



УДК 621.316.1

А.Ф. Жаркин, чл.-кор. НАН Украины
Ин-т электродинамики НАН Украины
(Украина, 03680, Киев, пр. Победы, 56),

В.А. Попов, канд. техн. наук,

Саид Банузаде Сахрагард, П.А. Замковой, аспиранты,

А.В. Сподинская

Ин-т энергосбережения и энергоменеджмента
Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический ин-т»

(Украина, 03056, Киев, ул. Борщаговская, 115,

тел. (044) 454 96 91, e-mail: tig@ukr.net, zamkovoy@list.ru)

Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в распределительные сети

Разработана процедура комплексной (многокритериальной) оценки влияния на режимы электрической сети альтернативных вариантов использования источников распределенной генерации с помощью методов VIKOR, TOPSIS и алгоритма Беллмана—Заде. Указанные методы определяют оптимальную альтернативу на основе оценки расстояния до так называемого идеального решения при различной интерпретации данного показателя.

Розроблено процедуру комплексної (багатокритеріальної) оцінки впливу на режими електричної мережі альтернативних варіантів використання джерел розподіленої генерації за допомогою методів VIKOR, TOPSIS і алгоритма Беллмана—Заде. Зазначені методи визначають оптимальну альтернативу на основі оцінки відстані до так званого ідеального рішення, але при різній інтерпретації даного показника.

К л ю ч е в ы е с л о в а: распределенная генерация, методы многокритериального принятия решений, VIKOR, TOPSIS, алгоритм Беллмана—Заде.

В настоящее время малая энергетика играет важную роль в формировании энергетического баланса большинства индустриально развитых стран мира. Как указано в материалах ряда международных агентств, за последние годы объем вновь вводимых мощностей, относящихся к категории малой энергетики (включая распределенную генерацию, базирующуюся как на альтернативных, так и на традиционных источниках энергии), в некоторых странах уже превысил темпы развития централизованной генерации. Целесообразность и эффективность подобной стратегии развития энерге-

© А.Ф. Жаркин, В.А. Попов, Саид Банузаде Сахрагард, П.А. Замковой,
А.В. Сподинская, 2016

тики подтверждены не только результатами многочисленных исследований, но и достаточно обширным практическим опытом. Успех и масштабность проектов развития малой энергетики в значительной мере обеспечивались наличием в этих странах широкой законодательной и нормативной поддержки, а также протекционистской политикой государства.

Как показывают результаты многочисленных исследований, аргументированное применение распределенной генерации (выбор мощности источников и мест их интеграции в электрические сети) положительно влияет на технико-экономические показатели работы энергокомпаний и поэтому представляет для них несомненный интерес. В связи с этим целесообразной является разработка механизма комплексной оценки альтернативных вариантов внедрения источников распределенной генерации для обоснования решения, представляющего наибольший интерес как для возможных инвесторов, так и для энергокомпаний.

Очевидно, что источники распределенной генерации даже относительно небольшой мощности в большей или меньшей степени оказывают воздействие на условия работы распределительных сетей и, в первую очередь, на такие характеристики как потери мощности и электрической энергии, режим напряжений, надежность электроснабжения. При этом, в общем случае, произвольно размещенные в электрических сетях генерирующие источники могут как улучшать, так и ухудшать все или, по крайней мере, некоторые из перечисленных показателей.

Теоретически определение величины потерь мощности и электрической энергии при наличии соответствующей информации относительно параметров сети и характеристик ее режима не вызывает затруднений [1]. В полной мере это относится и к оценке величины изменения потерь в условиях применения средств распределенной генерации. Более того, при необходимости в процессе данного анализа может также быть учтено изменение величины потерь в сетях высших номинальных напряжений, вызванное появлением генерирующих источников в примыкающих к ним распределительных сетях [2].

Понятно, что подключение генерирующего источника к линии распределительной сети по-разному влияет на режим напряжений у потребителей. В отдельных случаях снижение потери напряжения в режиме максимальных нагрузок может способствовать обеспечению нормируемых отклонений напряжения. Иногда для достижения данной цели требуется изменение ответвлений распределительных трансформаторов 10/0,4 кВ или (и) закона регулирования напряжения на подстанции. Однако может сложиться ситуация, когда распределенная генерация резко нарушает однородность графиков нагрузки отдельных распределительных линий, что су-

щественно снижает эффективность централизованного регулирования напряжения и приводит к ухудшению режима напряжений у потребителей.

Решение вопроса количественной оценки влияния распределенной генерации на режим напряжений не является однозначным. В частности, использование такой характеристики как величина энергии, потребляемая при отклонениях напряжения, выходящих за допустимые пределы, связана со следующими недостатками. С одной стороны, данный показатель не является нормативным и не всегда объективно отражает фактическую ситуацию с обеспечением качества электрической энергии. С другой стороны, учитывая реальное информационное обеспечение, существующее в системах электроснабжения, трудно рассчитывать, что данный показатель может быть определен с приемлемым уровнем адекватности. Недостаточно убедительным выглядит и предложенный в [3] подход, связанный с оценкой индекса стабилизации напряжения. В качестве альтернативного подхода можно рассматривать применение экспертной оценки последствий использования распределенной генерации относительно ее влияния на отклонения напряжения у потребителей.

Влияние распределенной генерации на надежность электроснабжения является наиболее дискуссионным вопросом. Многое зависит от существующей нормативной базы и стратегии поведения конкретной энергокомпании. Если изолированная работа источников распределенной генерации на выделенную нагрузку в аварийных ситуациях (так называемый островной режим) не допускается, то указанные источники практически не оказывают влияния на показатели надежности.

Если островной режим работы допустим, то следует рассмотреть две ситуации:

- 1) отсутствие нормирования показателей надежности в энергокомпании;
- 2) наличие нормативных значений для определенных показателей надежности, устанавливаемых соответствующим регулирующим органом, что характерно практически для всех индустриально развитых стран.

В первом случае распределенная генерация не рассматривается как средство целенаправленного повышения надежности. Если отсутствует однозначная регламентация, надежность можно оценивать по любому из используемых для этого показателей [4], в частности по ожидаемой величине недоотпущенной электроэнергии.

Во втором случае, вне зависимости от вариантов интеграции генерирующих источников в распределительные сети, должен быть обеспечен одинаковый уровень надежности электроснабжения. В любой ситуации для обеспечения приемлемых условий работы электрических сетей с интегрированными в них источниками распределенной генерации требуется применение современных коммутационных аппаратов (преимущественно

автоматических), перенастройка или модернизация средств релейной защиты и автоматики.

Таким образом, при внедрении источников распределенной генерации, в зависимости от конкретных условий, может потребоваться установка дополнительных или замена существующих коммутационных аппаратов, их перераспределение в пределах отдельной распределительной линии, реорганизация или развитие средств релейной защиты и автоматики. При этом объемы требуемых инвестиций для реализации каждого из вариантов интеграции средств распределенной генерации могут быть существенно различными. Поэтому фактор надежности при принятии решения относительно выбора оптимального варианта в зависимости от конкретной ситуации может оцениваться либо удельным (на единицу вложенных средств) уровнем повышения надежности либо величиной требуемых дополнительных инвестиций.

Следовательно, принятие решения относительно оптимального варианта применения распределенной генерации должно формироваться в результате реализации той или иной процедуры многокритериального сравнения альтернатив. При этом независимо от оценки влияния генерирующих источников на качество электрической энергии и надежность электроснабжения используемые для данной цели методы должны учитывать различную физическую природу и размерность используемых критериев.

Таблица 1

Номер варианта	ΔA , МВт · ч	K , баллы	I , млн. гр.
1	14,4	3	1,0
2	10,0	6	1,8
3	16,0	2	1,2
4	24,4	4	2,1
5	11,6	8	2,0
6	14,0	3	1,5
7	20,0	6	0,3
8	17,2	7	0,6
9	26,0	9	2,5
10	18,0	4	1,8
f^+	10,0	9	0,3
f^-	26,0	2	2,5

В настоящее время существуют различные классификации подходов к многокритериальному принятию решений для различных классов задач. Соответственно разработано достаточно большое число методов и алгоритмов решения этих задач. Рассмотрим возможность использования трех методов многокритериального принятия решений, VIKOR, TOPSIS и алгоритма Беллмана—Заде, которые определяют оптимальную альтернативу на основе оценки расстояния до идеального решения при различной интерпретации данного показателя. Представляет практический интерес исследование устойчивости формируемого при этом ряда ранжирования альтернатив.

В табл. 1 представлены 10 альтернативных вариантов подключения источников распределенной генерации к электрическим сетям среднего напряжения, каждый из которых характеризуется тремя показателями:

величиной потерь электрической энергии ΔA в распределительных сетях и сетях 110 кВ энергосистемы;

экспертной оценкой качества K электрической энергии (режим напряжений) после подключения источников распределенной генерации и соответствующей адаптации к данным условиям параметров средств регулирования напряжения;

объемом инвестиций I , необходимым для обеспечения нормируемого уровня надежности после интеграции средств распределенной генерации в электрические сети.

Согласно методу VIKOR [5] компромиссное решение задачи должно представлять собой альтернативу, которая наиболее близка к идеальному решению. При этом для оценки степени близости альтернативы к идеальному решению используется многокритериальная мера, основанная на L_p метрике [6]. Уровень несоответствия рассматриваемого решения идеальному определяется выражением

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^n [w_i (f_i^+ - f_{ij}) / (f_i^+ - f_i^-)]^p \right\}^{1/p},$$

$$1 \leq p \leq \infty, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m, \quad \sum w_i = 1,$$

где m — число рассматриваемых альтернатив; n — число целевых функций; w_i — вес i -й целевой функции, отражающий ее значимость при принятии решения; f_i^+ — соответствует идеальному решению для i -й целевой функции ($f_i^+ = \min_j f_{ij}$ — для минимизируемых целевых функций, характеризующих величину потерь; $f_i^+ = \max_j f_{ij}$ — для максимизируемых целевых функций, характеризующих выигрыш); f_i^- — соответствует наихуд-

шему решению ($f_i^- = \min_j f_{ij}$ — для минимизируемых целевых функций, $f_i^+ = \max_j f_{ij}$ — для максимизируемых целевых функций). В данном случае $L_{1,j}$ соответствует максимальному уровню групповой согласованности отдельных целевых функций (факторов), $L_{\infty,j}$ — условию максимального индивидуального отклонения отдельных целевых функций от идеального решения.

Вычислительная процедура метода VIKOR состоит из следующих операций [7].

А л г о р и т м 1.

1. Определяем наилучшее и наихудшее значения всех рассматриваемых целевых функций f_i^+ и f_i^- , $i = 1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. подлежит данная целевая функция максимизации или минимизации).

2. Вычисляем показатели S_j , характеризующие максимальную групповую полезность, и R_j , отражающие уровень индивидуальных потерь:

$$S_j = \sum w_i (f_i^+ - f_{ij}) / (f_i^+ - f_i^-), \quad \sum w_i = 1, \quad (1)$$

$$R_j = \max_i [w_i (f_i^+ - f_{ij}) / (f_i^+ - f_i^-)],$$

где w_i — индикатор относительного веса (важности) i -й целевой функции (критерия).

3. Вычисляем характеристику Q_j , $j = 1, \dots, m$:

$$Q_j = \begin{cases} \frac{R_j - R^+}{R^- - R^+}, & \text{если } S^+ = S^-, \\ \frac{S_j - S^+}{S^- - S^+}, & \text{если } R^+ = R^-, \\ \left[v \frac{(S_j - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1-v) \frac{(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} \right] & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

где $S^+ = \min_j S_j$; $S^- = \max_j S_j$; $R^+ = \min_j R_j$; $R^- = \max_j R_j$; v — относительный

вес стратегии выбора компромиссного решения согласно характеристике S или R (если отсутствуют иные условия, принимается $v = 0,5$).

4. Формируем последовательности альтернатив в соответствии с убыванием значений S , R и Q , получая три ряда ранжирования.

В качестве потенциального компромиссного решения рассматривается альтернатива $A^{(1)}$, которая в ряде ранжирования по показателю Q имеет

минимальное значение. Окончательное решение относительно выбора данной альтернативы в качестве оптимальной принимается на основании анализа следующих двух условий:

1. Наличие приемлемого различия между проранжированными альтернативами: $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \Delta Q$, где $A^{(2)}$ — альтернатива, занимающая второе место в ряду ранжирования по Q ; $\Delta Q = \frac{1}{m-1}$, m — общее число альтернатив.

2. Наличие приемлемой стабильности решения. Это означает, что альтернатива $A^{(1)}$ должна быть одновременно лучшей и в рядах ранжирования по S и (или) по R , вычисленных по формуле (1).

Если одно из указанных условий не выполняется, то окончательное решение представляется в виде ряда альтернатив, которые включают: альтернативы $A^{(1)}$ и $A^{(2)}$ при невыполнении условия 2; альтернативы $A^{(1)}, \dots, A^{(m)}$ при невыполнении условия 1; тогда альтернатива $A^{(m)}$ определяется условием $Q(A^{(m)}) - Q(A^{(1)}) \leq \Delta Q$.

Таблица 2

Номер варианта	S	R_1	R_2	R_3	R	Q
1	0,483	0,092	0,285	0,106	0,285	0,553
2	0,37	0	0,143	0,228	0,228	0,288
3	0,594	0,125	0,333	0,137	0,333	0,789
4	0,811	0,3	0,238	0,273	0,3	0,908
5	0,339	0,033	0,048	0,258	0,258	0,34
6	0,551	0,083	0,285	0,182	0,285	0,618
7	0,351	0,208	0,143	0	0,208	0,217
8	0,291	0,15	0,095	0,046	0,15	0
9	0,667	0,333	0	0,334	0,334	0,862
10	0,632	0,167	0,238	0,228	0,238	0,567
S^+, R^+	0,291				0,15	
S^-, R^-	0,811				0,334	

Таблица 3

Критерий	Ранжирование альтернативных вариантов по месту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	8	7	2	5	1	10	6	3	9	4
S	8	5	7	2	1	6	3	10	9	4
R	8	7	2	10	5	6	1	4	3	9

Результаты поэтапных расчетов, выполненных в соответствии с алгоритмом 1 по методу VIKOR, представлены в табл. 2. Полученные данные позволяют проранжировать рассматриваемые альтернативы по критериям Q, S и R .

Как видно из табл. 3, сформированные ряды ранжирования достаточно схожи между собой. Поэтому с учетом указанных выше условий, можно сделать вывод о том, что в качестве оптимального следует рассматривать восьмой вариант интеграции источников распределенной генерации в электрические сети.

Метод многокритериального анализа (ранжирования) альтернатив TOPSIS [8], в отличие от метода VIKOR, помимо оценки расстояния от рассматриваемой альтернативы до идеального решения позволяет учитывать и расстояние до наихудшего решения. Компромисс при выборе оптимальной альтернативы основан на том, что выбранное решение должно быть одновременно максимально близким к идеальному и наиболее удалено от наихудшего решения. Алгоритм решения задачи следующий.

А л г о р и т м 2.

1. Формируем нормализованную матрицу решений, элементы которой вычисляются так:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m f_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m,$$

где f_{ij} — значение i -й целевой функции для j -й альтернативы.

2. Вычисляем взвешенную нормализованную матрицу решений с помощью весовых коэффициентов, определяющих важность для лица, принимающего решение (ЛПР), отдельных целевых функций w_i . Элементы матрицы находим в соответствии с выражением $v_{ij} = w_i r_{ij}$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

3. Определяем идеальное A^+ и наихудшее A^- решения:

$$A^+ = v_1^+, \dots, v_n^+ = (\max_j v_{ij} | i \in I', \min_j v_{ij} | i \in I''),$$

$$A^- = v_1^-, \dots, v_n^- = (\min_j v_{ij} | i \in I', \max_j v_{ij} | i \in I''),$$

где I' — целевые функции, характеризующие выигрыш и требующие максимизации; I'' — целевые функции, характеризующие затраты и требующие минимизации.

4. Вычисляем меры различия каждой альтернативы с идеальным и наихудшим решениями, используя n -мерное евклидово расстояние:

до идеального решения — $D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}$, $j = 1, \dots, m$;

до наихудшего решения — $D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}$, $j = 1, \dots, m$.

Находим показатель относительной близости альтернатив к идеальному решению:

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}.$$

Таблица 4

Номер варианта	r_{ij}			v_{ij}		
	ΔA	K	I	ΔA	K	I
1	0,255	0,168	0,195	0,085	0,053	0,065
2	0,177	0,335	0,351	0,059	0,112	0,117
3	0,284	0,112	0,234	0,094	0,037	0,078
4	0,432	0,224	0,41	0,144	0,074	0,137
5	0,206	0,447	0,39	0,069	0,149	0,13
6	0,248	0,168	0,293	0,083	0,056	0,098
7	0,354	0,335	0,059	0,118	0,112	0,02
8	0,305	0,391	0,117	0,102	0,13	0,039
9	0,461	0,503	0,488	0,154	0,167	0,163
10	0,319	0,224	0,351	0,106	0,074	0,117
v^+				0,059	0,167	0,02
v^-				0,154	0,037	0,163

Таблица 5

Номер варианта	D_j^+	D_j^-	C_j^*
1	0,123	0,121	0,495
2	0,113	0,129	0,533
3	0,147	0,103	0,412
4	0,172	0,046	0,212
5	0,113	0,144	0,561
6	0,138	0,098	0,415
7	0,081	0,165	0,670
8	0,060	0,163	0,732
9	0,172	0,130	0,431
10	0,143	0,075	0,346

При этом $C_j^* = 1$, если $A_j = A^+$, и $C_j^* = 0$, если $A_j = A^-$. Упорядочиваем альтернативы в порядке убывания параметра C_j^* . Альтернатива, которой соответствует максимальное значение параметра C_j^* , может рассматриваться в качестве наилучшего компромиссного решения задачи.

В табл. 4 и 5 представлены результаты поэтапных расчетов, выполненных в соответствии с методом TOPSIS, для многокритериального сравнения альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в электрические сети.

Анализ полученных данных, проведенный в соответствии с алгоритмом 2, позволил проранжировать альтернативные варианты применения средств распределенной генерации следующим образом:

Место	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ранжирование альтернатив по критерию C_j^*	8	7	5	2	1	9	6	3	10	4

Рассмотрим алгоритм многокритериального принятия решений, описанный в работе [9], который также в определенной мере связан с оценкой степени близости каждого из альтернативных решений к идеальному, так как оптимальное решение в данном случае должно отвечать требованию одновременного максимального удовлетворения всех целей.

Согласно данному подходу к решению многокритериальных задач изначально каждая целевая функция заменяется нечеткой функцией или нечетким множеством $A_k = \{X, \mu_{A_k}(x)\}$, $x \in L$, $k = 1, \dots, q$, где $\mu_{A_k}(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества A_k ; L — область допустимых решений. В этом случае нечеткое решение D формируется на основе использования некоторого оператора агрегирования и операции минимизации: $\mu_A(X) = \min_{k=1, \dots, q} \mu_{A_k}(X)$, $x \in L$, где функции принадлежности $\mu_{A_k}(x)$, $k = 1, \dots, q$, определяют степень достижения нечеткими целевыми функциями оптимальных значений. Этому условию, в частности, отвечают следующие функции принадлежности:

для целевых функций, подлежащих максимизации, —

$$\mu_{A_k}(x) = \left[\frac{f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)}{\max_{x \in L} f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)} \right]^{w_k}, \quad (2)$$

для целевых функций, подлежащих минимизации, —

$$\mu_{A_k}(x) = \left[\frac{\max_{x \in L} f_k(x) - f_k(x)}{\max_{x \in L} f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)} \right]^{w_k}, \quad (3)$$

где w_k — степень важности (веса) отдельных целевых функций.

С учетом функций принадлежности (2) и (3) оптимальному решению задачи будет соответствовать условие $\max_{x \in L} \mu_A(x) = \max_{x \in P} \min_{k=1, \dots, q} \mu_{A_k}(x)$. Тогда $x^* = \arg \max_{x \in P} \min_{k=1, \dots, q} \mu_{A_k}(x)$, где P — область компромиссов (область Парето).

В табл. 6 приведены результаты расчетов, выполненных описанным методом Беллмана—Заде. Анализ полученных данных позволил проранжировать альтернативные варианты в следующем порядке:

Место	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ранжирование альтернатив по критерию μ_{A_k}	8	7	2	10	5	1	6	4	3	9

Таким образом, сравнивая методы VIKOR и TOPSIS, видим, что они оба основаны на применении обобщенной функции, отражающей степень близости к идеальному решению с использованием метода компромиссного программирования [10]. Метод VIKOR определяет компромисс на основе оценки кратчайшего расстояния до идеального решения. Вырабатываемое решение должно обеспечить максимальную полезность и минимальные потери по отдельным критериям. Метод TOPSIS гарантирует для выбираемого компромиссного решения кратчайшее расстояние от идеального решения и одновременно максимальное расстояние до наихудшего решения. Однако данный метод не позволяет учесть важность этих расстояний, что является его недостатком, поскольку для ЛПП минимальное расстояние до идеального решения является более понятным аргументом.

Таблица 6

Номер варианта	$\mu(\Delta A)$	$\mu(K)$	$\mu(I)$	$\min \mu$
1	0,725	0,143	0,682	0,143
2	1,0	0,571	0,318	0,318
3	0,625	0	0,591	0
4	0,1	0,286	0,182	0,1
5	0,9	0,857	0,227	0,227
6	0,75	0,143	0,455	0,143
7	0,375	0,571	1,0	0,375
8	0,55	0,714	0,864	0,55
9	0	1,0	0	0
10	0,5	0,286	0,318	0,286

Рассмотренные методы ориентированы на различные формы агрегирующих функций (L_p -метрики) и различные формы нормализации: VIKOR — на линейную, TOPSIS — на векторную. Поэтому в VIKOR нормализуемая величина не зависит от единиц измерений целевых функций, а в TOPSIS она может зависеть от единиц измерений критериев.

Выводы

Использование различных методов многокритериального принятия решений при рассмотрении одной и той же задачи не только позволяет оценить устойчивость полученных решений, но и является важным фактором подтверждения их корректности. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени стабильности ранжирования вариантов применения распределенной генерации при использовании различных методов многокритериального принятия решений (во всех случаях к числу наиболее предпочтительных относятся варианты 2, 5, 7, 8). Данный факт увеличивает обоснованность выбора оптимального решения при рассмотрении представленных альтернатив.

Из рассмотренных методов только метод Беллмана—Заде имеет теоретически доказанное обоснование того факта, что полученное с его помощью оптимальное решение автоматически принадлежит области Парето [11]. Следовательно, совпадение рядов ранжирования альтернатив может быть косвенным доказательством того, что и получаемые при использовании методов VIKOR и TOPSIS оптимальные решения принадлежат области Парето, что подтверждает теоретическую корректность достигнутых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электрической энергии в электрических сетях. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 176 с.
2. Жаркин А.Ф., Попов В.А., Ткаченко В.В., Саид Банузаде Сахрагард Функциональное эквивалентирование электрических сетей при оценке влияния источников распределенной генерации на их режимы// Электрон. моделирование. — 2013. — 35, № 3. — С. 99—111.
3. Бартоломей П.И., Пониковская Т.Ю., Чечушев Д.А. Анализ влияния распределенной генерации на свойства СЭС// Сб. трудов объединенного симпозиума «Энергетика России в 21 веке — Восточный вектор». — Иркутск, 2010. — С. 1—5.
4. Попов В.А., Ткаченко В.В., Манойло Ю.Д. Вопросы оценки уровня надежности воздушных линий 6,10 кВ в энергосистемах Украины// Промэлектрo. — 2010. — № 5. — С. 25—32.
5. Opricovic S. Multi-criteria optimization of civil engineering systems. — Belgrade: Faculty of Civil Engineering, 1998.

6. Yu P.L. A Class of Solutions for Group Decision Problems // Management Science. — 1973. — Vol. 19, No 8. — P. 936—946.
7. Opricovic S., Tzeng G.H. The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS // European Journal of Operational Research. — 2004. — 156 (2). — P. 445—455.
8. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. — Methods and Applications // A State of Art Survey. — Berlin, Heidelberg, NY: Springer Verlag, 1981. — 320 p.
9. Bellmann R.E., Zadeh L.A. Decision — making in a fuzzy environment // Management Science. — 1970. — No 17. — P. 141—164.
10. Zeleny M. Multiple Criteria Decision Making. — McGraw-Hill, NY, 1982.
11. Bellman R., Giertz M. On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets // Inform. science. — 1974. — No 5(2). — P. 149—157.

A.F. Zharkyn, V.A. Popov,
S. Banuzade Sahragard, P.A. Zamkovi, A.V. Spodynska

MULTICRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVE OPTIONS FOR THE DISTRIBUTED GENERATION SOURCES INTEGRATION INTO THE DISTRIBUTION NETWORKS

The procedure has been developed of complex (multicriteria) assessment of distributed generation sources impact on electric network modes of operation. For this purpose, VIKOR and TOPSIS methods as well as the Bellman-Zadeh algorithm were used. These methods have one common feature – they all define the optimal alternative on the bases of estimating distance to the so-called perfect solution, but at a different interpretation of this indicator.

Keywords: distributed generation, multi-criteria decision-making methods, VIKOR, TOPSIS, the algorithm of Bellman-Zadeh.

REFERENCES

1. Zhelezko, Yu.S. (1989), *Vybor meropriyatiy po snizheniyu poter' elektricheskoy energii v elektricheskikh setyakh* [The choice of measures to reduce electricity losses in electrical networks], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
2. Zharkin, A.F., Popov, V.A., Tkachenko, V.V. and Said Banuzade Sahragard (2013), “Electrical networks functional equivalenting in assessing the impact of distributed generation sources to their modes”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 35, no. 3, pp. 99-111.
3. Bartolomey, P.I., Ponikovskaya, T.Yu. and Chechushev, D.A. (2010), “Analysis of distributed generation impact on the properties of SES”, *Proceedings of the Joint Symposium «Energy of Russia in the 21st Century — Eastern Vector»*, Irkutsk, 2010, Russia, pp.1-5.
4. Popov, V.A., Tkachenko, V.V. and Manoylo, Yu.D. (2010), “Issues of assessing reliability level of 6,10 kV overhead lines in power systems of Ukraine”, *Promelektro*, no. 5, pp. 25-32.
5. Opricovic, S. (1998), Multi-criteria optimization of civil engineering systems, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia.
6. Yu, P.L. (1973), “A class of solutions for group decision problems”, *Management Science*, Vol. 19, no. 8, pp. 936-946.
7. Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2004), “The compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, no. 2, pp. 445-455.
8. Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981), Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications. A State of the Art Survey, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, N.Y.

9. Bellmann, R.E. and Zadeh, L.A. (1970), "Decision — making in a fuzzy environment", *Management Science*, no. 17, pp. 141-164.
10. Zeleny, M. (1982), *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York, USA.
11. Bellman, R. and Giertz, M. (1974) "On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets", *Information Science*, no. 5(2), pp. 149-157.

Поступила 19.10.15;
после доработки 23.11.15

ЖАРКИН Андрей Федорович, чл.-кор. НАН Украины, зам. директора Ин-та электродинамики НАН Украины. В 1977 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — вопросы повышения качества электрической энергии и эффективности ее использования в системах электроснабжения, разработка методов анализа электрических сетей с нелинейными и нестационарными нагрузками, разработка теоретических основ построения информационно-измерительных систем мониторинга качества электрической энергии и новых подходов к обеспечению электромагнитной совместимости.

ПОПОВ Владимир Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ». 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.

САИД БАНУЗАДЕ САХРАГАРД, аспирант кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 2010 г. Область научных исследований — моделирование режимов электрических сетей с источниками распределенной генерации, методы многокритериального анализа.

ЗАМКОВОЙ Петр Александрович, аспирант кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 2014 г. Область научных исследований — моделирование распределительных сетей, проектирование и управление режимами microgrids.

СПОДИНСКАЯ Анастасия Владимировна, студент-магистрант кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ». Область научных исследований — интеграция альтернативных источников энергии в СЭС.