ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 65:658(0,75.8)
CC BY 4.0
DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-63-73 Оригинальная статья/ Original article

Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах

Н.Л. Баламирзоев, В.Б. Мелехин

Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля 70, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования сводится к разработке одного из методов построения математической модели строительного производства, базирующегося на обработке экспертных данных с применением инструментальных средств математического аппарата нечетких множеств типа лингвистических переменных и лингвистических функций. **Метод.** Данные обрабатываются методом регрессионного анализа и в результате формируется аналитическое выражение графика лингвистической функции, фактически представляющего собой аналитическое выражение, устанавливающее зависимость рассматриваемого показателя эффективности от влияющих на него факторов нестабильной экономической среды сложных систем (строительной организации). **Результат.** Построены аналитические зависимости графиков лингвистических функций, соответствующих различным показателям эффективности, используемые в качестве критериев оптимального принятия управленческих решений. Наибольший эффект можно получить путем постановки и решения различных задач многокритериальной оптимизации по Парето, используя для этого в качестве критериев оптимальности аналитические выражения нескольких показателей эффективности функционирования строительного производства. **Вывод.** Построение эмпирических выражений показателей эффективности исследуемых систем позволяет организовать на их основе оптимальное принятие управленческих решений и обеспечить эффективное функционирование сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с разработкой метода оптимального управления поведением различных социально-экономических и технических систем, функционирующих в спонтанно изменяющихся условиях окружающей среды на основе решения задач многокритериальной оптимизации и выработки оптимальных цепочек проводимых организационно-управленческих мероприятий.

Ключевые слова: нестабильные условия, спонтанные изменения, регрессионная математическая модель, оптимальное управление.

Для цитирования: Н.Л. Баламирзоев, В.Б. Мелехин. Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):63-73. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-63-73

A method of processing expert data for constructing empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments

N.L. Balamirzoev, V.B. Melekhin

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a method for constructing a mathematical model of construction production based on processing expert data using tools of the mathematical apparatus of fuzzy sets such as linguistic variables and linguistic functions. **Method.**

The data are processed using regression analysis, resulting in an analytical expression of the linguistic function graph, which is actually an analytical expression establishing the dependence of the performance indicator under consideration on the factors of the unstable economic environment of complex systems (construction organization) that influence it. **Result**. Analytical dependencies of the graphs of linguistic functions corresponding to various performance indicators are constructed, used as criteria for optimal decision-making. The greatest effect can be achieved by setting and solving various problems of multi-criteria Pareto optimization, using analytical expressions of several performance indicators of construction production as optimality criteria. **Conclusion.** Constructing empirical expressions of performance indicators of the systems under study allows organizing optimal management decisions on their basis and ensuring the effective functioning of complex management objects in unstable environmental conditions. Further development of the research is associated with the development of a method for optimal control of the behavior of various systems operating in spontaneously changing environmental conditions based on solving problems of multi-criteria optimization and developing optimal chains of organizational and management measures.

Keywords: unstable conditions, spontaneous changes, regression mathematical model, optimal control

For citation: N.L. Balamirzoev, V.B. Melekhin. A method of processing expert data for constructing empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):63-73. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-63-73

Введение. Строительные организации являются сложными экономическими объектами управления, построение общей математической модели которых аналитическим путем затруднено в силу существенного разнообразия их производственной деятельности как на различных интервалах времени отчетного периода, так и в зависимости от вида производимой строительной продукции. Ввиду же спонтанных изменений, происходящих в экономической среде строительных организаций (СО), фактически невозможно и построение адекватных эмпирических математических моделей производственной деятельности строительных организаций, т.к. получаемые в этом случае статистические данные фактически не отражают закономерности и тенденции функционирования и развития строительного производства как в краткосрочном периоде времени, так и в долгосрочной перспективе.

Обойти отмеченную выше проблему можно путем формализации производственных процессов в строительстве на основе нечетких множеств [1, 2]. Однако рассмотренные в данных работах модели не позволяют формализовать весь процесс строительного производства [3, 4] с учетом взаимодействия строительной организации с внешней спонтанно изменяющейся экономической средой.

Постановка задачи. К одному из достаточно эффективных подходов решения этой проблемы следует отнести построение эмпирической математической модели строительного производства на основе обработки экспертных данных, отражающих достаточно общие закономерности функционирования как отдельных, так и совокупности СО в различных условиях нестабильной экономической среды. Для решения этой задачи в настоящей работе предлагается использовать такие фундаментальные инструментальные средства нечетких множеств как лингвистические переменные (ЛП) [5, 6] и лингвистические функции (ЛФ) [7, 8].

Методы исследования. Лингвистические переменные и лингвистические функции являются основными инструментальными средствами практического применения математического аппарата нечетких множеств для формализации поведения сложных систем различного назначения, функционирующих в условиях недоброкачественной неопределенности. Иначе говоря, их эффективно использовать для построения математической модели

сложных производственных систем, когда не представляется возможным организовать сбор и обработку методами регрессионного анализа статистических данных, отражающих закономерности функционирования исследуемых объектов управления на различных интервалах времени отчетного периода.

Под лингвистической переменной (ЛП) следует понимать переменную, которая помимо количественных значений определяется еще и качественными или словесными значениями, называемыми термами [5]. Допустим, что в СО стоит проблема снижения себестоимости производимой строительной продукции. В общем случае ЛП, соответствующая этой проблеме, определяется следующей пятеркой:

$$\text{ЛП} = (H, T, Q, \beta_S, l),$$

где H – название ЛП «Себестоимость производимой строительной продукции»; T – терм множество или множество нечетких значений ЛП, элементам которого являются следующие термы: «$T_1(Э_S)$ – очень низкая»; «$T_2(Э_S)$ – низкая»; «$T_3(Э_S)$ – средняя»; «$T_4(Э_S)$ – высокая» и «$T_5(Э_S)$ – очень высокая себестоимость производимой строительной продукции»; Q – множество базовых значений ЛП, которое, как правило, ограничено снизу и сверху, т.е. $Q \in [q(min), q(max)]$.

Например, для ЛП соответствующей показателю эффективности $Э_S$ – «Себестоимость производимой строительной продукции», данные ограничения, соответственно, определяются текущим и желаемым значением себестоимости производимой строительной продукции в рассматриваемый отчетный период времени. Необходимо отметить, что на основе множества базовых значений ЛП формируется шкала ее нечетких и количественных оценок, на которой экспертным путем определяются граничные значения термов путем построения соответствующих им нечетких множеств (рис.1).

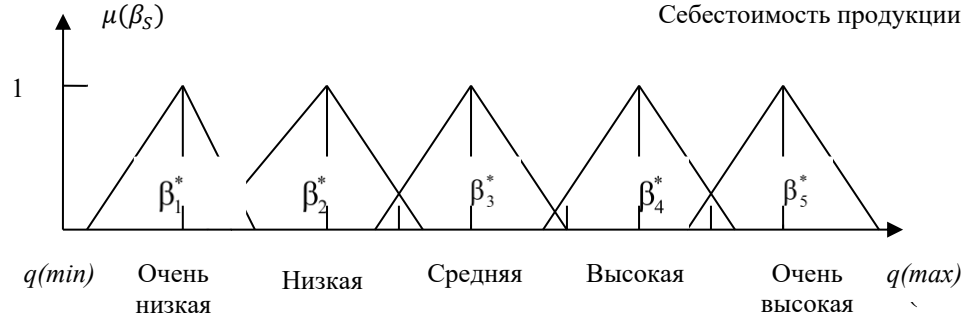

Рис. 1 – Шкала лингвистической переменной «Себестоимость строительной продукции»: ($\mu(\beta_S)$) – степень принадлежности значения β_S базовой переменной ЛП к нечеткому множеству, определяемому термом, в интервал численных значений которого оно попадает)
Fig. 1 – Scale of the linguistic variable "Cost of construction products": (μ(β_S)) – the degree of belonging of the value β_S of the basic variable to the fuzzy set defined by the term, in the range of numerical values of which it falls)

β_S – базовая переменная ЛП, определяющая ее количественное текущее значение, например, фактическая на текущий момент времени себестоимость производимой строительной продукции;

L – преобразования, выполняемые над различными значениями ЛП, служащие для перехода от ее количественных оценок к качественным или словесным значениям и, наоборот, для перехода от словесных (качественных) к ее количественным значениям.

Так, выполнение прямых преобразований, относящихся к параметру L, сводится к переходу от численных значений ЛП, определяемых фактическими значениями ее базовой переменной β_S к качественному их представлению, например, в виде следующих пар [9]:

$$\beta_S = < \mu(\beta_S), T_i(Э_S) >, i = \overline{1,5},$$

где $T_i(Э_S)$ – нечеткое значение ЛП или ее терм, в интервал численных значений которого попадает текущая величина ее базовой переменной β_S.

Следует отметить, что такое представление различных значений базовой переменной ЛП позволяет сравнивать их между собой без использования операции нечеткой эквивалентности [10], требующей выполнения трудоемких вычислений, связанных с определением минимумов и максимумов участвующих в сравнении величин различных показателей эффективности. Для нечеткого же описания текущих количественных значений β_S показателя эффективности СО представленного с помощью соответствующей ЛП можно использовать следующие преобразования [9]:

$$\Psi: \beta_S \rightarrow \begin{cases} T_1(Э_S), \text{ если} & 0 < \beta_S \le r_1^*; \\ T_1(Э_S), \text{ если} & r_1^* < \beta_S \le r_2^*; \\ \dots & \dots \\ T_1(Э_S), \text{ если} & r_5^* < \beta_S \le r_6^*, \end{cases}$$

позволяющие каждому значению базовой переменной β_S ЛП, поставить в соответствие один из ее термов $T_j(Э_S), j = \overline{1,5}$, где r_{j-1}^*, r_j^* – соответственно нижняя и верхняя границы числовых значений нечеткого множества соответствующего терму $T_j(Э_S)$.

В этом случае степень нечеткого равенства $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2)$ двух значений β_i^1 и β_i^2 базовой переменной ЛП, представленных соответственно парами $< \mu(\beta_i^1), T_j^1(Э_S) >$ и $< \mu(\beta_i^2), T_j^2(Э_S) >$, может вычисляться на основе следующего характеристического уравнения [9]:

$$\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = \begin{cases} 1, & \text{если } (|\mu(\beta_i^1) - \mu(\beta_i^2)| \le \varepsilon) \& (T_j^1(Э_S) = T_j^2(Э_S)); \\ 1 - \frac{|\beta_i^1 - \beta_i^1|}{|r_j^* - r_{j-1}^*|}, & \text{если } (T_j^1(Э_S) = T_j^2(Э_S)); \\ 0, & \text{если } T_j^1(Э_S) \ne T_j^2(Э_S), \end{cases}$$

где ε – величина допустимого отклонения фактического значения базовой переменной β_i^1 от заданного ее значения β_i^2, определяемая на основе требуемой точности решения стоящей в текущий момент времени задачи (например, допустимая ошибка точности расчета сметной стоимости проектируемого сооружения); $|\beta_i^1 - \beta_i^1|$ – абсолютная величина разности.

После получения оценки степени равенства $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2)$ сравниваемых между собой значений β_i^1 и β_i^2 оцениваемого показателя эффективности $Э_S$ строительного производства принимается следующее решение:

– сравниваемые значения β_i^1 и β_i^2 равны между собой, если $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = 1$, т.е. оба значения показателя эффективности $Э_S$ попадают в заданную окрестность ε одной и той же точки на шкале допустимых численных значений соответствующей ему ЛП;

– сравниваемые значения показателя эффективности нечетко равны между собой при выполнении условия $0 < \rho(\beta_i^1, \beta_i^2) < 1$, т.е. если они попадают в интервал численных значений одного и того же терма соответствующей этому показателю ЛП. В этом случае оценка степени равенства определяется по их относительной удаленности от центра тяжести функции принадлежности;

– сравниваемые значения заданного показателя эффективности $Э_S$ строительного производства не равны между собой, если степень их нечеткого равенства принимает значение, равное $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = 0$, т.е. они попадают в интервалы численных значений различных термов.

При этом, например, степень принадлежности $\mu(\beta_i^1)$ значения β_i^1 к нечеткому множеству, определяемому термом $T_j^1(Э_S)$, можно вычислить следующим образом:

$$\mu(\beta_i^1) = 1 - \frac{\beta_i^1}{r_j^*}.$$

Обратный же переход или переход от нечеткого (словесного) значения ЛП, определяемого, например, термом $T_j^1(Э_S)$, к количественной оценке β_i^1 показателя эффективности $Э_S$ осуществляется по проекции на шкалу ее численных значений из максимума функции принадлежности нечеткого множества соответствующего этому терму. Например, для терма $T_2^1(Э_S)$ – «Низкая себестоимость строительной продукции» рассматриваемого показателя эффективности строительного производства переменная β_i^1 будет определяться значением, равным величине β_2^* (рис.1).

В общем случае, лингвистические функции (ЛФ), позволяющие формализовать как в нечеткой форме, так и в аналитическом виде характер влияния параметров состояния экономической среды на показатели эффективности строительного производства исследуемой СО, по аналогии с показателями, рассмотренными в работе [9], определяются следующей пятеркой:

$$ЛФ = \left(H, ЛП_З\left\{F_{НЗ}(k), k = \overline{1,m}\right\}, M_1, M_2, \Psi\right),$$

где H – название лингвистической функции; $ЛП_З$ – зависимая лингвистическая переменная ЛФ, определяющая исследуемый показатель эффективности СО $Э_S$. Необходимо отметить, что название ЛФ, как правило, совпадает с названием ее зависимой ЛП; $F_{НЗ}(k)$ – независимая ЛП, соответствующая $k-$му фактору экономической среды, влияющему на рассматриваемый показатель эффективности строительного производства; M_1 – матрица ЛФ, элементы которой определяются экспертным путем в виде соответствия между нечеткими значениями рассматриваемого показателя эффективности $Э_S$ (зависимой переменной ЛФ) и набором нечетких значений влияющих на него факторов внутренней и внешней экономической среды СО (независимых переменных ЛФ); M_2 – матрица ЛФ, определяющая соответствие между количественными значениями зависимой переменной и набором количественных оценок влияющих на нее факторов экономической среды, определяющих независимые переменные лингвистической функции; Ψ – график ЛФ или аналитическая зависимость между значениями соответствующего этой функции показателя эффективности $Э_S$ (зависимой ЛП) и параметрами состояния экономической среды исследуемого строительного производства, определяющими независимые переменные лингвистической функции $F_{НЗ}(k), k = \overline{1,m}$.

Для построения ЛФ вначале формируются все входящие в ее структуру лингвистические переменные с соответствующими названиями. Затем по экспертным данным формируется соответствие между термами данных ЛП и строится матрица лингвистической функции M_1. Для этого на основе опроса экспертов каждому нечеткому значению зависимой ЛП в соответствие ставится набор нечетких значений влияющих на нее независимых ЛП. Затем осуществляется переход от нечетких значений ЛП по максимумам функций принадлежности нечетких множеств, определяющих нечеткие значения переменных ЛФ, к четким их значениям. Данные полученной матрицы соответствий M_2 количественных оценок ЛП строящейся лингвистической функции рассматриваются как псевдостатистика, найденная экспертным путем, которая обрабатывается методом множественного регрессионного анализа. В результате получается график искомой лингвистической функции. Наиболее наглядно эффективность применения графиков ЛФ в качестве математической модели обеспечивающей возможность принятия эффективных управленческих решений в системе управления строительным производством, можно представить следующим образом: пусть требуется организовать подсистему поддержки принятия решений в системе организационного управления эффективностью производственной деятельности СО, которую в общем

случае можно охарактеризовать множеством различных показателей. Например, производительностью труда, себестоимостью выпускаемой строительной продукции, качеством выполняемых строительно-монтажных работ и т.д.

В этом случае в структурированном виде метод построения графиков ЛФ для различных показателей эффективности строительного производства будет иметь следующее содержание.

Входные переменные: множество используемых в формируемой математической модели показателей эффективности $Э = \{Э_{k_1}\}, k_1 = \overline{1, n_1}$ и параметров состояния $F = \{F_{k_2}\}, k_2 = \overline{1, n_2}$ внешней и внутренней экономической среды строительного производства, влияющих на данные показатели эффективности.

Промежуточные переменные: соответствия между нечеткими значениями, найденными экспертным путем и количественными оценками заданных показателей эффективности $Э_{k_1} \in Э$ и параметров состояния $F_{k_2} \in F$ экономической среды строительного производства.

Выходные переменные: регрессионные модели показателей эффективности $Э_{k_1} \in Э$ полученные в виде соответствующих им графиков ЛФ и количественные оценки входящих в их структуру коэффициентов пропорциональности $a_z^{k_1}, z = \overline{1, n_{k_1}}$.

Метод.

Начало. 1. Принять $k_1 = 1$.

2. Определить параметры состояния экономической среды строительного производства $F_{k_2} \in F$ влияющие на показатель эффективности $Э_{k_1} \in Э$. Принять, например, в качестве математической модели определяющей зависимость рассматриваемого показателя эффективности $Э_{k_1}$ от параметров состояния $F_{k_2} \in F$ линейную регрессионную многофакторную модель следующего вида:

$$Э_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \cdots + a_{k_2}^{k_1} F_{k_2}. \quad (1)$$

3. Построить для каждого входящего в структуру уравнения (1) параметра состояния экономической среды строительного производства $F_{k_2} \in F$ соответствующую ему лингвистическую переменную $ЛП_{k_2}$ с названием «$k_2 -$ й параметр состояния экономической среды строительной организации».

4. Сформировать для показателя эффективности $Э_{k_1} \in Э$ соответствующую ему лингвистическую переменную $ЛП_{k_1}$ с названием «Показатель эффективности $Э_{k_1}$».

5. Опросить высококвалифицированных экспертов и построить по полученным экспертным данным матрицу M_1 лингвистической функции, для которой роль зависимой лингвистической переменной играет $ЛП_{k_1}$, а роль независимых лингвистических переменных исполняют переменные $ЛП_{k_2}$, соответствующие влияющим на показатель эффективности $Э_{k_1}$ факторам экономической среды строительной организации $F_{k_2} \in F$.

Пусть, например, для показателя эффективности $Э_{k_1}$ строительного производства «Себестоимость выпускаемой строительной продукции» по экспертным данным построена матрица M_1, отражающая влияние на него следующих параметров состояния $F_{k_2} \in F$: стоимость строительных материалов, оплата труда производственных рабочих, затраты связанные с эксплуатацией строительной техники (табл.1), где $m(k_1)$ – количество параметров состояния экономической среды СО, влияющих на показатель эффективности $Э_{k_1}$.

В табл.1 столбец, соответствующий терму $T_3(Э_{k_1})$ означает, что среднему значению показателя эффективности $Э_{k_1}$ эксперты в соответствие поставили большое значение $T_5(F_1)$ параметра состояния F_1, среднее значение $T_3(F_2)$ параметра состояния F_2,…, среднее значение $T_3(F_{m(k_2)})$ параметра состояния $F_{m(k_2)}$.

Таблица 1. Соответствие между нечеткими значениями показателя эффективности $Э_{k_1}$ и параметрами состояния $F_{k_2} \in F$ экономической среды строительного производства, установленных экспертным путем

Table 1. Correspondence between fuzzy values of the efficiency indicator $Э_{k_1}$ and the state parameters $F_{k_2} \in F$ of the economic environment of construction production, established by experts

$T_j(Э_{k_1})$/ $T_j(F_{k_2})$	$T_1(Э_{k_1})$	$T_2(Э_{k_1})$	$T_3(Э_{k_1})$	$T_4(Э_{k_1})$	$T_5(Э_{k_1})$
$T_j(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$
$T_j(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_4(F_2)$
…		…			…
$T_j(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_3(F_{m(k_2)})$	$T_2(F_{m(k_2)})$

6. Определить значения базовой переменной $\beta^*_{k_1}\left(T_j\left(Э_{k_1}\right)\right), j = \overline{1,5}$ $ЛП_{k_1}$ и базовых переменных $x(T_j(F_{k_2}))$ $ЛП_{k_2}$ по проекциям из максимумов функций принадлежности нечетких множеств, соответствующих термам зависимой $Э_{k_1} \in Э$ и независимых $F_{k_2} \in F$ переменных формируемой ЛФ, на базовую шкалу их численных значений. Используя полученные таким образом данные построить таблицу соответствий M_2 между численными значениями зависимой и независимых лингвистических переменных строящейся ЛФ.

Например, для показателя эффективности $Э_{k_1}$ «Себестоимость производимой строительной продукции» справедлива табл. 2, определяющая соответствие между его количественными значениями $\beta^*_z, z = \overline{1,5}$ и количественными оценками x^*_{jz} параметров состояния $F_{k_2} \in F$, найденными по нечетким их значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 2. Соответствие между количественными значениями $\beta^*_{k_1}(T_j(Э_{k_1}))$ показателя эффективности $Э_{k_1}$ и количественными оценками $x\left(T_j\left(F_{k_2}\right)\right)$, влияющих на него параметров состояния $F_{k_2} \in F$

Table 2. Correspondence between the quantitative values $\beta^*_{k_1}(T_j(Э_{k_1}))$ of the efficiency indicator $Эk_1$) and the quantitative estimates $x(T_j(F_{k_2}))$, of the state parameters $F_{k_2} \in F$ that influence it

$\beta^*_{k_1}(T_j(Э_{k_1}))/x(T_j(F_{k_2}))$	β^*_1	β^*_2	β^*_3	β^*_4	β^*_5
$x(T_j(F_1))$	x^*_{13}	x^*_{14}	x^*_{15}	x^*_{15}	x^*_{15}
$x(T_j(F_2))$	x^*_{22}	x^*_{22}	x^*_{23}	x^*_{23}	x^*_{24}
…		…			…
$x(T_j(F_5))$	x^*_{51}	x^*_{54}	x^*_{53}	x^*_{53}	x^*_{52}

В табл. 2 использованы следующие обозначения: $\beta^*_z, z = \overline{1,5}$ – количественные оценки показателя эффективности $Э_{k_1}$, найденные по термам $T_j(Э_{k_1})$ соответствующей ему лингвистической переменной $ЛП_{k_1}$; $x^*_{jk_2}$ – количественные оценки факторов экономической среды СО F_{k_2}, найденные по термам $T_j\left(F_{k_2}\right)$ соответствующих им $ЛП_{k_2}$.

Например, количественному значению показателя эффективности $Э_{k_1}$, найденному по максимуму функции принадлежности нечеткого множества, определяющего интервал численных значений терма $T_1(Э_{k_1})$, соответствуют следующие численные значения параметров состояния экономической среды СО $x^*_{13}, x^*_{22}, \dots, x^*_{51}$, найденные по соответствующим им термам $ЛП_{k_2}$ (см. табл. 2).

7. Обработать данные, полученные в таблице соответствий количественных значений зависимых и независимых ЛП (табл. 2), используя многофакторный регрессионный анализ [11-13] вычислить коэффициенты $a^{k_1}_{k_2}$ уравнения (1), определяющего график Ψ_{k_1}

строящейся лингвистической функции, соответствующей показателю эффективности строительного производства $Э_{k_1} \in Э$.

8. Построить аналитическое выражение графика ЛФ Ψ_{k_1}:

$$Э_{k_1} = a_1^{k_1}F_1 + a_2^{k_1}F_2 + \cdots + a_5^{k_1}F_5.$$

9. Проверить условие «$k_1 = n_1$»: если условие выполняется, то перейти к п. 10; в противном случае, $k_1 = k_1 + 1$, перейти к п. 2.

10. ***Конец.***

Следует отметить, что для построения аналитической зависимости $Э_{k_1} = a_1^{k_1}F_1 + a_2^{k_1}F_2 + \cdots + a_5^{k_1}F_5$ требуется решить следующее матричное уравнение [14-15]:

$$(X^T X)A = X^T Y,$$

где X – матрица, состоящая из элементов табл. 2, например, первая строка данной матрицы включает следующие элементы: $x_{13}^*, x_{14}^*, x_{15}^*, x_{15}^*, x_{15}^*, x_{15}^*$; X^T – транспонированная матрица X; A – вектор столбец неизвестных коэффициентов уравнения $Э_{k_1} = a_1^{k_1}F_1 + a_2^{k_1}F_2 + \cdots + a_5^{k_1}F_5$; Y– вектор столбец, состоящий из элементов $\beta_{k_1}^*(T_j(Э_{k_1}))$ первой строки табл. 2.

Отсюда, неизвестные коэффициенты уравнения $Э_{k_1} = a_1^{k_1}F_1 + a_2^{k_1}F_2 + + \cdots + a_5^{k_1}F_5$ вычисляются на основе следующего уравнения [16]:

$$A = (X^T X)^{-1}(X^T Y),$$

где $(X^T X)^{-1}$– матрица обратная матрице $(X^T X)$.

Полученные таким способом аналитические зависимости графиков лингвистических функций, соответствующих различным показателям эффективности $Э_{k_1} \in Э$ строительного производства, используются в качестве уравнений эмпирической модели рассматриваемого сложного объекта. Кроме того, они позволяют на основе факторного анализа методом цепной подстановки [17,18] установить характер автономного влияния различных факторов экономической среды $F_{k_2} \in F$ на эффективность текущего состояния строительного производства. Для реализации метода цепной подстановки в уравнениях $Э_{k_1} = a_1^{k_1}F_1 + a_2^{k_1}F_2 + \cdots + a_5^{k_1}F_5$ поочередно за исключением исследуемого, фиксируются значения всех факторов экономической среды $F_{k_2} \in F$ строительного производства. Например, пусть на первом шаге проводимого исследования устанавливается влияние фактора экономической среды F_1 на показатель эффективности $Э_1$. В этом случае, для всех остальных факторов влияния $F_{k_2} \in F$ определяются наиболее вероятные их фиксированные значения, например, $f_2^*, f_3^*, \ldots, f_n^*$, которые подставляются в уравнение $Э_1 = a_1^1F_1 + a_2^1F_2 + \cdots + a_5^1F_5$. После этого, меняя значения f_1^* фактора F_1 в заданных пределах, определяется влияние его количественного значения на величину показателя эффективности $Э_1$. Затем в качестве следующего исследуемого рассматривается фактор F_1, а значения всех остальных факторов $F_{k_2} \in F$ фиксируются, и устанавливается его влияние на показатель эффективности $Э_1$ и т.д., пока не будет исследовано влияние всех факторов экономической среды СО на показатели эффективности строительного производства $Э_{k_1} \in Э$.

В свою очередь, это позволяет для различных показателей эффективности $Э_{k_1} \in Э$ определить наиболее чувствительные с точки зрения их регулирования параметры влияния внешней и внутренней экономической среды СО и реализовать на этой основе авторскую методику оптимального управления строительным производством.

Обсуждение результатов. Рассмотрим методику выбора в подсистеме принятий решений на основе эмпирической математической модели управляющих воздействий $U_z \in U$, обеспечивающих наиболее эффективную реализацию строительного производства в изменяющихся условиях экономической среды СО.

После построения эмпирической зависимости, например, $Э_1 = a_1^1F_1 + +a_2^1F_2 + \cdots + a_5^1F_5$ для показателя эффективности строительного производства $Э_1$ интегральный критерий $Э^*$ выбора на альтернативной основе наиболее эффективных организационно-управленческих мероприятий в текущей ситуации экономической среды СО будет иметь следующий вид:

$$Э^* = (Э_1 = a_1^1F_1 + +a_2^1F_2 + \cdots + a_z^1F_z + \cdots + a_5^1F_5 \Rightarrow max),$$

при наличии ограничения в виде равенства:

$$Э_2 = a_1^2F_1^2 + a_2^2F_2^2 + a_3^2F_4^2 = C_2 \mp \varepsilon,$$

где F_z – затраты, связанные с отработкой альтернативных организационно-управленческих мероприятий U_z; C_2 – требуемая себестоимость выполнения подрядных работ с допустимым отклонением ε.

Пусть, в экономической среде строительной организации сложилась проблемная ситуация, характеризующаяся очень низкой производительностью труда из-за частых простоев связанных с выходом из строя изношенной строительной техники. В этом случае, на основе возникшей проблемной ситуации, в организационной системе управления производственной деятельностью СО целесообразно сформировать следующие альтернативные организационно-управленческие мероприятия.

1. U_1 – проводить периодический текущий ремонт вышедшей из строя строительной техники с общими затратами в течение отчетного периода, равными: $G_2 == \sum_h^d m_h^* W_h$, где m_h^*, W_h – соответственно среднее количество выходов из строя строительной техники вида h в течение отчетного периода и средняя стоимость одного ремонта этой техники; d – количество видов имеющейся у СО строительной техники.

2. U_2 – выполнить капитальный ремонт наиболее часто выходящей из строя строительной техники, который требует следующих затрат: $G_2 = \sum_{h_1=1}^{d_1} m_{h_1}^* W_{h_1}$, где $m_{h_1}^*$ – количество выходов из строя в течение отчетного периода строительной техники h_1 вида; W_{h_1} – средняя стоимость капитального ремонта строительной техники h_1 вида;

3. U_3 – провести замену часто выходящей из строя строительной техники из-за ее высокого износа новой техникой, закупка которой приводит к затратам, равным: $G_3 = \sum_{h_2=1}^{d_2} m_{h_2}^* W_{h_2}$. Здесь $m_{h_2}^*$ – количество строительной техники h_2 вида, требующей срочной замены; W_{h_2}– рыночная стоимость одной единицы строительной техники h_2 вида.

Определение наиболее эффективного управленческого воздействия в полученном множестве альтернатив в сложившейся проблемной ситуации на объекте управления (строительном производстве) осуществляется в системе принятия решений по максимуму принятого выше критерия выбора. Для этого в данный критерий подставляются значения параметров состояния, которые можно получить в результате отработки различных управляющих мероприятий и оценки стоимости их реализации.

Например, отработка управления U_1 позволяет обеспечить минимальный рост производительности труда и минимальные затраты, а отработка управления U_3 – максимальный рост производительности труда при максимальных затратах. Следовательно, эффективным образом поставленную выше задачу целесообразно сформулировать и решить в виде двухкритериальной задачи, в которой один из критериев «рост производительности труда» максимизируется, а второй критерий «затраты, связанные с ростом производительности труда» – минимизируется. В этом случае применение метода многокритериальной оптимизации по Парето позволяет найти наиболее эффективное компромиссное решение данной задачи [19,20].

Таким образом, приведенный пример, показывает эффективность применения предложенных инструментальных средств позволяющих подсистеме принятия решений определять на альтернативной основе наиболее эффективные управленческие воздействия в различных проблемных ситуациях ОС в условиях неопределенности.

Вывод. Резюмируя вышезложенное, можно сделать следующие основные выводы.

1. Применение таких фундаментальных средств нечетких множеств как лингвистические переменные и функции позволяет эффективным образом обрабатывать данные, полученные экспертным путем, и на этой основе строить эмпирические математические модели сложных систем и процессов в условиях с недоброкачественной неопределенностью.

2. Построение эмпирических выражений показателей эффективности исследуемых систем позволяет организовать на их основе оптимальное принятие управленческих и хозяйственных решений и таким образом обеспечить эффективное функционирование сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды.

3. Дальнейшее развитие предложенного в работе принципа управления поведением сложных систем в условиях неопределенности может быть связано с разработкой метода оптимального управления поведением различных социально-экономических и технических систем функционирующих в спонтанно изменяющихся условиях окружающей среды на основе постановки решении задач многокритериальной оптимизации и выработки оптимальных цепочек проводимых организационно-управленческих мероприятий .

Библиографический список:

1. Лапидус А.А., Макаров А.Н. Теория нечетких множеств на этапах моделирования организации строительных процессов возведения многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 66-71.
2. Лапидус А.А., Макаров А.Н. Нечеткая модель организации строительного процесса // Известия вузов. Инвестиции. Строительство Недвижимость. 2017. Том 7. № 1. С. 59-68.
3. Daniel W. Helpin, Ronald W. Woodhead. Construction Management. New York: Willey, 2016. 483 p.
4. Олейник П.П. Организация строительного производства. М.: АСВ, 2010. 575 с.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: МИР, 1976. 168 с.
6. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Управление целенаправленной деятельностью автономных летающих роботов в нестабильном окружении. СПб.: Политехника, 2023. 248 с.
7. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.
8. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энергоатомиздат, 1994. 240 с.
9. Берштейн Л.С., Казупаев В.М., Коровин С.Я., Мелихов А.Н. Параллельный процессор нечеткого вывода для ситуационных экспертных систем // Известия РАН СССР. Техническая кибернетика. 1990. № 5. С. 181-190.
10. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Управление технологическим процессом с нечеткой логикой обработки знаний // Проблемы управления. 2019. №1. С. 73-81.
11. Выгодчикова И. Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию //Прикладная информатика. 2015. Том 10. № 4(58). С. 105-115.
12. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 448 с.
13. Син Такахаси. Занимательная статистика. Регрессионный анализ. М.: ДМК Пресс, 2023. 224 с.
14. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980. 454 с.
15. Шилин А.И. Линейная алгебра с приложениями: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 248 с.
16. Беллман, Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1976. 351 с.
17. Табекин А.В., Табекин П.А., Табекина А.А. Методы принятия управленческих решений на основе детерминированного факторного анализа//Журнал исследований по управлению. 2017. Том 3. № 5. С. 8-25.
18. Соколов Г.А., Сагитов Р.В. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике: учеб. пособие для вузов. М.: ИНФРА-М, 2017. 201 с.
19. Зак Ю.А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации. М.: Экономика, 2014. 455 с.
20. Бородин А.И., Выгодчикова И.Ю., Горский М.А. Методы оптимизации в экономике и финансах. М.: Юрайт, 2022. 157 с.

References:

1. Lapidus A.A., Makarov A.N. Fuzzy set theory at the stages of modeling the organization of construction processes for the construction of multi-story buildings. *Industrial and civil engineering*. 2016;6:66-71.(In Russ.)

2. Lapidus A.A., Makarov A.N. Fuzzy model of the organization of the construction process. *News of universities. Investments. Construction Real Estate*. 2017; 7(1):59-68. (In Russ.)
3. Daniel W. Helpin, Ronald W. Woodhead. Construction Management. New York: Willey, 2016. 483 p.
4. Oleynik P.P. Organization of construction production. Moscow: ASV, 2010. 575 p.(In Russ.)
5. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions: trans. from English. Moscow: MIR, 1976. 168 p. .(In Russ.)
6. Melekhin VB, Khachumov MV Control of goal-oriented activity of autonomous flying robots in an unstable environment. St. Petersburg: Politekhnika, 2023. 248 p. (In Russ.)
7. Melekhin VB, Khachumov MV Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty. St. Petersburg: Politekhnika, 2022. 276 p.(In Russ.)
8. Bershtein LS, Melekhin VB Planning the behavior of an intelligent robot. Moscow: Energoatom-publishing house, 1994. 240 p. (In Russ.)
9. Bershtein L.S., Kazupaev V.M., Korovin S.Ya., Melikhov A.N. Parallel processor of fuzzy inference for situational expert systems. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics.* 1990;5:181-190.(In Russ.)
10. Melehin V.B., Khachumov V.M. Control of the technological process with fuzzy logic of knowledge processing. *Problems of Management*. 2019;1:73-81. (In Russ.)
11. Vygodchikova I.Yu. Algorithm for estimating the parameters of a linear multiple regression model using the minimax criterion. *Applied Informatics*. 2015; 10(4(58):105-115. .(In Russ.)
12. Meshcheryakov V. V. Problems in Statistics and Regression Analysis with MATLAB. Moscow: Dialog-MIFI, 2009. 448.(In Russ.)
13. Shin Takahashi. Entertaining Statistics. Regression Analysis. Moscow: DMK Press, 2023. 224 p.(In Russ.)
14. Streng G. Linear Algebra and Its Applications. Moscow: Mir, 1980. 454 p.
15. Shilin A.I. Linear Algebra with Applications:A Textbook for Universities. St.Petersburg: Lan, 2021.248 p.(In Russ.)
16. Bellman, R. Introduction to Matrix Theory. Moscow: Nauka, 1976. 351 p. (In Russ.)
17. Tabekina A. V., Tabekina P. A., Tabekina A. A. Methods of making management decisions based on deterministic factor analysis. *Journal of Management Studies*. 2017; 3(5): 8-25..(In Russ.)
18. Sokolov G.A., Sagitov R.V. Introduction to regression analysis and planning of regression experiments in economics: a textbook for universities. Moscow: INFRA-M, 2017. 201 p. (In Russ.)
19. Zak Yu.A. Applied problems of multicriteria optimization. Moscow: Economica, 2014. 455 p.(In Russ.)
20. Borodin A.I., Vygodchikova I.Yu., Gorsky M.A. Optimization methods in economics and finance. Moscow: Yurait, 2022. 157 p.(In Russ.)

Сведения об авторах:
Назим Лиодинович Баламирзоев, кандидат экономических наук, доцент, ректор, dstu@dstu.ru
Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор.
Information about authors:
Nazim L. Balamirzoev, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Rector, dstu@dstu.ru.
Vladimir B.Melekhin , Dr. Sci. (Eng.), Professor.

Конфликт интересов/Conflict of interest.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 29.03.2025.
Одобрена после рецензирования/ Reviced 06.05.2025.
Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2025.