

НЕЧЕТКИЕ ПРОГНОЗЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОД ИХ РАЗРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУРЫ ГРУППОВОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

¹Исмагилов И.И., ²Бичурин Р.В.

¹ФГБОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Министерства образования и науки РФ, Казань, e-mail: iiismag@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ», Казань, e-mail: bichurin.ruslan-ru@yandex.ru

В данной работе рассматриваются основные методы прогнозирования количественных показателей сложных систем, приводятся недостатки и преимущества использования каждого из них. Предлагается классификация нечетких прогнозов, сформированных экспертами индивидуально либо в составе группы. Указывается, что полученные индивидуальные и коллективные нечеткие прогнозы могут быть агрегированы в комбинированный нечеткий прогноз. Необходимость получения комбинированного нечеткого прогноза может быть обусловлена поставленной задачей. Также в работе предложен новый метод разработки нечетких прогнозов на основе процедуры групповой экспертизы. Суть данного метода заключается в последовательном сужении исходного коллективного интервального прогнозного значения до соответствующих нечетких чисел подгруппами экспертов. Сужение осуществляется посредством сравнения приоритетов получаемых подинтервалов согласно методу Саати. В рамках данного метода были выведены аналитические выражения для вычисления приоритетов альтернатив в случае деления прогнозного интервала на три подинтервала. Построение функции принадлежности полученного нечеткого прогноза и определение его доверительного интервала осуществляется согласно эвристическому алгоритму построения функции принадлежности нечеткого числа. В рамках алгоритма реализации метода предусмотрено уменьшение количества итераций по сужению исходного прогнозного интервала посредством предварительной оценки требуемого их количества для получения нечеткого прогноза. Разработанный метод является компьютерно-ориентированным и предназначен для использования в человеко-машинных системах прогнозирования социально-экономических процессов и показателей сложных технических систем

Ключевые слова: прогнозирование, нечеткий прогноз, функция принадлежности нечеткого числа, прогнозный интервал, доверительный интервал нечеткого числа, матрица парных сравнений

FUZZY FORECASTS: CLASSIFICATION AND METHOD OF THEIR DEVELOPMENT BASED ON PROCEDURE OF A GROUP EXPERTISE

¹Ismagilov I.I., ²Bichurin R.V.

¹Kazan Federal University, Kazan, e-mail: iiismag@mail.ru;

²Kazan State Technical University n.a. A.N. Tupolev, Kazan, e-mail: bichurin.ruslan-ru@yandex.ru

In this paper discusses the basic methods of forecasting of quantitative indicators of complex systems, given the advantages and disadvantages of using each of them. A classification of fuzzy forecasts generated by experts individually or as a group. Indicates that the resulting individual and collective fuzzy forecasts can be aggregated into a combined fuzzy forecast. The need to obtain a combined fuzzy prediction may be due to the task. Also in this paper we propose a new method for the development of fuzzy forecasts based on the procedure of group examination. The essence of this method lies in the sequential narrowing of the original collective interval predictive values to the corresponding fuzzy numbers subgroups of experts. Narrowing performed by comparing the priorities derived subintervals according to the method Saaty. Under this method were derived analytical expressions for the calculation of the priorities of alternatives in the case of division of the forecast interval of three sub-interval. Construction of membership functions obtained fuzzy prediction and determination of confidence intervals is carried out according to a heuristic algorithm for constructing membership functions of fuzzy numbers. Within the framework of the implementation of the algorithm of the method is provided for reducing the number of iterations of the interval narrowing the initial forecast by a preliminary assessment of the required amount for their fuzzy forecast. The developed method is a computer-oriented and is intended for use in man-machine systems, forecasting socio-economic processes and performance of complex technical systems.

Keywords: forecasting, fuzzy forecast, the membership function of the fuzzy number, the forecast interval, the confidence interval of a fuzzy number, the matrix of pairwise comparisons

Прогнозирование – это один из ключевых моментов при принятии управленческих решений в современном обществе. Регулярное прогнозирование процессов позволяет не только принимать эффективные управленческие решения, но и накапливать опыт, позволяющий повысить точность и надёжность прогнозов, улучшить модели и алгоритмы прогнозирования [1].

Условно все методы прогнозирования подразделяют на две большие группы [2]:

- формализованные (фактографические);
- экспертные (интуитивные).

Зачастую к вышеперечисленным добавляют еще одну группу – комбинированные (гибридные) методы, которые представляют собой сочетание первых двух.

К фактографическим относят методы, основанные на обработке объективных данных об объекте прогнозирования. Данные методы опираются на факты, информация о которых получена. К экспертным относят методы, в которых информационной основой являются мнения экспертов (специалистов в соответствующей обла-

сти), опирающихся на их знания, интуицию и опыт.

В настоящее время насчитывается уже несколько сотен методов прогнозирования. Преимущества и недостатки широко распространенных методов, используемых для прогнозирования количественных показателей сложных систем, представлены в таблице [3, 4, 5]:

| Метод | Область применения | Преимущества | Недостатки |
|------------------------------|---|--|---|
| Экспоненциальное сглаживание | Прогнозирование показателей по предприятию, прогноз потребностей в ресурсах, прогнозирование спроса, финансовое прогнозирование. Используется для среднесрочных и краткосрочных прогнозов | Простота. Единообразие их анализа и проектирования. Ясность и простота математической формулировки. Объем данных не значим. Постоянный пересмотр прогнозных значений по мере поступления фактических | Отсутствие гибкости. Требуют весьма тонкой настройки сглаживающих функций, даже для стационарных процессов. Оптимальный выбор этих функций является отдельной достаточно сложной задачей |
| Регрессионные методы | Прогнозирование объема инвестиций, уровня затрат, финансовых результатов, объемов продаж и т.п. Используется в среднесрочном прогнозировании | Простота. Единообразие их анализа и проектирования. Быстрое получение результата | Сложность определения вида функциональной зависимости. Низкая адаптивность линейных моделей и отсутствие способности моделирования нелинейных процессов |
| Авторегрессионные методы | Прогнозирование объема инвестиций, уровня затрат, финансовых результатов, объемов продаж и т.п. Используется в среднесрочном прогнозировании | Простота. Единообразие их анализа и проектирования | Низкие адаптационные свойства. Большое число параметров модели, идентификация которых неоднозначна и ресурсоемка. Линейность и отсутствие способности моделирования нелинейных процессов |
| Нейросетевые методы | Прогнозирование объема инвестиций, уровня затрат, финансовых результатов, объемов продаж и т.п. | Способность устанавливать нелинейные зависимости. Высокие адаптационные свойства. Масштабируемость | Отсутствие гибкости. Сложность выбора архитектуры. Высокие требования к непротиворечивости обучающей выборки и ресурсоемкость процесса обучения. Невозможность интерпретации модели в терминах предметной области. Неясность в выборе числа слоев и элементов в слое. Невозможность добавления нейронов в процессе самообучения нейросети |
| Экспертный подход | Прогнозирование рынков сбыта, сроков обновления выпускаемой продукции, прогноз технического уровня продукции. Срок прогнозирования не ограничен | Возможность прогнозирования в условиях наличия неопределенности в исходной информации. Возможность причинного анализа | Субъективное мнение отдельного эксперта или небольшой группы может оказать доминантное влияние на общее мнение и привести к неправильному прогнозу. Отрицательное влияние на решения членов экспертной группы в отдельных случаях может оказать не глубина доводов, а количество замечаний «за» и «против» |
| Прогнозирование по аналогии | Может применяться для установления качественной и количественной аналогии с целью изучения опыта, результатов и т.п. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование | Лингвистическая простота реализации | Вероятность возникновения ситуации, когда отсутствует аналог. Резкое ухудшение результатов в случае наличия нелинейности |
| Комбинированные методы | Для всех видов прогнозирования. Срок прогнозирования не ограничен | Определяются методами, входящими в состав комбинированной системы | |

Обоснованность прогноза в значительной мере зависит от выбора метода прогнозирования, посредством которого он был получен. Фактографические методы превосходят экспертные по точности прогнозирования, так как опираются на математический инструментарий, но существенно уступают вторым в условиях наличия неопределенности в исходной информации.

Следует учесть, что ввиду значительной сложности реальных систем зачастую либо невозможно учесть влияние многих факторов, либо невозможно получить точные результаты измерений, то есть в полученных результатах присутствует определенная степень неопределенности. В таких ситуациях эффективное применение находит аппарат теории нечетких множеств. Следует также отметить, что часто прогнозируемые показатели исследуемых систем представлены временными рядами. При их прогнозировании используются следующие основные методы нечеткого прогнозирования [6]:

- методы нечеткого регрессионного анализа;
- методы нечеткого авторегрессионного анализа;
- методы нечеткого нейросетевого анализа;
- методы анализа нечетких тенденций.

Развиваются также методы нечеткого прогнозирования временных рядов на основе методов групповой экспертизы.

В данной работе предложен метод получения нечеткого прогноза, являющийся развитием метода нечеткого прогнозирования количественных показателей, представленного в [7].

Классификация нечетких прогнозов

Прежде чем приступить к описанию метода разработки нечетких прогнозов, приведем предложенную их классификацию. В данной работе нечетким прогнозом будем называть прогноз, построенный в виде нечеткого числа. Нечеткие прогнозы разделим на две группы:

- 1) индивидуальные (прогнозы отдельных экспертов);
- 2) коллективные (прогнозы группы экспертов).

Отметим, что индивидуальные прогнозы относятся к классу $L-R$ нечетких чисел [8], а коллективные в общем случае могут и выходить за пределы этого класса нечетких чисел.

В случае коллективных нечетких прогнозов выделим 3 схемы их выработки:

- 1) жесткие (прогнозы строятся группой экспертов);
- 2) мягкие (экспертами строятся индивидуальные прогнозы);

3) комбинированные (комбинации первых двух схем).

Применение этих схем выработки прогнозов соответственно приводит к жестким, мягким и комбинированным нечетким прогнозам.

Жесткий нечеткий прогноз – нечеткое число, полученное в результате реализации определенной процедуры многотуровой групповой экспертизы.

Мягкий нечеткий прогноз – нечеткое число, полученное на основе агрегирования индивидуальных нечетких прогнозов.

Комбинированный нечеткий прогноз – нечеткое число, полученное в результате агрегирования жесткого нечеткого прогноза определенной подгруппы экспертов и индивидуальных нечетких прогнозов экспертов, не вошедших в эту подгруппу.

Введем также парциальные (частные) жесткие, мягкие и комбинированные нечеткие прогнозы, под которыми будем понимать нечеткие числа, полученные в результате агрегирования определенных групп соответствующих прогнозов.

Таким образом, в общем случае, если в результате групповой экспертизы разработаны k индивидуальных и l частных жестких нечетких прогнозов, то количество возможных вариантов построения нечетких прогнозов равно $2^{(k+l)}$.

Метод нечеткого прогнозирования

В методе нечеткого прогнозирования, предложенном в [7], использован эвристический алгоритм построения функции принадлежности (ФП) нечетких чисел (чисел приблизительно равных некоторому числу K). ФП чисел, приблизительно равных некоторому числу K , строится в виде

$$\mu_K(u) = e^{-\alpha(K-u)^2}, \quad u \in U,$$

где U – универсальное множество (в общем случае – множество действительных чисел); α – параметр степени нечеткости ФП.

Величина α определяется из выражения

$$\alpha = \frac{-4 \ln 0,5}{(\beta(K))^2},$$

где $\beta(K)$ – расстояние между точками перехода для $\mu_K(u)$, в которых ФП принимает значение 0,5.

Тогда выражение для ФП нечеткого числа запишется так:

$$\mu_K(u) = e^{4 \ln 0,5((K-u)/\beta(K))^2}, \quad u \in U.$$

Для целочисленной переменной X , изменяющейся в пределах от 1 до 99, формулы для вычисления значений $\beta(X)$ приведены в [9]. На основе этих формул в указанной

работе предложен алгоритм построения ФП числа, приблизительно равного K , при произвольном натуральном числе K . С помощью данного алгоритма может быть также построена ФП в случае, когда K есть число с дробной частью, представленное в форме с плавающей запятой, при этом мантисса числа должна быть целым числом. Алгоритм применяется к мантиссе числа, а затем учитывается его порядок.

Приведем краткое описание метода нечеткого прогнозирования, основанного на использовании представленного выше известного алгоритма построения ФП нечеткого числа. Суть метода в общем случае заключается в последовательном сужении исходного коллективного интервального прогнозного значения до соответствующих нечетких чисел подгруппами экспертов.

Исходный интервал возможных значений отчета временного ряда на периоде прогнозирования устанавливается на основе групповой экспертизы определением минимального и максимального значений левой и правой границы интервала прогноза. Возможно также использование других способов определения исходного интервала прогноза. Этот интервал разбивается на s перекрывающихся на 50% подинтервалов равной длины и проводится определение как отдельными экспертами, так и их группой нормированных приоритетов этих подинтервалов на основе метода Саати [10]. С учетом этих приоритетов подинтервалов в общем случае проводится разбиение экспертов на подгруппы и определение исходных интервалов прогноза для них. К каждому интервалу применяется итерационная процедура получения прогнозного нечеткого числа.

Итерационная процедура сужения интервала прогноза до нечеткого числа заключается в следующем. Интервал прогноза текущей итерации разбивается на s перекрывающихся на 50% подинтервалов равной длины, и проводится определение их приоритетов. С учетом приоритетов производится сужение интервала прогноза и его сравнение с интервалом достоверности (α -срезом) нечеткого числа на заданном уровне α , в качестве среднеожидаемого которого принимается среднее значение интервала прогноза. В случае включения интервала прогноза в интервал достоверности нечеткого числа итерации прекращаются, в противном случае – проводится новая итерация по сужению интервала прогноза. Прогнозное значение показателя определяется в виде нечеткого числа, полученного на последней итерации.

Согласно алгоритму реализации метода нечеткого прогнозирования, представлен-

ного в [7], исходный прогнозный интервал делится на 3 перекрывающихся на 50% подинтервала:

$$[\underline{m}, \underline{m} + 2\delta), [\underline{m} + \delta, \bar{m} - \delta), [\bar{m} - 2\delta, \bar{m}],$$

где \underline{m}, \bar{m} – соответственно левая и правая границы интервального прогноза;

$$\delta = \frac{\bar{m} - \underline{m}}{4}.$$

Каждая итерация данного алгоритма, основанная на процедуре групповой экспертизы, сужает исходный интервал в 2 раза. Исходя из этого, зависимость величины прогнозного интервала от номера итерации алгоритма может быть представлена следующим образом:

$$\Delta_i = \Delta_0 2^{-i}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где Δ_0 – величина исходного прогнозного интервала; Δ_i – величина прогнозного интервала после i итерации алгоритма.

Аналогично для общего случая деления исходного прогнозного интервала на k равных интервалов и соответственно на $(s = 2k - 1)$ перекрывающихся на 50% подинтервалов вышеописанное выражение запишется так:

$$\Delta_i = \Delta_0 k^{-i}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Определение оценки максимального числа итераций сужения интервала прогноза найдем из условия вложенности прогнозных значений в доверительные интервалы трех нечетких чисел, построенных на граничных и серединной точках исходного интервального прогноза. Эти условия имеют вид

$$\Delta_0 k^{-i_1} \leq \beta_L(\underline{m}); \quad \Delta_0 k^{-i_2} \leq \beta_C\left(\frac{\bar{m} + \underline{m}}{2}\right);$$

$$\Delta_0 k^{-i_3} \leq \beta_R(\bar{m}), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\beta_C\left(\frac{\bar{m} + \underline{m}}{2}\right)$, $\beta_L(\underline{m})$ и $\beta_R(\bar{m})$ – доверительные интервалы соответствующих нечетких чисел.

Приравняв и прологарифмировав левые и правые части данных условий, получим следующие оценки количества итераций:

$$i_1 = \log_k \Delta_0 - \log_k \beta_L(\underline{m});$$

$$i_2 = \log_k \Delta_0 - \log_k \beta\left(\frac{\bar{m} + \underline{m}}{2}\right);$$

$$i_3 = \log_k \Delta_0 - \log_k \beta_R(\bar{m}).$$

Итоговая оценка числа итераций определяется как максимальное из получившихся

значений i_1, i_2, i_3 . Таким образом, может быть предварительно оценено число итераций при делении прогнозного интервала на k равных интервала.

Практический смысл данной оценки заключается в том, что, предварительно получив достаточно большое количество итераций реализации алгоритма при $k = 2$, мы можем с целью их уменьшения разбить прогнозные интервалы на большее количество интервалов, например на 3. Тогда возникает дополнительный вопрос: «На какое максимальное число подинтервалов целесообразно делить исходный прогнозные интервал?»

В работе по инженерной психологии [11] установлено «магическое число Миллера», согласно которому эксперт способен различать 7 ± 2 градации. Значит количество подинтервалов (альтернатив) со степенью перекрытия 50% при разбиении исходного прогнозного интервала не должно превышать число 9. Таким образом, максимальное количество равных интервалов, на которое можно разбить исходный прогнозные интервал, равно 5. Кроме того, возможен комбинированный вариант деления исходного прогнозного интервала, при этом целесообразно деление на 2 и 3 интервала. В этом случае сначала необходимо использовать разбиение на 3 интервала, а затем по мере сужения прогнозного интервала с целью повышения точности использовать деление на 2 интервала. На наш взгляд, деление на 4 и 5 равных интервалов и соответственно анализ 7 и 9 альтернатив имеет большую трудоемкость для экспертов и вычислительную сложность обработки матриц парных сравнений (МПС) альтернатив. Поэтому рациональным является деление исходного прогнозного интервала на 2 или 3 равных интервала в соответствии с ситуацией и анализ 3 или 5 альтернатив соответственно.

Ниже приведем аналитические выражения для вычисления приоритетов альтернатив методом Саати в случаях деления прогнозного интервала на 2 или 3 равных интервала. Аналитические выражения для приоритетов альтернатив выводились из

следующей системы уравнений, записанной в общем виде:

$$AW = \lambda W; w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1,$$

где A – МПС альтернатив; $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$ – вектор приоритетов; λ – максимальное собственное значение МПС альтернатив.

В случае деления прогнозного интервала на $k \in \{2, 3\}$ равных интервалов ($s \in \{3, 5\}$ перекрывающихся на 50% подинтервалов) были получены следующие выражения для приоритетов альтернатив:

1) $k = 2$ ($s = 3$):

$$w_1 = \frac{a_{12}a_{23} + 2a_{13}}{a_{12}a_{23} + 2a_{13} + \frac{a_{13}}{a_{12}} + 2a_{23} + 3};$$

$$w_2 = \frac{\frac{a_{13}}{a_{12}} + 2a_{23}}{a_{12}a_{23} + 2a_{13} + \frac{a_{13}}{a_{12}} + 2a_{23} + 3};$$

$$w_3 = \frac{3}{a_{12}a_{23} + 2a_{13} + \frac{a_{13}}{a_{12}} + 2a_{23} + 3};$$

2) $k = 3$ ($s = 5$):

$$w_1 = \frac{t_1 t_6 + t_2 t_7}{t_1 (t_3 + t_5 + t_6 + t_8) + t_2 (t_4 + t_5 + t_7 + t_9)};$$

$$w_2 = \frac{t_1 t_8 + t_2 t_9}{t_1 (t_3 + t_5 + t_6 + t_8) + t_2 (t_4 + t_5 + t_7 + t_9)};$$

$$w_3 = \frac{t_1 t_3 + t_2 t_4}{t_1 (t_3 + t_5 + t_6 + t_8) + t_2 (t_4 + t_5 + t_7 + t_9)};$$

$$w_4 = \frac{t_5 t_1}{t_1 (t_3 + t_5 + t_6 + t_8) + t_2 (t_4 + t_5 + t_7 + t_9)};$$

$$w_5 = \frac{t_2 t_5}{t_1 (t_3 + t_5 + t_6 + t_8) + t_2 (t_4 + t_5 + t_7 + t_9)};$$

где

$$t_1 = a_{13}a_{24}a_{34} (15a_{15} + a_{12}a_{25} + 4a_{13}a_{35} + a_{12}a_{23}a_{35} + 52a_{14}a_{45}) +$$

$$+ a_{14}a_{24} (4a_{15} + 15a_{13}a_{35} + a_{12}a_{25} - a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}) + a_{14}a_{34} (15a_{14}a_{25} + a_{15}a_{23} + 4a_{13}a_{23}a_{35}) +$$

$$+ \frac{a_{13}a_{14}a_{34}}{a_{12}} \left(a_{13}a_{35} + 4a_{15} + \frac{a_{13}a_{24}a_{45}}{a_{23}} \right) + \frac{a_{13}a_{24}}{a_{23}} \left(a_{13}a_{25}a_{34} + 4a_{14}a_{25} + \frac{a_{14}a_{15}}{a_{12}} \right);$$

$$t_2 = a_{13}a_{24}a_{34} (163a_{14} - 4a_{12}a_{24} - 4a_{13}a_{34}) - a_{12}a_{14}a_{24} (4a_{23}a_{34} + 4a_{24}) -$$

$$- a_{14}^2 (4a_{24} + a_{23}a_{34}) - a_{12}a_{23}a_{24}a_{34} (a_{13}a_{14} + 4a_{14}) -$$

$$- \frac{a_{13}a_{14}a_{34}}{a_{12}} \left(4a_{14} + a_{13}a_{34} + 4 \frac{a_{13}a_{24}}{a_{23}} + 4 \frac{a_{14}a_{24}}{a_{23}a_{34}} \right) - \frac{a_{13}a_{24}^2}{a_{23}} (4a_{14} + a_{13}a_{34});$$

$$\begin{aligned}
 t_3 &= 4a_{14} + a_{12}a_{24} + \frac{a_{13}a_{14}}{a_{12}a_{23}} + \frac{4a_{13}a_{24}}{a_{23}} + 15a_{13}a_{34}; \\
 t_4 &= 4a_{15} + a_{12}a_{25} + \frac{a_{13}a_{15}}{a_{12}a_{23}} + \frac{4a_{13}a_{25}}{a_{23}} + 15a_{13}a_{35}; \\
 t_5 &= 52a_{13} - a_{12}a_{23} - \frac{a_{13}^2}{a_{12}a_{23}}; \\
 t_6 &= 15a_{13}a_{14} + 4a_{12}a_{13}a_{24} + \frac{a_{13}^2a_{24}}{a_{23}} + 4a_{12}^2a_{34} + a_{12}a_{13}a_{23}a_{34}; \\
 t_7 &= 15a_{13}a_{15} + 4a_{12}a_{13}a_{25} - \frac{a_{13}^2a_{25}}{a_{23}} + 4a_{12}^2a_{35} + a_{12}a_{13}a_{23}a_{35}; \\
 t_8 &= 4\frac{a_{13}a_{14}}{a_{12}} + 15a_{13}a_{24} + \frac{a_{13}^2a_{34}}{a_{12}} + a_{14}a_{23} + 4a_{13}a_{23}a_{34}; \\
 t_9 &= 4\frac{a_{13}a_{15}}{a_{12}} + 15a_{13}a_{25} + \frac{a_{13}^2a_{35}}{a_{12}} + a_{15}a_{23} + 4a_{13}a_{23}a_{35},
 \end{aligned}$$

где a_{ij} – соответствующие элементы МПС.

Приведем пошаговое описание алгоритма разработанного метода нечеткого прогнозирования:

Шаг 1. Постановка задачи прогнозирования.

Шаг 2. Формирование множества экспертов размерности M : $E_0 = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$.

Шаг 3. Определение вектора оценок компетентности экспертов:

$$W = \{(e_1w_1, e_2w_2, \dots, e_Mw_M)\}.$$

Определение весов компетентности экспертов осуществляется известными методами [12, 13, 14].

Шаг 4. Определение на основе экспертного опроса множества:

$$A = \{\underline{a}_i, \bar{a}_i, i = \overline{1, M}\},$$

где $\underline{a}_i, \bar{a}_i$ – соответственно, левая и правая границы интервала прогноза i -го эксперта.

Шаг 5. Нахождение исходной групповой интервальной оценки прогнозного значения:

$$(\underline{m}, \bar{m}); \quad \underline{m} = \min \{\underline{a}_i, i = \overline{1, M}\};$$

$$\bar{m} = \max \{\bar{a}_i, i = \overline{1, M}\}.$$

Шаг 6. Определение нечеткого числа \tilde{P} «приблизительно равного $(\underline{m} + \bar{m})/2$ » и его доверительного интервала β на уровне 0,5 ФП.

Шаг 7. Проверка вложенности интервала прогнозных значений в доверительный интервал нечеткого числа: $(\bar{m} - \underline{m}) \leq \beta$.

Если условие вложенности выполняется, то переход к шагу 27, иначе – к шагу 8.

Шаг 8. Предварительная оценка количества итераций сужения интервала при делении исходного прогнозного интервала на 2 равных интервала и сравнение его с предельно допустимым числом итераций, заранее заданным системным аналитиком.

Если получившаяся оценка итераций больше предельно допустимого количества итераций, то делим прогнозный интервал на 3 равных интервала. Количество получившихся альтернатив интервального прогноза в данном случае равно 5:

$$A_1 = [\underline{a}_1, \bar{a}_1] = [\underline{m}, \underline{m} + 2\delta];$$

$$A_2 = [\underline{a}_2, \bar{a}_2] = [\underline{m} + \delta, \underline{m} + 3\delta];$$

$$A_3 = [\underline{a}_3, \bar{a}_3] = [\underline{m} + 2\delta, \bar{m} - 2\delta];$$

$$A_4 = [\underline{a}_4, \bar{a}_4] = [\underline{m} + 3\delta, \bar{m} - \delta];$$

$$A_5 = [\underline{a}_5, \bar{a}_5] = [\bar{m} - 2\delta, \bar{m}],$$

где $\delta = (\bar{m} - \underline{m})/6$.

Если получившаяся оценка итераций меньше или равна предельно допустимому количеству итераций, то делим прогнозный интервал на 2 равных интервала. Количество получившихся альтернатив интервального прогноза s в данном случае равно 3:

$$A_1 = [\underline{a}_1, \bar{a}_1] = [\underline{m}, \underline{m} + 2\delta];$$

$$A_2 = [\underline{a}_2, \bar{a}_2] = [\underline{m} + \delta, \bar{m} - \delta];$$

$$A_3 = [a_3, \bar{a}_3] = [\bar{m} - 2\delta, \bar{m}],$$

где $\delta = (\bar{m} - \underline{m}) / 4$.

Шаг 9. Формирование экспертами индивидуальных МПС альтернатив по степени предпочтительности для определения их приоритетов для экспертов (локальных приоритетов). Аналитические выражения для вычисления приоритетов альтернатив при $s = 3, 5$ приведены выше.

Шаг 10. Вычисление вектора локальных приоритетов альтернатив:

$$\mathbf{L}_i = (l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{is}), \quad i = \overline{1, M}, \quad s = \{3, 5\}.$$

Шаг 11. Определение локальных интервальных прогнозов:

$$(\underline{n}_i, \bar{n}_i), \quad \underline{n}_i = \sum_{j=1}^s l_{ij} \underline{a}_j;$$

$$\bar{n}_i = \sum_{j=1}^s l_{ij} \bar{a}_j, \quad i = \overline{1, M}.$$

Шаг 12. Вычисление коэффициентов перекрытия локальных интервальных прогнозов K_{ij} , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, 3}$ со следующими интервалами:

а) $s = 3$:

$$[\underline{a}_1, \bar{a}_1), [\underline{a}_2, \bar{a}_2), [\underline{a}_3, \bar{a}_3];$$

б) $s = 5$:

$$[\underline{b}_1, \bar{b}_1), [\underline{b}_2, \bar{b}_2), [\underline{b}_3, \bar{b}_3],$$

где $\underline{b}_1 = \underline{a}_1$; $\bar{b}_1 = \bar{a}_1$; $\underline{b}_2 = \underline{a}_3$; $\bar{b}_2 = \bar{a}_3$; $\underline{b}_3 = \underline{a}_5$; $\bar{b}_3 = \bar{a}_5$.

Шаг 13. Формирование подмножеств экспертов по степени их «тяготения» к базовым интервалам:

$$E_1 = \{e_i \mid \max_j \{K_{ij}\} = K_{i1}\},$$

$$E_2 = \{e_i \mid \max_j \{K_{ij}\} = K_{i2}\},$$

$$E_3 = \{e_i \mid \max_j \{K_{ij}\} = K_{i3}\},$$

$$i = \overline{1, M}, \quad E_1 \cup E_2 \cup E_3 = E_0.$$

Шаг 14. Проверка условий $E_i \neq \emptyset$, $i = \overline{1, 3}$. Определение группового весового коэффициента v_i и выполнение для каждого непустого множества экспертов шагов 15–27.

Шаг 15. Проверка условия равенства количества экспертов в текущем их множестве 1. Если условие выполняется, то переход к шагу 16, иначе – к шагу 17.

Шаг 16. Определение группового интервального прогноза как соответствующего локального интервального прогноза и переход к шагу 20.

Шаг 17. Определение групповой МПС альтернатив путем определения ее элементов как среднегеометрических соответствующих элементов индивидуальных МПС.

Шаг 18. Вычисление вектора групповых приоритетов альтернатив:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_s), \quad s = \{3, 5\}.$$

Шаг 19. Определение группового интервального прогноза (\underline{m}, \bar{m}) :

$$\underline{m} = \sum_{j=1}^s p_j \underline{a}_j; \quad \bar{m} = \sum_{j=1}^s p_j \bar{a}_j, \quad s = \{3, 5\}.$$

Шаг 20. Определение нечеткого числа \tilde{P} «приблизительно равного $(\underline{m} + \bar{m}) / 2$ » и его интервала β на уровне 0,5 ФП.

Шаг 21. Проверка вложенности интервала прогнозных значений в доверительный интервал нечеткого числа: $(\bar{m} - \underline{m}) \leq \beta$. Если условие вложенности выполняется, то переход к этапу 27, иначе – к этапу 22.

Шаг 22. Предварительная оценка количества итераций дальнейшего сужения интервала прогноза. Выбор рационального количества перекрывающихся подинтервалов $s \in \{3, 5\}$, на которое будет поделен исходный интервал и определение альтернатив.

Шаг 23. Формирование экспертами индивидуальных МПС альтернатив по степени предпочтительности.

Шаг 24. Определение групповой МПС альтернатив путем определения ее элементов как среднегеометрических соответствующих элементов индивидуальных МПС.

Шаг 25. Вычисление вектора групповых приоритетов альтернатив:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_s), \quad s = \{3, 5\}.$$

Шаг 26. Определение группового интервального прогноза (\underline{m}, \bar{m}) :

$$\underline{m} = \sum_{j=1}^s p_j \underline{a}_j; \quad \bar{m} = \sum_{j=1}^s p_j \bar{a}_j, \quad s = \{3, 5\},$$

и переход к шагу 20.

Шаг 27. Определение жесткого нечеткого прогноза в виде нечеткого числа $\tilde{P}_{\text{гр}}$ и его ФП. Если на данный шаг был осуществлен переход с шага 7, то переход к шагу 29, в противном случае переход к шагу 28.

Шаг 28. Агрегирование нечетких прогнозов подгрупп экспертов с учетом весов

их компетентности и получение итогового нечеткого прогноза:

$$\tilde{P}_r = \oplus_{v_i} \tilde{P}_i.$$

Шаг 29. Построение ФП нечеткого прогноза и определение его доверительного интервала β на уровне 0,5.

Заключение

В данной работе предложена классификация нечетких прогнозов с учетом схем их выработки. Разработан метод нечеткого прогнозирования и описан алгоритм его реализации. В этом алгоритме предусмотрено уменьшение количества итераций по сужению исходного прогнозного интервала посредством предварительной оценки требуемого их количества для получения нечеткого прогноза.

Метод нечеткого прогнозирования на основе процедуры групповой экспертизы является компьютерно-ориентированным и предназначен для использования в человеко-машинных системах прогнозирования социально-экономических процессов и показателей сложных технических систем.

Список литературы

1. Жариков О.Н., Королевская В.И., Хохлов С.Н. Системный подход к управлению / под ред. В.А. Персианова. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2001. – 62 с.
2. Чегыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
3. Глушенко В.В. Менеджмент: системные основы. – 2-е изд. – М.: НПЦ – «Крылья», 1998. – 224 с.
4. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие. – Невинномысск, 2006. – 221 с.
5. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобию: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2012. – 153 с.
6. Ярушклина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: Учебное учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 320 с.
7. Исмагилов И.И., Зинкин В.А. Нечеткое прогнозирование количественных показателей сложных систем // Исследования по информатике. – Казань.: Отечество, 2007. – С. 49–56.
8. Заде Л. Заде. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Изд-во «Мир», 1976. – 149 с.
9. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
10. Саати Т.Саати. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Изд-во «Радио и связь», 1993. – 278 с.
11. Миллер Г. Миллер. Магическое число семь плюс минус два // Инженерная психология. – М.: Прогресс, 1964. – С. 564–581.

12. Чернышева Т.Ю. Иерархическая модель отбора и оценки экспертов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск., 2009. – С. 168–173.

13. Shanteau J. Competence in experts // Organizational Behavior and Human Decision Processes. – Kansas, 2006. – P. 252–266.

14. Bagaturia G., Tabatadze M. Estimation of Expert's Competence for the Tasks of Forecasting // Journal of Business. – 2012. – P. 4–9.

References

1. Zharikov O.N., Korolevskaya V.I., Khokhlov S.N. Sistemnyy podkhod k upravleniyu, Moskva, 2001, 62 p.
2. Chetyrkin E.M., Statisticheskie metody prognozirovaniya, M, 1977, 200 p.
3. Gluschenko V.V., Menedzhment: sistemnye osnovi, Moskva, 1998, 224 p.
4. Tichonov E.E., Metody prognozirovaniya v usloviyach rynka, Nevinnomyssk, 2006, 221 p.
5. Chuchueva I.A., Model prognozirovaniya vremennykh ryadov po vyborke maksimalnogo podobiya, Moskva, 2012, 153 p.
6. Yarushkina N.G., Afanaseva T.V., Perfilava I.G., Intellektualnyy analiz vremennykh ryadov, Ulyanovsk, 2010, 320 p.
7. Ismagilov I.I., Zinkin V.A., Nchetkoe prognozirovanie kollichestvennykh pokazateley slozhnykh system, Kazan, 2007, pp. 49–56.
8. Zade L., Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy I ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy, Moskva, 1976, 149 p.
9. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I. P., Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modeley, Riga, 1993, 184 p.
10. Saati T., Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarchiy, Moskva, 1993, 278 p.
11. Miller G., Magicheskoe chislo sem plus minus dva, Moskva, 1964, pp. 564–581.
12. Chernysheva T.Yu., Ierarchicheskaya model otbora I otsenki ekspertov, Tomsk, 2009, pp. 168–173.
13. Shanteau J. Competence in experts // Organizational Behavior and Human Decision Processes. – Kansas, 2006. – pp. 252–266.
14. Bagaturia G., Tabatadze M. Estimation of Expert's Competence for the Tasks of Forecasting // Journal of Business, 2012. – pp. 4–9.

Рецензенты:

Песошин В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань;

Кирпичников А.П., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань.

Работа поступила в редакцию 27.10.2014.