ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В РАЗВИТИИ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОТРАСЛЕЙ

УДК: 330.131.7
JEL C130
DOI: 10.17213/2312-6469-2020-1-116-133

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ФИШБЕРНА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ[1]

© *А.В. Сигал, Е.С. Ремесник* 2020

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

Статья посвящена применению формул Фишберна и их обобщений, последовательностей Фишберна, в экономике, прежде всего, для корректного моделирования процессов принятия управленческих решений о реализации инновационных проектов. Применение последовательностей Фишберна позволяет учесть такие важные особенности современной экономики и процессов принятия решений о реализации инновационных проектов, как неопределенность, неполнота информации, конфликтность, многокритериальность и порожденный этими экономическими категориями экономический риск. Методы моделирования процессов принятия решений о реализации инновационных проектов, предлагаемые в статье, основываются на применении последовательностей Фишберна, а также на концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр.

Ключевые слова: *формулы Фишберна; последовательности Фишберна; принятие управленческих решений; инновационный проект; экономический риск, статистическая игра; антагонистическая игра.*

THE USE OF FISHBURN SEQUENCES FOR DECISION ON THE IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE PROJECTS

© *A.V. Sigal, E.S. Remesnik* 2020

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-010-00688.

The article is devoted to the application of Fishburn formulas and their generalizations, Fishburn sequences in economics, first of all, for the correct modeling of adoption of management decisions processes on the implementation of innovative projects. The use of Fishburn sequences makes it possible to take into account such important features of the modern economy and decision-making processes on the implementation of innovative projects as uncertainty, incomplete information, conflict, multi-criteria and the economic risk economic risk generated by these economic categories. The methods for modeling decision-making processes on the implementation of innovative projects, proposed in the article, are based on the use of Fishburn sequences, and also on the concept of combined use of statistical and antagonistic games.

Keywords: *formulas of Fishburn; Fishburn sequences; adoption of management decisions; innovative project; economic risk: statistical game; antagonistic game.*

Моделирование, в т.ч. теоретико-игровое моделирование, процессов принятия управленческих решений о реализации инновационных проектов требует учета самых разных факторов, в частности, таких важных особенностей современной экономики и процессов принятия решений о реализации инновационных проектов, как *неопределенность*, *неполнота информации*, *конфликтность*, *многокритериальность* и порожденный ими *экономический риск*.

Под *неопределенностью* будем понимать недостаточность обеспеченности процесса принятия управленческих решений необходимой информацией или, в более общей трактовке, знаниями о проблемной ситуации. Неопределенность влияет на эффективность экономической деятельности. Фундаментальная неопределенность экономической деятельности – это неопределенность ее результатов. Неполное, недостоверное, неточное знание разнообразных параметров порождается разными причинами. Прежде всего, оно порождается неполной и недостоверной информацией об условиях реализации управленческих решений, о связанных с этими решениями возможных выгодах и затратах, наличием множественности целей и многокритериальности их оценки. Подчеркнем, в экономике приходится иметь дело с существованием некоторой неопределенности, которую невозможно устранить, а также с неполнотой информации, которую невозможно полностью преодолеть за приемлемую цену, а порой и абсолютно невозможно преодолеть хотя бы частично.

Любой экономической деятельности присущи напряженные отношения участников (например, партнеров, контрагентов, конкурентов), противоречия (полные или частичные) между их целями и интересами, множественность целей субъектов экономической деятельности, прежде всего лиц, принимающих решения (ЛПР), а также многокритериальность задач принятия управленческих решений. Все эти особенности и означают, что современной экономике присуща такая экономическая категория как *конфликтность*.

Альтернативность и *многокритериальность* – это свойства, присущие процессам принятия управленческих решений в экономике. Само принятие управленческих решений – это выбор оптимальной, наилучшей, альтернативы из нескольких рассматриваемых альтернатив. Субъекты экономической деятельности (собственно, ЛПР) преследуют, как правило, не одну единственную цель, а одновременно несколько различных целей, поэтому, в большинстве случаев, модель принятия управленческих решений в экономике представляет собой многоцелевую многокритериальную задачу, в которой требуется оптимизировать значения нескольких выбранных экономических показателей.

Существует множество различных определений термина «экономический риск». Согласно одному из наиболее общих определений этого термина, сформулированного В.В. Витлинским (см., например, [1, с. 10]), *экономический риск* (*ЭР*) – это экономическая категория, отображающая характерные особенности восприятия ЛПР неопределенности, неполноты информации, случайности, конфликтности, альтернативности и многокритериальности, объективно существующих и внутренне присущих современной экономики, процессам определения целей, управления, оценивания альтернативных вариантов действий и принятия решений. Все эти процессы отягощены возможными опасностями и неиспользованными возможностями. Количественная оценка уровня ЭР представляет собой многомерную величину, характеризующую возможность отклонения от целей, от желательного, ожидаемого, результата, возможность неудачи, в т.ч. возможность возникновения потерь. При этом важно учитывать влияние контролируемых (управляемых) и неконтролируемых (неуправляемых) факторов, прямых и обратных связей.

Необходимость учета таких свойств, как неопределенность, неполнота информации, случайность, конфликтность, альтернативность, многокритериальность и порожденный ими ЭР, требует применения адекватных методов и моделей процессов принятия управленческих решений в экономике, т.е. таких методов и моделей процессов принятия управленческих решений в экономике, которые позволяют адекватно и корректно учитывать все эти экономические категории. Это замечание относится и к случаям применения теоретико-игровых методов моделирования процессов принятия решений о реализации инновационных проектов, по сути, о выборе для реализации одного наилучшего (или нескольких наилучших) с точки зрения ЛПР проекта (проектов) из нескольких рассматриваемых инновационных проектов.

При обосновании и принятии управленческих решений в различных областях экономики в условиях неопределенности особую роль играет статическая модель принятия решений [2, с. 9–14], которую еще называют статистической игрой. Абрахам Вальд, основоположник последовательного анализа [3], основной моделью теоретико-игрового принятия решений считал статическую модель принятия решений, т.е. статистическую игру.

Статистическая игра представляет собой игру двух участников, в которой первый игрок является *ЛПР*, активно и осмысленно выбирающим свои стратегии, а второй – «*природой*», т.е. экономической средой. «Природа» пассивно выбирает свои чистые стратегии, т.е. случайным образом (неосознанно) оказывается в одном из своих возможных состояний.

Пусть ситуацию принятия решений о реализации инновационных проектов моделирует статистическая игра, заданная своей платежной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$, где r_{ij} – значение выигрыша ЛПР (например, значение показателя эффективности, выбранного ЛПР) в случае, когда ЛПР принял решение о реализации i-го инновационного проекта, а экономическая среда оказалась в своем j-м возможном состоянии. Согласно концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр (см., например, [4]), эту статистическую игру можно отождествить с *антагонистической игрой* (*АИ*)*, характеризующей ситуацию принятия управленческих решений*, т.е. с АИ, заданной той же самой платежной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$.

Цель статьи – разработка теоретико-игровых методов принятия решений о реализации инновационных проектов, причем методов, адекватно и корректно учитывающих важнейшие особенности современной экономики и процессов принятия решений о реализации инновационных проектов. Предлагаемые методы моделирования процессов принятия решений о реализации инновационных проектов основываются на концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр, а также на применении последовательностей Фишберна.

В статье будет, в частности, рассмотрен случай, когда на компонентах вектора априорного распределения вероятностей возможных состояний экономической среды задано то или иное линейное отношение порядка. Эти отношения порядка были подробно изучены П. Фишберном [5–7] и приведены, например, в монографии Р.И. Трухаева [2, с. 77–80]. Эти формулы и их обобщения как последовательности Фишберна (см., например, [8, с. 106–138]) могут быть применены, например, для вычисления значений компонент априорного распределения вероятностей возможных состояний фондового рынка, что, как показано в работе А.В. Сигала [9], позволяет приводить обобщенные модели Марковица задачи поиска эффективного портфеля, заданных в поле, так называемой, третьей информационной ситуации (см., например, [2, с. 13]), к классической модели Марковица задачи поиска эффективного портфеля.

Кроме того, последовательности Фишберна могут быть применены для вычисления оценок значений удельных весов критериев, показателей или факторов, рассматриваемых при принятии решений в экономике, технике и других областях, и обладающих различной значимостью, измеренной в некоторой шкале, при этом значимости рассматриваемых альтернатив оцениваются числами, значения которых характеризуются определенным разбросом. Применение последовательностей Фишберна в современной теории портфеля подробно рассмотрено в монографии А.В. Сигала, Е.С. Ремесник [8, с. 139–194], а их применение в нечетком когнитивном моделировании и в моделях с количественными факторами – в монографии Е.С. Ремесник, А.В. Сигала [10, с. 153–168].

1. Основные понятия и определения

Допустим, что для каждой пары возможных состояний экономической среды можно указать, какое из них имеет больший приоритет (собственно, характеризуется бóльшим значением вероятности своей реализации), или, что они являются эквивалентными (имеют одинаковую вероятность своей реализации). Кроме того, следует учитывать, что компоненты вектора, характеризующего распределение вероятностей возможных состояний экономической среды, обязаны удовлетворять следующим основным требованиям:

условию нормировки

$$\sum_{j=1}^{n} q_j = 1, \tag{1}$$

и требованиям неотрицательности всех вероятностей

$$q_j \geq 0, \ j = \overline{1, n}. \tag{2}$$

Пусть $\mathbf{q} = (q_1; q_2; \ldots; q_j; \ldots; q_n)$ – вектор априорного распределения вероятностей возможных состояний экономической среды, для компонент которого не известны их точные истинные значения. Приведем определения двух наиболее распространенных типов линейных отношений порядка [2, с. 78].

Простым линейным отношением порядка называют соотношения, которым должны удовлетворять значения членов последовательности, выражающиеся неравенствами $q_1 \geq q_2 \geq \ldots \geq q_j \geq \ldots \geq q_n$ или $q_1 \leq q_2 \leq \ldots \leq q_j \leq \ldots \leq q_n$. *Частично усиленным линейным отношением порядка* называют соотношения, которым должны удовлетворять значения членов последовательности, выражающиеся неравенствами $q_j \geq q_{j+1} + \ldots + q_n, \ j = \overline{1, n-1}$, или $q_j \geq q_1 + \ldots + q_{j-1}, \ j = \overline{2, n}$.

Р.И. Трухаев приводит основные точечные оценки распределения априорных вероятностей состояний экономической среды в поле третьей ИС, т.е. для приведенных выше отношений порядка [2, с. 84-85]. Эти оценки распределения априорных вероятностей состояний экономической среды в монографии Р.И. Трухаева названы *точечными оценками Фишберна*. Формулы Фишберна позволяют простым и естественным способом вычислить оценки значений вероятностей состояний экономической среды, если для этих вероятностей задан тот или иной вектор приоритетов, т.е. то или иное отношение порядка.

Пусть $\hat{q}_1; \hat{q}_2;...;\hat{q}_j;...;\hat{q}_n$ – оценки неизвестных значений компонент вектора $\mathbf{q} = (q_1; q_2;...;q_j;...;q_n)$. Для случая простого линейного отношения порядка П. Фишберн предложил считать, что оценки $\hat{q}_j$ неизвестных значений вероятностей состояний экономической среды образуют арифметическую прогрессию, а для случая частично усиленного линейного отношения порядка – монотонную геометрическую прогрессию. Если соответствующие последовательности представляют собой убывающие прогрессии, то формулы

$$\hat{q}_j = \frac{2 \cdot (n - j + 1)}{n \cdot (n+1)}, \ j = \overline{1, n}, \tag{3}$$

и

$$\hat{q}_j = \frac{2^{n-j}}{2^n - 1}, \ j = \overline{1, n}, \tag{4}$$

принято называть [2, с. 84] первой и второй формулой Фишберна, соответственно. Очевидно, числа, найденные по формулам (3) и (4), обязательно удовлетворяют соотношениям (1) и (2).

Как предложено в статье [11], *прогрессией Фишберна* будем называть последовательность $\{\hat{q}_j\}_{j=1}^n$, заданную формулой (3) или (4): *арифметической прогрессией Фишберна* – последовательность, заданную формулой (3), *геометрической прогрессией Фишберна* – последовательность, заданную формулой (4).

Рассмотрим ситуацию, когда соответствующие последовательности представляют собой возрастающие прогрессии. В этом случае приведенные формулы Фишберна принимают следующий вид:

$$\hat{q}_j = \frac{2 \cdot j}{n \cdot (n+1)}, \ j = \overline{1, n}, \tag{5}$$

$$\hat{q}_j = \frac{2^{j-1}}{2^n - 1}, \ j = \overline{1, n}. \tag{6}$$

В экономических исследованиях принято считать, что формула (3) отражает тот факт, что об уровне значимости альтернатив (например, возможных состояний экономической среды; моделируемых систем; рассматриваемых показателей; анализируемых проектов и т.п.) неизвестно ничего, кроме того, что они расположены по порядку убывания значимости. Формула (4) отражает тот факт, что уровень значимости очередной альтернативы не меньше, совокупного (суммарного) уровня значимости всех предшествующих альтернатив, вместе взятых. Аналогично можно интерпретировать формулы (5) и (6). Заметим, в определенных ситуациях применение формул (5) и (6) предпочтительнее применения формул (3) и (4), соответственно. Например, при исследовании динамических рядов, когда натуральные значения индекса j задают дискретные моменты времени, применение формул (5) и (6) явно предпочтительнее применения соответствующих формул (3) и (4). Во-первых, в связи с тем, что, как правило, ситуация, сложившаяся в предшествующий момент времени, более удаленный от настоящего момента времени, оказывает на нынешнюю ситуацию меньшее влияние, чем ситуация, сложившаяся в предшествующий момент времени, более приближенный к настоящему моменту времени. Во-вторых, по причине нежелательности перенумерации, упорядоченных хронологически, дискретных моментов времени.

Формулы (3) и (5), как, соответственно, и формулы (4) и (6), несложно обобщить, что впервые было предложено в статье [11], на случай монотонных прогрессий, удовлетворяющих лишь условию нормировки (1) и требованиям неотрицательности (2) всех членов прогрессии.

Обобщенной прогрессией Фишберна будем называть прогрессию $\left\{\hat{q}_j\right\}_{j=1}^{n}$, удовлетворяющую всем ограничениям (1) и (2): *обобщенной арифметической прогрессией Фишберна* – арифметическую прогрессию, удовлетворяющую всем ограничениям (1) и (2), *обобщенной геометрической прогрессией Фишберна* – геометрическую прогрессию, удовлетворяющую всем ограничениям (1) и (2).

Как показано в статье [11], обобщенная арифметическая прогрессия Фишберна представляет собой арифметическую прогрессию вида

$$\hat{q}_j = \frac{1}{n} - \frac{(n-1)\cdot x}{2} + (j-1)\cdot x = \frac{2 - n\cdot(n-2\cdot j+1)\cdot x}{2\cdot n}, \quad j=\overline{1,n}, \tag{7}$$

разность которой удовлетворяет соотношениям

$$|x| \le \frac{2}{n\cdot(n-1)}, \tag{8}$$

а обобщенная геометрическая прогрессия Фишберна представляет собой геометрическую прогрессию вида

$$\hat{q}_j = \frac{x-1}{x^n-1}\cdot x^{j-1} = \frac{1-x}{1-x^n}\cdot x^{j-1}, \quad j=\overline{1,n}, \tag{9}$$

знаменатель которой удовлетворяет соотношению

$$x > 0. \tag{10}$$

Основные свойства, в т.ч. энтропийные свойства, обобщенных прогрессией Фишберна впервые были приведены в статье А.В. Сигала, Е.С. Ремесник [12].

Рассмотрим метод построения произвольной последовательности, удовлетворяющей простому линейному отношению порядка и задающей распределение вероятностей, который был предложен в работе А.В. Сигала [13]. Пусть $\{a_j\}_{j=1}^{n}$ – произвольная монотонная последовательность неотрицательных чисел, сумма которых является положительным числом, т. е. справедливы соотношения $a_1 \geq a_2 \geq \ldots \geq a_j \geq \ldots \geq a_n \geq 0$ или $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \ldots \leq a_j \leq \ldots \leq a_n$, при этом $\sum_{j=1}^{n} a_j > 0$, тогда последовательность $\{\hat{q}_j\}_{j=1}^{n}$, где

$$\hat{q}_j = \frac{a_j}{\sum_{i=1}^{n} a_i}, \ j = \overline{1, n}, \tag{11}$$

удовлетворяет и простому линейному отношению порядка, и всем требованиям (1) и (2), т.е. задает распределение вероятностей. Далее будем использовать следующую терминологию и обозначения, впервые введенные в [8, с. 132].

Последовательностью Фишберна будем называть последовательность $\{\hat{q}_j\}_{j=1}^{n}$, значения элементов которой вычисляются по формулам (11), где $\{a_j\}_{j=1}^{n}$ – монотонная последовательность неотрицательных чисел, сумма которых является положительным числом, при этом последовательность $\{a_j\}_{j=1}^{n}$ будем называть *последовательностью, производящей* (или *порождающей*) *последовательность Фишберна* $\{\hat{q}_j\}_{j=1}^{n}$.

Отметим, что формула (11) внешне совпадает с так называемой третьей формулой Фишберна (см., например, [2, с. 85]), применяемой в случае справедливости так называемого усиленного линейного отношения порядка (см., например, [2, с. 78]). Однако формула (11) определяет класс последовательностей, являющийся гораздо более широким, чем класс последовательностей, элементы которых вычисляются по формуле точечных оценок Фишберна для случая усиленного линейного отношения порядка, т.е. по третьей формуле Фишберна.

Рассмотрим АИ, характеризующую ситуацию принятия управленческих решений. Уточним, что *антагонистическими играми* (*АИ*) будем называть конечные игры двух лиц (игроков) с нулевой суммой. При этом будем различать два принципиально разных класса антагонистических игр. Первый – *классические антагонистические игры* (*КАИ*), представляющие собой АИ с полной информацией, т.е. игры, заданные своей полностью известной платежной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$. Второй – *неоклассические антагонистические игры* (*НАИ*), представляющие собой АИ с неполной информацией, т.е. игры, заданные своей частично известной платежной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$. Как отмечалось ранее, современной экономике, в т.ч. процессам принятия решений о реализации инновационных проектов, внутренне присущи такие особенности как неопределенность, неполнота информации, случайность, конфликтность, альтернативность, многокритериальность и порожденный ими ЭР. Эти особенности экономики приводят к тому, что при теоретико-игровом моделировании процессов принятия управленческих решений в экономике не для всех элементов платежной матрицы $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$ известны их точные истинные значения. В таких случаях следует применять НАИ.

В рамках теории принятия решений с учетом неопределенности, неполноты информации, случайности, конфликтности, альтернативности, многокритериальности и порожденного ими ЭР возможны различные концепции поиска оптимального решения НАИ. Например, для оценки значений неизвестных элементов платежной матрицы можно использовать методы интерполирования, экстраполирования, регрессионного анализа. Решение полученной КАИ можно интерпретировать как оптимальное решение исходной НАИ. Возможные методы приведения исходной НАИ к КАИ зависят от имеющей место информационной ситуации относительно неопределенности значений неизвестных элементов платежной матрицы (см., например, [4, с. 244–248]). Можно утверждать, что НАИ представляет собой основную теоретико-игровую модель принятия управленческих решений в экономике, позволяющую учитывать неопределенность, неполноту информации, случайность, конфликтность, альтернативность, многокритериальность и порожденный ими ЭР.

С методами решения АИ, прежде всего, КАИ можно ознакомиться в обширной литературе, например, в книгах [1, 4, 8, 10, 14–16].

Подчеркнем, отождествление исходной статистической игры, моделирующей ситуацию принятия решений о реализации инновационных проектов, с соответствующей АИ (НАИ в случае, когда не для всех элементов платежной матрицы $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$ известны их точные истинные значения), характеризующей ситуацию принятия управленческих решений, не меняет свойств «природы», которая, по-прежнему, характеризуется случайным выбором собственных стратегий, т.е. своих состояний. К необходимости комбинированного применения статистических и антагонистических игр приводит мнение ЛПР о том, что ему нецелесообразно рисковать.

2. Теоретико-игровые методы принятия решений о реализации инновационных проектов

Итак, ситуацию принятия решений о реализации инновационных проектов моделирует статистическая игра, заданная своей платежной матрицей.

При этом принято выделять творческую и формальную составляющие процесса построения теоретико-игровой модели [2, с. 7–10]. Основными этапами творческой составляющей построения теоретико-игровой модели являются следующие:

1) формирование множества $\boldsymbol{I} = \{1; 2; \ldots; i; \ldots; k\}$ чистых стратегий первого и второго игроков, т.е. перечисление решений ЛПР, которые оно может реализовывать при однократном принятии управленческих решений, и множества $\boldsymbol{J} = \{1; 2; \ldots; j; \ldots; n\}$ возможных состояний экономической среды;

2) определение и формализация основного показателя эффективности (и/или полезности), построение платежной матрицы соответствующей игры, характеризующей процесс принятия решений;

3) если процесс принятия управленческих решений характеризует статическая модель, то определение (идентификация) имеющей место информационной ситуации, характеризующей поведение экономической среды, а для НАИ – определение (идентификация) имеющей место информационной ситуации, характеризующей неопределенность возможных значений неизвестных элементов платежной матрицы;

4) выбор правила (критерия принятия решений, называемого еще критерием оптимальности) поиска оптимальной стратегии ЛПР из множества критериев, которые можно применять в поле имеющей место информационной ситуации;

5) выбор оптимальной стратегии согласно выбранному критерию оптимальности среди чистых стратегий первого игрока и/или его смешанных стратегий, если их применение возможно и экономически целесообразно.

По мнению специалистов, процесс построения является одним из наиболее ответственных и сложных этапов теоретико-игрового моделирования. В случае применения АИ в экономике элементы r_{ij} платежной матрицы – это, как правило, числа, характеризующие соответствующие статистические данные или представления экспертов, анализирующих ситуацию принятия управленческих решений. Например, построение платежной матрицы возможно с помощью метода попарных сравнений, как в методе анализа иерархий [17]. Построение платежной матрицы с помощью метода попарных сравнений применялось, например, в работах [18]. Заметим также, что процедуры построения матриц попарных сравнений достаточно подробно рассмотрены в монографии Г.Н. Гнатиенко, В.Е. Снитюка [19, с. 159–199], а в практикуме В.В. Витлинского, Е.В. Пискуновой, О.В. Ткача, В.И. Скицко, А.Н. Новоселецкого рассмотрена классификация и ранжирование экономических объектов методом анализа иерархий [20, с. 104–134]. Отметим еще один интересный метод оценки сложных объектов, который использует систему АСПИД-3W, предложенный Д.Н. Колесовым, М.В. Михайловым, Н.В. Ховановым в их работе [21].

Применение НАИ позволяет в определенном смысле учесть и преодолеть неполноту информации относительно значений элементов платежной матрицы игры. Более того, применение НАИ позволяет не только лучше учесть неопределенность, неполноту информации, случайность, конфликтность, альтернативность, многокритериальность и порожденный ими ЭР, но и позволяет оптимизировать уровень ЭР. Основные понятия теории АИ и некоторые особенности применения НАИ для принятия управленческих решений в экономике были впервые рассмотрены в работе А.В. Сигал, В.Ф. Блыщика [22], а наиболее полно изложены в монографии А.В. Сигала [4].

2.1. При решении статистической игры важно корректно оценить распределение априорных вероятностей состояний «природы», т.е. экономической среды. Для корректной оценки распределения априорных вероятностей целесообразно применять последовательности Фишберна. Первый из двух предлагаемых теоретико-игровых методов принятия решений о реализации инновационных проектов может быть представлен в виде выполнения следующей последовательности этапов (шагов) *схемы теоретико-игрового метода принятия решений о реализации инновационных проектов, основанного на применении последовательностей Фишберна*.

Шаг 1. Формирование ЛПР множества $\boldsymbol{I}$ всех инновационных проектов, рассматриваемых им для возможной реализации в настоящий момент времени.

Шаг 2. Формирование ЛПР множества $\boldsymbol{J}$ всех возможных сценариев, т.е. всех возможных состояний, в которых может оказаться экономическая среда.

Шаг 3. Оценка экономической эффективности каждого из рассматриваемых инновационных проектов для каждого сценария на основе расчетных значений выбранного показателя эффективности и построение матрицы $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = \left(r_{ij} \right)$, где r_{ij} – значение выбранного показателя эффективности (например, значение прибыли, получаемой ЛПР) в случае, когда ЛПР принял решение о реализации i-го инновационного проекта, а экономическая среда оказалась в своем j-м возможном состоянии.

Шаг 4. Оценка по формуле (11) величин $\hat{q}_j$ неизвестных значений вероятностей q_j возможных сценариев, при этом в качестве последовательности, производящей соответствующую последовательность Фишберна, следует выбрать последовательность $\left\{ a_j \right\}_{j=1}^{n}$, обладающей всеми свойствами, которыми с точки зрения ЛПР должно обладать распределение вероятностей возможных состояний экономической среды.

Шаг 5. Вычисление точечных оценок соответствующих числовых характеристик, например, оценок ожидаемых (средних) значений по формулам $m_i = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot \hat{q}_j$, $i = \overline{1, k}$, или оценок дисперсий по формулам $\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}^2 \cdot \hat{q}_j - m_i^2$, $i = \overline{1, k}$.

Шаг 6. Выбор наиболее надежного инновационного проекта, подлежащего реализации, на основании применения критерия, характерного для принятия управленческих решений в поле первой информационной ситуации (см., например, [2, с. 13]). Номер i^* наиболее надежного инновационного проекта согласно критерию Байеса определяется равенством

$$i^* = \arg\max_i m_i,$$

а согласно критерию минимума дисперсии функционала оценивания

$$i^* = \arg\min_i \sigma_i^2.$$

Для окончательного выбора наиболее надежного инновационного проекта (или нескольких наиболее надежных проектов), подлежащего (подлежащих) реализации, ЛПР может задать минимально допустимый уровень значения выбранного показателя эффективности C^*, при этом в случае сравнения ожидаемых (средних) значений этого показателя ЛПР принимает положительное решение о реализации i-го инновационного проекта тогда и только тогда, когда справедливо соотношение $m_i \geq C^*$ и для реализации этого инновационного проекта имеются все необходимые ресурсы.

2.2. Второй из двух предлагаемых теоретико-игровых методов принятия решений о реализации инновационных проектов может быть представлен в виде выполнения следующей последовательности этапов (шагов) *схемы теоретико-игрового метода принятия решений о реализации инновационных проектов, основанного на концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр*.

Шаг 1. Формирование ЛПР множества $\boldsymbol{I}$ всех инновационных проектов, рассматриваемых им для возможной реализации в настоящий момент времени.

Шаг 2. Формирование ЛПР множества $\boldsymbol{J}$ всех возможных сценариев, т.е. всех возможных состояний, в которых может оказаться экономическая среда.

Шаг 3. Оценка экономической эффективности каждого из рассматриваемых инновационных проектов для каждого сценария на основе расчетных значений показателей эффективности (в первую очередь, таких классических показателей, как NPV, IRR, PI, PP, DPP), выбранных ЛПР.

Шаг 4. Оценка значений μ_{ij} функции принадлежности i-го инновационного проекта нечеткому множеству (см., например, [23–27])

$\widetilde{\boldsymbol{I}}_j = \{(\mu_{1j}/1); (\mu_{2j}/2);\ldots;(\mu_{ij}/i);\ldots;(\mu_{kj}/k)\}$ наиболее надежных (в смысле возможности достижения целей, поставленных ЛПР) инновационных проектов в условиях j-го сценария.

Шаг 5. Решение соответствующей АИ, точнее КАИ, заданной своей платежной матрицей $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_{k\times n} = (\mu_{ij})$, если матрица $\boldsymbol{\mu}$ известна полностью, или решение НАИ, заданной своей платежной матрицей $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_{k\times n} = (\mu_{ij})$, если матрица $\boldsymbol{\mu}$ известна частично. Для определенности будем считать, что АИ, заданная своей платежной матрицей $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_{k\times n} = (\mu_{ij})$, не имеет седловой точки и не имеет решения в чистых стратегиях игроков.

Шаг 6. Вычисление оценок уровней надежности рассматриваемых инновационных проектов, а именно величин μ_i^*, $i = \overline{1, k}$, представляющих собой оценки значений функции принадлежности соответствующих инновационных проектов нечеткому множеству $\widetilde{\boldsymbol{I}}$ по формулам

$$\mu_i^* = p_i^* \Big/ \max_l p_l^*, \ i = \overline{1, k}. \tag{12}$$

Шаг 7. Выбор наиболее надежного инновационного проекта, подлежащего реализации.

Для окончательного выбора наиболее надежного инновационного проекта (или нескольких наиболее надежных проектов), подлежащего (подлежащих) реализации, ЛПР может задать минимально допустимый уровень надежности C^* (например, $C^* = 0{,}25$ или $C^* = 0{,}75$), при этом ЛПР принимает положительное решение о реализации i-го инновационного проект тогда и только тогда, когда для оценки его уровня надежности справедливо соотношение $\mu_i^* \ge C^*$ и для реализации этого инновационного проекта имеются все необходимые ресурсы.

Заметим, что предложенная здесь схема теоретико-игрового метода принятия решений о реализации инновационных проектов, основанного на концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр, во многом повторяет общий принцип теоретико-игрового упорядочивания альтернатив по уровню их надежности, впервые предложенной А.В. Сигалом в статье В.В. Витлинского, А.В. Сигала [28].

2.3. Задачи принятия управленческих решений в экономике, в т.ч. задачи принятия решений о реализации инновационных проектов, часто представляют собой задачу многокритериальной оптимизации, имеющую следующий общий вид:

$$\varphi_l(\mathbf{x}) \to \max_{\mathbf{x}\in X}, \ l = \overline{1, L}, \tag{13}$$

где $\varphi_1(\mathbf{x}),\ldots, \varphi_L(\mathbf{x})$ – частные критерии, представляющие собой заданные функции, X – область допустимых решений, представляющая собой заданное множество $X \subset \mathbf{R}^n$, L, n – заданные натуральные числа.

Для поиска оптимальных по Парето решений задачи (13) ее можно привести к задаче однокритериальной оптимизации. Одним из наиболее распространенных методов поиска оптимальных по Парето решений задачи (13) является приведение ее к задаче оптимизации функции свертки

$$\varphi(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^{L} u_l \cdot \varphi_l(\mathbf{x}).$$

Решение задачи однокритериальной оптимизации

$$\varphi(\mathbf{x}) \to \max_{\mathbf{x}\in X}$$

позволяет найти допустимое решение $\mathbf{x}^* \in X$, для которого справедливо равенство

$$\varphi(\mathbf{x}^*) = \max_{\mathbf{x}\in X} \varphi(\mathbf{x}).$$

Оптимизация функции свертки не всегда приводит к оптимальному по Парето решение задачи (13), но при соблюдении не слишком жестких требований $\mathbf{x}^* \in X$ является оптимальным по Парето решением задачи (13).

Для построения оценок вектора $\mathbf{u} = (u_1; u_2;...;u_l;...;u_L)$ весовых коэффициентов приоритета можно применять последовательности Фишберна, обладающие желаемыми свойствами. В качестве свойств, которыми с точки зрения ЛПР должны обладать компоненты вектора весовых коэффициентов, могут выступать простое линейное отношение порядка или частично усиленное линейное отношение порядка.

Итак, предлагаемый метод оценки вектора весовых коэффициентов, основанный на использовании последовательностей Фишберна (11), можно применять для поиска оптимального по Парето решения задачи (13) многокритериальной оптимизации. Оценив вектор весовых коэффициентов, исходную задачу многокритериальной оптимизации можно привести к задаче оптимизации функции свертки. ЛПР должно осуществить свой выбор оценки вектора весовых коэффициентов на основе имеющейся в его распоряжении информации, его опыта, компетентности и профессиональной интуиции. Основное преимущество предлагаемого метода оценки вектора весовых коэффициентов, основанного на использовании последовательностей Фишберна, состоит в том, что он позволяет построить аддитивную функцию свертки, максимизация которой дает возможность найти такое оптимальное по Парето решение задачи (13) многокритериальной оптимизации, которое в полной мере учитывает субъективные предпочтения ЛПР. Предлагаемый метод оценки вектора весовых коэффициентов, основанный на использовании последовательностей Фишберна, подробно рассмотрен в публикации А.В. Сигала [29].

Выводы

Исследование, проведенное в статье, позволяет прийти к следующим выводам.

Моделирование, в т.ч. теоретико-игровое моделирование, процессов принятия управленческих решений о реализации инновационных проектов требует учета самых разных факторов, в частности, таких важных особенностей современной экономики и процессов принятия решений о реализации инновационных проектов, как неопределенность, неполнота информации, конфликтность, многокритериальность и порожденный ими экономический риск.

В статье предложены два теоретико-игровых метода принятия решений о реализации инновационных проектов. Первый метод принятия решений о реализации инновационных проектов основан на применении последовательностей Фишберна. Последовательность Фишберна представляет собой монотонную последовательность неотрицательных чисел, удовлетворяющих условию нормировки, т.е. их сумма равна числу 1, а последовательность, производящая последовательность Фишберна, – монотонную последовательность неотрицательных чисел, сумма которых является положительным числом.

В случае, когда ситуацию принятия управленческих решений в экономике, например, принятия решений о реализации инновационных проектов, характеризует статистическая игра, требуется корректно оценить распределение вероятностей состояний экономической среды. Для корректной оценки распределения вероятностей состояний экономической среды и целесообразно применение последовательностей Фишберна.

При оценивании неизвестного распределения вероятностей состояний экономической среды часто требуется, чтобы искомая оценка удовлетворяла тем или иным линейным отношениям порядка. Наиболее важными и распространенными из линейных отношений порядка являются следующие две разновидности этих отношений: 1) простое линейное отношение порядка, 2) частично усиленное линейное отношение порядка.

Выбрав в качестве последовательности, производящей последовательность Фишберна, последовательность (например, можно использовать прогрессии, в т.ч. константу, а также такие классические последовательности, как числа Мерсенна, числа Евклида, числа Ферма, числа Фибоначчи), обладающую желаемыми свойствами (например, обладающую простым линейным отношением или частично усиленным линейным отношением порядка), ЛПР может применить в качестве оценки распределения вероятностей состояний экономической среды последовательность Фишберна, порожденную выбранной им последовательностью.

По нашему мнению, последовательности Фишберна представляют собой удобный инструментарий, позволяющий выполнять соответствующий анализ различных экономических ситуаций и процессов, а также принимать управленческие решения в экономике, в т.ч. управленческие решений о реализации инновационных проектов. При этом методы, основанные на использовании последовательностей Фишберна, позволяют адекватно и корректно учитывать важные особенности современной экономики (например, неопределенность, неполноту информации, конфликтность, многокритериальность и порожденный ими экономический риск), особенности сложившейся ситуации принятия управленческих решений, а также предпочтения лица, принимающего решения.

Второй метод принятия решений о реализации инновационных проектов основан на концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр. Суть концепции комбинированного применения статистических и антагонистических игр состоит в абстрактном отождествлении статистической игры, моделирующей исходную ситуацию принятия управленческих решений в экономике, с антагонистической (матричной) игрой, характеризующей исходную ситуацию принятия управленческих решений в экономике, т.е. с антагонистической игрой, платежная матрица которой совпадает с платежной матрицей статистической игры, моделирующей исходную ситуацию принятия управленческих решений в экономике.

Кроме того, т.к. задачи принятия управленческих решений в экономике, в т.ч. задачи принятия решений о реализации инновационных проектов, часто представляют собой задачи многокритериальной оптимизации, в статье предложен метод оценки вектора весовых коэффициентов, основанный на использовании последовательностей Фишберна, обладающих желаемыми свойствами, что позволяет привести задачу многокритериальной оптимизации к задаче оптимизации аддитивной функции свертки. Основное преимущество предлагаемого метода оценки вектора весовых коэффициентов, основанного на использовании последовательностей Фишберна, состоит в том, что он позволяет построить аддитивную функцию свертки, максимизация которой дает возможность найти такое оптимальное по Парето решение задачи многокритериальной оптимизации, которое в полной мере учитывает субъективные предпочтения лица, принимающего решения.

От качества решения задач принятия управленческих решений в экономике, в т.ч. задач принятия решений о реализации инновационных проектов, существенным образом зависит эффективность функционирования экономической системы (например, предприятия или экономики страны). Как известно, уровень эффективности функционирования экономической системы в значительной мере определяет величину, в т.ч. направленность, экономического роста

Литература

1. Экономический риск: игровые модели / В.В. Витлинский, П.И. Верченко, А.В. Сигал, Я.С. Наконечный // Под ред. д-ра экон. наук, проф. В.В. Витлинского. – Киев: КНЭУ, 2002. – 446 с. (на укр. яз.)
2. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М.: Наука, 1981. – 258 с.

3. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд; пер. с англ. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.
4. Сигал А.В. Теория игр для принятия решений в экономике: монография / А.В. Сигал. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2014. – 308 с.
5. Fishburn P.C. Analysis of Decisions with Incomplete Knowledge of Probabilities / P.C. Fishburn // Operations Research. 1965. V. 13. № 2. P. 217-237.
6. Fishburn P.C. Decision and Value Theory / P.C. Fishburn. № Y.: John Wiley & Sons, 1964. 437 p.
7. Fishburn P.C. Independence in Utility Theory with Whole Product Sets / P.C. Fishburn // Operations Research. 1965. V. 13. № 1. P. 28-45.
8. Сигал А.В. Последовательности Фишберна и их применение в современной теории портфеля: монография / А.В. Сигал, Е.С. Ремесник. – Симферополь: ИП Корниенко А.А., 2018. – 204 с.
9. Сигал А.В. О приведении обобщенной модели Марковица в поле третьей информационной ситуации к классической модели Марковица / А.В. Сигал // Системный анализ и информационные технологии: Труды Седьмой Международной конференции САИТ-2017 (13-18 июня 2017, Светлогорск). – М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. – С. 159-167.
10. Ремесник Е.С. Последовательности Фишберна и их применение в экономических исследованиях: монография / Е.С. Ремесник, А.В. Сигал. – Симферополь: ИП Корниенко А.А., 2019. – 188 с.
11. Сигал А.В. Обобщенные прогрессии Фишберна / А.В. Сигал, Г.Н. Макеева // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2015): сб. науч. тр. IX Межд. школы-симпозиума АМУР-2015 (Севастополь, 12–21 сентября 2015). – Симферополь: КФУ им. В.И. Вернадского, 2015. – С. 343-350.
12. Сигал А.В. Последовательности, удовлетворяющие линейным отношениям порядка: применение в экономике и свойства / А.В. Сигал, Е.С. Ремесник // Друкеровский вестник. 2018. № 1. – С. 44-58.
13. Сигал А.В. О произвольной последовательности, удовлетворяющей простому линейному отношению порядка / А.В. Сигал // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. Труды XVI Международной научно-практической конференции. Симферополь–Гурзуф, 19-21 октября 2017. – Саки: ИП Бровко А.А., 2017. – С. 67.
14. Воробьев Н.Н. Основы теории игр. Бескоалиционные игры / Н.Н. Воробьев. – М.: Физматлит, 1984. – 496 с.
15. Воробьев Н.Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков / Н.Н. Воробьев. – М.: Наука, 1985. – 272 с.
16. Нейман Дж. фон. Теория игр и экономическое поведение / Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн; пер. с англ. – М.: Наука, 1970. – 708 с.
17. Saaty T.L. Creative Thinking, Problem Solving and Decision Making / T.L. Saaty. Pittsburgh: RWS Publ., 2005. 267 p.
18. Киселева Е.Е. Инвестиционные риски при развитии экономического потенциала предприятий электроэнергетики Украины на этапе прогнозирования / Е.Е. Киселева, А.В. Сигал // Экономика: проблемы теории и практики: Сб. науч. тр. Днепропетровск: – ДНУ, 2002. Вып. 159. – С. 140-146.
19. Гнатиенко Г.Н. Экспертные технологии принятия решений / Г.Н. Гнатиенко, В.Е. Снитюк. – Киев: ТОВ «Маклаут», 2008. – 444 с. (на укр. яз.)
20. Математически модели и методы рыночной экономики: практикум / В.В. Витлинский, Е.В. Пискунова, О.В. Ткач и др. – Киев: КНЭУ, 2014. – 362 с. (на укр. яз.)

21. Колесов Д.Н. Оценка сложных финансово-экономических объектов с использованием системы поддержки принятия решений АСПИД-3W: Учеб. пособие / Д.Н. Колесов, М.В. Михайлов, Н.В. Хованов. – СПб.: ОЦЭиМ, 2004. – 64 с.
22. Сигал А.В. Антагонистическая игра, заданная в условиях частичной неопределенности / А.В. Сигал, В.Ф. Блыщик // Экономическая кибернетика: Международный научный журнал. 2005. № 5–6 (35-36). – С. 47-53.
23. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде; пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 168 с.
24. Матвийчук А.В. Анализ и управление экономическим риском. Учебн. пособие / А.В. Матвийчук. – Киев: Центр учебной литературы, 2005. – 224 с. (на укр. яз.)
25. Матвийчук А.В. Моделирование экономических процессов с использованием методов нечеткой логики: Монография / А.В. Матвийчук. – Киев: КНЭУ, 2007. – 264 с. (на укр. яз.)
26. Zadeh L.A. Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
27. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications / H.-J. Zimmermann. Boston: Springer US, 2006. 358 p.
28. Витлинский В.В. Теоретико-игровое оценивание инвестиционных проектов / В.В. Витлинский, А.В. Сигал // Моделирование и информационные системы в экономике: Межвед. науч. сб. Вып. 68. – Киев: КНЭУ, 2002. – С. 126-133. (на укр. яз.)
29. Сигал А.В. Применение последовательностей Фишберна для принятия решений в экономике / А.В. Сигал // Системное моделирование социально-экономических процессов. – Воронеж: Изд-во «Истоки», 2019. – С. 509-515.

Поступила в редакцию 17.01.2020

Сигал Анатолий Викторович – доктор экономических наук, профессор кафедры бизнес-информатики и математического моделирования Института экономики и управления (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского; профессор, г. Симферополь, Россия.

Sigal Anatoliy V. – doctor of Economic Sciences, professor at the Department of business informatics and mathematical modeling; V.I. Vernadsky Crimean Federal University, professor, Simferopol, Russia.

Ремесник Елена Сергеевна – ассистент кафедры бизнес-информатики и математического моделирования Института экономики и управления (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия.

Remesnik Elena S. – lecturer at the Department of business informatics and mathematical modeling; V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia.

Россия, 295015, г. Симферополь,
ул. Севастопольская, д. 21/4
D. 21/4, Sevastopolsky str., 295015, Simferopol, Russia
e-mail: ksavo3@gmail.com