как нормализация частных критериев, определение принципа оптимальности, объясняющего, в каком смысле одно решение является лучше другого, обеспечение того, чтобы выбранные решения обязательно принадлежали области компромиссов, возможность задания различных приоритетов отдельным целевым функциям.

Опыт решения практических задач, связанных с многокритериальной оптимизацией, показал, что все перечисленные выше вопросы достаточно обоснованно и вместе с тем относительно просто решаются при использовании подхода предложенного Беллманом и Заде [1, 2].

В этом случае принцип оптимальности заключается в максимальном удовлетворении всех целей. Более того, в условиях отсутствия дифференциации степени важности отдельных критериев, при использовании данного подхода уровень удовлетворения отдельных критериев оказывается достаточно близким, т.е. обеспечивается гармоничность решений, которые к тому же, как доказано в ряде работ, всегда принадлежат области компромиссов.

В соответствии с данным подходом каждая целевая функция $F_r(X)$ исходной многокритериальной задачи

$$F_r(X) \rightarrow \underset{X \in L}{extr}, \quad r = 1, \dots, q \quad (1)$$

заменяется нечетким множеством (нечеткой целевой функцией)

$$A_r = \{X, \mu_{A_r}(X)\}, \quad X \in L, \quad r = 1, \dots, q, \quad (2)$$

где $\mu_{A_r}(X)$ – функция принадлежности нечеткой характеристики A_r , L – область допустимых решений.

Здесь функции принадлежности $\mu_{A_r}(X)$, $r = 1, \dots, q$ должны отражать степень достижения нечеткими целевыми функциями своих оптимальных значений. Указанному условию отвечают, в частности, следующие функции принадлежности

$$\mu_{A_r}(X) = \left[\frac{F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)}{\max_{X \in L} F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)} \right]^{\lambda_r} \quad (3)$$

– для целевых функций подлежащих максимизации

$$\mu_{A_r}(X) = \left[\frac{\max_{X \in L} F_r(X) - F_r(X)}{\max_{X \in L} F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)} \right]^{\lambda_r} \quad (4)$$

– для целевых функций подлежащих минимизации.

В (3) и (4) показатель λ_r характеризует степень важности отдельных целевых функций.

В этом случае, т.е. при наличии нечетких целевых функций, решение задачи формируется на основе использования определенного оператора агрегирования [2]:

$$\mu_D(X) = \text{agg}(\mu_{A_1}(X), \mu_{A_2}(X), \dots, \mu_{A_q}(X)), \quad X \in L.$$

В технической литературе предложено семейство различных операторов агрегирования [3]. При этом отсутствует формальное обоснование для выбора того или иного оператора при решении конкретной проблемы. В большинстве случаев данный выбор носит интуитивный характер и зависит от опыта лица принимающего решение [4].

Среди предложенных операторов агрегирования, наибольшее распространение получила операция минимизации. В этом случае имеем

$$\mu_D(X) = \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X), \quad X \in L. \quad (5)$$

А, учитывая приведенную выше интерпретацию функций принадлежности, оптимальному решению задачи (X^*) будут отвечать следующие условия

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X) \quad (7)$$

$$c \ X^* = \arg \max_{X \in L} \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X) \quad (8)$$

Решение задачи выбора оптимальных характеристик микросети начинается с генерации множества возможных альтернативных вариантов как формирования ее структуры, так и ориентировочного соотношения мощностей отдельных технологических групп генерирующего оборудования.

Имеется ряд исследований, где на основании проведенного анализа даны рекомендации относительно выбора наиболее рациональных альтернативных технологий генерации энергии для областей Украины и их отдельных территориальных образований [5, 6]. Данная информация используется для определения перечня приоритетных технологий генерации энергии, которые могут быть задействованы при формировании структуры микросети, а, соответственно, и для определения альтернативных вариантов ее построения.

При этом дальнейший анализ возможных альтернативных решений относительно структуры и параметров микросети осуществляется с учетом нескольких групп факторов экономического, технического, социального и т.п. характера. Очевидно, что на предварительной стадии проектирования детализация количественных характеристик всех указанных факторов для каждой альтернативы не только невозможна, но и нецелесообразна, что предполагает их задание в интервальной форме.

На данном этапе в качестве экономических показателей используют удельные капитальные затраты ($\bar{z}_k - z_k$) и удельные эксплуатационные издержки ($\bar{z}_o - z_o$), значения которых могут быть получены путем обобщения данных имеющихся в открытых источниках.

В этом случае при сравнении вариантов, соответствующие экономические показатели предполагаемых к использованию генерирующих установок рассчитываются следующим образом

$$Z_k = z_k P_n, \quad Z_o = z_o P_{ном} T_{max},$$

где P_n – предполагаемая номинальная мощность генерирующего источника, T_{max} – характерное для данной технологической установки значение времени использования максимума (которое, как будет показано ниже, может задаваться как интервальной, так и детерминированной величиной).

Техническая сторона проекта в принципе отражается достаточно широким спектром показателей. В данном случае для этой цели применяется такая комплексная характеристика конкретной технологии генерации электрической энергии как время использования максимума (T_{max}). По аналогии со стоимостными показателями, T_{max} оценивается интервальной величиной ($\bar{T}_{max} - T_{max}$).

В качестве социальных факторов, поддающихся количественной оценке, можно рассматривать индекс снижения выбросов в окружающую среду (V), например CO_2 , за счет применения предлагаемой технологии генерации энергии.

Данный показатель предлагается оценивать следующим образом

$$V = (V_0 - V_T) P_n T_{max},$$

где V_T – удельный (на 1 кВт ч) уровень выбросов CO_2 , отвечающий предлагаемой к применения технологической установки, V_0 – средний по Украине уровень выбросов CO_2 на 1 кВт·ч генерируемой электроэнергии. Так как соответствующая характеристика для каждой технологической установки в справочной литературе задается в интервальном виде ($\bar{V}_T - V_T$), то естественно, что и показатель V будет представлен интервальной величиной ($\bar{V} - V$).

Еще одним важным показателем, который необходимо принимать в учет на предварительном этапе проектирования микросистемы, является фактор риска. Существует множество аспектов, характеризующих риск, связанный с принятием проектных решений [7]. На данном этапе учитываются технический и финансовый риски.

Технический риск характеризует возможность того, что проектируемая микросистема не сможет выдать в сеть определенную величину мощности. Например, ветрогенератор (без аккумуляторных батарей) не может генерировать энергию, если скорость ветра выходит за нижний или верхний допустимые пороги, мощность гелиоустановки зависит от интенсивности солнечной радиации, связанной с уровнем облачности неба и т.д. По мере увеличения количества совместно работающих различных технологических генерирующих установок, благодаря возможности их взаимокompенсации, вероятность невыполнения задачи по выдаче микросетью требуемой мощности снижается. В связи с этим технический риск зависит от степени диверсификации источников генерации и может быть оценен в соответствии со следующим выражением

$$R_T = -\sum_n p_i \ln p_i, \quad (9)$$

где p_i – доля соответствующей технологии в установленной мощности микросети, n – количество используемых в микросети технологических установок.

Финансовый риск, как будет показано ниже, оценивается косвенным путем на основании анализа приведенных выше экономических (стоимостных) характеристик проекта.

Таким образом, рассматриваемая задача выбора оптимальной структуры (состава) и параметров (мощностей отдельных генерирующих установок) микросети, по сути, сводится к процедуре сравнения ряда альтернативных вариантов с целью выбора наилучшего по совокупности разноплановых показателей.

Учитывая, что характеристики используемого оборудования задаются в интервальном виде, необходимо каким-либо образом сформировать множество альтернативных конкурирующих вари-

антов обеспечения проектной мощности микросети. Нет сомнения в том, что чем полнее будут представлены возможные альтернативы, тем убедительнее будут выглядеть результаты выбора оптимального варианта. Данная задача может быть решена путем привлечения экспертов, либо должны быть разработаны определенные процедуры автоматической генерации альтернатив. Учитывая все приведенные соображения, соответствующий алгоритм в общем виде может быть представлен следующим образом.

Задается общая суммарная мощность проектируемой микросети (P_{st}). Экспертным путем определяется перечень потенциальных генерирующих установок, которые, с учетом конкретных местных условий, теоретически целесообразно было бы использовать для решения поставленной задачи. Если допустить, что ограничения по установленной мощности для любой генерирующей установки отсутствуют, то, в принципе, требуемая суммарная мощность станции может быть обеспечена при любой комбинации двух и более генерирующих установок различного типа. При этом для любой формируемой альтернативы должно быть обеспечено выполнение условия баланса мощностей

$$\sum_{i=1}^S P_i = P_{st}, \quad (10)$$

где S – количество типов генерирующих источников составляющих микросеть.

Выбор величин $P_i, i=1, \dots, S$ может быть реализован следующим образом. Первоначально задаются интервалы дискретности $\Delta P_i, i=1, \dots, S$ изменения мощностей отдельных генерирующих источников. После этого формируется процедура, состоящая из S вложенных циклов, которая позволяет, учитывая принятые интервалы дискретности, определить все возможные комбинации (варианты) сочетания переменных (мощностей отдельных генерирующих установок), обеспечивающие выполнение условия (10). Данный подход может позволить достаточно равномерно исследовать всю допустимую область изменения мощностей отдельных источников. При этом величина ΔP_i может быть различной для отдельных источников формирующих микросеть в зависимости от их технических характеристик.

Важным элементом процедуры выбора рациональной структуры и параметров микросети является сравнение сгенерированных альтернативных вариантов, в результате чего должен будет определен один или несколько наиболее предпочтительных по какому-либо критерию или по совокупности критериев.

В общем случае проблема принятия решений или сравнения альтернатив является чрезвычайно пространственной задачей в проектной практике. Однако на начальных этапах проектирования, решения чаще всего необходимо принимать в условиях неопределенности информации, что характерно и для рассматриваемой задачи, где, как уже указывалось выше, параметры заданы интервальными величинами. Складывающаяся при этом ситуация,

когда известно множество вариантов решений, но без какой-либо априорной информации относительно их вероятности, является наиболее сложной. Данная сложность имеет не столько вычислительный, как, в первую очередь, концептуальный характер, т.к. в этом случае не совсем ясны принципы сравнения решений и выбора наиболее предпочтительного.

Для анализа альтернатив и принятия решений в условиях неопределенности могут быть применены различные подходы [8, 9]. Одним из традиционных путей решения подобных задач является использование аппарата теории игр, что позволяет установить принципы разумности, доказать существование и выявить решения, удовлетворяющие данным принципам [10, 11].

Общим свойством недетерминированных задач является необходимость варьирования значениями исходных данных. При этом следует учитывать, что сопоставляться между собой могут только те варианты решения, которые оцениваются при одном и том же сочетании данных. Таким образом, процедура формирования множества комбинаций исходных данных, по сути, сводится к дискретизации задачи. При этом от того, насколько удачно выбраны комбинации исходных данных, зависит полнота и достоверность дальнейшего анализа. Здесь необходимо, чтобы отобранные представительные точки x_i некоторого непрерывного множества $[x \dots x]$ были равномерно (в определенном смысле) распределены в пределах данной области, что дает возможность охарактеризовать наилучшим образом всю область варьирования факторов в целом.

В общем случае множество точек считается равномерно распределенным в некоторой области разделенной на части, когда количество точек попадающих в любую часть области так относится к общему числу точек, как объем данной подобласти к объему всей области.

В работе [12] было показано, что при возможности реализации относительно небольшого числа опытов, наиболее полный и равномерный анализ всей многомерной области допустимых значений параметров достигается при использовании, так называемых, ЛП_т последовательностей. В этом случае для дискретизации задачи служат числа, принадлежащие ЛП_т последовательности и определяемые в процессе применения специального алгоритма.

Данный алгоритм позволяет получить точки Q_i , с координатами $q_{ij}, i=1, \dots, I, j=1, \dots, n$, которые образуют равномерно распределенные последовательности в одиночном n -мерном кубе K^n . Координаты искомым точек вычисляются на основании следующего выражения [13]

$$q_{ij} = \sum 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum [2 \langle i 2^{-\ell} \rangle] \left[2 \left(r_j^{(\ell)} 2^{k-1-\ell} \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

где i – номер точки, $[a]$ – означает целую часть числа a , $\langle a \rangle$ – представляет собой дробную часть числа a , $r_j^{(\ell)}$ – определяются по специальным таблицам, приведенным в [14].

При орієнтації на апарат теорії ігор, прийняття рішень, направлених на вибір найлучшої альтернативи пов'язано з побудовою і аналізом так званої платіжної матриці. В даній матриці рядки відповідають різним альтернативам побудови мікросети, а стовпці – станам природи, т.е. можливим значенням вихідних даних при яких може реалізовуватися дана альтернатива і визначаються в відповідності з описаним вище підходом. Елементи матриці, в залежності від оцінюваного параметра, відображають корисність або можливі втрати, які виникають в результаті реалізації відповідної альтернативи в певних умовах (т.е. при певному наборі вихідних даних).

Оскільки вихідні дані задаються індивідуально для окремих генеруючих джерел, а кожен альтернативний варіант побудови мікросети, в загальному випадку, представляє собою комбінацію генеруючих джерел з різним їх удільним вагом, виникає задача інтегральної оцінки альтернатив по кожному з перерахованих вище показників. Для даної мети пропонується використовувати наступні залежності

$$Z_{kij} = \sum_{s=1}^n \left[z_{ks} + q_{js} (\bar{z}_{ks} - z_{ks}) \right] p_{is},$$

$$T_{\max ij} = \frac{\sum_{s=1}^n \left[T_{\max s} + q_{js} (\bar{T}_{\max s} - T_{\max s}) \right] p_{is}}{\sum_{s=1}^n p_{is}},$$

$$Z_{oij} = \sum_{s=1}^n \left[z_{os} + q_{js} (\bar{z}_{os} - z_{os}) \right] p_{is} T_{\max cps},$$

$$V_{ij} = \sum_{s=1}^m \left\{ V_0 - \left[V_s + q_{ij} (\bar{V}_s - V_s) \right] \right\} p_{is} T_{\max cps},$$

де p_{is} – потужність s -го джерела в i -ій альтернативі; $i = 1, \dots, N$ – номер альтернативи, $j = 1, \dots, M$ – номер варіанта варіювання вихідних даних, $s = 1, \dots, n$ – порядковий номер (тип) джерела генерації в складі мікросети згідно розглядаваної альтернативи, q_{ij} – визначається в відповідності з (11) для кожної i -ї альтернативи і j -го набору даних, $T_{\max cps} = \frac{T_{\max s} + \bar{T}_{\max s}}{2}$.

При цьому, враховуючи, що ефективність кожної з сгенерованих альтернатив оцінюється за допомогою показників, то для кожного з них формується власна платіжна матриця. В якості прикладу в табл. 1 представлено платіжну матрицю, побудовану для аналізу показника (Z_k) , що характеризує капітальні витрати на будівництво мікросети.

Таблиця 1 – Платіжна матриця для аналізу показника «капітальні витрати»

Альтернативи	Сочетания вихідних даних					Характерні оцінки			
	1	...	j	...	M	max	min	cp	$\frac{\max + \min}{2}$
1	$Z_{k1,1}$		$Z_{k1,j}$		$Z_{k1,M}$				
...									
i	$Z_{ki,1}$		$Z_{ki,j}$		$Z_{ki,M}$				
...									
N	$Z_{kN,1}$		$Z_{kN,j}$		$Z_{kN,M}$				

Основним методом, що дозволяє знайти оптимальну альтернативу в умовах невизначеності, є постановка певної гіпотези по поведінці середовища, що дозволяє визначити для кожної альтернативи певну оцінювальну функцію, і тим самим запропонувати інструмент для порівняння альтернатив. При цьому будь-яка платіжна матриця $\|e_{ij}\|$ в кінцевому підсумку зводиться до одного стовпця. Таким чином, кожному варіанту (альтернативі) E_i присвоюється певний результат e_{ij} , що характеризує, в цілому, всі наслідки цього рішення. Для порівняння альтернатив і вибору найлучшої з них найбільш поширеними [10, 15] є наступні критерії.

Критерій Вальда оснований на гіпотезі, згідно з якою при виборі рішення потрібно розглядати найменш вигідний варіант. При цьому оцінкою кожної альтернативи вважається величина $E_i = \min_j e_{ij}$ (при умові, що e_{ij}

характеризує корисність рішення). Оптимальною в цьому випадку вважається альтернатива, для якої виконується умова

$$E_{Vi}^* = \max_i \min_j e_{ij}. \tag{12}$$

Естественно, що якщо розглядавана цільова функція підлягає мінімізації, то оптимальна альтернатива згідно даному критерію вибирається виходячи з умови.

$$E_{Vi}^* = \min_i \max_j e_{ij}. \tag{13}$$

Орієнтація на даний критерій відображає крайню обережну стратегію, властиву песимістам.

Так звані максимумні критерії вважаються критерієм крайнього оптимізму і, відповідно, є протилежними критерію Вальда. ЛПР, користуючись даним критерієм, вважає, що природа буде знаходитися в найбільш вигідній

ном для него состоянии и уверен в наибольшем выигрыше.

Оптимальной в этом случае считается альтернатива с наибольшим показателем эффективности, т.е. для которой выполняется условие, соответственно

$$E_{Mi}^* = \max_i \max_j e_{ij},$$

или $E_{Mi}^* = \min_i \min_j e_{ij}.$

Критерий Сэвиджа основан на преобразовании исходной платежной матрицы в матрицу рисков. Риск для выбранной альтернативы i при состоянии среды j определяется величиной $r_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}$ (при условии, что e_{ij} характеризует полезность решения).

Оптимальной в этом случае считается альтернатива минимизирующая максимальный риск. Другими словами, выбор из матрицы рисков осуществляется на основе минимаксного критерия

$$E_{Si}^* = \min_i \max_j r_{ij}.$$

Критерий Лапласа основан на гипотезе равновероятности (равновероятности) появления различных состояний среды. При принятии данной гипотезы в качестве характеристики i -ой альтернативы выступает среднеарифметическое значение оценочных функций, стоящих в i -ой строке платежной матрицы. Таким образом, оценка в соответствии с критерием Лапласа имеет вид

$$E_{Li} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij}.$$

Оптимальной в соответствии с данным критерием считается та альтернатива i , которая максимизирует оценочную функцию, в случае, когда она характеризует полезность решения

$$E_{Li}^* = \max_i E_{Li}$$

или минимизирует функцию, отражающую, например, потери

$$E_{Li}^* = \min_i E_{Li}.$$

Стремление получить решения, которые бы лучше отражали реальную ситуацию, стимулировало создание так называемых составных показателей, на которых основаны критерии Гурвица, Ходжа-Лемана, Гермейера и ряд других [15, 16].

Как уже указывалось выше, при решении рассматриваемой задачи необходимо учесть, что оценка оптимальности той или иной альтернативы осуществляется по нескольким критериям. В этом случае формируется так называемая многомерная (трехмерная) платежная матрица, координатами которой соответственно являются: альтернативы, состояния природы, оценочные характеристики (рис. 1).

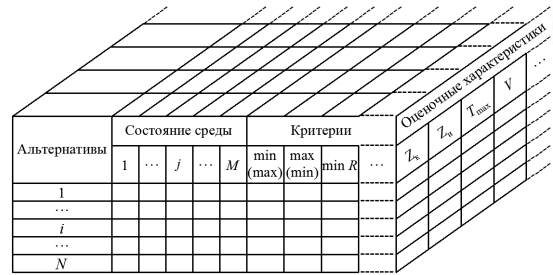


Рисунок 1 – Многомерная платежная матрица

Для дальнейшего анализа полученной многомерной платежной матрицы предложен подход, опирающийся на идеи, представленные в работах [1, 17] и заключающийся в следующем.

На основании выражений (3) для целевых функций подлежащих максимизации или (4) – для минимизируемых целевых функций, формируются, так называемые, модифицированные (нормализованные) платежные матрицы по каждой из рассматриваемых целевых функций (критериев оптимальности). В частности, для целевой функции, характеризующей капитальные затраты получаем следующую модифицированную платежную матрицу (табл. 2)

Таблица 2 – Модифицированная платежная матрица для анализа показателя «капитальные затраты»

Альтернативы	Сочетания исходных данных				
	1	...	j	...	M
1	$\mu_{Zk1,1}$		$\mu_{Zk1,j}$		$\mu_{Zk1,M}$
...					
i	$\mu_{Zki,1}$		$\mu_{Zki,j}$		$\mu_{Zki,M}$
...					
N	$\mu_{ZkN,1}$		$\mu_{ZkN,j}$		$\mu_{ZkN,M}$

При этом минимальные и максимальные значения каждой из целевых функций, необходимых для выполнения вычислений согласно (3) и (4), выбираются, принимая во внимание все альтернативы и все состояния природы. Например, для функции капитальных затрат соответственно принимаем

$$\max_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,M}} Z_{ki,j}, \quad \min_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,M}} Z_{ki,j}.$$

На следующем этапе осуществляется формирование агрегированной платежной матрицы (табл. 3) на основе условия (5), рассматривая одновременно все частные целевые функции, а, соответственно, и все модифицированные платежные матрицы.

Таблица 3 – Агрегированная платежная матрица

Альтернативы	Сочетания исходных данных				
	1	...	j	...	M
1	$\mu_{D1,1}$		$\mu_{D1,j}$		$\mu_{D1,M}$
...					
i	$\mu_{Di,1}$		$\mu_{Di,j}$		$\mu_{Di,M}$
...					
N	$\mu_{DN,1}$		$\mu_{DN,j}$		$\mu_{DN,M}$

Для анализа сформированной таким образом агрегированной платежной матрицы могут быть использованы любые из рассмотренных выше критериев теории игр с целью выбора оптимального решения. Однако в данном случае принимаемое решение будет уже учитывать всю совокупность рассматриваемых в задаче целевых функций.

В частности, в соответствии с критерием Вальда выбор оптимальной альтернативы происходит по условию

$$\max_{1 \leq i \leq N} \mu_{Di,j} = \max_{1 \leq i \leq N} \min_{1 \leq j \leq M} \min_{1 \leq s \leq S} \mu_{s,i,j},$$

где S – количество рассматриваемых целевых функций.

Согласно критерию Лапласа имеем

$$\max_{1 \leq i \leq N} \mu_{Di,j} = \max_{1 \leq i \leq N} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \min_{1 \leq s \leq S} \mu_{s,i,j}.$$

Подобно стандартному подходу, в данном случае также может быть сформирована и матрица рисков

$$R_{i,j} = \mu_{Di}^{\max} - \mu_{Di,j}, \text{ где } \mu_{Di}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq N} \mu_{Di,j},$$

что дает возможность осуществить выбор оптимальной альтернативы на основе критерия Сэвиджа

$$\min_{1 \leq i \leq N} R_{i,j}^{\max} = \min_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq M} \left[\max_{1 \leq j \leq N} \min_{1 \leq s \leq S} \mu_{s,i,j} - \min_{1 \leq s \leq S} \mu_{s,i,j} \right].$$

Таким образом, обращаясь к критериям теории игр и используя представленный выше подход, появляется возможность выбора оптимальной альтернативы (в данном случае структуры и параметров микросети) не только с учетом неопределенности исходной информации, но и принимая во внимание многокритериальный характер задачи.

ВЫВОДЫ. Одним из актуальных и перспективных направлений развития энергетики, который подтверждается мировой практикой, является интеллектуализация процессов генерации, передачи и распределения энергии, формирование, так называемых, микросетей, объединяющих как традиционные, так и альтернативные источники энергии. Решение подобных задач в условиях нашей страны усложняется дефицитом имеющихся материальных ресурсов и отсутствием адекватной информационной среды. Указанные обстоятельства заставляют уделять самое серьезное внимание вопросам создания адекватных математических моделей, используемых при принятии соответствующих проектных решений.

Поэтому, согласно поставленной задаче, в работе разработан алгоритм, позволяющий определить оптимальные состав и параметры генерирующего оборудования в структуре формируемой микросети в условиях реально существующей неопределенности исходной информации и при учете ряда критериев различной природы. Постановка задачи и предложенный алгоритм ее решения призваны

гарантировать максимальную фактическую эффективность использования устанавливаемого генерирующего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pedrycz, W., Ekel, P., and Parreiras, R. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications. – NY: John Wiley & Sons, 2011. – P. 338.
2. Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. Decision-making in a fuzzy environment // Management Science. – 1970. – № 17. – PP. 141–164.
3. Zimmermann, Y.J. Fuzzy set theory and its application. – Boston: Kluwer Academic Publisher, 1990.
4. Beliakov, G., Warren, J. Appropriate choice of aggregation operators in fuzzy decision support systems // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2001. – №. 9. – PP. 773–784.
5. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України: Енергія вітру, сонячна енергія, енергія малих рік, енергія біомаси, геотермальна енергія, енергія довкілля, енергія скидного енерготехнологічного потенціалу, енергія нетрадиційного палива / Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. та ін. – К.: НАН України, Державний Комітет України з енергозбереження, 2001. – С. 41.
6. Калинчик В.П., Кокорина М. Т. Планирование энергообеспечения регионов Украины на основе возобновляемых источников энергии // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3/2013 (80). – С. 60–65.
7. Балабанов И.Т. Риск-менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 192 с.
8. Трухачев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. – М.: Наука, 1981. – 258 с.
9. Эддоус М., Стэнфилд Р. Методы принятия решений. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 590 с.
10. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988. – 206 с.
11. Оуэн Г. Теория игр. – М.: Мир, 1971. – 232 с.
12. Соболев И.М., Статников И.Р. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 107 с.
13. Соболев И.М., Статников И.Р. ЛП-поиск в задачах оптимального конструирования // В кн.: Проблемы случайного поиска. – Рига: Зинатне, 1972. – № 1. – С. 117–135.
14. Соболев И.М., Левитан Ю.Л. Получение точек, равномерно расположенных в многомерном кубе. – М., 1976. – 37 с. (Препринт / Институт прикладной математики АН СССР, № 40).
15. Льюис Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. – М.: Изд. Иностран. Лит., 1961. – 642 с.
16. Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании, экономике. – М.: Мир, 1964. – 837 с.
17. Ekel, P., Pedrycz, W. and Schinzinger, R., A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems, Fuzzy Sets and Systems. – 1998. – № 97. – PP. 49–66.

MULTIOBJECTIVE SELECTION OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF COMPLEX ENERGY SOURCES (MICROGRIDS) TAKING INTO CONSIDERATION THE UNCERTAINTY OF THE INITIAL INFORMATION

V. Popov, I. Dmitrenko, A. Spodinskaya, Y. Stepanel

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: yanstepanel@gmail.com

This paper presents results of research related to the development of the algorithm for selection of optimal structure and parameters of the generating sources in the autonomous microgrids. The procedure proposed for this purpose allows one to take into account the uncertainty of the initial information, as well as multi-criteria nature of the problem. Comparison of pre-formed alternatives of microgrids structure is based on the analysis of the modified multidimensional payment matrices using criteria of the game theory and Bellman-Zade approach to multiobjective decision making. The proposed algorithm can effectively take into account the wide range of data on the technical, economical, environmental, social, etc. aspects of the project, to obtain solution of the problem enough harmonious for all criteria, which belongs to the area of compromise.

Key words: microgrid, game theory, alternative energy sources, multicriteria decision making.

REFERENCES

1. Pedrycz, W., Ekel, P., and Parreiras, R. (2011), *Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications*, John Wiley & Sons, New York, USA.
2. Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. (1970), "Decision-making in a fuzzy environment", *Management Science*, no. 17, pp. 141–164.
3. Zimmermann, Y.J. (1990), *Fuzzy set theory and its application*, Kluwer Academic Publisher, Boston, USA.
4. Beliakov, G. and Warren, J. (2001), "Appropriate choice of aggregation operators in fuzzy decision support systems", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, no. 9, pp. 773–784.
5. Kudrya, S.O., Yatsenko, L.V., Dushina, G.P. and other. (2001), *Atlas energetychnogo potencialu vidnovljувanyh ta netradycyjnyh dzherel energii Ukrainy: Energija vitru, sonjachna energija, energija malyh rik, energija biomasy, eotermal'na energija, energija dovkillja, energija skydnogo energotekhnologichnogo potencialu, energija netradycyjnogo palyva* [Atlas of an energy potential of renewable and non-traditional power sources of Ukraine: Wind power, solar energy, energy of the small rivers, energy of biomass, geothermal energy, energy of environment, energy of waste power technological potential, energy of non-traditional fuel], NAS of Ukraine, State Committee of Ukraine on Energy Saving, Kyiv, Ukraine.
6. Kalinchik, V.P., Kokorina, M.T. (2013), "Planning of power supply of regions of Ukraine on the basis of renewables", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 3, pp. 60–65.
7. Balabanov, I.T. (1996), *Risk-menedzhment* [Risk management], Finansy i statistika, Moscow, Russia.
8. Truhaev, R.I. (1981), *Modeli prinyatiya resheniy v usloviyah neopredelennosti* [Decision-making models in the conditions of uncertainty], Nauka, Moscow, Russia.
9. Eddous, M. and Stensfeld, R. (1997), *Metodyi prinyatiya resheniy* [Decision-making methods], Audit, YUNITI, Moscow, Russia.
10. Venttsel, E.S. (1998), *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Research of operations: tasks, principles, methodology], Nauka, Moscow, Russia.
11. Ouen G. (1971), *Teoriya igr* [Games theory], Mir, Moscow, Russia.
12. Sobol, I.M. and Statnikov, I.R. (1981), *Vyibor optimalnyh parametrov v zadachah s mnogimi kriteriyami* [Choice of optimum parameters in tasks with many criteria], Nauka, Moscow, Russia.
13. Sobol I.M. and Statnikov I.R. (1972), "LP-search in tasks of optimum constructioning", *Problemy sluchaynogo poiska*, no. 1, pp. 117–135.
14. Sobol, I.M. and Levitan, Yu.L. (1976), "Receiving the points uniformly located in a multivariate cube", *Preprint of the Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy*, no. 40, 37 p.
15. Lyuis, R.D. and Rayfa, H. (1961), *Igry i resheniya* [Games and decisions], Issuing of foreign literature, Moscow, Russia.
16. Karlin, S. (1964), *Matematicheskie metody v teorii igr, programmirovani, ekonomike* [Mathematical methods in the games theory, programming, economy], Mir, Moscow, Russia.
17. Ekel, P., Pedrycz, W. and Schinzing, R. (1998), "A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems", *Fuzzy Sets and Systems*, no. 97, pp. 49–66.

Стаття надійшла 31.03.2014.