

МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Султанов Муроджон Бахтиярович

доцент кафедры Искусственного интеллекта Ташкентского государственного экономического университета

Аннотация

В статье осуществлен системный анализ принятия решений в интеллектуальных системах управления. На основании методов системного подхода выявлены проблемы и недостатки процессов принятия решений в интеллектуальных системах управления. В данной работе изложена одна из главных проблем интеллектуальных технологий управления которая является воссоздание с помощью компьютера разумных рассуждений и поведения, создание устройств, имитирующих принятие человеком управленческих решений в условиях неопределенности и высокого риска и проведен вычислительный эксперимент решения задач нечеткой модели принятия решений в интеллектуальных системах управления. Результаты проведенных вычислительных экспериментов решения задач показали повышения качество, оперативность и достоверность принимаемых решений в интеллектуальных системах управления.

Abstract

The article provides a systematic analysis of decision-making in intelligent control systems. Based on the methods of the systematic approach, the problems and disadvantages of decision-making processes in intelligent control systems are identified. This paper describes one of the main problems of intelligent management technologies, which is the computer-assisted recreation of reasonable reasoning and behavior, the creation of devices that simulate human decision-making in conditions of uncertainty and high risk, and a computational experiment for solving problems of a fuzzy decision-making model in intelligent control systems. The results of the conducted computational experiments for solving problems have shown improvements in the quality, efficiency and reliability of decisions made in intelligent control systems.

Ключевые слова

Системный анализ, модель, задача, интеллектуальная система, принятия решений.

Keywords

System analysis, model, task, intelligent systems, decision-making.

Введение

В настоящее время в мире можно повседневно наблюдать интенсивное проникновение методов и алгоритмов искусственного интеллекта во все сферы человеческой деятельности для решения сложных задач управления и поддержки принятия решений. Во-первых, интерес к классу интеллектуальных систем управления и принятия решений обусловлен целым рядом причин, сводящихся к тому, что традиционные информационные технологии не могут обеспечить требуемого качества управления, поскольку не учитывают всех неопределенностей, воздействующих на объект. Во-вторых, потенциал теории автоматического управления может быть существенным образом расширен на основе применения современных методов информационных технологий и технологий обработки данных и знаний. Дальнейшее развитие интеллектуальных технологий управления как на исполнительном уровне, так и на стадии организации целесообразных действий и поведения позволяет реализовать совершенные технические системы, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками и расширенными функциональными возможностями [1, 2].

Одной из главных проблем интеллектуальных технологий управления является воссоздание с помощью компьютера разумных рассуждений и поведения, создание устройств, имитирующих принятие человеком управленческих решений в условиях неопределенности и высокого риска. К сфере искусственного интеллекта, как правило, относят те области деятельности, которые не опираются на точные аналитические модели, методы и алгоритмы решения проблем, характеризующихся высокой степенью неопределенности. Направление интеллектуальных технологий управления опирается на следующие основные научные парадигмы: нечеткие системы, искусственные иммунные системы, искусственные нейронные сети, эволюционные вычисления и роевой интеллект. Вкупе с логикой и дедуктивным выводом, машинным обучением, экспертными системами эти методы и алгоритмы формируют научное направление искусственного интеллекта. Интеллект в широком смысле определяют, как способность мыслить, понимать, извлекать пользу из опыта, включая творчество, искусство, сознание, эмоции и интуицию [3, 4].

Анализ

Большой класс сложных систем и процессов, к которым относятся и современные интеллектуальные системы управления, характеризуется интегрированностью, многоуровневостью, распределенностью и многообразием показателей эффективности. Проектирование таких систем,

оценка качества их структурно функциональных характеристик и управление происходящими в них процессами в реальных условиях происходит в условиях информационных, процедурно-функциональных, параметрических и критериальных неопределенностей различного типа. К ним, в частности, относится нечеткая (расплывчатая) неопределенность, характеризующейся неполнотой, неточностью и лингвистической расплывчатостью (нечеткостью), присутствующей в исходной информации, критериях и оценках заказчиков и разработчиков, а также в используемых моделях и процедурах описания и оценки альтернатив анализируемых вариантов объектов и их состояний. Необходимость учета в процессе выбора наилучших вариантов нескольких критериев, в том числе и предпочтений лиц, принимающих решения (ЛПР) в интеллектуальных системах управления, также характеризует одно из условий неопределенности.

Это обуславливает целесообразность разработки и использования моделей и методов описания и оценки вариантов (альтернатив) анализируемых объектов, а также принятия решений (ПР) по выбору наилучшего варианта в условиях нечеткой неопределенности, которые представляют собой специальный класс задач ПР, получивших название неструктурированных или слабоструктурированных. Альтернативы принимаемых решений в таких задачах оцениваются на основе анализа мягких оценок показателей эффективности результатов реализации решений (исходов) и значений рисков потерь, соответствующих тем или иным исходам решений.

Теоретико-методологическим аппаратом решения таких задач интеллектуальных систем управления являются средства интеллектуальной информационной технологии «Soft Computing» - «Мягких вычислений» [5, 6].

Ниже рассмотрим нечетко-множественные подходы к построению моделей описания и оценки альтернатив, а также задач принятия слабоструктурированных решений (ПССР) в условиях нечеткой неопределенности.

Введем определения основных понятий, используемых в рассматриваемой задаче интеллектуальных систем управления.

Альтернатива - один из вариантов множества возможных принимаемых решений. Исход - возможный результат реализации альтернативы, т.е. последствие (состояние объекта! наступающее от реализации принятого решения. Критерий и показатель эффективности - тип и характеристики меры, в соответствии с которой оценивается эффективность исходов и соответствующих им альтернатив. Предпочтения ЛПР - субъективные критерии, основанные на опыте и личной оценке ЛПР как внутренней, так и внешней текущей ситуации среды, в которой функционируют анализируемые объекты (системы и процессы различной природы). Проблемная ситуация - совокупность альтернатив, их исходов, т.е. состояний анализируемых объектов, а также соответствующих им типов и значений оценок показателей эффективности. Среда - совокупность типов неопределенностей, в условиях которых осуществляется оценка анализируемой проблемной ситуации и принятие решений. В данной задаче рассматривается нечеткая среда.

Задача принятия решений содержательно формулируется следующим образом. Имеется множество вариантов решений (альтернатив), реализация которых приводит к наступлению некоторых исходов: одному - в условиях определенности, и нескольким возможным - в условиях неопределенности. Исход может характеризоваться, например, значением состояния, в которое перейдет объект в результате реализации данной альтернативы. Имеются далее показатели и критерии эффективности, а также, что важно, субъективные предпочтения ЛПР. Оценка исходов по выбранным критериям эффективности определяет степень предпочтительности соответствующих этим исходам альтернатив. Требуется построить стратегию выбора альтернативы, наилучшей в соответствии с критериями эффективности исходов и предпочтениями ЛПР [6, 7].

Методология

Формальная постановка задачи ПР в условиях определенности:

Заданы множества: $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ - альтернатив (решений, действий), $Y = \{y_1, \dots, y_i, \dots, y_m\}$ - исходов альтернатив и $W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}$ - показателей их эффективности. Здесь имеют место отображения $f: X \rightarrow Y$, $u: Y \rightarrow W$ и вытекающее из них отображение $w: Y \rightarrow W = f, u$, являющейся суперпозицией f и u .

В реальных условиях альтернативы и их исходы оцениваются несколькими показателями (критериями) эффективности $u_k: Y \rightarrow W, k = 1, \dots, l$. Частные критерии u_k обычно бывают противоречивыми и зачастую несравнимыми.

Требуется при таких исходных условиях выбрать из множества допустимых наилучший вариант альтернативы x_{i_0} обеспечивающий наиболее приемлемое, в некотором смысле, значение показателя эффективности w_i соответствующих им исходов y_i , т.е.

$$x_{i_0} = \arg \text{extr } w_i, x_i \in X, y_i \in Y,$$

где *extr* - интерпретируется как «наилучший».

Выбор $x_i \in X$ в условиях неопределенности в целях, критериях, моделях ситуации, методах решения является задачей принятия неструктурированных или слабоструктурированных решений.

Для описания и оценки вариантов проблемных ситуаций анализируемых объектов, порождаемых в результате реализации соответствующих альтернатив в условиях неопределенности (нечеткой среды), и выбора их наиболее приемлемой по выбранным критериям эффективности задачу ПССР приведенного типа целесообразно представить многокритериальной моделью ПР в виде следующего набора

$$\langle T, D, W, \Theta(X), O, P, R \rangle \quad (1)$$

где T - тип задачи ПР, определяемый целевой функцией и ограничениями;

$D = \{d_1, \dots, d_i, \dots, d_m\}$ - множество альтернатив решений; $W = W(q(d), c(d), t(d)) = \{w_{ji}\}$ - вектор оценок эффективности исходов альтернатив D по различным показателям, например, по полезному эффекту $q(d)$, затратам энергии $c(d)$ и времени $t(d)$; $\Theta(X)$ - множество состояний (исходов), описываемых параметрами X исследуемого объекта; O -

распределение вероятностей наступления исходов; P - система предпочтений ЛПР; R - правила формирования альтернатив.

В условиях нечеткой среды каждой альтернативе могут соответствовать несколько исходов, имеющих нечеткие оценки. Рассматривается проблемная ситуация с одинаковым числом возможных исходов для всех альтернатив. Обобщенный показатель эффективности $w_{ji} \in W$ исходов альтернатив D обычно представляет собой, как было отмечено, вектор нескольких частных показателей. Конкретные значения оценок эффективности альтернатив определяются как значениями самих альтернатив, так и текущими значениями проблемной ситуации. Поэтому значения количественных оценок $w_{ji} \in W$ исходов $\theta_j \in \Theta$ альтернатив $d_i \in D$ представляется матрицей $W = \|\|w_{ji} = w(\theta_j, d_i)\|\|$ в виде

$$\begin{array}{cccccc} & d_1 & \dots & d_i & \dots & d_m \\ \theta_1 & w_{11} & \dots & w_{1i} & \dots & w_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_j & w_{j1} & \dots & w_{ji} & \dots & w_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_n & w_{n1} & \dots & w_{ni} & \dots & w_{nm} \end{array} \quad (2)$$

Эта матрица характеризует в развернутой форме ситуацию ПССР.

В этом случае проблемная ситуация в модели (1) представляется набором

$$\{D, W, A_\Theta\}, \quad (3)$$

где $D = \{d_1, \dots, d_i, \dots, d_m\}$ множество решений (альтернатив); $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ множество значений возможных состояний (исходов), в одно из которых может перейти проблемная ситуация при реализации альтернативы $d_i \in D$; $W = \{w_{ji}\}$ - матрица оценочного функционала, определенная на $\Theta \times D$, элементы которой $w_{ji} = w(\theta_j, d_i)$ принимают значения из R^i ; A_Θ - нечеткое множество оценок $A = \{w_{ji}\}$ на элементах которое определяется заданием отображения $\mu_{ji} = \mu_{A_\Theta}(w_{ji})$ значений элементов w_{ji} в интервале $[0,1]$, т.е. A_Θ отражает совокупность нечетких оценок показателей эффективности (ОПЭ) состояний $\theta_j \in \Theta$; проблемной ситуации, наступивших в результате реализации d_i .

Нечеткие оценки показателей эффективности задаются обычно нечеткими числами, например, такими как: «около n », «приблизительно n », «чуть больше n », «немного меньше n » и т.д. В ряде случаев могут использоваться сложные нечеткие оценки, состоящие из нескольких простых, связанных логическими связками И, ИЛИ, НЕ. Нечеткие числа отображают качественные оценки типа «низкая», «высокая», «средняя» и др. Могут быть и промежуточные оценки между указанными. Число таких оценок определяется типом используемой шкалы оценок: двухуровневой, трехуровневой, пятиуровневой и др., определяемой, в свою очередь, числом выбранных альтернатив, спецификой предметной области, типами критериев и показателей эффективности.

Совокупность значений таких оценок - нечетких чисел образует термножество $A = \{A_i\}, i = 1, 2, \dots, m$ лингвистической переменной (ЛП)

«ОПЭ». Здесь m - число уровней используемой шкалы, которое обычно выбирается равным числу альтернатив. Каждый из этих термов представляется нечетким множеством (НМ)

$$A_i = \mu_{A_i}(x_k)/x_k,$$

где $x_k \in X, k = 1, 2, \dots, K'$ - элементы базового множества X , отображающие возможные численные значения нечеткой оценки (терма $A_i \subset A$) показателя эффективности (ПЭ) $w_{ji} \in W$; $\mu_{A_i}(x_k)$ - функция принадлежности (ФП) элемента $x_k \in X$ НМ - терму $A_i \subset A$.

При заданной ситуации $\{D, W, A_\Theta\}$ (проблема принятия многоцелевых решений в нечеткой среде сводится к выбору ЛПР одного решения, наилучшего и наиболее приемлемого по выбранному им критерию.

С учетом вышеприведенных определений элементов моделей (1) - (3) постановку задачи ПССР в общем виде можно сформулировать следующим образом.

Заданы: множества $D = \{d_i\}$ - альтернатив, $\Theta = \{\theta_j\}$ - состояний среды (исходов) и $W(\Theta, D) = \{w_{ji} = w(\theta_j, d_i)\}, j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}$, - показателей их эффективности; нечеткое множество A_Θ оценок $w_{ji} = w(\theta_j, d_i)$; O - распределение вероятностей наступления возможных исходов $\Theta = \{\theta_j\}$ для каждой альтернативы; P - система предпочтений ЛПР; R - правила формирования альтернатив.

Требуется: выбрать наилучший вариант

$$d_{i_0} = \arg \text{extr} (w_{ji} = w(\theta_j, d_i)), d_i \in D, \theta_j \in \Theta$$

Здесь под значением *extr* понимается наилучшее значение, в наибольшей степени удовлетворяющее как выбранным критериям, так и предпочтениям ЛПР. При этом оценочный функционал W будет иметь положительный ингредиент, если ЛПР выбирает наилучшую альтернативу, исходя из условия $\max\{w(\theta_j, d_i)\}, d_i \in D, \theta_j \in \Theta$. В противном случае - отрицательный ингредиент. Положительный ингредиент для оценочного функционала используется для выражения категорий полезности, выигрыша, эффективности, вероятностей достижения целевых событий и т.д. Отрицательный ингредиент - для выражения потерь, проигрыша, сожалений, ущерба, риска и т.д.

Оценки вектора показателей эффективности принимаемых решений и состояний среды могут иметь как количественные, так и качественные (нечеткие) значения. Конкретный вид элементов целевой функции, а также учет всех или отдельных факторов нахождения наилучшего значения $w_{ji} = w(\theta_j, d_i) \in W(\Theta, D)$ определяют выбор соответствующих методов решения, что приводит к большому многообразию задач ПССР в нечеткой среде, т.е. в условиях нечеткой неопределенности в целях, критериях, моделях ситуации и методах решения.

При этом следует учитывать наличие следующих допущений в исходных условиях проблемной ситуации в изложенной постановке задачи ПССР в нечеткой среде.

1. Множество альтернатив (решений), которые возможно будет реализовать с целью перевода объекта (процесса) из текущей ситуации (состояния) $\theta_j \in \Theta$, $j = \overline{1, n}$, требуемую, из заданного множества ситуаций, задается конечным и фиксированным в виде $D = \{d_i\} i = \overline{1, m}$.

2. Множество возможных состояний (ситуаций), в одно из которых может перейти объект (процесс) в результате реализации любой альтернативы $d_i \in D$, $i = \overline{1, m}$ т.е. множество возможных исходов альтернатив, также задается конечным и фиксированным в виде $\Theta = \{\theta_j\}, j = \overline{1, n}$.

3. Множество возможных значений аксиологических вероятностей наступления исходов $\theta_j \in \Theta$, $j = \overline{1, n}$ формируется заранее на основе экспертных заключений для рассматриваемой предметной области и задается матрицей вида $\bar{P} = \|\bar{p}_{ji}\|, j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}$.

4. Множество значений оценок ПЭ $w_{ji} = w(\theta_j, d_i)$ анализируемых исходов соответствующих альтернатив формируется также заранее на основе соответствующих расчетов (по моделям и выражениям, описывающим зависимости между количественными и/или качественными параметрами состояний (ситуаций) и выбранными, определенными по соглашению исходя из соответствующих целей и предпочтений) критериями эффективности. В случае отсутствия и/или невозможности, в силу каких-то причин, построения таких моделей и выражений искомое множество оценок ПЭ формируется на основе экспертных заключений в виде лингвистических переменных с соответствующим терм-множеством, отображающим совокупность возможных нечетких оценок ПЭ.

Решение сформулированной задачи (4) с использованием моделей (1) - (3) осуществляется в несколько этапов. На первом этапе формируется постановка задачи: цели, критерии, ограничения и предпочтения ЛПР. На втором этапе определяются правила, на основе которых формируется множество возможных для рассматриваемой ситуации вариантов альтернатив решений и соответствующих им исходов. На третьем этапе осуществляется оценка исходов альтернатив по каждому из выбранных критериев. На четвертом этапе строится (или выбирается) решающее правило – стратегия определения и выбора наилучшей альтернативы в соответствии с критериями и предпочтениями ЛПР. На основе этой стратегии формируется упорядоченное множество допустимых альтернатив - предпочтительных из возможных для текущей ситуации. Анализ допустимых альтернатив определяет, получено ли требуемое упорядочение альтернатив. Если не получено, то возвращаются к предыдущим этапам для осуществления соответствующих уточнений и корректировок параметров построенных моделей и правил исходной задачи. Если требуемое упорядочение получено, то из него ЛПР выбирает наилучшее решение с учетом своих личных предпочтений.

Во многих задачах ПР в нечеткой среде результат выбора той или иной альтернативы в качестве решения оценивается нечетким числом. Для m альтернатив формируется m базовых нечетких чисел- оценок. При наличии n возможных исходов каждой альтернативы образуется $m \cdot n$ нечетких чисел-

оценок. При этом количество их значений будет равно количеству базовых чисел-оценок (m). Для решения таких задач предлагаются модифицированные - нечеткие аналоги известных критериев, например, байесовского и дисперсии.

Если задан вектор $P = (p_1, \dots, p_n)$ распределения вероятностей на множестве $\Theta = \{\theta_j\}$, то для формирования оценочного функционала $W(\Theta, D) = \{w_{ji} = w(\theta_j, d_i)\}$ а выбора наилучшего их них в условиях стохастической среды используют классический критерий Байеса, имеющий вид

$$B = \text{extr}_{d_i \in D} \left[\sum_{j=1}^n p_j w_{ji} \right] \quad (5)$$

В зависимости от значения ингредиента используемого функционала W (положительного или отрицательного) ищется максимум или минимум критерия (5).

В условиях нечеткой среды задаются вектор $\bar{P} = (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_n)$ распределения аксиологических вероятностей и вектор $M = (\mu_1, \dots, \mu_m)$ функций принадлежности значений оценок ПЭ нечетким числам- оценкам (термам $A_i \subset A$) на множестве $\Theta \times D$. В этом случае оценочный функционал преобразуется к виду $w_{ji} = w(\theta_j, d_i)$. Тогда стратегия статического принятия решений осуществляется в соответствии с нечеткими аналогами соответствующих классических критериев: Байеса, дисперсии, Вальда, Гурвица и др.

Предлагаемый нечеткий аналог критерия Байеса описывается, для положительного ингредиента оценочного функционала, выражениями

$$B(\bar{p}, \mu, d_{i_0}) = \max_{d_i \in D} (\bar{p}, \mu, d_i) \quad (6)$$

где

$$B(\bar{p}, \mu, d_i) = \sum_{j=1}^n \bar{p}_j \sum_{s=1}^k \mu_{ji}^S w_{ji}^S / \sum_{j=1}^n \bar{p}_j \mu_j,$$

$$\mu_j = \sum_{s=1}^k \mu_{ji}^S.$$

Здесь: $w_{ji}^S = w^S(\theta_j, d_i)$ - дискретные значения элементов w_{ji} матрицы $W(\Theta, D) = \{w_{ji} = w(\theta_j, d_i)\}$ оценочного функционала, входящие в множество соответствующих нечетких чисел-оценок и принимающих значения из R^1 с соответствующими ФП $\mu_{ji}^S = \mu_{A_i}(w_{ji}^S), S = \overline{1, k}$ - область задания дискретных значений, составляющих базовое множество нечетких чисел-оценок w_{ji}^S - соответствующих нечетких термов-множеств ЛП «ОПЭ». Последняя может характеризоваться, например, качественными оценками - нечеткими термами «высокий», «средний», «низкий», которые, в свою очередь, могут отображаться соответствующими нечеткими числами: «приблизительно 1», «приблизительно 3», «приблизительно 5».

Нечеткий аналог критерия типа дисперсии значений оценочного функционала W представляется в виде

$$\sigma^2(\bar{p}, \mu, d_{i_0}) = \min_{d_k \in D} \sigma^2(\bar{p}, \mu, d_i),$$

где

$$B\sigma^2(\bar{p}, \mu, d_{i_0}) = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{s=1}^k \bar{p}_j \mu_{ji}^s w_{ji}^s / \sum_{j=1}^n \bar{p}_j \mu_j - B(\bar{p}, \mu, d_i) \right]^2 \bar{p}_j$$

Здесь μ_j и $B(\bar{p}, \mu, d_i)$ определяются в соответствии с выражениями (6).

В более общем виде нечеткая среда характеризуется также и нечеткой (качественной) оценкой состояний $\theta_j \in \Theta$. В этом случае при вычислении соответствующих критериев следует учитывать выражения нечетких множеств, которыми отображаются оценки состояний.

В настоящее время в основном рассматриваются статические модели, результаты которых являются начальным этапом детализации оценок проблемных ситуаций и критериев принятия решений. В различных ситуационных условиях целесообразно использование динамических (многошаговых) моделей процессов принятия решений.

Рассмотрим динамический N - этапный процесс функционирования управляемого объекта. Будем предполагать, что на каждом этапе $l (1 \leq l \leq N)$ органу управления известно следующее.

1. Множество $A^l = \{a_1^l, \dots, a_m^l\}$ возможных состояний объекта, в одно из которых может переходить объект из любого состояния на предыдущем $(l - 1)$ - м этапе.

2. Множество $D^l = \{d_1^l, \dots, d_m^l\}$ решений, которые может принять орган управления, где под d_m^l понимается решение органа управления на l -м этапе о переводе объекта в состояние d_m^l причем на l - м этапе орган управления может принять только одно решение из множества D^l .

3. Множество $\theta^l = \{\theta_1^l, \dots, \theta_m^l\}$ характеристик возможных состояний среды на l -м этапе.

4. Априорное распределение $p^l = \{p_1^l, \dots, p_m^l\}$ состояний среды на множестве Θ^l . т.е. $p_j^l = P\{\theta^l = \theta_j^l\}$.

5. Матрица $W(a_v^{i-1}) = \{f_{j,k}^i(a_v^{i-1})\}_{j,k=1}^{n,m}$ (здесь

$$f_{j,k}^i(a_v^{i-1}) = \sum_{s=1}^k \mu_{jk}^s w_{jk}^s(a_v^{i-1}) / \sum_{j=1}^n \mu_j, \mu_j \sum_{s=1}^k \mu_{jk}^s$$

значений оценочного функционала W для всех возможных состояний $a_v^{i-1} \in A^{i-1}$.

6. Условное распределение вероятностей $g_r^i(a_v^{i-1}, d_k^i) = P\{a_v^{i-1} \rightarrow a_r^i | d^i = d_k^i\}$ перехода объекта в состояние $a_v^{i-1} \in A^i$ из состояния $a_v^{i-1} \in A^{i-1}$, если принято решение $d_k^i \in D^i$.

Результаты

Для органа управления цель динамического процесса принятия решений состоит в переводе управляемого объекта из данного начального состояния a^0 в

заданное множество конечных состояний $\{a^0\}$ посредством выбора органом управления последовательности оптимальных решений в соответствии с принятыми критериями.

Согласно критерию типа Байеса, оптимальная стратегия динамического процесса принятия решений $\{d_{k_l}^l(a_r^{l-1})\}_{r=1}^{m_{l-1}}$ могут быть последовательно найдены для $l = N, N - 1, \dots, 2, 1$ из условий

$$f_1(d_{k_l}^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1}) = \min_{d_k^l \in D^l} f_1(d_k^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1}),$$

при этом значения удовлетворяют следующим $f_1(d_k^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1})$ рекуррентным уравнениям:

$$\begin{aligned} f_N(d_{k_N}^N(a_r^{N-1}), a_r^{N-1}) &= \min_{d_k^N \in P^i} B^N(d_k^N, a_r^{N-1}), \\ f_1(d_{k_l}^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1}) &= \min_{d_k^l \in D^l} [B^l(d_k^l, a_r^{l-1}) + \\ &\sum_{r_1=1}^{m_1} f_{l+1}(d_{k_{l+1}}^{l+1}(a_{r_1}^l), a_{r_1}^l) g_{r_1}^l(a_r^{l-1}, d_k^l)]. \end{aligned}$$

Здесь:

$$\begin{aligned} B^l(d_k^l, a_r^{l-1}) &= \sum_{j=1}^{n_l} p_j^l f_{jk}^l(a_r^{l-1}), \\ f_{jk}^l(a_r^{l-1}) &= \sum_{S=1}^k \mu_{jk}^S w_{jk}^S(a_r^{l-1}) / \sum_{j=1}^n \mu_j, \\ \mu_j &= \sum_{S=1}^k \mu_{ji}^S. \end{aligned}$$

Для критерия типа Вальда рекуррентные уравнения для нахождения оптимальных стратегий динамического процесса принятия решений имеют вид:

$$\begin{aligned} f_N^0(d_{k_N}^N(a_r^{N-1}), a_r^{N-1}) &= \min_{d_k^N \in P^i} \max_{j=1, \dots, n_N} f_{jk}^N(a_r^{N-1}), \\ f_l^0(d_{k_l}^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1}) &= \min_{d_k^l \in D^l} [\max_{j=1, \dots, \eta_l} f_{jk}^l(a_r^{l-1}) + \\ &+ \sum_{\eta=1}^{m_l} f_{l+1}^0(d_{k_{l+1}}^{l+1}(a_\eta^l), a_\eta^l) g_\eta^l(a_r^{l-1}, d_k^l)], \quad l = N, N - 1, \dots, 2, 1. \end{aligned}$$

Здесь:

$$f_{jk}^l(a_r^{l-1}) = \sum_{S=1}^k \mu_{jk}^S w_{jk}^S(a_r^{l-1}) / \sum_{j=1}^n \mu_j, \quad \mu_j = \sum_{S=1}^k \mu_{ji}^S.$$

Для критерия типа Гурвица оптимальная стратегия динамического процесса принятия решений

$$D_0^l = \{d_{k_l}^l(a_r^{l-1})\}_{r=1}^{m_{l-1}}, \quad l = 1, \dots, N$$

находятся при решении рекуррентных уравнений вида

$$\begin{aligned}
& f_{N^N}^\lambda(d_{k_N^0}^N(a_r^{N-1}), a_r^{N-1}) = \min_{d_k^N \in D^N} [\lambda_N \\
& \min_{j=1, \dots, \eta_N} f_{jk}^N(a_r^{N-1}) + (1 + \lambda_N) \max_{j=1, \dots, \eta_N} f_{jk}^N(a_r^{N-1})], \\
& f_{l^l}^\lambda(d_{k_l^0}^l(a_r^{l-1}), a_r^{l-1}) = \min_{d_k^l \in D^l} [\lambda_l \\
& \min_{j=1, \dots, \eta_l} f_{jk}^l(a_r^{l-1}) + (1 + \lambda_l) \max_{j=1, \dots, \eta_l} f_{jk}^l(a_r^{l-1}) + \\
& + \sum_{r_l=1}^{m_l} f_{l+1}^{\lambda_l}(d_{k_{l+1}^0}^{l+1}(a_{r_l}^l), a_{r_l}^l) g_{r_l}^l(a_r^{l-1}, d_k^l)].
\end{aligned}$$

Здесь:

$$f_{jk}^i(a_r^{i-1}) = \sum_{S=1}^k \mu_{jk}^S w_{jk}^S(a_r^{i-1}) / \sum_{j=1}^n \mu_j, \quad \mu_j = \sum_{S=1}^k \mu_{ji}^S.$$

Выводы и предложения

Проведен вычислительный эксперимент решения задач нечеткой модели принятия решений в интеллектуальных системах управления. Результаты проведенных вычислительных экспериментов решения задач показали повышения качество, оперативность и достоверность принимаемых решений в интеллектуальных системах управления.

Перспективным направлением исследований по рассматриваемой проблематике является разработка методов решения задач принятия слабоструктурированных решений с использованием комбинации средств «Soft Computing» - технологии: нечетких множеств, нейронных сетей, генетических алгоритмов, эволюционного моделирования и программирования.

Список литературы

1. Ishankhodjayev, G., Sultanov, M., & Nurmamedov, B. Issues of development of intelligent information electric power systems. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2(2), 0251–0263. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-2-0251-0263>.
2. Ishankhodjaev G.K., Sultanov M.B, Mirzaakhmedov D.M. Azimov D.T. Optimization of information processes of multilevel intelligent systems. *CMSCDE 2021: 1st International workshop on Communication management, Soft Computing and Digital Economy*, December 15-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3508072.3508212>.
3. Ishankhodjayev G.K., Sultanov M.B., Sultanov J. Development of an algorithm for optimizing energy-saving management processes in intelligent energy systems. *International conference on information science and communications technologies (ICISCT 2021): applications, trends and opportunities*, November 3-5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISCT52966.2021.9670247>

4. Ishankhodjayev, G., Sultanov, M., Parpiyeva, R., & Norboyeva, N. (2022). Development of intelligent information decision support systems. the 6th International Conference on Future Networks & Distributed Systems has processing errors. DOI: <https://doi.org/10.1145/3584202.3584203>.
5. Ishankhodjayev, G., Sultanov, M., Parpiyeva, R., & Norboyeva, N. (2023). Creation of intelligent information decision support systems. IV International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering”. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336504031>
6. Ishankhodjayev, G., Sultanov, M., Parpiyeva, R. & Norboyeva, N.2022. Improvement of Information Support in Intelligent Information Energy Systems. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2022, LNCS 13772, pp. 1–13, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30258-9_16.
7. Ishankhodjayev G.K., Sultanov M.B. Development of Information Support for Decision-Making in Intelligent Energy Systems, International conference on information science and communications technologies (ICISCT 2022): applications, trends and opportunities, November 3-5, 2022. DOI:10.1109/ICISCT55600.2022.10146931.