
УДК 621.316.1

В.А. Попов, д-р техн. наук, **Е.С. Ярмолук**, канд. техн. наук,
Ф.В. Ткаченко, **Д.В. Яценко**, аспирант
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корп. 22,
тел. +380669854888, +380662969593,
e-mail: tig@ukr.net, yarmolyuk.lena@gmail.com)

Особенности многокритериальной оценки альтернативных вариантов применения распределенной генерации в условиях неопределенности исходной информации

Предложен метод комплексной сравнительной оценки влияния на основные режимные показатели электрических сетей альтернативных вариантов интеграции в них источников распределенной генерации. При решении данной задачи на основе адаптированных алгоритмов многокритериального принятия решений VIKOR и TOPSIS предполагается учет неопределенности используемой исходной информации, задаваемой в виде нечетких множеств. Рассмотрена процедура вычисления энтропии и на ее основе соответствующих коэффициентов важности критериев с учетом неопределенности исходных данных, представленных в виде нечетких множеств.

К л ю ч е в ы е с л о в а: неопределенность информации, многокритериальное принятие решений, распределенная генерация, режимы электрических сетей.

В настоящее время широкое применение распределенной генерации (РГ) является важным направлением развития мировой электроэнергетики. Не вызывает сомнения, что источники генерации различной мощности, подключаемые к отдельным узлам распределительных сетей, по-разному влияют на режимы их работы и данное влияние может быть как позитивным, так и негативным. Существует большое число работ по оценке воздействия РГ на отдельные показатели режимов. Однако, как показано в [1], наибольший интерес представляет комплексная оценка влияния интегрируемых генерирующих источников, в частности, на такие показатели как величина потерь электрической энергии, ее качество, надежность электроснабжения. По результатам многокритериального ранжирования ряда альтернативных вариантов применения РГ энергокомпании получают возможность выявить наиболее предпочтительные с позиций их собственных интересов проекты с целью их дальнейшей поддержки.

© В.А. Попов, Е.С. Ярмолук, Ф.В. Ткаченко, Д.В. Яценко, 2018

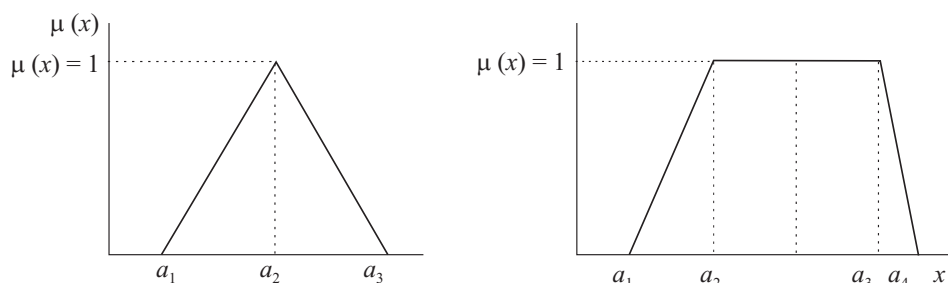
Вместе с тем, очевидно, что в эксплуатируемых в нашей стране распределительных сетях существующие технические измерительные средства не позволяют осуществить адекватное моделирование параметров режима без учета фактического уровня неопределенности информации. Более того, влияние данного фактора усиливается по мере увеличения объема альтернативных источников энергии, интегрируемых в электрические сети (ЭС) в качестве РГ. Это позволяет утверждать, что на данный момент при решении задач оптимального планирования развития отечественных распределительных сетей или оперативного управления их режимами использование детерминированной информации является, по сути, вынужденным шагом, который в значительной мере связан с ориентированием на традиционный математический аппарат. В полной мере это относится и к вопросам, связанным с принятием оптимальных решений на основе комплексной (многокритериальной) оценки альтернатив.

Рассмотрим использование представленных в [1] методов многокритериального принятия решений в условиях, когда оценки (количественные или качественные) таких показателей режима, как величина потерь электроэнергии, отклонения напряжения на зажимах электроприемников, надежность электроснабжения представлены нечеткими множествами (в частности, нормализованными) с треугольными или трапецидальными функциями принадлежности (см. рисунок):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a_1, \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2, \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & \text{если } a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0, & \text{если } x \geq a_3; \end{cases}$$

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & \text{если } x \in (a_1, a_2), \\ 1, & \text{если } x \in (a_2, a_3), \\ \frac{x-a_4}{a_3-a_4}, & \text{если } x \in (a_3, a_4), \\ 0, & \text{если } x \in (-\infty, a_1) \cup (a_4, \infty). \end{cases}$$

Независимо от метода, используемого для многокритериального сравнения альтернатив, исходные условия задачи формируются в виде матри-



Треугольные и трапециевидные функции принадлежности (нормализованные нечеткие множества)

цы решений. В данной матрице строки соответствуют рассматриваемым альтернативам ($i=1, \dots, n$), а столбцы ($j=1, \dots, m$) — критериям. При этом в ячейки заносятся оценки отдельных критериев (\tilde{f}_{ij}), представленные соответствующими характеристиками нечетких множеств с треугольными (с параметрами a_1, a_2, a_3) или трапециевидными (с параметрами a_1, a_2, a_3, a_4) функциями принадлежности.

Дальнейшая процедура решения задачи может быть следующей. Согласно методу *VIKOR* [2] на начальном этапе все рассматриваемые показатели, для исключения влияния их различной размерности на процесс принятия решений, должны быть представлены своими относительными значениями. При этом, учитывая правила выполнения арифметических операций с нормализованными нечеткими числами [3], осуществляем следующие преобразования:

в случае предполагаемой максимизации при использовании треугольных функций принадлежности

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{a_{ij1}}{\max_i a_{ij3}}, \frac{a_{ij2}}{\max_i a_{ij3}}, \frac{a_{ij3}}{\max_i a_{ij3}} \right), \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m; \quad (1)$$

в случае предполагаемой максимизации при ориентации на трапециевидальные функции принадлежности

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{a_{ij1}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij2}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij3}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij4}}{\max_i a_{ij4}} \right), \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m; \quad (2)$$

когда требуется минимизация при использовании треугольных функций принадлежности,

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij3}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij2}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij1}} \right), \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m; \quad (3)$$

когда требуется минимизация при ориентации на трапецеидальные функции принадлежности,

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij4}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij3}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij2}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij1}} \right), \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m. \quad (4)$$

На следующем этапе определяем наилучшее (\tilde{V}_j^+) и наихудшее (\tilde{V}_j^-) значения для всех рассматриваемых показателей (критериев) $j=1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. принимая во внимание, подлежит ли данный критерий максимизации или минимизации). Таким образом, находим

$$\tilde{V}_j^+ = [\max_i a_{ij1}, \max_i a_{ij2}, \max_i a_{ij3}, \max_i a_{ij4}],$$

$$\tilde{V}_j^- = [\min_i a_{ij1}, \min_i a_{ij2}, \min_i a_{ij3}, \min_i a_{ij4}], \quad j=1, \dots, m.$$

После этого вычисляем расстояния между всеми элементами матрицы решений относительно наилучшего и наихудшего решений:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [d(\tilde{V}_j^+, \tilde{V}_{ij})]^2}, \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [d(\tilde{V}_j^-, \tilde{V}_{ij})]^2}. \quad (5)$$

В литературе, посвященной нечетким множествам, можно найти ряд различных подходов к их дефазификации и определению расстояния между ними. В частности, в работе [4] расстояние между двумя нормализованными нечеткими множествами (числами) \tilde{A} и \tilde{B} предлагается определять по следующим формулам:

при наличии треугольных функций принадлежности —

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{6} [(a_1 - b_1)^2 + 4(a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]}; \quad (6)$$

при использовании трапецеидальных функций принадлежности —

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{(y_A - y_B)^2 + (x_A - x_B)^2}{2}}, \quad (7)$$

где

$$y = \frac{\left(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} + 2 \right)}{6}, \quad x = \frac{y(a_2 + a_3) + (a_1 + a_4)(1 - y)}{2}. \quad (8)$$

В работе [5] аналогичный показатель определяется так: для нечетких множеств с треугольными функциями принадлежности —

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]};$$

для нечетких множеств с трапецидальными функциями принадлежности —

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{4} [(a_1 - b_1)^2 + 4(a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2 + (a_4 - b_4)^2]}.$$

Еще один подход к определению расстояния между нечеткими числами рассмотрен в работе [6].

На заключительном этапе выполнения данного алгоритма определяем показатели S_i и R_i [2], характеризующие соответственно групповую полезность и индивидуальные потери, а также интегральный показатель Q_i , $i=1, \dots, n$:

$$S_i = \sum_{j=1}^m \left[\frac{d(\tilde{V}_j^+, \tilde{V}_{ij})}{d(\tilde{V}_j^+, \tilde{V}_j^-)} \right], \quad R_i = \max_j \left[\frac{d(\tilde{V}_j^+, \tilde{V}_{ij})}{d(\tilde{V}_j^+, \tilde{V}_j^-)} \right],$$

$$Q_i = \begin{cases} \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+}, & \text{если } S^+ = S^-, \\ \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+}, & \text{если } R^+ = R^-, \\ \eta \frac{(S_i - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1 - \eta) \frac{(R_i - R^+)}{(R^- - R^+)} & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (9)$$

где $S^+ = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^+ = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$; η — показатель, определяющий относительный вес стратегии выбора компромиссного решения согласно идеологии характеристик S или R (если отсутствуют другие условия, принимается $\eta=0,5$). Вместе с тем, в работе [7] предлагается на основе концепции линейной нормы, используя геометрическую интерпретацию расположения альтернатив в $S-R$ пространстве, задавать коэффициент η в виде $\eta = \frac{S_i + R_i}{2}$ и соответственно $1 - \eta = \frac{2 - (S_i + R_i)}{2}$.

Ранжирование альтернатив на основе полученных результатов расчетов осуществляется стандартно [2] в соответствии с возрастанием показателя Q при приемлемом различии между проранжированными альтер-

нативами: $Q(A^{(1)}) - Q(A^{(2)}) \geq \Delta Q$, где $\Delta Q = 1/(n-1)$, n — общее число альтернатив, а также «приемлемой» стабильности решения, означающей, что альтернатива $A^{(1)}$ должна быть одновременно лучшей и в рядах ранжирования по S и (или) R . Компромисс при выборе оптимальной альтернативы на основе метода *TOPSIS* [2] основан на том, что выбранное решение должно быть одновременно максимально близким к так называемому идеальному решению (при котором все частные критерии принимают наилучшие значения) и наиболее удалено от наихудшего решения.

В общем случае соответствующий алгоритм решения задачи следующий. В вычислительном плане этапы (1)—(5) алгоритмов, реализующих методы *TOPSIS* и *VIKOR*, идентичны. Отличие заключается в необходимости одновременного определения расстояния между элементами нормализованной матрицы решений и наилучшим и наихудшим решениями. Учитывая это, определяем соответствующий показатель C_i :

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (10)$$

После этого все альтернативы $A^{(i)}$, $i=1, \dots, n$, могут быть проранжированы в соответствии с убыванием величины C_i . Таким образом, альтернативу, которой соответствует максимальное значение параметра C_i , можно рассматривать в качестве наилучшего компромиссного решения задачи.

Важным фактором, который целесообразно учитывать при принятии многокритериальных решений, является дифференцирование важности критериев. В технической литературе для этого предложен ряд различных подходов. Несмотря на их многообразие, все они могут быть разделены на две группы: субъективные и объективные методы определения весов.

Information Entropy Weighted Method (IEW) [8] рассматривается как объективный метод определения весов, характеризующих важность отдельных критериев. Данный метод основан на оценке энтропии информации, используемой при решении конкретной задачи. Поскольку в соответствии с данным методом оценки всех критериев представлены нечеткими числами (множествами), процедура определения их весов может быть представлена в следующем виде.

1. Исходные данные в матрице решений представляем относительными величинами, вычисленными в соответствии с выражениями (1)—(4), либо, с учетом правил выполнения арифметических операций с нормализованными нечеткими множествами с трапецеидальными функциями принадлежности:

$$\tilde{V}_{ij} = [V_{ij1}, V_{ij2}, V_{ij3}, V_{ij4}] =$$

$$= \left(\frac{a_{ij1} - \min_i a_{ij1}}{\max_i a_{ij4} - \min_i a_{ij1}}, \frac{a_{ij2} - \min_i a_{ij1}}{\max_i a_{ij4} - \min_i a_{ij1}}, \frac{a_{ij3} - \min_i a_{ij1}}{\max_i a_{ij4} - \min_i a_{ij1}}, \frac{a_{ij4} - \min_i a_{ij1}}{\max_i a_{ij4} - \min_i a_{ij1}} \right).$$

2. На основании данных нормализованной матрицы решений вычисляем нечеткую оценку энтропии:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_j &= [H_{j1}, H_{j2}, H_{j3}, H_{j4}] = \\ &= \left(-\sum_{i=1}^n e_{ij1} \ln e_{ij1}, -\sum_{i=1}^n e_{ij2} \ln e_{ij2}, -\sum_{i=1}^n e_{ij3} \ln e_{ij3}, -\sum_{i=1}^n e_{ij4} \ln e_{ij4} \right), \end{aligned}$$

где

$$\tilde{e}_{ij} = [e_{ij1}, e_{ij2}, e_{ij3}, e_{ij4}] = \left(\frac{1+V_{ij1}}{n + \sum_{i=1}^n V_{ij4}}, \frac{1+V_{ij2}}{n + \sum_{i=1}^n V_{ij3}}, \frac{1+V_{ij3}}{n + \sum_{i=1}^n V_{ij2}}, \frac{1+V_{ij4}}{n + \sum_{i=1}^n V_{ij1}} \right).$$

3. Полученные данные используем для нахождения весов отдельных критериев:

$$w_j = \frac{d(1, \tilde{H}_j)}{\sum_{j=1}^m d(1, \tilde{H}_j)},$$

где $d(1, \tilde{H}_j)$ определяется из выражений (7) и (8).

В качестве примера рассмотрим задачу сравнения пяти альтернативных вариантов подключения источников РГ к распределительным сетям с учетом их влияния на величину потерь электрической энергии (критерий $K1$), надежность электроснабжения (критерий $K2$) и отклонения напряжения (критерий $K3$). Оценки, используемые для количественной характеристики первых двух критериев, зависят от условий финансирования работ по внедрению РГ. Если затраты на реализацию данных проектов, включая оснащение ЭС необходимыми коммутационными и защитными аппаратами, средствами автоматизации и телекоммуникаций, полностью осуществляются за счет внешних инвесторов, то для энергокомпании эффект может быть оценен величиной годового снижения потерь энергии и достигнутым значением ожидаемой величины недоотпущенной электроэнергии.

Если внедрение РГ осуществляется за счет самой энергокомпании, то в качестве критериев, характеризующих потери электроэнергии и надежность электроснабжения, целесообразно рассматривать удельные показате-

тели: снижение потерь электрической энергии на 1 кВт установленной мощности источника РГ (предполагая, что затраты на внедрение РГ пропорциональны мощности устанавливаемого генерирующего источника) и затраты на 1кВт · ч снижения величины недоотпущенной электроэнергии.

В любом случае указанные характеристики при соответствующем учете неопределенности информации относительно электрических нагрузок и параметров источников РГ [9] будут представлены нечеткими множествами. При этом первый из указанных критериев подлежит максимизации, а второй — минимизации.

Применение РГ может по-разному влиять на отклонения напряжения в ЭС. В одних случаях вследствие возрастающей неоднородности графиков нагрузок отдельных распределительных линий не удастся обеспечить допустимые отклонения напряжения за счет средств централизованного регулирования напряжения. В других случаях подключение источников РГ не влияет на уровни напряжения не зависимо от того, соответствовали или нет его отклонения допустимым значениям. Возможны также ситуации, когда РГ позволяет исключить недопустимые отклонения напряжения у потребителей без какого-либо вмешательства в работу средств централизованного регулирования напряжения или после соответствующей их перенастройки.

Для оценки характера и степени влияния РГ на отклонения напряжения на зажимах электроприемников предложено использовать соответствующие лингвистические оценки: «значительное негативное влияние», «негативное влияние», «незначительное негативное влияние», «отсутствие влияния», «незначительное позитивное влияние», «позитивное влияние», «значительное позитивное влияние» (табл. 1).

В процессе дальнейшего анализа вариантов применения РГ использованы данные экспериментальных расчетов по моделированию режимов распределительных сетей с учетом фактического уровня неопределенности информации, выполненные для одного из районов ЭС «Хмельницк-облэнерго». Исходные нечеткие оценки рассматриваемых альтернативных вариантов применения РГ приведены в табл. 2. При этом экспертные оценки, отражающие качество электрической энергии в условиях планируемого применения РГ, были сформированы в процессе опроса оперативно-диспетчерского персонала энергокомпании.

Представим значения критериев в относительных единицах. Для критериев $K1$ и $K3$ данная операция осуществляется согласно (2), а для критерия $K2$ — согласно (4). Полученные результаты при

$$\max_i a_{ij4} (i=1, \dots, n, j=1, \dots, m) = \max (16,6; 12,4; 18,8; 28,6; 14,1) = 28,6,$$

$$\min_i a_{ij1} (i=1, \dots, n, j=1, \dots, m) = \min (0,81; 0,98; 1,62; 1,74; 0,14) = 0,14$$

приведены в табл. 3. Определяем наилучшее и наихудшее решения по каждому из критериев:

$$\tilde{V}_1^+ = (0,698; 0,811; 0,888; 1,0), \quad \tilde{V}_1^- = (0,297; 0,332; 0,392; 0,434),$$

$$\tilde{V}_2^+ = (1,0; 0,538; 0,424; 0,292), \quad \tilde{V}_2^- = (0,08; 0,07; 0,064; 0,057),$$

$$\tilde{V}_3^+ = (0,93; 0,98; 1,0; 1,0), \quad \tilde{V}_3^- = (0,04; 0,1; 0,18; 0,23).$$

Вычисляем расстояния между каждым альтернативным вариантом и наилучшим и наихудшим решениями. Расчеты выполняем по формуле (5) с учетом (7):

$$\begin{matrix} d_1^+ & d_2^+ & d_3^+ & d_4^+ & d_5^+ & d_1^- & d_2^- & d_3^- & d_4^- & d_5^- \\ 0,412 & 0,513 & 0,721 & 0,606 & 0,319 & 0,6 & 0,405 & 0,143 & 0,359 & 0,632 \end{matrix}$$

Таблица 1. Функции принадлежности лингвистических оценок

Лингвистическая оценка	Значение параметра функции принадлежности			
	a_1	a_2	a_3	a_4
Значительное негативное влияние	0	0	0,02	0,07
Негативное влияние	0,04	0,1	0,18	0,23
Незначительное негативное влияние	0,17	0,22	0,36	0,42
Отсутствие влияния	0,32	0,42	0,58	0,68
Незначительное позитивное влияние	0,58	0,64	0,78	0,83
Позитивное влияние	0,77	0,82	0,9	0,92
Значительное позитивное влияние	0,93	0,98	1	1

Таблица 2. Нечеткие оценки альтернативных вариантов применения РГ

Альтернатива	K1				K2				K3
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	a_4	
A1	10,2	12,6	14,8	16,6	0,81	0,94	1,06	1,22	Значительное позитивное влияние
A2	8,5	9,5	11,2	12,4	0,98	1,18	1,28	1,41	Незначительное позитивное влияние
A3	14,5	15,4	17,2	18,8	1,62	1,9	2,08	2,32	Негативное влияние
A4	19,7	23,2	25,4	28,6	1,74	2,01	2,18	2,45	Незначительное негативное влияние
A5	9,8	10,8	12,2	14,1	0,14	0,26	0,33	0,48	Позитивное влияние

Для этого предварительно находим координаты центров тяжести соответствующих нечетких оценок согласно (8), которые приведены в табл. 4. Определяем показатели $S_i, R_i, Q_i, i=1, \dots, n$:

$$S_1 = \frac{d(V_1^+, V_{11})}{d(V_1^+, V_1^-)} + \frac{d(V_2^+, V_{21})}{d(V_2^+, V_2^-)} + \frac{d(V_3^+, V_{31})}{d(V_3^+, V_3^-)},$$

$$S_1 = 0,775 + 0,861 + 0 = 1,636, \quad R_1 = \max(0,775; 0,861; 0) = 0,861;$$

$$S_2 = \frac{d(V_1^+, V_{12})}{d(V_1^+, V_1^-)} + \frac{d(V_2^+, V_{22})}{d(V_2^+, V_2^-)} + \frac{d(V_3^+, V_{32})}{d(V_3^+, V_3^-)},$$

$$S_2 = 1 + 0,902 + 0,324 = 2,226, \quad R_2 = \max(1; 0,902; 0,324) = 1;$$

$$S_3 = \frac{d(V_1^+, V_{13})}{d(V_1^+, V_1^-)} + \frac{d(V_2^+, V_{23})}{d(V_2^+, V_2^-)} + \frac{d(V_3^+, V_{33})}{d(V_3^+, V_3^-)},$$

$$S_3 = 0,561 + 0,992 + 1 = 2,553, \quad R_3 = \max(0,561; 0,992; 1) = 1;$$

Таблица 3. Нечеткие оценки альтернатив в относительных единицах

Альтернатива	K1				K2				K3			
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	a_4
A1	0,357	0,441	0,517	0,58	0,173	0,149	0,132	0,115	0,93	0,98	1	1
A2	0,297	0,332	0,392	0,434	0,143	0,119	0,109	0,099	0,58	0,64	0,78	0,83
A3	0,507	0,538	0,601	0,657	0,086	0,074	0,067	0,06	0,04	0,1	0,18	0,23
A4	0,689	0,811	0,888	1	0,08	0,07	0,064	0,057	0,17	0,22	0,36	0,42
A5	0,325	0,378	0,427	0,493	1	0,538	0,424	0,292	0,77	0,82	0,9	0,96

Таблица 4. Координаты центров тяжести нечетких оценок альтернатив по отдельным критериям

Альтернатива	K1		K2		K3	
	x	y	x	y	x	y
A1	0,473	0,39	0,142	0,382	0,974	0,381
A2	0,364	0,406	0,119	0,371	0,707	0,427
A3	0,576	0,403	0,072	0,378	0,137	0,404
A4	0,846	0,375	0,068	0,377	0,293	0,427
A5	0,407	0,382	0,586	0,36	0,863	0,404

$$S_4 = \frac{d(V_1^+, V_{14})}{d(V_1^+, V_1^-)} + \frac{d(V_2^+, V_{24})}{d(V_2^+, V_2^-)} + \frac{d(V_3^+, V_{34})}{d(V_3^+, V_3^-)},$$

$$S_4 = 0 + 1 + 0,816 = 1,816, \quad R_4 = \max(0; 1; 0,816) = 1;$$

$$S_5 = \frac{d(V_1^+, V_{15})}{d(V_1^+, V_1^-)} + \frac{d(V_2^+, V_{25})}{d(V_2^+, V_2^-)} + \frac{d(V_3^+, V_{35})}{d(V_3^+, V_3^-)},$$

$$S_5 = 0,906 + 0 + 0,13 = 1,036, \quad R_5 = \max(0,906; 0; 0,13) = 0,906.$$

Учитывая, что $S^+ = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^+ = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$, получаем

$$S^+ = \min(1,639; 2,226; 2,553; 1,816; 1,036) = 1,036,$$

$$S^- = \max(1,639; 2,226; 2,553; 1,816; 1,036) = 2,553,$$

$$R^+ = \min(0,861; 1; 1; 1; 0,906) = 0,861, \quad R^- = \max(0,861; 1; 1; 1; 0,906) = 1.$$

На основании (9) вычисляем показатель Q как интегральную оценку альтернатив в соответствии с методом *VIKOR*:

<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>	<i>A5</i>
0,198	0,892	1,0	0,757	0,162

Следовательно, согласно методу *VIKOR* рассматриваемые альтернативы могут быть проранжированы так: $A_5 \succ A_1 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_3$.

Для ранжирования альтернатив в соответствии с методом *TOPSIS* определяем интегральные показатели C_i , $i=1, \dots, n$, в соответствии с (10), используя полученные значения расстояний между альтернативными и наилучшими и наихудшими решениями (табл. 5). Следовательно, согласно методу *TOPSIS*, рассматриваемые альтернативы могут быть проранжированы так: $A_5 \succ A_1 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_3$.

Таблица 5. Интегральная оценка альтернатив в соответствии с методом *TOPSIS*

Альтернатива	d^+	d^-	C
<i>A1</i>	0,412	0,6	0,593
<i>A2</i>	0,513	0,405	0,441
<i>A3</i>	0,721	0,148	0,17
<i>A4</i>	0,606	0,359	0,372
<i>A5</i>	0,319	0,632	0,665

Как видим, полученные при использовании различных методов ряды ранжирования альтернатив являются практически идентичными, что позволяет с достаточной степенью обоснованности сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным является пятый вариант применения РГ.

Выводы

Для оценки эффекта от интеграции в существующие распределительные сети источников РГ следует учитывать комплексный характер их воздействия на ряд показателей режима и фактор неопределенности используемой исходной информации, что обуславливает необходимость ориентации на те или иные методы многокритериального принятия решений в нечеткой среде.

Учитывая тот факт, что априори трудно отдать обоснованное предпочтение какому-либо конкретному методу принятия решений, следует одновременно использовать несколько методов, что в случае близости полученных при этом рядов ранжирования альтернатив позволяет более аргументировано осуществить выбор оптимального варианта. В противном случае логично сделать вывод о целесообразности проведения дальнейшего анализа рассматриваемых альтернатив, например, с привлечением дополнительных критериев, экспертных оценок и др.

Результаты экспериментальных расчетов с использованием методов *VIKOR* и *TOPSIS* свидетельствуют о достаточно высокой согласованности полученных при использовании каждого из указанных методов рядов ранжирования альтернатив, что дает основания для более обоснованного выбора наилучшего варианта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаркин А.Ф., Попов В.А., Банузاده Сахрагард С. и др. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в распределительные сети // Электрон. моделирование. 2016, **38**, № 1, с. 99—112.
2. Opricovic S., Tzeng G.H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS // European Journal of Operational Research, 2004, № 156, p. 445—455.
3. Kauffmann A., Gupta M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. New York : Van Nostrand Reinhold, 1991, 361 p.
4. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its application. Boston, Dordrecht, London : Kluwer Academic Publishers, 1991, 479 p.
5. Chen C.T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment // Fuzzy Sets and Systems. 2000, V. 14, p. 1—9.
6. Tran L., Duckstain L. Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. // Ibid. 2002, V. 130, p. 331—341.

7. Ebrahimnejada S., Mousavib S.M., Tavakkoli-Moghaddamc R., Heydard M. Evaluating high risks in large-scale projects using an extended VIKOR method under a fuzzy environment // Intern. Journal of Industrial Engineering Computations. 2012, № 3, p. 463—476.
8. Chen T.Y., Li C.H. Determining objective weights with intuitionistic fuzzy entropy measures: a comparative analysis // Information Sciences. 2010, V. 180, № 21, p. 4207—4222.
9. Ярмолюк О.С. Моделивання параметрів джерел розподіленої генерації в інтегрованих електропостачальних системах із урахуванням невизначеності інформації // Технічна електродинаміка. 2012, № 3, с. 57—58.

Получена 12.12.17;
после доработки 15.02.18

REFERENCES

1. Zharkin, A.F., Popov, V.A., Banuzade, S.S., Zamkovyi, P.A. and Spodinskaya, A.V. (2016), “Multicriteria evaluation of alternative options for the distributed generation sources integration into the distribution networks”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 38, no. 1, pp. 99-112.
2. Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2004), Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European Journal of Operational Research*, no. 156, pp. 445-455.
3. Kauffmann, A. and Gupta, M.M. (1991), Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
4. Zimmerman, H.J. (1991), Fuzzy set theory and its application, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London.
5. Chen, C.T. (2000), Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 14, pp. 1-9.
6. Tran L., Duckstain, L. (2002), “Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 130, pp. 331-341.
7. Ebrahimnejada, S., Mousavib, S.M., Tavakkoli-Moghaddamc, R. and Heydard, M. (2012), Evaluating high risks in large-scale projects using an extended VIKOR method under a fuzzy environment, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, no. 3, pp. 463-476.
8. Chen, T.Y. and Li, C.H. (2010), Determining objective weights with intuitionistic fuzzy entropy measures: a comparative analysis, *Information Sciences*, Vol. 180, no. 21, pp. 4207-4222.
9. Yarmolyuk, O.S. (2012), “Modeling parameters of distributed generation sources in integrated distribution system with uncertainty information”, *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 3, pp. 57-58.

Received 12.12.17;
after revision 15.02.18

В.А. Попов, О.С. Ярмолюк, Ф.В. Ткаченко, Д.В. Яценко

ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПОЧАТКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Запропоновано метод комплексної порівняльної оцінки впливу на основні режимні показники електричних мереж альтернативних варіантів інтеграції у них джерел розосередженої генерації. При вирішенні даної задачі на основі адаптованих алгоритмів багатокритеріального прийняття рішень VIKOR та TOPSIS передбачається врахування невизначеності використовуваної початкової інформації, яку задано у вигляді нечітких множин. Розглянуто

процедуру обчислення ентропії та на її основі відповідних коефіцієнтів важливості критеріїв з врахуванням невизначеності початкових даних, поданих у вигляді нечітких множин.

Ключові слова: невизначеність інформації, багатокритеріальне прийняття рішень, розподільна генерація, режими електричних мереж.

V.A. Popov, O.S. Yarmoliuk, F.V. Tkachenko, D.V. Yatsenko

FEATURES OF MULTICRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVE OPTIONS OF DISTRIBUTED GENERATION APPLICATIONS TAKING IN CONDITIONS OF INITIAL INFORMATION UNCERTAINTY

A method of the complex comparative estimation of alternative options of integrating sources of distributed generation taking into account their influence on the main parameters of the electrical networks modus of operation is proposed. Solving this problem on the basis of modified algorithms of multicriteria decision making VIKOR and TOPSIS assumes considering the uncertainty of the initial information given in the form of fuzzy sets. A procedure of calculation of entropy and corresponding coefficients of criteria importance with allowance for uncertainty of initial information presented in the form of fuzzy sets is considered.

Key words: uncertainty of information, multicriteria decision-making, distributed generation, modes of electrical networks.

ПОПОВ Владимир Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского». В 1974 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование и оптимизация систем электроснабжения, учет неопределенности исходной информации при управлении режимами электрических сетей, построение систем электроснабжения с источниками распределенной генерации, использование методов многокритериального принятия решений при проектировании систем электроснабжения и оптимизации их режимов.

ЯРМОЛЮК Елена Сергеевна, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры электроснабжения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского». В 2010 г. окончила Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — оценка состояния интегрированных систем электроснабжения с альтернативными источниками энергии при условии учета фактора неопределенности информации, оптимальное управление режимами микросетей при различных формах их построения и условиях функционирования.

ТКАЧЕНКО Федор Валериевич, студент-магистрант кафедры электроснабжения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского». Область научных исследований — использование методов многокритериального принятия решений.

ЯЦЕНКО Дмитрий Валериевич, студент PhD (аспирант) кафедры электроснабжения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т им. Игоря Сикорского». В 2017 г. окончил Запорожский национальный технический университет. Область научных исследований — моделирование режимов электрических сетей с источниками распределенной генерации при учете фактора неопределенности информации.