условий которые при определенных допущениях приемлемы для обеих сторон (допустимые условия), и условий, несоблюдение которых недопустимо для одной или двух сторон (предельные). Кроме этого, рассмотрен алгоритм проверки силового оборудования системы электроснабжения на предмет способности обеспечить соответствующие режимы работы. Показано каким образом тепловые модели элементов системы электроснабжения могут быть использованы для получения оптимальных, допустимых и предельных по нагрузочной способностью условий.

Ключевые слова: активный потребитель, график нагрузки, оптимизационная задача, система электроснабжения, нагрузочная способность.

Надійшла 04.04.2014
Received 04.04.2014

УДК 621.316.1

В.А. Попов, канд. техн. наук, доцент; **Е.С. Ярмолюк, П.А. Замковой, И.А. Дмитренко**
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ МИКРОСИСТЕМ С УЧЕТОМ ФАКТОРА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В работе представлены результаты исследований связанных с разработкой двухэтапного алгоритма выбора оптимальных структуры и параметров генерирующих источников в автономной микросистеме. Предложенная для данной цели процедура позволяет учесть неопределенность исходной информации, а также многокритериальный характер рассматриваемой задачи. На первом этапе сравнение предварительно сформированных вариантов построения микросистемы осуществляется на основе анализа модифицированных многомерных платежных матриц с использованием критериев теории игр и похода Беллмана-Заде к многокритериальному принятию решений, что позволяем выделить ограниченное число наиболее рациональных альтернатив. На втором этапе выбор оптимального решения осуществляется путем реализации процедур инвестиционного менеджмента, при интервальном задании ряда факторов, используя обобщенную интервальную арифметику Хансена.

Ключевые слова: микросистема, теория игр, многокритериальное принятие решений, подход Беллмана-Заде, интервальная арифметика Хансена.

1 Введение

Одной из характерных особенностей развития современной мировой энергетики является масштабное расширение использования новых технологий генерации и распределения энергии, сопровождаемое созданием интеллектуальных сетей (smart grid) и микросистем (microgrids), в качестве их важного структурного элемента. Целесообразность формирования микросистем объясняется рядом причин. Прежде всего, в этом случае проще задействовать возобновляемые источники энергии, а также источники, использующих местные сырьевые ресурсы. Помимо этого очевидно, что в данных условиях введение в работу нового современного генерирующего оборудования реализуется быстрее, возникает возможность снизить эксплуатационные затраты, уровень выбросов в окружающую среду. Компактное расположение источников и потребителей энергии позволяет сократить потери энергии, связанные с ее передачей и распределением по электрическим и тепловым сетям. Как показывают исследования и уже существующая практика, в микросистемах обеспечить высокую надежность легче, чем при ориентации исключительно на централизованное электроснабжение. При этом микросистема может работать как в автономном режиме, так и параллельно со смежными микросистемами или в перспективе интегрироваться в электрические сети энергосистем [1]. Формирование автономных микросистем является актуальной задачей в условиях Украины, учитывая, что на сегодняшний день в стране отсутствует необходимые правовая и нормативная базы, регламентирующие, в частности, технические требования интеграции подобных структур в централизованные системы электроснабжения, возможность и условия реализации избыточной электрической и тепловой энергии.

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

2 Постановка задачи выбора оптимальных структуры и параметров микросистем

Анализ возможных альтернативных решений с целью выбора оптимальной структуры и параметров микросистемы предлагается осуществлять с учетом нескольких групп факторов экономического, технического, социального и т.п. характеров. Очевидно, что на предварительной стадии проектирования детализация количественных характеристик всех используемых факторов для каждой альтернативы не только невозможна, но и нецелесообразна, что предполагает их задание в интервальной форме.

На данном этапе техническая сторона проекта характеризуется величиной времени использования максимума ($T_{\max}$), которая для каждой характерной s-ой технологии генерации энергии задается в интервальной форме ($\underline{T}_{s\max} - \overline{T}_{s\max}$). В качестве экономических показателей используют удельные капитальные затраты ($\underline{z}_{\kappa s} - \overline{z}_{\kappa s}$) и удельные эксплуатационные издержки ($\underline{z}_{us} - \overline{z}_{us}$), значения которых могут быть получены путем обобщения данных имеющихся в открытых источниках.

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

$$Z_{\kappa s} = z_{\kappa s} P_{\text{ном}s}, \quad Z_{us} = z_{us} P_{\text{ном}s} T_{s\max},$$

где $P_{\text{ном}s}$ – предполагаемая номинальная мощность генерирующего источника;

$T_{s\max}$ – характерное для данной технологической установки значение времени использования максимума.

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

Данный показатель предлагается оценивать следующим образом

$$V_s = (V_0 - V_{Ts}) P_{\text{ном}s} T_{s\max},$$

где V_{Ts} – удельный (на 1 кВт ч) уровень выбросов CO_2, предлагаемой к применения s-й технологической установки;

V_0 – средний по Украине уровень выбросов CO_2 на 1 кВт ч генерируемой электроэнергии.

Так как соответствующая характеристика для каждой технологической установки в литературе задается в интервальном виде ($\underline{V}_{Ts} - \overline{V}_{Ts}$), то естественно, что и показатель V будет представлен интервальной величиной ($\underline{V}_s - \overline{V}_s$).

Еще одним важным показателем, который необходимо принимать в учет на предварительном этапе проектирования микросистемы, является фактор риска. В частности, технический риск, отражающий возможность того, что проектируемая микросистема не сможет выдать в сеть определенную величину мощности, может быть оценен в соответствии со следующим выражением

$$R_T = -\sum_{s=1}^{S} p_s \ln p_s,$$

где p_s – доля соответствующей технологии в установленной мощности микросистемы;

n – количество используемых в микросистеме технологических установок.

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

Таким образом, рассматриваемая задача выбора оптимальной структуры (состава) и параметров (мощностей отдельных генерирующих установок) микросистемы, по сути, сводится к процедуре сравнения ряда альтернативных вариантов с целью выбора наилучшего по совокупности разноплановых показателей. Соответствующий алгоритм в общем виде может быть представлен следующим образом.

Задается общая суммарная мощность проектируемой микросистемы ($P_{\text{ст}}$). Экспертным путем определяется перечень потенциальных генерирующих установок, которые, с учетом конкретных местных условий, теоретически целесообразно было бы использовать для решения поставленной задачи. Если допустить, что ограничения по установленной мощности для любой генерирующей установки отсутствуют, то, в принципе, требуемая суммарная мощность станции может быть обеспечена при любой комбинации двух и более генерирующих установок различного типа при соблюдении баланса мощностей

$$\sum_{s=1}^{S} P_s = P_{cm}, \tag{1}$$

где S – количество типов генерирующих источников составляющих микросистему.

Для выбора величин P_s, $s = 1, \ldots, S$ первоначально для каждого из источников задаются интервалы дискретности ΔP_s, $i = s, \ldots, S$ изменения мощностей отдельных генерирующих источников. После этого формируется процедура, состоящая из S вложенных циклов, которая позволяет, учитывая принятые интервалы дискретности, определить все возможные комбинации (варианты) сочетания переменных (мощностей отдельных генерирующих установок), обеспечивающие выполнение условия (1).

Таким образом, поставленная задача заключается в сравнении сгенерированных альтернативных вариантов, в результате чего должен будет определен один или несколько наиболее предпочтительных по совокупности указанных выше критериев.

Одним из традиционных путей решения подобных задач является использование аппарата теории игр, что позволяет установить принципы разумности, доказать существование и выявить решения, удовлетворяющие данным принципам [2, 3].

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

В работе [4] было показано, что при возможности реализации относительно небольшого числа опытов, наиболее полный и равномерный анализ всей многомерной области допустимых значений параметров достигается при использовании, так называемых, ЛП$_\tau$ последовательностей.

Предложенный в [4] алгоритм позволяет получить точки Q_i, с координатами q_{ij}, $i = 1, \ldots, I$, $j = 1, \ldots, n$, которые образуют равномерно распределенные последовательности в одиночном n-мерном кубе K^n. Координаты искомых точек вычисляются на основании следующего выражения [5]

$$q_{ij} = \sum 2^{-k+1}\left\{\frac{1}{2}\sum\left[2\langle i2^{-\ell}\rangle\right]\left[2\left(r_j^{(\ell)}2^{k-1-\ell}\right)\right]\right\}, \tag{2}$$

где i – номер точки;

$[a]$ – означает целую часть числа a;

$\langle a\rangle$ – представляет собой дробную часть числа a;

$r_j^{(\ell)}$ – определяются по специальным таблицам, приведенным в [6].

При ориентации на аппарат теории игр, принятие решений направленных на выбор наилучшей альтернативы связано с построением и анализом, так называемой, платежной матрицы. В рассматриваемой задаче строки данной матрицы соответствуют различным альтернативам построения микросистемы, а столбцы – состояниям природы, т.е. возможным значениям исходных данных при которых может реализовываться данная альтернатива и определяемых в соответствии с описанным выше подходом.

Поскольку исходные данные задаются индивидуально для каждого из генерирующих источников, а каждый альтернативный вариант построения микросистемы, в общем случае, представляет собой комбинацию генерирующих источников с различным их удельным весом, возникает задача интегральной оценки альтернатив по каждому из перечисленных выше показателей. Для данной цели предлагается использовать следующие зависимости

$$Z_{kij} = \sum_{s=1}^{S}\left[\underline{z}_{ks} + q_{js}\left(\overline{z}_{ks} - \underline{z}_{ks}\right)\right]p_{is}, \qquad T_{\max ij} = \frac{\sum_{s=1}^{S}\left[\underline{T}_{\max s} + q_{js}\left(\overline{T}_{\max s} - \underline{T}_{\max s}\right)\right]p_{is}}{\sum_{s=1}^{S} p_{is}},$$

$$Z_{uij} = \sum_{s=1}^{S}\left[\underline{z}_{us} + q_{js}\left(\overline{z}_{us} - \underline{z}_{us}\right)\right]p_{is}T_{\max cp}, \qquad V_{ij} = \sum_{s=1}^{S}\left\{V_0 - \left[\underline{V}_s + q_{ij}\left(\overline{V}_s - \underline{V}_s\right)\right]\right\}p_{is}T_{\max cps},$$

где $T_{\max cps} = \dfrac{\underline{T}_{\max s} + \overline{T}_{\max s}}{2}$;

p_{is} – мощность s-го источника в i-й альтернативе;

i – номер альтернативы, $i = 1, \ldots, N$;

j – номер варианта варьирования исходных данных, $j = 1, \ldots, M$;

s – порядковый номер (тип) источника генерации в составе микросистемы согласно рассматриваемой альтернативы, $s = 1, \ldots, S$;

q_{ij} – вычисляется в соответствии с (2) для каждой i-й альтернативы и j-го набора данных.

При этом, учитывая, что эффективность любой из сгенерированных альтернатив оценивается рядом показателей, и в соответствии с каждым из них формируется собственная платежная матрица, то для получения решения задачи в дальнейшем рассматривается, так называемая, многомерная (трехмерная) платежная матрица, координатами которой соответственно являются: альтернативы, состояния природы, оценочные характеристики (рис. 1)

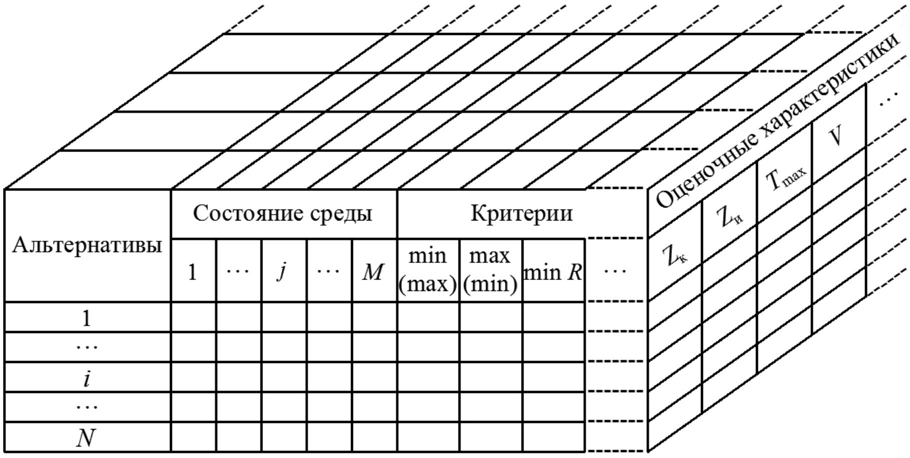

Рис. 1 Многомерная платежная матрица

3 Процедура многокритериального сравнения альтернатив

Для анализа полученной многомерной платежной матрицы может использоваться подход, опирающийся на идеи представленные в работах [7, 8] и основанный на процедуре многокритериального принятия решений предложенной Беллманом и Заде [9].

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

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

заменяется нечетким множеством (нечеткой целевой функцией)

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

где $\mu_{A_r}(X)$ – функция принадлежности нечеткой характеристики A_r;

L – область допустимых решений.

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

$$\mu_{A_r}(X) = \left[\frac{F_r(X) - \min\limits_{X \in L} F_r(X)}{\max\limits_{X \in L} F_r(X) - \min\limits_{X \in L} F_r(X)} \right]^{\lambda_r} \qquad (3)$$

для целевых функций подлежащих максимизации

$$\text{и } \mu_{A_r}(X) = \left[\frac{\max\limits_{X \in L} F_r(X) - F_r(X)}{\max\limits_{X \in L} F_r(X) - \min\limits_{X \in L} F_r(X)} \right]^{\lambda_r} \qquad (4)$$

для целевых функций подлежащих минимизации.

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

При наличии нечетких целевых функций, решение задачи формируется на основе использования определенного оператора агрегирования [10]

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

В технической литературе предложено семейство различных операторов агрегирования [11]. При этом отсутствует формальное обоснование для выбора того или иного оператора при решении конкретной проблемы [12]. Среди предложенных операторов агрегирования, наибольшее распространение получила операция минимизации. В этом случае имеем

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

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

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{r=1,\ldots,q} \mu_{A_r}(X) \text{ с } X^* = \arg\max_{X \in L} \min_{r=1,\ldots,q} \mu_{A_r}(X).$$

Таким образом, на основании выражений (3) или (4), соответственно для максимизируемых и минимизируемых целевых функций («слоев» многомерной платежной матрицы), формируются, так называемые, модифицированные (нормализованные) платежные матрицы. В частности, для целевой функции, характеризующей капитальные затраты получаем следующую модифицированную платежную матрицу (табл. 1).

Таблица 1

Модифицированная платежная матрица для анализа показателя «капитальные затраты»

Альтернативы	Сочетания исходных данных				
	1	…	j	…	M
1	$\mu_{Zk_1 1,1}$		$\mu_{Zk1,j}$		$\mu_{Zk1,M}$
…					
i	$\mu_{Zki,1}$		$\mu_{Zki,j}$		$\mu_{Zki,M}$
…					
N	$\mu_{ZkN,1}$		$\mu_{ZkN,j}$		$\mu_{ZkN,M}$

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

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

На следующем этапе осуществляется формирование агрегированной платежной матрицы (табл. 2) на основе условия (5), рассматривая одновременно все частные целевые функции, а, соответственно, и все модифицированные платежные матрицы.

Таблица 2

Агрегированная платежная матрица

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

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

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

$$\max_{1 \le i \le N} \mu_{Di,j} = \max_{1 \le i \le N} \min_{1 \le j \le M} \min_{1 \le q \le Q} \mu_{q,i,j},$$

где Q – количество рассматриваемых целевых функций (оценочных характеристик проекта).

Согласно критерию Лапласа имеем

$$\max_{1 \le i \le N} \mu_{Di,j} = \max_{1 \le i \le N} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} \min_{1 \le q \le Q} \mu_{q,i,j}.$$

В данном случае также может быть сформирована и матрица рисков

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

что дает возможность осуществить выбор оптимальной альтернативы на основе критерии Сэвиджа

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

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

Однако, как показывает опыт, во многих случаях каждому из критериев теории игр соответствует своя оптимальная альтернатива, что затрудняет выбор окончательного решения. Помимо этого необходимо учесть, что в формируемых решениях параметры отдельных генерирующих установок носят индикативный характер и не соответствуют характеристикам серийно выпускаемого оборудования. В связи с этим представляется целесообразным переход ко второму этапу решения задачи, связанному с технико-экономическим анализом ограниченного числа полученных на первом этапе наиболее предпочтительных вариантов построения микросистемы.

4 Алгоритм технико-экономического сравнения вариантов с учетом неопределенности информации.

В рыночных условиях любой субъект хозяйственной деятельности при принятии решений неизбежно сталкивается с неопределенностями различного вида и происхождения. Неопределенность в контексте подобных задач трактуется как неполнота или неточность информации об условиях реализации инвестиционного проекта. При этом всегда существуют внешние факторы, в значительной мере определяющие результаты инвестиционного проекта. Таким образом, источники неопределенностей находятся вне рамок хозяйствующих субъектов.

В основу динамического инвестиционного анализа может быть положено выражение [13]

$$NPV = \sum_{t=0}^{N} \frac{CF^{(t)}}{(1+q)^t}. \quad (6)$$

Здесь поток платежей характеризуется величиной $CF^{(t)}$, которая может быть как положительной (доход от инвестиционной деятельности), так и отрицательной (инвестиционные расходы). Показатель q представляет собой величину ставки дисконтирования.

В принципе все переменные, входящие в данное выражение, имеют прогнозный характер, т.к. относятся к будущим периодам жизненного цикла инвестиционного проекта. Поэтому трудно говорить о точных значениях этих переменных.

Термин неопределенность в большинстве случаев означает не полное отсутствие информации об объекте, а состояние частичного знания, когда мы все-таки располагаем какой-то информацией относительно интересующей нас величины. В этом случае простейшей и наиболее распространенной ситуацией является знание множества возможных значений неизвестной величины, что является предметом интервального анализа, который в последнее время трансформировался в один из важнейших разделов современной прикладной математики.

Важным свойством стандартных арифметических действий с интервальными величинами является не только то, что они приводят к резкому расширению получаемых в результате интервалов, но также отсутствие обратных операций.

Еще одним необычным свойством интервальной математики [14] является то, что при вычислении функций вещественных аргументов могут быть получены различные результаты. Это в ряде случаев затрудняет применение данного математического аппарата для решения практических задач. Например, значение функции $y = \frac{x_1 + x_2}{x_1 - x_2}$ при условии $x_1 = [5, \ 10]$, $x_2 = [1, \ 2]$ дает результат $y = [0{,}667, \ 4]$. Если преобразовать исходное выражение к эквивалентному виду $y = 1 + \frac{2}{\frac{x_1}{x_2} - 1}$, то в процессе выполнения соответствующих операций с интервальными величинами получаем результат $y = [1{,}222, \ 2{,}333]$ со значительно меньшим уровнем неопределенности.

Перечисленные обстоятельства стимулировали разработку альтернативных походов к выполнению арифметических операций [15–17]. Однако, учитывая, что для выполнения арифметических операций на основе указанных подходов необходимо выполнение ряда условий, и они не всегда применимы на практике, Хансеном была разработана обобщенная интервальная арифметика [18].

В этом случае для удобства оперирования интервальные величины $X[\underline{x},\overline{x}]$ представляются в форме $X = y + c$, где $y = \frac{\underline{x}+\overline{x}}{2}$, $c = \frac{\overline{x}-\underline{x}}{2}$.

Следовательно, произвольная точка из интервала $x \in X$ определяется в виде $x = y + \alpha$, где $\alpha \in [-c, c]$. В то же время для интервального вектора $\boldsymbol{X} = ([X_1],...[X_n])^T$ j - ый интервал $[X_j]$ может быть представлен в обобщенной интервальной форме следующим образом

$$[\boldsymbol{X}_j] = [y_j] + [0,0]\alpha_1 + ... + [0,0]\alpha_{j-1} + [1,1]\alpha_j + [0,0]\alpha_{j+1} + ... + [0,0]\alpha_n = [y_j] + [1,1]\alpha_j, \quad (7)$$

Если необходимо найти интервал, содержащий множество значений рационального выражения, зависящего от n переменных, то, представив каждую переменную $x_i \in X_i$ в виде (7), результирующая величина, полученная в результате вычислений, будет представлена следующим образом

$$X_i = Y_i + \sum_{r=1}^{n} \alpha_r Z_{ir}.$$

В приведенном выражении Y_i, Z_{ir}, $i = 1,2,...,n$, $r = 1,2,...,n$ – некоторые интервалы, $\alpha_r \in [-c_r, c_r]$, $Z_{ii} = [1,1]$, $Z_{ir} = [0,0]$, $i \neq r$.

Арифметические операции над обобщенными интервалами выполняются в соответствии со следующими правилами. Допустим, два обобщенных интервала представлены как

$$[X_i] = [y_i] + \sum_{r=1}^{n} \alpha_r [Z_{ir}], \quad [X_j] = [y_j] + \sum_{r=1}^{n} \alpha_r [Z_{jr}].$$

Тогда

$$[X_k] = [X_i] \pm [X_j] = [y_i] \pm [y_j] + \sum_{r=1}^{n} \alpha_i ([Z_{ir}] \pm [Z_{jr}]), \quad [X_k] = [X_i] \cdot [X_j] = [y_k] + \sum_{r=1}^{n} \alpha_r [Z_{kr}],$$

где $[y_k] = [y_i] \cdot [y_j] + \sum [0, c_r^2] \cdot [Z_{ir}] \cdot [Z_{jr}]$, $\quad [Z_{kr}] = [y_i] \cdot [Z_{jk}] + [y_j] \cdot [Z_{ik}] + [-1,1] \cdot [Z_{ir}] \cdot \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq r}}^{n} c_p [Z_{jp}]$,

$$[X_k] = \frac{[X_i]}{[X_j]} = [y_k] + \sum_{r=1}^{n} \alpha_r [Z_{kr}],$$

где $[y_k] = \frac{[y_i]}{[y_j]}$, $\quad [Z_{kr}] = \frac{[y_j] \cdot [Z_{ik}] - [y_i] \cdot [Z_{jk}]}{[y_j] \cdot \left([y_j] + [-1,1] \cdot \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq r}}^{n} c_p [Z_{jp}] \right)}$.

В соответствии с приведенными выше правилами обобщенной интервальной арифметики, представим интервальную величину (q) ставки дисконтирования (6) в виде

$$q = q_0 + u_q, \quad -r_q \leq u_q \leq r_q,$$

где $q_0 = \frac{q_1 + q_2}{2}$, $\quad r_q = \frac{q_2 - q_1}{2}$.

В этом случае интервальное значение чистого приведенного дохода $[NPV_1, NPV_2]$ определится следующим образом

$$NPV_1 = \sum_{t=0}^{N} \left(\frac{CF^{(t)}}{B^{(t)}} - r_q \frac{CF^{(t)} F^{(t)}}{D^{(t)}} \right), \quad NPV_2 = \sum_{t=0}^{N} \left(\frac{CF^{(t)}}{A^{(t)}} + r_q \frac{CF^{(t)} F^{(t)}}{D^{(t)}} \right),$$

где $\quad A^{(t)} = (1 + q_0)^t$, $\quad B^{(t)} = t(1 + q_0)^{t-1}$, $\quad D^{(t)} = (1 + q_0)^t + \sum_{k=1}^{t/2} C_t^{2k} (1 + q_0)^{t-2k} r_q^{2k}$,

$F^{(t)} = t(1 + q_0)^{t-1} + \sum_{k=1}^{(t-1)/2} C_t^{2k+1} (1 + q_0)^{t-1+2k} r_q^{2k}$, $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

Очевидно, что, в принципе, аналогичным образом может быть учтена и неопределенность информации при задании потока платежей.

Таким образом, на втором этапе решения задачи выбора оптимальной структуры и параметров микросистемы, используя уже предварительно полученные индикативные характеристики наиболее рациональных проектов, формируется ограниченное число подлежащих технико-экономическому сравнению альтернативных вариантов. Для данных альтернативных вариантов построения микросистемы определяются возможные поставщики оборудования а, соответственно, и все их фактические экономические и технические характеристики. Осуществляемый после этого технико-экономический анализ с учетом неопределенности внешних факторов, влияющих на эффективность проектов, позволяет с большей степенью объективности оценить технико-экономические показатели сравниваемых альтернатив и, следовательно, сделать более обоснованный выбор наилучшего.

5 Выводы

Одним из актуальных и перспективных направлений развития энергетики, которое убедительно подтверждается мировой практикой, является формирование, так называемых, микросистем, объединяющих как традиционные, так и альтернативные источники энергии. Отсутствие необходимой правовой базы, технической и экономической регламентации относительно интеграции источников распределенной генерации в электрические сети, делает вопросы формирования локальных микросистем особо актуальными для Украины. Сложность решения данной задачи в нашей стране усложняется ограниченностью имеющихся материальных ресурсов, отсутствием адекватной информационной среды. Указанные обстоятельства заставляют уделять самое серьезное внимание вопросам создания объективных математических моделей, используемых для определения оптимальной структуры и параметров микросистем. Предложенный в работе для этой цели алгоритм позволяет учесть многокритериальность рассматриваемой задачи и неопределенность исходной информации, присущую подавляющему большинству задач проектного характера. Возможность корректного учета указанных факторов позволяет обеспечить максимальную адекватность формируемых математических моделей и обоснованность получаемых на основе их анализа решений а, как следствие этого, гарантировать фактическую эффективность использования залаженного в проектах генерирующего оборудования.

Список литературы

1. Стогній, Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка / Наук.-прикл. журнал. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – № 5. – С. 52–67.

2. Льюис Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. – М.: Изд. Иностр. Лит., 1961. – 642 с.

3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988, 206 с.

4. Соболь И. М., Статников И. Р. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями. – М.: Наука, 1981, 107 с.

5. Соболь И. М., Статников И. Р. ЛП-поиск в задачах оптимального конструирования. – В кн.: Проблемы случайного поиска. Рига: Зинатне, 1972, № 1, с. 117-135.

6. Соболь И. М., Левитан Ю.Л. Получение точек, равномерно расположенных в многомерном кубе. – М., 1976. – 37 с. (Препринт/Институт прикладной математики АН СССР, № 40).

7. Pedrycz W., Ekel P., Parreiras R. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications // New York, NY: John Wiley & Sons, 2011, 338 c.

8. P. Ekel,W. Pedrycz, R. Schinzinger, A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems, Fuzzy Sets and Systems, N 97, 1998, С. 49–66.

9. R.E. Bellman, L.A. Zadeh Decision-making in a fuzzy environment, Management Science, N. 17 (1970) С. 141–164.

10. Y.J. Zimmermann Fuzzy set theory and its application, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1990.

11. G. Beliakov, J. Warren Appropriate choise of aggregation operators in fuzzy decision support systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, N. 9, 2001, С. 773–784.

12. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств, пер. с фр., М.: Радио и связь, 1982, 432 с.

13. Ример М.И., Касатов А.Д., Матиенко Н.Н. Экономическая оценка инвестиций. СПб.: Питер, 2008, 480 с.

14. Шокин Ю.И. Интервальный анализ, Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 1981, 112 с.

15. Marcov S.M. Extended interval arithmetic. – C.R. Acad. Bulgara Sci., 1977, V. 30, С. 1239-1242.

16. Kahan W. A more complete interval arithmetic.-Lecture notes for a summer course in numerical analysis, University of Michigan, 1968, 128 p.

17. Л.А. Конышева, Д.М. Назаров Основы теории нечетких множеств, Питер, 2011, 192 с. ISBN 978-5-459-00735-0.

18. Hansen E. A generalized interval arithmetic, in Interval Mathematics, Ed. By K. Nickel. Interval Mathematics, Lecture notes in Computer Science. V. 29. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1975, С.7-18.

V. Popov, O. Yarmoliuk, P. Zamkovyi, I. Dmitrenko
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

A TWO-STEP ALGORITHM STRUCTURE AND PARAMETERS MICROSYSTEMS WITH UNCERTAINTY INFORMATION

In this paper, the expediency of forming micrografids, as one of the important directions of the modernization of the energy sector of Ukraine, is justified. However, for the successful implementation of such the projects, it is necessary to provide a convincing argumentation for choice the structure of primary energy sources, as well as the nominal capacities of all types of generating equipment. Decision making is based on an analysis of possible alternative options for building microgrids, using several groups of factors of economic, technical, social, etc. character. For this purpose, a two-step algorithm that allows one to take into account the uncertainty of the initial information, as well as multi-criteria nature of the problem is proposed. In the first stage comparison of the preformed variants of microgrids is based on the mathematical apparatus of the games theory and is associated with the construction of payment matrices for each of the of the objective functions accepted for consideration. With the purpose to take into account multicriteria nature of the problem, the Bellman-Zadeh approach is used. It allows one to form a generalized multidimensional payoff matrix. Further analysis of this matrix can be based on any of the criteria of the game theory. It is assumed that at this stage will be determined a limited number of alternatives that are most rational from the standpoint of the individual criteria. In the second stage selection of the optimal solution is performed by using the procedures of investment management. In this case, on the one hand, we can take into account the actual cost and the technical characteristics of the used equipment, and, on the other hand, we can consider the uncertainty of information connected with the external conditions of the investment project realization, by setting a number of factors (for example, discount rate, payment flows) in the interval form and using in the corresponding calculations the generalized interval arithmetic of Hansen.

Keywords: microgrids, game theory, multicriteria decision making, the Bellman-Zadeh approach, interval arithmetic of Hansen.

1. Stohniy, B. S. Evolyutsiya intelektual'nykh elektrychnykh merezh ta yikhni perspektyvy v Ukrayini [Tekst] / B. S. Stohniy, O. V. Kyrylenko, A. V. Prakhovnyk, S. P. Denysyuk // Tekhnichna elektrodynamika / Nauk.-prykl. zhurnal. – K. : Instytut elektrodynamiky NAN Ukrayiny, 2012. – # 5. – S. 52–67.
2. L'yuys R.D., Rayfa Kh. Yhrы y reshenyya. – M.: Yzd. Ynostr. Lyt., 1961. – 642 s.
3. Venttsel' E. S. Yssledovanye operatsyy: zadachy, pryntsypы, metodolohyya. M.: Nauka, 1988, 206 s.
4. Sobol' Y. M., Statnykov Y. R. Vыbor optymal'nыkh parametrov v zadachakh s mnohymy kryteryyamy. – M.: Nauka, 1981, 107 s.
5. Sobol' Y. M., Statnykov Y. R. LP-poysk v zadachakh optymal'noho konstruyrovanyya. – V kn.: Problemы sluchaynoho poyska. Ryha: Zynatne, 1972, # 1, s. 117-135.
6. Sobol' Y. M., Levytan Yu.L. Poluchenye tochek, ravnomerno raspolozhennыkh v mnohomernom kube. – M., 1976. – 37 s. (Preprynt/Ynstytut prykladnoy matematyky AN SSSR, # 40).
7. Pedrycz W., Ekel P., Parreiras R. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications // New York, NY: John Wiley & Sons, 2011, 338 r.
8. P. Ekel,W. Pedrycz, R. Schinzinger, A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems, Fuzzy Sets and Systems, N 97, 1998, pp. 49–66.
9. R.E. Bellman, L.A. Zadeh Decision-making in a fuzzy environment, Management Science, N. 17 (1970) r. 141–164.
10. Y.J. Zimmermann. Fuzzy set theory and its application, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1990.
11. G. Beliakov, J. Warren Appropriate choise of aggregation operators in fuzzy decision support systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, N. 9, 2001, p. 773 – 784.
12. Kofman A. Vvedenye v teoryyu nechetkykh mnozhestv, per. s fr., M.: Radyo y svyaz', 1982, 432 s.
13. Rymer M.Y., Kasatov A.D., Matyenko N.N. Эkonomycheskaya otsenka ynvestytsyy. SPb.: Pyter, 2008, 480 s.
14. Shokyn Yu.Y. Ynterval'nыy analyz, Novosybyrsk, Nauka, Sybyrskoe otdelenye, 1981, 112 s.
15. Marcov S.M. Extended interval arithmetic. – C.R. Acad. Bulgara Sci., 1977, V. 30, pp. 1239-1242.
16. Kahan W. A more complete interval arithmetic.-Lecture notes for a summer course in numerical analysis, University of Michigan, 1968, 128 r.
17. L.A. Konыsheva, D.M. Nazarov Osnovы teoryy nechetkykh mnozhestv, Pyter, 2011, 192 s. ISBN 978-5-459-00735-0.
18. Hansen E. A generalized interval arithmetic, in Interval Mathematics, Ed. By K. Nickel. Interval Mathematics, Lecture notes in Computer Science. V. 29. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1975, pp.7-18.

УДК 621.316.1

В.А. Попов, канд. техн. наук, доцент; **О.С. Ярмолюк, П.О. Замковий, І.А. Дмитренко**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ДВОХЕТАПНИЙ АЛГОРИТМ ВИБОРУ СТРУКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ МІКРОСИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У роботі обґрунтовується доцільність формування мікросистем, як одного з важливих етапів модернізації енергетичної галузі України. Однак для успішної реалізації зазначених проектів необхідно забезпечити ретельну аргументацію визначення як структури первинних джерел енергії, так і співвідношення номінальних потужностей всіх типів генеруючого обладнання, що входить до складу мікросистеми. Рішення відносно зазначених питань приймається на основі аналізу можливих альтернативних варіантів побудови мікросистеми з урахуванням декількох груп факторів економічного, технічного, соціального й іншого характерів. Для даної мети було розроблено двоетапний алгоритм, що дозволяє врахувати невизначеність вихідної інформації, а також багатокритеріальний характер задачі. На першому етапі порівняння попередньо сформованих варіантів побудови мікросистеми здійснюється на основі математичного апарату теорії ігор і пов'язується з побудовою платіжних матриць по кожній з прийнятих до розгляду цільових функцій. Для урахування багатокритеріального характеру задачі використовується підхід Беллмана-Заде, що дає можливість сформувати узагальнену багатовимірну платіжну матрицю. Подальший її аналіз може здійснюватися на підставі будь-якого з критеріїв теорії ігор. Передбачається, що на даному етапі буде визначено обмежена кількість альтернатив найбільш раціональних з позицій окремих критеріїв. На другому етапі вибір оптимального рішення здійснюється шляхом використання процедур інвестиційного менеджменту. При цьому, з одного боку, враховуються фактичні вартісні і технічні характеристики обладнання, яке планується використовувати, а, з іншого боку, приймається в облік невизначеність інформації про умови реалізації інвестиційного проекту, шляхом завдання ряду факторів (наприклад, ставка дисконтування, потоків платежів) у інтервальній формі, використовуючи при відповідних розрахунках узагальнену інтервальну арифметику Хансена.

Ключеві слова: мікросистема, теорія ігор, багатокритеріальне прийняття рішень, підхід Беллмана-Заде, інтервальна арифметика Хансена.

Надійшла 06.05.2014
Received 06.05.2014

УДК 662.963

Г. Г. Стрелкова, канд. фіз.-мат. наук, доцент; **К. В. Рабчук**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СИНТЕЗУ АМІАКУ НА ОСНОВІ РОЗРОБКИ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ

Аміак є одною з неорганічних хімічних речовин з найвищою часткою виробництва в світі. Процес синтезу аміаку є енергозатратним та потребує детального аналізу. Такий аналіз є можливим та безпечним за допомогою моделювання процесу. Дана стаття розглядає моделювання реактору синтезу аміаку та виконання експерименту над моделлю. Модель є динамічною, що дозволяє краще зрозуміти процес синтезу при раптовій зміні параметрів процесу.

Ключові слова: аміак, реактор, процес синтезу, моделювання, динамічна модель, MATLAB.

Вступ.

Аміак є одною з неорганічних хімічних речовин з найвищою часткою виробництва в світі. 131 мільйонів тон аміаку були вироблені в 2010 році, згідно зі статистикою [1], зокрема, 3,4 мільйони тон – в Україні, 1,8 мільйони тон – в Польщі, 1,1 мільйони тон – в Румунії, 2,7 мільйони тон – в Німеччині. За 2011 рік в Україні було вироблено 4,8 мільйони тон аміаку [2]. Актуальність виробництва аміаку пояснюється тим, що близько 80 % виробленого аміаку використовується для отримання добрив у