

В.А. Попов, д-р. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-3484-4597
Е.С. Ярмолюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-8571-2573
Н.Н. Федосенко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-7077-8334
В.В. Ткаченко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4528-7661
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПО СОВОКУПНОСТИ РЕЖИМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены вопросы оценки влияния распределенной генерации на такие режимные характеристики распределительной сети как потери электрической энергии и напряжения, надежность электроснабжения. Данные факторы целесообразно учитывать при сравнении различных вариантов интеграции генерирующих источников в электрическую сеть. Показано, что в распределительных сетях оценка указанных характеристик режима невозможна без учета неопределенности информации и предложены пути решения данной задачи. Разработаны методы адекватного учета фактического уровня неопределенности информации при определении значений электрических нагрузок и выходной мощности альтернативных источников распределенной генерации, моделировании режимов распределительных сетей и оценке их основных показателей. Представлен алгоритм многокритериального сравнения альтернатив с учетом неопределенности учитываемых критериев, их различной физической природы и размерности. Реализация полученных в работе результатов позволит повысить интегральную эффективность работы современных распределительных сетей с подключенными к ним источниками распределенной генерации.

Ключевые слова: неопределенность информации, распределенная генерация, многокритериальное сравнение альтернатив.

Сегодня применение распределенной генерации (РГ) рассматривается в качестве одного из актуальных направлений развития мировой электроэнергетики. Однако при решении вопросов внедрения генерирующих источников часто практический интерес представляет сравнение различных вариантов их применения, в частности, с точки зрения влияния на основные показатели режима электрических сетей, характеризующих, например, уровень потерь электрической энергии, надежность электроснабжения, отклонения напряжения. Это позволяет не только оценить характер и степень данного влияния, но при необходимости выбрать из ряда альтернативных вариантов наиболее рациональные в этом отношении решения относительно применения РГ. Вместе с тем, учитывая, что указанные генерирующие источники чаще всего интегрируются в сети низкого или среднего напряжения, при рассмотрении указанной задачи необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Во-первых, крайне ограниченный объем измерительных устройств, которые имеются в настоящее время в отечественных распределительных сетях (РС), не позволяют адекватно моделировать их режимы без учета неопределенности информации. Проблема дефицита необходимого информационного обеспечения еще в большей степени проявляется при интеграции в данные сети источников РГ, в первую очередь, альтернативного характера, выходная мощность которых в значительной степени зависит от ряда труднопрогнозируемых факторов в основном метеорологического характера.

Во-вторых, указанные выше показатели режима имеют различную физическую природу и не могут быть объективно представлены единой интегральной характеристикой, например, экономического характера, что предполагает необходимость использования для решения данной задачи методы многокритериального сравнения альтернатив.

В-третьих, предлагаемые для указанной цели методы принятия решений должны иметь возможность оперировать с нечетко заданными критериями различной природы и размерности.

Таким образом, целью представленных исследований является разработка методов адекватного учета фактического уровня неопределенности информации при определении значений электрических нагрузок и выходной мощности альтернативных источников РГ, моделировании режимов РС и оценке их основных показателей, а также адаптации процедуры многокритериального принятия решений к условиям, когда отдельные критерии представлены нечеткими количественными или качественными величинами.

© В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, Н.Н. Федосенко, В.В. Ткаченко, 2019

В работах, например, [1, 2] был предложен ряд методик и алгоритмов, которые позволяют сформировать нечеткие оценки нагрузок и выходной мощности генерирующих источников с учетом фактического уровня неопределенности используемой для данной цели информации, основная суть которых заключается в следующем.

Оценки электрической нагрузки отдельных потребителей или узлов сети формируются на основании типовых графиков (ординаты которых, учитывая ограниченные статистические данные, используемые для их формирования, и с целью повышения адекватности представляются интервальными величинами [3]) и некоторого количества ретроспективных измерений нагрузок и/или их косвенных значений, полученных, например, путем пересчета данных о месячном электропотреблении [3]. В этом случае, результат каждого прямого или косвенного измерения нагрузки (P_{kt}), трансформируется в интервальные оценки отдельных ординат соответствующего графика нагрузки вида $[\underline{P}_{kt}, \bar{P}_{kt}]$, $[\underline{P}_t^*, \bar{P}_t^*]$ – интервальные оценки ординат соответствующего типового графика нагрузки, $k \in K$, $t = 1, \dots, T$, (рис. 1), где K – объем используемых данных, \underline{P}_{kt} , \bar{P}_{kt} – соответственно нижняя и верхняя границы интервальной оценки t -ой ординаты графика нагрузки. Последующий механизм формирования нечетких (обобщенных) оценок нагрузок представлен на рис. 1 и, как показывает практика расчетов, наиболее удобной формой их представления является задание в виде нечетких множеств, в частности, $L-R$ типа с трапециевидальными функциями принадлежности [3].

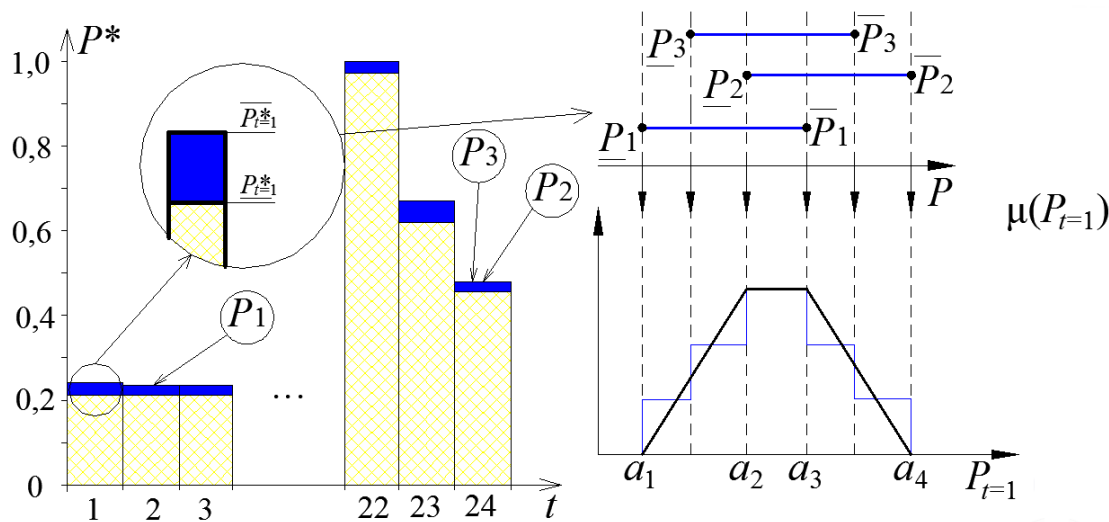


Рисунок 1 – Интервальный типовой график и нечеткая оценка нагрузки

Различные физические процессы, лежащие в основе работы отдельных источников РГ, и геофизические факторы, которые влияют на их функционирование, не позволяют сформировать унифицированный подход для расчета выходных характеристик с учетом фактического уровня неопределенности имеющейся информации. В связи с этим были разработаны методики, например, [1], которые дают возможность наиболее рационально задействовать все имеющиеся соответствующие данные о технических характеристиках, конкретных условиях эксплуатации, физических процессах, лежащих в основе их работы, и ряде гидрометеорологических факторов для оценки выходной мощности различных альтернативных источников энергии в отдельные периоды времени. В частности, выходная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) для произвольного момента времени может быть определена следующим образом [1, 4]

$$\tilde{P}_{ВЭС_t} = \rho \frac{F}{2} [\underline{V}_t^3, \bar{V}_t^3] \tilde{\xi} \tilde{\eta}_p \tilde{\eta}_Г \tilde{\eta}_{пр}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; F – площадь, ометаемая ветроколесом; $\underline{V}_t, \bar{V}_t$ – интервальная оценка скорости ветра на высоте установки ветроколеса; ξ – коэффициент использования скорости ветра; $\eta_p, \eta_G, \eta_{пр}$ – к.п.д. соответственно повышающего редуктора, ветрогенератора, преобразовательного устройства (выпрямительно-инверторного блока).

В данном случае скорость ветра задается интервальной величиной, определяемой на основе построенного по ограниченному статистическим данным соответствующего типового (для предполагаемого

места установки ВЭС и сезона года) графика [1, 4]. Остальные, входящие в (1), неопределенные параметры представляются нечеткими числами с треугольными функциями принадлежности. Это объясняется тем, что на предварительных этапах проектирования не всегда имеется информация о конкретных технических характеристиках оборудования и они определяются на основании справочных данных, задаваемых чаще всего в виде диапазона их возможных значений. В этом случае при стандартном подходе, ориентированном на детерминированную информацию, в расчетах использовались, как правило, значения параметров, соответствующие серединам приведенных интервалов. Учет всего возможного диапазона изменений соответствующего показателя (например, задавая его нечетким числом с треугольной функцией принадлежности) призван повысить адекватность моделируемых характеристик.

Таким образом, учитывая характер и форму задания начальных данных, а также правила выполнения операций с нечеткими числами [1, 5], оценка выходной мощности источника РГ (в данном случае ВЭС) для любого времени суток t характерного сезона года будет описываться нечетким множеством (нечетким числом) с трапецидальной функцией принадлежности.

Следовательно, определение выходной мощности альтернативных источников РГ и электрических нагрузок осуществляется в рамках единой методологии, что позволит эффективно использовать полученные результаты при определении потокораспределения и последующей оценке параметров режимов систем электроснабжения с учетом реальной неопределенности информации.

В то же время сформированные таким образом нечеткие оценки нагрузок и выходной мощности источников РГ отражают параметры режима в среднем за некоторый характерный период времени и в подобном виде они могут быть непосредственно использованы для определения такой характеристики работы системы электроснабжения, отражающей ее надежность, как, например, ожидаемая величина

недоотпущенной электроэнергии ($EENS$):
$$EENS = \omega \tau \sum_{i=1}^n \tilde{P}_{срi}$$
 (где ω – удельная повреждаемость

элементов сети; τ – среднее время восстановления электроснабжения; $P_{срi}$ – средняя нагрузка i -го элемента

сети). Очевидно, что в этом случае по аналогии с нечеткой оценкой средней нагрузки величина $EENS$ (не зависимо от того будут ли значения ω и τ заданы детерминированными, интервальными или нечеткими числами) также представляется нечетким числом с трапецидальной функцией принадлежности.

Вместе с тем при расчете таких показателей режима как потери электрической энергии или напряжений с целью снижения уровня неопределенности получаемых оценок целесообразно по возможности учесть пусть и ограниченные, но все же имеющиеся в сети оперативные измерения.

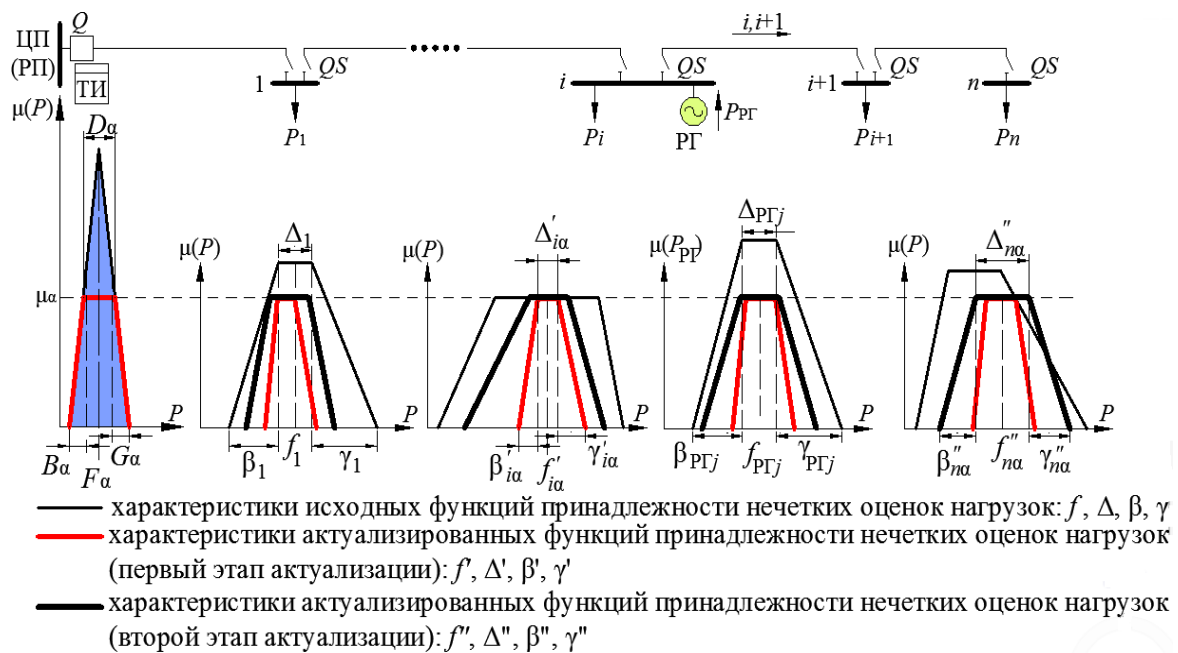


Рисунок 2 – Процедура актуализации нечетких оценок нагрузок узлов и выходных мощностей источников РГ

Предложенный для данной цели эвристический метод [3] позволяет исключить использование арифметических операций над нечеткими множествами, которые приводят к возрастанию уровня неопределенности, а оперирует с характеристиками нечетких оценок параметров, к которым относятся (рис. 2): Δ – ширина интервала толерантности; f – середина интервала толерантности; β, γ – левый и правый коэффициенты неопределенности [6]. При этом процедура актуализации нагрузок реализуется в два этапа.

Первоначально указанные выше характеристики нечетких оценок нагрузок узлов координируются с аналогичными характеристиками оценки телеизмерений («ТИ» на рис. 2) суммарной нагрузки согласно условию, что в большей степени корректируются не только большие по величине нагрузки (характеристика f), но и те оценки нагрузки, которые имеют более высокий уровень неопределенности (характеристики Δ, β, γ) – рис. 2.

На втором этапе процедуры актуализации учитывается, что степень неопределенности полученных оценок нагрузок будет тем выше, чем больше количество узлов, для которых имеется оперативное измерение их фактической суммарной нагрузки. При этом исходят из следующего. Если гипотетически предположить, что от некоторой точки сети, где проводилось телеизмерение нагрузки, питается только один нагрузочный узел, то после актуализации оценка его нагрузки должна быть полностью идентична результату телеизмерения. При возрастании количества узлов, для которых осуществлялось измерение нагрузки, увеличивается число комбинаций возможных значений нагрузок отдельных узлов, которые в сумме будут соответствовать результату телеизмерения.

Аналогичные соображения лежат и в основе процедуры расчета потокораспределения в сети. Например, для линии РС с источником РГ соответствующие характеристики нечеткой оценки нагрузки для некоторого участка $i, i+1$ (рис. 2) определяются на основании следующих выражений:

$$f''_{i,i+1} = \sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} f''_{ga} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} f''_{qP\Gamma a},$$

$$\Delta''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \Delta''_{ga} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \Delta''_{qP\Gamma a} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

$$\beta''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \beta''_{ga} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \beta''_{qP\Gamma a} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

$$\gamma''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \gamma''_{ga} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \gamma''_{qP\Gamma a} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

где $n_{i,i+1}$ – количество узлов нагрузок, которые получают питание от участка сети $i, i+1$; $k_{i,i+1}$ – количество источников РГ, мощность от которых согласно расчету потокораспределения протекает по участку сети $i, i+1$; $f''_{ga}, \Delta''_{ga}, \beta''_{ga}, \gamma''_{ga}$ – соответствующие характеристики (рис. 2) функций принадлежности нечетких оценок нагрузок узлов (после реализации второго этапа актуализации), получающих питание от участка $i, i+1$; $g \in \Pi_{i,i+1}$ – означает, что при расчетах учитываются соответствующие характеристики только тех узлов нагрузок g , которые получают питание от участка сети $i, i+1$; $f''_{qP\Gamma a}, \Delta''_{qP\Gamma a}, \beta''_{qP\Gamma a}, \gamma''_{qP\Gamma a}$ – характеристики функций принадлежности нечетких оценок мощностей источников РГ, установленных в узлах, которые получают питание от участка $i, i+1$; $q \in \Pi_{i,i+1}$ – означает, что при расчетах учитываются характеристики только тех узлов нагрузки q , в которых установлены источники РГ и которые получают питание от участка сети $i, i+1$.

При расчете потокораспределения в соответствии с предложенным подходом оценка нагрузки последнего участка линии всегда строго соответствует актуализированной оценке нагрузки ее последнего узла. Одновременно с этим оценка нагрузки головного участка линии всегда будет совпадать с нечеткой оценкой суммарной нагрузки, определенной по результатам телеизмерений.

Важным достоинством предложенного подхода является возможность не только рационально и объективно учесть существующую неопределенность информации, но и определить потокораспределение в сети при выполнении условий первого закона Кирхгофа.

На основании полученных нечетких оценок нагрузок на участках сети появляется возможность вычислить такие показатели режима как потери мощности (энергии) и напряжений, которые, очевидно, по аналогии с оценками нагрузок будут также представлены нечеткими множествами с трапециевидальными функциями принадлежности.

Так для линии РС (рис. 2) потери электроэнергии за период времени T составят

$$\Delta \tilde{A}_{\Sigma} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n-1} 3 \tilde{I}_{i,i+1,t}^2 R_{i,i+1}.$$

Эффект, связанный с применением РГ, в плане их влияния на потери электрической энергии может быть определен в результате двух последовательных расчетов (соответственно без и с источником РГ), а полученная при этом оценка будет представлена нечетким множеством с трапецидальной функцией принадлежности.

Влияние источников РГ на режим напряжений теоретически можно оценить в процессе расчета изменения его потерь на соответствующих элементах сети. Однако данный подход является чрезвычайно трудоемким, поскольку это связано с объемными расчетами, оперирующими нечеткими числами, требует проведения дополнительного анализа относительно целесообразности изменения параметров имеющихся в сети средств централизованного регулирования напряжения вызванного появлением РГ и в случае положительного решения – оценки изменения отклонений напряжения у всех потребителей, получающих питание от трансформатора подстанции, на котором был изменен закон регулирования напряжения.

В связи с этим представляется более предпочтительным на начальной стадии проектирования использовать для данной цели экспертные оценки. При этом можно ориентироваться на следующие соображения.

Анализ опыта применения РГ показал, что в плане ее влияния на режим напряжения могут сложиться ситуации, когда внедряемый генерирующий источник позволяет: без изменения параметров средств централизованного регулирования напряжения исключить или снизить объем потребления электрической энергии при отклонениях напряжения выходящих в исходном режиме за допустимые пределы; обеспечить аналогичный результат только после соответствующего изменения параметров средств регулирования напряжения; не повлиять на режим напряжений, который практически соответствовал требованиям действующего стандарта; после соответствующего изменения параметров средств регулирования напряжения сохранить в сети допустимые отклонения напряжения; ухудшить режим напряжений даже после попытки соответствующей перенастройки параметров средств централизованного регулирования.

В этом случае эксперты могут оценить режимы, которые формируются в РС после внедрения источников РГ, с точки зрения их воздействия на уровни напряжений посредством лингвистических характеристик в соответствии с приведенной выше классификацией возникающих при этом ситуаций. Используемые при этом лингвистические переменные (например, значительное улучшение режима напряжений без необходимости перенастройки средств регулирования напряжения (1); улучшение режима напряжений, после незначительного изменения параметров средств регулирования напряжения (2); улучшение режима напряжений после кардинального изменения параметров средств регулирования напряжения (3); нейтральное воздействие на режим напряжений (4); сохранение исходного уровня недопустимых отклонений напряжения после изменения параметров средств регулирования напряжения (5); незначительное ухудшение режима напряжений (6); существенное ухудшение режима напряжений (7), что нельзя устранить средствами централизованного регулирования) описываются соответствующими функциями принадлежности, в частности трапецидального вида [7] (рис. 3).

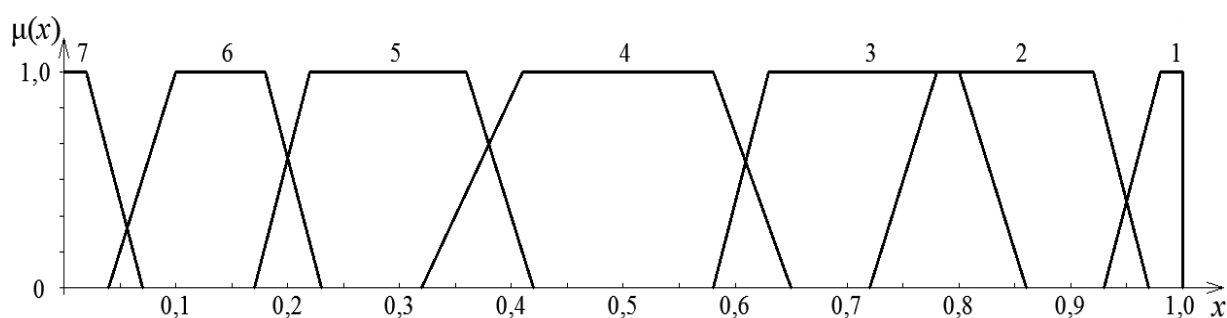


Рисунок 3

Таким образом, оценки влияния РГ на рассматриваемые показатели режима будут представлены нечеткими количественными и качественными величинами с трапецидальными (или, в отдельных случаях, треугольными) функциями принадлежности.

С целью комплексной оценки альтернативных вариантов применения РГ с позиций их влияния на характеристики режима РС, в дальнейшем применяются методы многокритериального принятия решений. В работе [8] была рассмотрена возможность использования методов *VIKOR* и *TOPSIS*, а также алгоритма Беллмана-Заде для многокритериального ранжирования альтернатив при детерминированном задании исходных данных. Основная идея здесь заключается в том, что совпадение или, по крайней мере, близость рядов ранжирования альтернатив, полученных при использовании различных методов, позволяет более обоснованно выбрать оптимальный вариант применения РГ. При существенном различии полученных рядов ранжирования возникает необходимость в дальнейшем анализе, в частности, за счет привлечения дополнительных критериев для возможности принятия обоснованного окончательного решения. Вместе с

тем появление неопределенной информации в качестве исходных данных потребует соответствующей модификации указанных выше методов многокритериального принятия решений.

В связи с этим ниже рассматривается модифицированный метод TOPSIS [9], который позволяет проранжировать альтернативы на основе одновременной оценки их удаленности относительно идеального и наихудшего решений, применительно к задаче выбора оптимального варианта применения РГ. Соответствующий алгоритм решения задачи, принимая во внимание необходимость оперирования с нечеткими величинами, строится следующим образом.

1. На основании определенных для каждого варианта применения распределенной генерации количественных показателей, характеризующих в данном случае потери электрической энергии, а также лингвистической оценки, отражающей режим напряжений, формируется, так называемая, матрицы решений, строки которой отвечают рассматриваемым альтернативам, а столбцы – критериям. При этом в ячейки матрицы заносятся соответствующие оценки показателей режима, которые представляются характерными параметрами (a_1, a_2, a_3, a_4) отвечающих им нечетких множеств в данном случае с трапецидальными функциями принадлежности (рис. 1).

2. С целью исключения влияния различной размерности рассматриваемых показателей на процесс принятия решений, предварительно все они должны быть нормализованы. При этом, учитывая правила выполнения арифметических операций с нечеткими числами [5], данная операция осуществляется следующим образом

– для факторов, предполагающих максимизацию

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

– для факторов, требующих минимизации

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij4}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij3}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij2}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij1}}, \mu_{ij} \right), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где m – число учитываемых критериев; n – количество рассматриваемых альтернатив.

3. Определяем наилучшее (\tilde{V}_i^+) и наихудшее (\tilde{V}_i^-) значения для всех рассматриваемых показателей (критериев) $i = 1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. принимая во внимание, подлежит ли данный критерий максимизации или минимизации).

4. Для всех элементов нормализованной матрицы решений, элементы которой определены в соответствии с (2) и (3), находим детерминированные аналоги, представляемые центрами тяжести функций принадлежности соответствующих нечетких чисел, которые, например для некоторого нечеткого числа \tilde{A} с трапецидальной функцией принадлежности вычисляются следующим образом [10]:

$$y_A = \frac{\mu_A \left(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} \right) + 2}{6}, \quad x_A = \frac{y_A(a_2 + a_3) + (a_1 + a_4)(\mu_A - y_A)}{2\mu_A}.$$

5. Вычисляем расстояния между всеми элементами матрицы решений относительно наилучшего и наихудшего решений

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij})]^2}, \quad d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m [d(\tilde{V}_i^-, \tilde{V}_{ij})]^2}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

При вычислениях реализуемых согласно (4) исходим из того, что расстояние между двумя нечеткими числами \tilde{A} и \tilde{B} определяется в соответствии с формулой

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

6. На заключительном этапе вычисляем показатель

$$C_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-}, \quad j = 1, \dots, n,$$

где n – количество рассматриваемых альтернатив.

После этого все альтернативы $A^{(j)}$, $j = 1, \dots, n$ согласно стандартному методу TOPSIS [11] могут быть проранжированы в соответствии с убыванием величины C_j . Таким образом, альтернатива, которой соответствует максимальное значение показателя C_j , может рассматриваться в качестве наилучшего компромиссного решения задачи.

Выводы. Эффективное использование РГ, которая в последние годы динамично увеличивает свой удельный вес в энергетических балансах практически всех стран мира, требует тщательной оценки ее влияния на режимные показатели электрических сетей. Решение данной задачи затрудняется отсутствием в существующих отечественных системах электроснабжения адекватного для данной цели информационного обеспечения. Это делает актуальными вопросы учета фактического уровня неопределенности данных как относительно нагрузок узлов сети, так и выходной мощности интегрируемых в них источников энергии (в первую очередь возобновляемых) при оценке влияния РГ на комплекс режимных показателей электрических сетей.

Таким образом, разработанные методы и алгоритмы, позволяющие сформировать нечеткие оценки нагрузок и выходных характеристик источников РГ в виде нечетких множеств на основе агрегирования ретроспективных как прямых, так и косвенных данных позволят повысить адекватность моделирования режимов РС как при отсутствии, так и при наличии в их структуре источников РГ. Также продемонстрировано, каким образом при постепенном оснащении РС средствами телеизмерений, получаемые оперативные данные могут быть интегрированы в процедуры расчета потокораспределения и вычисления таких показателей как потери энергии и напряжения в элементах сети с целью обоснованного снижения уровня неопределенности определяемых параметров.

Помимо этого, показана возможность привлечения характеристик качественного характера (например, лингвистических экспертных оценок, отражающих последствия использования РГ с позиций их воздействия на режимы напряжений) для многокритериальной оценки (а при необходимости и сравнения) вариантов применения РГ. Выполненная модификация метода TOPSIS с целью возможности его применения при появлении в качестве исходных данных как нечетких количественных, так и лингвистических переменных открывает возможность для параллельного использования в дальнейшем нескольких методов многокритериального принятия решений с учета неопределенности информации с целью более обоснованного выбора наилучшего решения за счет сравнения полученных в соответствии с каждым из них рядов ранжирования альтернатив.

Реализация полученных в работе результатов позволит повысить интегральную эффективность работы современных РС с подключенными к ним источниками РГ.

Список использованной литературы

1. Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ярмолюк О.С. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір «Врахування фактору невизначеності при моделюванні вихідної потужності вітрових електростанцій». № 52665; заявл. 21.10.2013; зареєстр. 19.12.2013.
2. Кузнецов М.П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2010. № 3. С. 42–48.
3. Попов В.А., Ярмолюк О.С. Евристичний алгоритм моделювання режимів інтегрованих систем електропостачання з урахуванням невизначеності вихідної інформації. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. Спецвип. С. 40–46.
4. Козирський В.В., Тугай Ю.І., Бодунов В.М., Гай О.В. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 5. С. 63–67.
5. Kauffmann A., Gupta M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 361 p.
6. Яхьяева Г. Нечеткие множества и нейронные сети. Москва: Бином, 2006. 316 с.
7. Shih-Hua W., Shyi-Ming C. Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36, is. 2. Pp. 2285–2299.
8. Жаркин А.Ф., Попов В.А., Сахрагард С., Замковой П.А., Сподинская А.В. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в распределительные сети. *Электронное моделирование*. 2016. № 3. С. 99–111.
9. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State of Art Survey. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1981. 259 p.
10. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its application. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1991. 479 p.
11. Mahdavi I., Heidarzade A., Sadeghpour-Gildeh B., Mahdavi-Amiri N. A general fuzzy TOPSIS model in multiple criteria decision making. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45, is. 3–4. Pp. 406–420.

В.А. Попов, д-р. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-3484-4597
О.С. Ярмолюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-8571-2573
М.М. Федосенко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-7077-8334
В.В. Ткаченко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4528-7661
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЗА СУКУПНІСТЮ РЕЖИМНИХ ПОКАЗНИКІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

Розглянуто питання оцінки впливу розосередженої генерації на такі режимні характеристики розподільної мережі як втрати електричної енергії та напруги, надійність електропостачання. Дані фактори доцільно враховувати при порівнянні різних варіантів інтеграції джерел генерації в мережу. Показано, що в розподільних мережах об'єктивна оцінка зазначених характеристик режиму неможлива без урахування невизначеності інформації та запропоновано шляхи вирішення даного завдання. Розроблено методи адекватного врахування фактичного рівня невизначеності інформації при визначенні значень електричних навантажень і вихідної потужності альтернативних джерел розосередженої генерації, моделюванні режимів розподільних мереж і оцінці їх основних показників. Представлено алгоритм багатокритеріального прийняття рішення з урахуванням невизначеності критеріїв та їх різної фізичної природи і розмірності. Реалізація отриманих у роботі результатів дасть можливість підвищити інтегральну ефективність роботи сучасних розподільних мереж із підключеними до них джерелами розосередженої генерації.

Ключові слова: невизначеність інформації, розосереджена генерація, багатокритеріальне порівняння альтернатив.

V. Popov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3484-4597
O. Yarmoliuk, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8571-2573
M. Fedosenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7077-8334
V. Tkachenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-4528-7661
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

COMPARATIVE EVALUATION OF ALTERNATIVES OF DISTRIBUTED GENERATION APPLICATION CONSIDERING MODE OF OPERATION CHARACTERISTICS AND UNCERTAINTY OF INFORMATION

The estimation of influence of the distributed generation on such characteristics of a distribution network mode of operation as losses of electric energy, voltage drops and reliability of power supply are considered. These factors should be taking into account in the process of comparing different alternatives of generating sources integration into the network. It is shown that in the distribution networks an objective assessment of the mentioned above mode of operation characteristics is impossible without taking into consideration the uncertainty of information and ways of solving this problem are proposed. Methods have been developed for adequately taking into account the actual level of information uncertainty for determining of electrical loads and output power of alternative sources distributed generation, modeling of distribution network and assessment of their main indicators. The universal approach to determine the load flow in distribution networks with different levels of information uncertainty, including fuzzy estimates of electrical loads and output capacity of distributed generation sources is developed. An algorithm for multicriteria decision-making, taking into account the uncertainty of the considered criteria, their different physical nature and dimension is presented. Implementation of the results obtained in this work will improve the integrated efficiency of modern distribution networks with distributed generation sources connected to them.

Keywords: uncertainty of information, distributed generation, multicriteria comparison of alternatives.

References

1. Zharkyn A.F., Popov V.A., Yarmoliuk O.S. Certificate of registration of copyright to a work «Considering the factor of uncertainty in modeling the power output of wind power plants». No 52665; stated 21.10.2013; registered 19.12.2013. (Ukr.)
2. Kuznetsov M.P. Methods of forecasting electric power generation by wind power plants. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2010. No 3. Pp. 42–48. (Ukr.)
3. Popov V.A., Yarmoliuk O.S. Heuristic algorithm for modeling the integrated distribution system modes of operation considering initial information uncertainty. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2012. Spetsvyp. Pp. 40–46. (Ukr.)
4. Kozyrskyi V.V., Tugai Y.I., Bodunov V.M., Gai O.V. Integration of renewable energy sources into distributive electric networks of rural regions. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2011. No 5. Pp. 63–67. (Ukr.)
5. Kauffmann A., Gupta M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 361 p.
6. Yahiaeva G. Fuzzy sets and neural networks. Moscow: Binom, 2006. 316 p. (Rus.)
7. Shih-Hua W., Shyi-Ming C. Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36, is. 2. Pp. 2285–2299.
8. Zharkyn A.F., Popov V.A., Sakhrhard S., Zamkovoii P.A., Spodynskaia A.V. Multicriteria assessment of alternative variants of integration of distributed generation sources into distribution networks. *Elektronnoe modelyrovanye*. 2016. No 3. Pp. 99–111. (Rus.)
9. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State of Art Surwey. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1981. 259 p.
10. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its application. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1991. 479 p.
11. Mahdavi I., Heidarzade A., Sadeghpour-Gildeh B., Mahdavi-Amiri N. A general fuzzy TOPSIS model in multiple criteria decision making. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45, is. 3–4. Pp. 406–420.

Надійшла 15.10.2019
Received 15.10.2019