УДК 519.711 doi: 10.15827/0236-235X.151.389-402 2025. Т. 38. № 3. С. 389–402

Построение локальных нечетких моделей для ситуационного управления сложными объектами на основе прецедентов

М.И. Дли [1]✉, А.М. Соколов [2], М.Ю. Воротилова [1]

[1] Смоленский филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск, 214013, Россия
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, 111250, Россия

Ссылка для цитирования
Дли М.И., Соколов А.М., Воротилова М.Ю. Построение локальных нечетких моделей для ситуационного управления сложными объектами на основе прецедентов // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 3. С. 389–402. doi: 10.15827/0236-235X.151.389-402
Информация о статье
Группа специальностей ВАК: 2.3.1
Поступила в редакцию: 07.02.2025 После доработки: 10.03.2025 Принята к публикации: 07.04.2025

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оптимального управления сложными объектами различной природы в условиях динамически изменяющихся факторов неопределенности внешней среды. Проведен анализ существующих подходов к управлению объектами данного типа с учетом особенностей создания современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Показана целесообразность применения нечетких ситуационно-прецедентных моделей, которые формируются на основе имевших место ранее прецедентов и обеспечивают высокий уровень наглядности при выборе оптимальной стратегии управления. Выявлено, что одним из ограничений использования данных моделей является сложность их адаптации при изменении условий функционирования управляемого объекта из-за большого в общем случае числа учитываемых ситуаций и переходов между ними. Предложен новый тип нечетких ситуационно-прецедентных моделей для локальных областей признакового пространства, характеризующего ситуационные аспекты управления объектом. Основным отличием данных моделей является ограничение области их построения некоторой областью вокруг текущей и целевой ситуаций. Такой подход значительно упрощает процесс адаптации структуры сети при изменении внутренних и внешних факторов. Предложены три варианта формирования области признакового пространства и, соответственно, определения степени разветвленности сетевой структуры модели на основе задания коэффициента локализации. Описан способ построения локальных нечетких моделей, предполагающий объединение близких нечетких прецедентов по достижении целевой ситуации для упрощения структуры модели и повышения степени оперативности ситуационного управления сложными объектами. Программная реализация предложенного способа выполнена на языке Python 3.12. с использованием библиотеки Numpy для нечетких вычислений и пакета NetworkX для визуализации сети. Проведен вычислительный эксперимент, который показал эффективность применения локальных нечетких ситуационно-прецедентных моделей для управления сложными объектами в условиях динамического изменения факторов неопределенности по сравнению с ситуационными моделями, имеющими фиксированную структуру.

Ключевые слова: локальная нечеткая модель, ситуационное управление, прецедентный подход, сложный объект
Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-21-00353

Введение. Управление сложными объектами различной природы, которые характеризуются возможностью пребывания в определенных состояниях и возникновения набора ситуаций при их функционировании, реализуется достаточно часто. В этом случае задачей управления является выработка и реализация решения по переводу объекта из текущего состояния в целевое. Подобные задачи характерны как для производственных процессов, так и для социально-экономических систем различного уровня (отдельное предприятие, региональный промышленный комплекс, отрасль экономической деятельности). Например, для многостадийных производств и систем энергообеспечения ситуационные аспекты управления могут быть связаны с качеством сырья, степенью износа оборудования и квалификацией персонала [1], а также с влиянием климатических факторов [2]. При рассмотрении вопросов управления предприятиями возникновение тех или иных значимых ситуаций часто вызвано факторами рыночной среды и действиями регуляторов [3], а при разрешении проблем управления региональными и отраслевыми промышленно-энергетическими комплексами – трансформацией логистических цепей [4, 5] и мероприятиями государственной поддержки [6].

Обычно для управления указанными объектами используются *интеллектуальные системы поддержки принятия решений* (ИСППР) с различными методами интеллектуального анализа данных на основе методов теории нечетких множеств, обеспечивающие представление

создаваемых моделей в виде, удобном для интерпретации результатов [7].

Среди таких моделей можно выделить нечеткие ситуационные модели, которые позволяют абстрагироваться от представления внутренней структуры сложного объекта и описать его функционирование в виде отдельных ситуаций, переход между которыми может быть осуществлен на основе реализации заданных управляющих решений. Использование элементов теории нечетких множеств и аппарата нечетких вычислений при построении этих моделей позволяет учесть особенности функционирования объекта в условиях неопределенности [8]. В то же время существующие типы моделей ориентированы на всю область признакового пространства, что в условиях большого числа возможных ситуаций приводит к необходимости использования достаточно громоздких, плохо поддающихся адаптации структур. Однако на практике формирование модели для всех возможных ситуаций и переходов между ними часто нецелесообразно. Достаточно иметь локальную модель для решения конкретной задачи в текущих условиях реализации управленческого решения.

Таким образом, подтверждается актуальность тематики исследования, связанного с разработкой локальных моделей для ситуационного управления сложными объектами, а также способа их применения для конкретного класса текущих ситуаций.

Анализ существующих нечетких сетевых методов для ситуационного управления сложными объектами

Для решения основных задач по ситуационному управлению сложными объектами среди нечетких сетевых моделей можно выделить когнитивные карты, сети Петри и ситуационные сети.

Нечеткие когнитивные карты представляют собой сетевые структуры в виде графа с вершинами, характеризующими параметры исследуемого объекта, и дугами, отражающими связи межу данными параметрами [9]. Указанный тип моделей позволяет исследовать показатели системной динамики как технических [10], так и социально-экономических объектов [11]. Однако, несмотря на наглядность, известные типы когнитивных моделей не позволяют в достаточной степени учесть влияние управляющих воздействий для перехода из одной ситуации в другую, что может привести к снижению эффективности управления [12]. При этом в [13] отмечается сложность процессов адаптации нечетких когнитивных моделей к изменению условий функционирования моделируемого объекта.

Нечеткие сети Петри используются в моделировании объектов, для которых ситуационные аспекты описываются параллельными и/или циклическими процессами. В этом случае основной целью управления является исключение ситуаций нерационального взаимодействия между элементами [14, 15]. К недостаткам моделей данного типа следует отнести возможность их применения только для достаточно узкого класса сложных объектов.

Нечеткие ситуационные сети представляют собой направленные графы, вершинами которых являются нечеткие ситуации, определяемые характеристиками самого объекта и параметрами внешней среды, а ребра задают управляющие решения, применение которых позволяют переводить объект из одной ситуации в другую. Применение данных моделей предполагает определение среди узлов сети нечеткой ситуации, наиболее близкой к текущей, и формирование оптимальной последовательности переходов до заданной целевой ситуации [16]. Известные подходы к построению нечетких ситуационных сетей предполагают использование в основном экспертной информации. Возможные различия во мнениях экспертов даже при определении трактовки термов нечетких множеств, с помощью которых описываются ситуационные признаки и элементы стратегии управления, приводят к использованию нечеткости 2-го уровня, что существенно повышает уровень субъективности (и так присущей экспертным методам) и усложняет в ряде случаев использование рассматриваемых моделей на практике. Также следует отметить, что существующие нечеткие ситуационные сети не учитывают в достаточной степени возможность возникновения различных реакций объекта при одинаковых управляющих воздействиях.

В работе [17] рассмотрены сетевые *нечеткие ситуационно-прецедентные модели* (НСПМ) для управления сложными объектами, отличающиеся возможностью использования прецедентной информации о функционировании объекта и учитывающие неоднозначность переходов между ситуациями при одинаковых управляющих решениях, что возможно вследствие наличия воздействий неучтенных факторов внешней среды.

Процессы создания и применения НСПМ предполагают формирование множества ситуационных прецедентов, каждый из которых содержит информацию о начальной нечеткой ситуации $\tilde{S}^{н}$, принятых управляющих решениях $\tilde{R}$, полученной конечной нечеткой ситуации $\tilde{S}^{к}$, а также об оценках эффективности управления в соответствии с выбранной системой критериев $\tilde{\alpha}(\tilde{S}^{н}, \tilde{R})$. Графическое представление нечеткого ситуационного прецедента представлено на рисунке 1.

Каждая нечеткая ситуация $\tilde{S}$ задается на множестве ситуационных признаков $\tilde{p}$, которое включает как характеристики самого объекта управления, так и отдельные факторы внешней среды его функционирования:

$\tilde{S}_i = \{\{\mu_h(p_m)/p_m\}, h = 1, \ldots, H\}, m = 1, \ldots, M\}$, $i = 1, \ldots, I$.

В соответствии с описанным в работе [17] способом построения глобальной НСПМ, предполагающим кластеризацию всех нечетких ситуаций с последующим объединением групп схожих ситуаций в узлы графа с построением соответствующих управляющих переходов между ними, нечеткие ситуации считаются схожими, если значение нечеткого расстояния между ними не превышает заданного порога $d_{кр}$:

$\tilde{S}_i \cong \tilde{S}_j : d(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \le d_{кр}$.

Для определения расстояния между ситуациями может использоваться, например, нечеткое псевдометрическое расстояние минковского порядка β:

$$d_M(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \frac{1}{M}\left(\sum_{m=1}^{M}\left|\mu_i(\tilde{p}_m^i) - \mu_j(\tilde{p}_m^j)\right|^{\beta}\right)^{1/\beta}.$$

Схожие ситуации могут быть объединены согласно выражению

$$\tilde{S}_{avg}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \left\{\begin{matrix}\frac{1}{2}\left(\left\{\mu_i(\tilde{p}_m^i)/\,\tilde{p}_m^i + \mu_j(\tilde{p}_m^j)/\,\tilde{p}_m^j\right\}\right), \\ m = 1, ..., M\end{matrix}\right\}.$$

Важной особенностью применения НСПМ является возможность учета перехода в различные ситуации при одинаковых управляющих решениях вследствие воздействия неучтенных факторов неопределенности, которая вычисляется как

$$Z(\tilde{R}_{ij}, T_{ij}) = \frac{Count_{\tilde{R}_{ij}, T_{ij}}}{Count_{\tilde{R}_{ij}, T_i^*}},$$

где T_{ij} – установленный факт перехода из ситуации $\tilde{S}_i$ в $\tilde{S}_j$; $Count_{\tilde{R}_{ij}, T_{ij}}$ – количество переходов из $\tilde{S}_i$ в $\tilde{S}_j$ при применении управляющего решения $\tilde{R}_{ij}$; $Count_{\tilde{R}_{ij}, T_i^*}$ – общее количество переходов из $\tilde{S}_i$ в любую ситуацию при применении управляющего решения $\tilde{R}_{ij}$.

Нечеткая интерпретация возможности перехода может быть представлена в виде термножества

$$\tilde{Z}(\tilde{R}_{ij}, T_{ij}) = \left\{\mu_{\tilde{Z}(\tilde{R}_{ij}, T_{ij})}(Z)/Z\right\}.$$

После построения глобальная НСПМ может быть использована для определения оптимальной стратегии управления на всем рассматриваемом ситуационно-признаковом пространстве в соответствии с выбранным критерием управления.

К определенным ограничениям предложенного типа моделей можно отнести необходимость построения по всему множеству известных прецедентов, в то время как часто достаточно иметь ограниченную (локальную) модель для конкретной управленческой стратегии, которая будет обеспечивать принятие пусть и условно оптимальных, но приемлемых по точности решений. Следует отметить, что для обеспечения достаточно устойчивых решений в случае динамического изменения условий функционирования и, как следствие, воздействия внешних факторов среды требуется регулярное обновление и дополнение множества имеющихся прецедентов, а также структурно-параметрическая настройка модели, что сопряжено с дополнительными затратами времени и ресурсов.

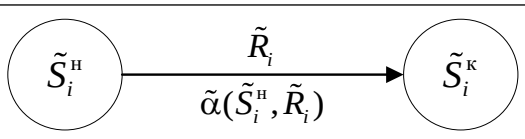

Рис. 1. Графическое представление нечеткого ситуационного прецедента

Fig. 1. Graphical representation of a fuzzy situational precedent

Способ построения локальных сетевых НСПМ

Как отмечалось ранее, при поиске оптимальной стратегии управления зачастую бывает достаточно рассмотрения ограниченной области ситуационного признакового пространства между текущей и целевой нечеткими ситуациями.

Авторами статьи предлагается способ построения локальных НСПМ с ограниченным ситуационным признаковым пространством, локализуемым относительно некоторого под-

множества значений нечетких ситуационных признаков с центром в целевой ситуации и радиусом γD, где D – расстояние между текущей и целевой нечеткими ситуациями; $\gamma \in (0, \gamma_{гр})$ – коэффициент локализации, определяющий границы ситуационного признакового пространства. В зависимости от значений коэффициента γ могут быть выделены три типовых варианта построения НСПМ (рис. 2):

- при $\gamma < 1$ выполняется расширение ситуационного признакового пространства, что способствует формированию более разветвленной сетевой структуры НСПМ;
- при $\gamma = 1$ радиус локальной области ограничений совпадает с расстоянием между текущей и целевой нечеткими ситуациями D;
- при $\gamma > 1$ на выбор нечетких ситуационных прецедентов накладываются более жесткие ограничения.

На рисунке 3 представлен пример усечения нечетких прецедентов, конечные ситуации которых находятся за пределами локальной области.

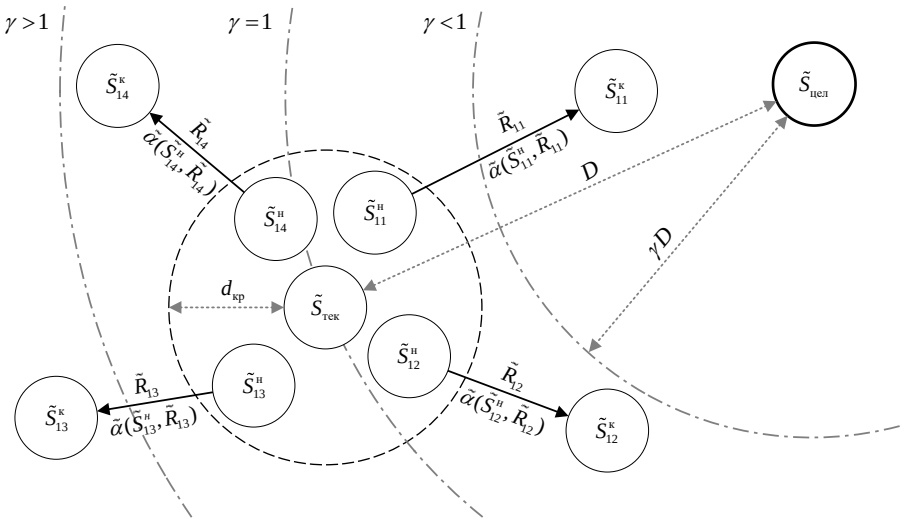

Рис. 2. Возможные варианты построения локальной области в зависимости от значения коэффициента локализации γ

Fig. 2. Possible options for constructing a local area depending on the value of the localization coefficient γ

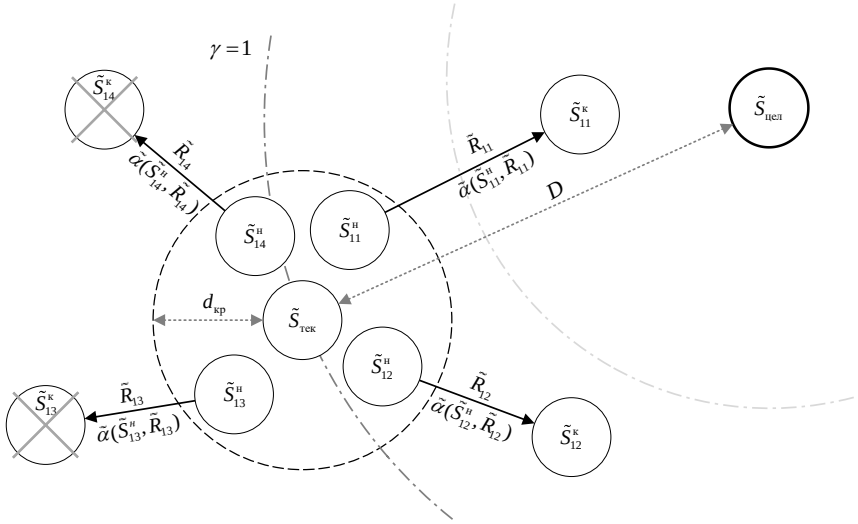

Рис. 3. Пример усечения нечетких прецедентов, выходящих за пределы локальной области при $\gamma = 1$

Fig. 3. Truncation example for fuzzy precedents extending beyond the local region at $\gamma = 1$

Способ построения локальных НСПМ состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Задание максимального значения степени близости $d_{кр}$ для нахождения схожих нечетких ситуаций и коэффициента локализации γ, а также вычисление расстояния D (радиуса локальной зоны) от текущей нечеткой ситуации $\tilde{S}_{тек}$ до целевой $\tilde{S}_{цел}$.

Шаг 2. Определение набора нечетких ситуационных прецедентов $\{c_{ij}\}$, нечеткие начальные ситуации которых близки к текущей, то есть удалены не более чем на заданное значение порога $d_{кр}$:

$$d(\tilde{S}_{тек}, \tilde{S}_{ij}^{н}) \le d_{кр},$$

а конечные ситуации $\tilde{S}_{ij}^{к}$ не удаляются от целевой $\tilde{S}_{цел}$ более чем на расстояние γD:

$$d(\tilde{S}_{цел}, \tilde{S}_{ij}^{к}) \le \gamma D,$$

где i – номер текущей итерации; $j = 1, \ldots, N_i$; N_i – количество найденных прецедентов, удовлетворяющих указанным условиям.

Графическая иллюстрация примера реализации шагов 1 и 2 первой итерации способа построения локальной НСПМ приведена на рисунке 4.

Шаг 3. Проверка близости конечной ситуации $\tilde{S}_{ij}^{к}$ к целевой нечеткой ситуации $\tilde{S}_{цел}$ для каждого прецедента из набора $\{c_{ij}\}$ в соответствии с условием

$$d(\tilde{S}_{цел}, \tilde{S}_{ij}^{к}) \le d_{кр}, j = 1, \ldots, N_i.$$

Для прецедентов $\{c_{ij}\}$, не удовлетворяющих этому условию, шаги 2 и 3 повторяются итерационно, пока не будет достигнута целевая ситуация, при этом в качестве $\tilde{S}_{тек}$ на каждой последующей итерации принимается соответствующая конечная ситуация $\tilde{S}_{ij}^{к}$.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры реализации итераций способа построения локальной НСПМ.

Шаг 4. Объединение близких нечетких прецедентов по достижении целевой ситуации.

На рисунках 7 и 8 приведено графическое представление всех итераций рассмотренного

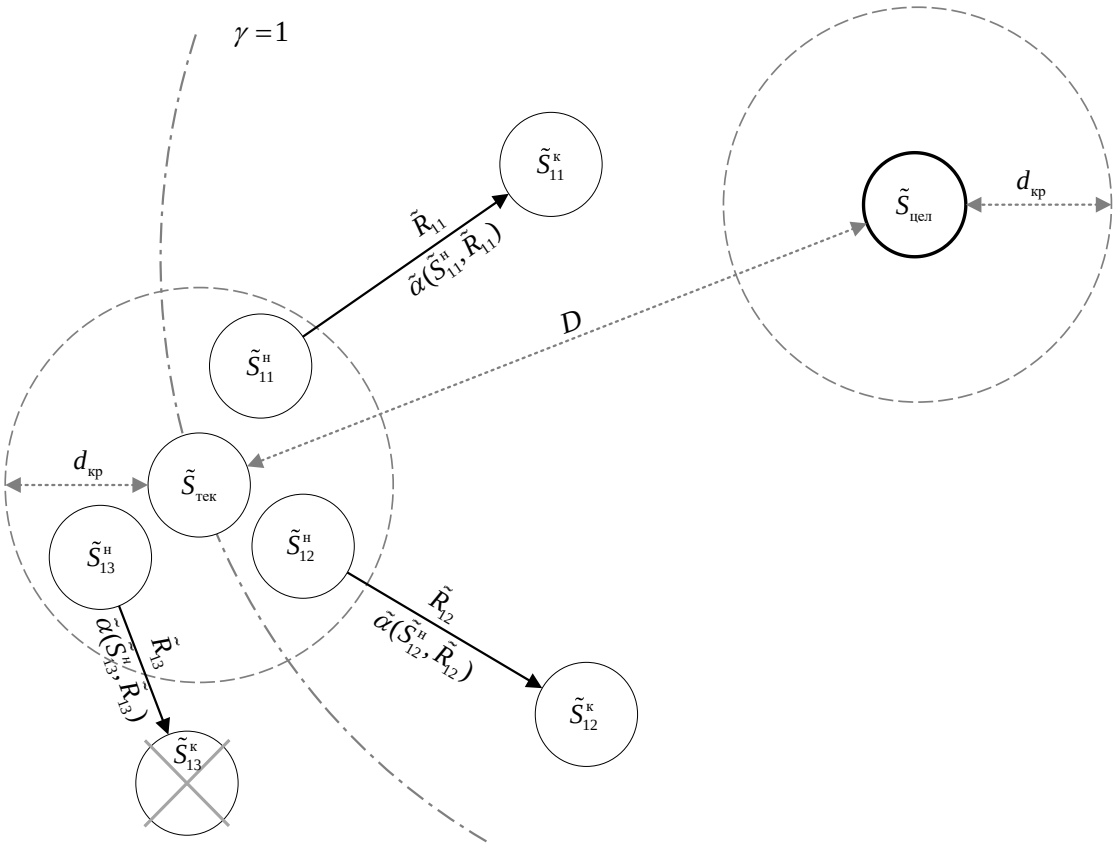

Рис. 4. Пример реализации шагов 1 и 2 первой итерации способа построения локальной НСПМ

Fig. 4. Example of implementing steps 1 and 2 in the first iteration of the local Fuzzy Situational-Precedent Model construction method

примера по реализации предложенного способа, а также полученная локальная НСПМ после объединения близких нечетких прецедентов.

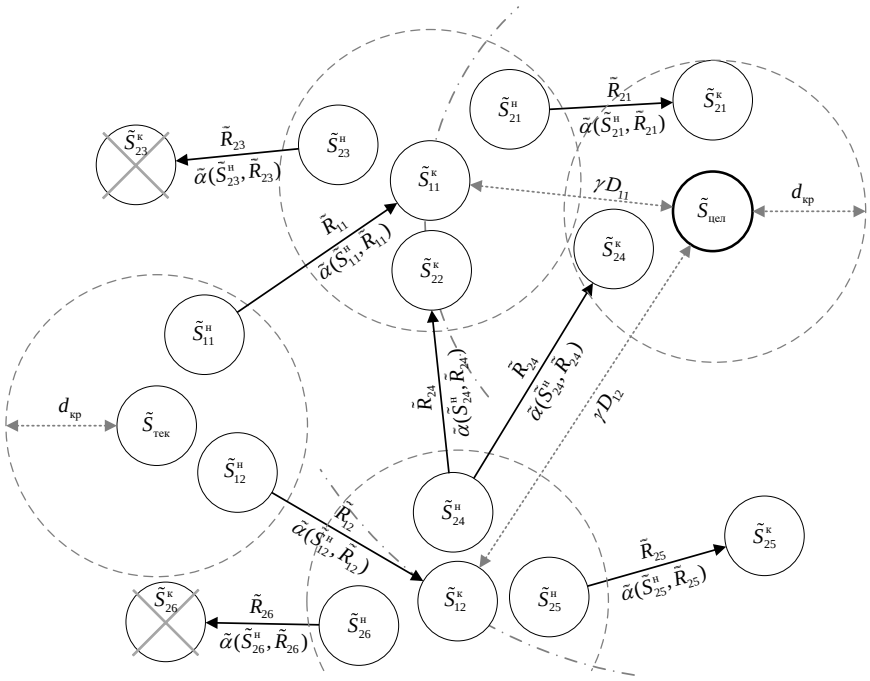

Рис. 5. Пример реализации второй итерации способа построения локальной НСПМ

Fig. 5. Example of implementing the second iteration in constructing the local Fuzzy Situational-Precedent Model

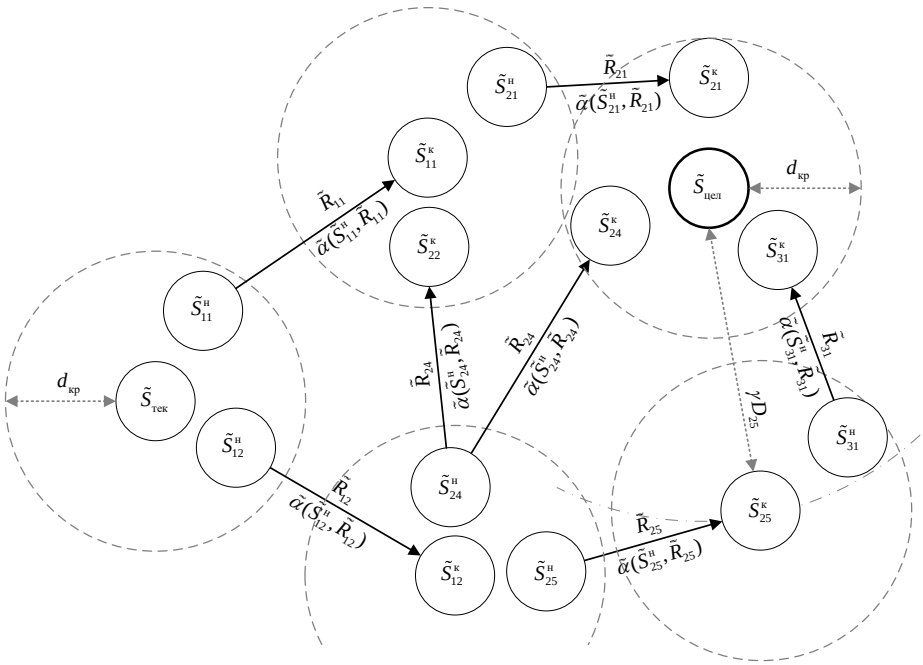

Рис.6. Пример реализации третьей итерации способа построения локальной НСПМ

Fig.6. Example of implementing the third iteration in constructing the local Fuzzy Situational-Precedent Model

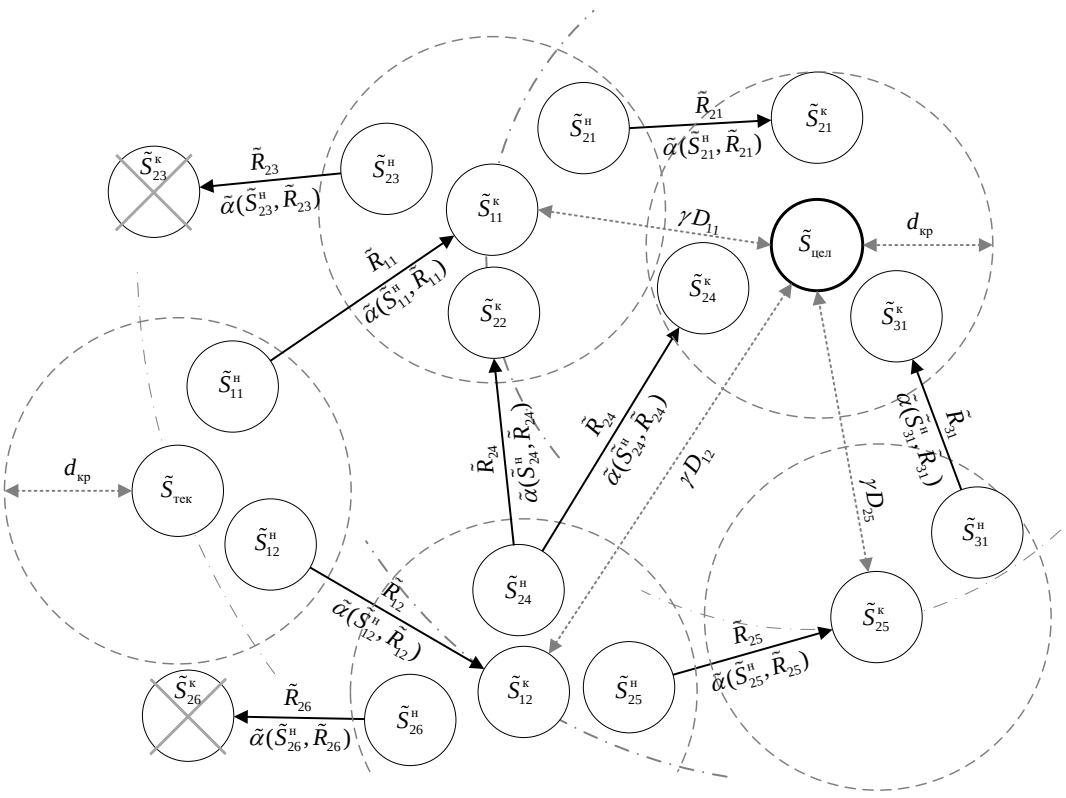

Рис. 7. Итерации рассмотренного примера построения локальной НСПМ

Fig. 7. Iterations of the local Fuzzy Situational-Precedent Model construction example

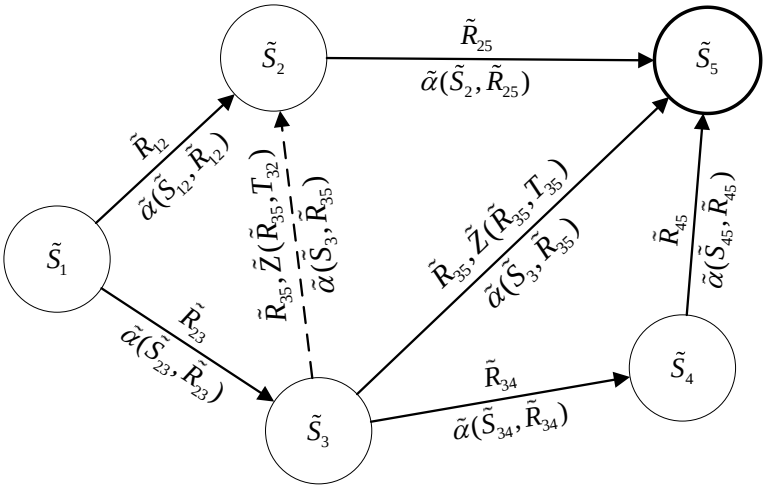

Рис. 8. Пример итоговой локальной НСПМ

Fig. 8. Final local Fuzzy Situational-Precedent Model example

Предлагаемый способ позволяет уменьшить затраты времени и вычислительных ресурсов при построении локальной НСПМ, а также применить при формировании стратегии управления актуальные прецедентные данные об управлении сложным объектом.

Алгоритмическая и программная реализация

На рисунке 9 представлена блок-схема алгоритма построения локальной НСПМ, предполагающего определение в некоторой ограни-

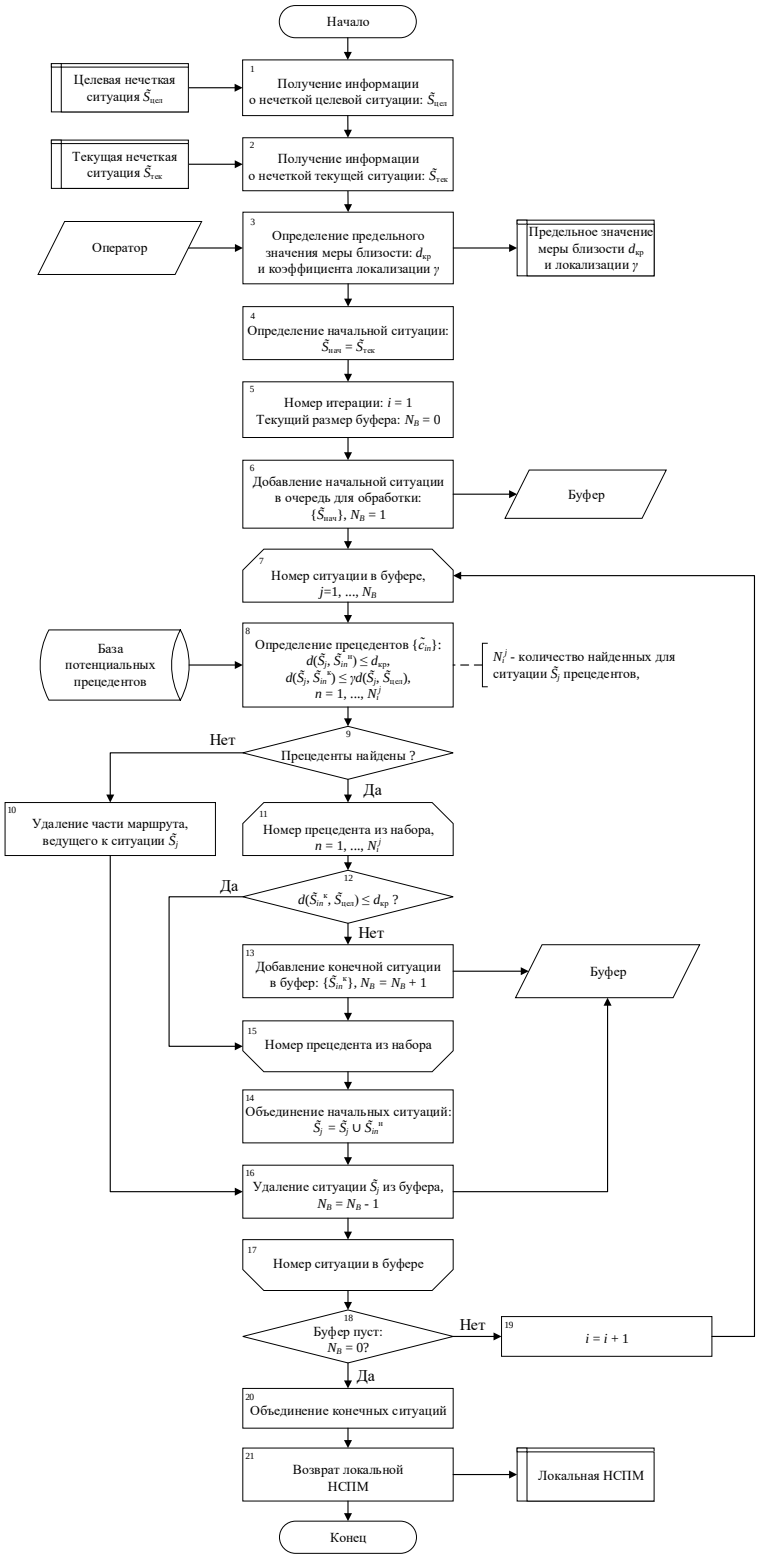

Рис. 9. Алгоритм способа построения локальной НСПМ

Fig. 9. Algorithm for constructing a local Fuzzy Situational-Precedent Model

ченной области признакового пространства локальной НСПМ.

Входными данными алгоритма является информация о текущей ситуации $\tilde{S}_{тек}$; информа-

ция о целевой нечеткой ситуации $\tilde{S}_{\text{цел}}$, в которую необходимо перевести сложный объект; предельное значение меры близости для сопоставления нечетких ситуаций $d_{\text{кр}} \in (0, 1)$ и коэффициент локализации $\gamma \in (0, \infty)$.

На начальном этапе алгоритма инициализируется организованный в виде односторонней очереди буфер, в который будут добавляться нечеткие ситуации для последующей обработки. Далее в указанный буфер помещается текущая нечеткая ситуация $\tilde{S}_{\text{тек}}$, рассматриваемая в качестве начальной $\tilde{S}_{\text{нач}}$ для поиска всех доступных маршрутов до целевой ситуации в локализованной области ситуационного признакового пространства.

Выполнение алгоритма продолжается итерационно до тех пор, пока в буфере остается хотя бы одна ситуация. Каждая *i*-я итерация алгоритма предполагает определение для каждой находящейся в буфере *j*-й ситуации $\tilde{S}_j$ набора нечетких ситуационных прецедентов $\{\tilde{c}_{in}\}$, $n = 1, \ldots, N_i^j$, каждый из которых удовлетворяет следующим условиям: начальная ситуация соответствующего прецедента близка к рассматриваемой $d(\tilde{S}_j, \tilde{S}_{in}^{\text{н}}) \le d_{\text{кр}}$, а конечная ситуация прецедента располагается внутри допустимой области, представляющей собой гиперсферу в пространстве ситуационных признаков с центром в целевой ситуации и радиусом, равным произведению расстояния от рассматриваемой ситуации до целевой ситуации на коэффициент локализации: $d(\tilde{S}_j, \tilde{S}_{in}^{\text{к}}) \le \gamma d(\tilde{S}_j, \tilde{S}_{\text{цел}})$. Далее для каждого найденного прецедента в наборе осуществляется проверка достижения целевой ситуации $d(\tilde{S}_{in}^{\text{к}}, \tilde{S}_{\text{цел}}) \le d_{\text{кр}}$. Если целевая ситуация была достигнута, то алгоритм переходит к следующему прецеденту в наборе, иначе ситуация $\tilde{S}_{in}^{\text{к}}$ добавляется в буфер в качестве очередной начальной ситуации для обработки на следующей итерации алгоритма. Если ни одного потенциального прецедента, удовлетворяющего указанным условиям, не было найдено, то ведущая к рассматриваемой ситуации несопряженная часть маршрута ситуационной сети удаляется. После рассмотрения всех близких к нечеткой ситуации $\tilde{S}_j$ прецедентов, данная ситуация удаляется из буфера.

На следующем шаге осуществляется проверка наличия в буфере нечетких ситуаций для анализа. Если буфер непуст, то алгоритм переходит к следующей итерации, в противном случае нечеткие ситуации, достигшие конечных целей маршрутов объединеняются. Далее осуществляется возврат сформированной сетевой структуры локальной НСПМ, после чего алгоритм завершает свою работу.

Программная реализация предложенного способа построения локальной НСПМ выполнена на языке Python 3.12. Для реализации математического аппарата нечетких вычислений, лежащих в основе данного типа моделей, применялась библиотека Numpy, которая предоставляет пользователю гибкий и удобный инструментарий для осуществления операций с данными в матричном виде. Для визуального представления НСПМ использовался пакет NetworkX, предназначенный для создания, манипулирования и изучения структуры, динамики и функций сетевых структур.

Вычислительный эксперимент

Проверка адекватности разработанных программных средств и оценка эффективности предложенной модели, а также способа и алгоритма ее построения осуществлялись на примере управления сложной теплотехнологической системой переработки мелкодисперсных отходов добычи апатит-нефелиновых руд [18, 19]. Для проведения вычислительного эксперимента были использованы разработанные авторами цифровые модели отдельных стадий реализации химико-электротехнологических процессов сушки и обжига окомкованного рудного сырья в *обжиговой машине конвейерного типа* (ОМКТ) [20, 21]. Разработанные модели применялись для получения нечетких ситуационных прецедентов при различных характеристиках объекта управления и внешних факторов функционирования на каждой стадии. Моделирование осуществлялось на персональном компьютере, оснащенным процессором Intel Core i7-9750H с частотой ядра 2.6 ГГц. В качестве критерия управления использовалось условие минимизации количества поврежденных окатышей на выходе ОМКТ, вычисляемое в процентах относительно общего объема партии.

На первой стадии эксперимента с использованием разработанной цифровой модели была сформирована выборка из 2 000 нечетких ситуационных прецедентов при фиксированных условиях. Сравнение предложенной локальной НСПМ производилось с предварительно построенными на основе полученных данных *экспертной нечеткой ситуационной сетью* (ЭНСС)

и глобальной НСПМ, структура и параметры которых в ходе эксперимента не изменялись. Процедура оценки эффективности каждой модели включала 20 циклов управления со случайно заданными начальными и целевыми нечеткими ситуациями с последующим вычислением среднего значения процента бракованных окатышей на выходе ОМКТ.

Целью второй части эксперимента являлось определение уровня влияния изменений условий функционирования сложного объекта на эффективность управления с использованием моделей, построенных на основе устаревших данных (исходной выборки). Для этого в цифровой модели отдельных стадий ОМКТ были изменены параметры, отвечающие за скорость движения конвейерной линии, интенсивности подачи газа-теплоносителя в вакуум-камерах, а также литологические и гранулометрические свойства исходного сырья, после чего проведена оценка эффективности каждой модели в соответствии с описанной ранее процедурой.

Последующие стадии эксперимента заключались в формировании дополнительных наборов данных при изменении условий функционирования объекта. Каждый из указанных наборов данных, состоящих из 500 ситуационных прецедентов, последовательно добавлялся к исходной выборке, тем самым повышая актуальность содержащейся в ней информации о новых условиях функционирования объекта. На всех стадиях также осуществлялась оценка эффективности управления для каждой из рассматриваемых моделей.

Результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице, данные визуализированы (http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-3/9.jpg).

Очевидно, что в сравнении с ЭНСС и глобальной НСПМ, построенных на актуальных данных о функционировании ОМКТ, предложенная локальная модель показывает меньшую, в среднем на 32 %, эффективность, что связано с ограничением набора доступных стратегий управления. При этом стоит отметить, что применение предложенной модели позволяет обеспечить приемлемое качество управления ОМКТ с допустимой долей брака на выходе около 3,5 %.

В процессе изменения условий функционирования объекта эффективность управления с использованием как устаревших ЭНСС и глобальной НСПМ, так и построенной на неактуальных данных локальной модели снизилась в среднем на 8 % по сравнению с результатами первой стадии эксперимента.

При актуализации набора прецедентов (стадии эксперимента 3–5) эффективность управления с использованием локальной НСПМ увеличивается пропорционально доле обновленных данных. Количество прецедентов, необходимое для восстановления качества управления на основе локальной НСПМ, может быть снижено за счет введения темпоральной компоненты, например, в виде весов прецедентов, учитывающих время их добавления в набор и позволяющих организовать удаление из него устаревшей информации.

Предложенная локальная НСПМ показывает более низкое, в среднем на 13 %, быстродействие при поиске оптимальной стратегии управления по сравнению с ЭНСС и глобальной НСПМ, поскольку предполагает дополнительный этап построения, включающий поиск в наборе близких прецедентов. Однако стоит отметить, что построение и корректировка моделей с фиксированной структурой является достаточно ресурсоемкой процедурой, что делает целесообразным применение локальной НСПМ в случае частого изменения факторов

Оценка эффективности управления при изменении условий функционирования сложного объекта

Assessment of control effectiveness when operating conditions of a complex object change

№	Выборка	Количество поврежденных окатышей на выходе, %		
		ЭНСС	Глобальная НСПМ	Локальная НСПМ
1	Исходная (ИВ)	2,63	2,17	3,52
Изменение условий				
2	Исходная	11,18	10,91	11,3
3	Исходная + 500 новых образцов	11,24	10,79	7,14
4	Исходная + 1 000 новых образцов	11,17	11,29	4,96
5	Исходная + 1 500 новых образцов	11,59	10,87	4,13

внешней среды. В качестве решения для повышения быстродействия локальной НСПМ могут рассматриваться модернизация алгоритмов поиска ближайших прецедентов, а также кеширование или введение дополнительной таблицы для сохранения вычисленных ранее расстояний между известными нечеткими ситуациями.

Заключение

Разработан новый тип локальных НСПМ, которые строятся на основе ограниченного множества ситуационных прецедентов и предназначены для оптимального управления сложными объектами в условиях воздействия динамически изменяющихся факторов внешней среды.

Предложены способ и алгоритм построения локальных НСПМ, предполагающие формирование фрагмента НСПМ для ограниченной области ситуационного признакового пространства между заданными нечеткими начальной и конечной ситуациями. К особенностям модели может быть отнесена возможность учета различных реакций объекта на одинаковые управляющие воздействия при схожих начальных ситуациях, возникающих вследствие воздействия неучтенных внешних факторов.

Разработаны программные средства, реализующие предложенные способ и алгоритм построения локальных НСПМ, на языке программирования Python.

На примере управления ОМКТ с использованием разработанных программных средств и цифровых моделей отдельных стадий химико-технологического процесса производства окатышей был проведен вычислительный эксперимент, который показал эффективность применения локальной НСПМ, а также более высокую устойчивость к динамическим изменениям факторов внешней среды по сравнению с ЭНСС и глобальной НСПМ.

Несмотря на то, что в данной работе в качестве примера рассматривалось управление сложным техническим объектом, полученные результаты и выводы могут быть без потери общности распространены на другие классы сложных объектов, в том числе относящихся к группе социально-экономических.

Список литературы

1. Меркурьев С.А., Палюх Б.В., Ветров А.Н. Программная реализация диагностики непрерывных многостадийных производств с использованием динамической экспертной системы // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 4. С. 622–628. doi: 10.15827/0236-235X.148.622-628.

2. Синявский Ю.В., Кириллова Е.А. Интеллектуальный алгоритм управления автономными комплексными энергетическими установками арктического исполнения // Прикладная информатика. 2021. № 4. С. 74–82. doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-74-82.

3. Дулясова М.В., Тутов С.В. Повышение конкурентоспособности предприятий по производству крупнотоннажных полимеров // Современная конкуренция. 2024. № 4. С. 99–111. doi: 10.37791/2687-0657-2024-18-4-99-111.

4. Кулик Е.И. Особенности конкурентоспособности региона в современных условиях // Современная конкуренция. 2024. № 3. С. 37–47. doi: 10.37791/2687-0657-2024-18-3-37-47.

5. Трушаков Р.В., Бобков В.И., Мищенко М.Н. Компьютеризированная система принятия решений по энергообеспечению в масштабе региона // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 2. С. 29–34.

6. Склюев А.М., Хабаров В.И., Мусатова И.В., Попова О.В. Организационно-управленческие инновации в электронной промышленности России: современные тренды // Современная конкуренция. 2022. № 6. С. 103–116. doi: 10.37791/2687-0657-2022-16-6-103-116.

7. Емельянов В.А., Черный С.Г., Емельянова Н.Ю. Архитектура системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического оборудования // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 451–458. doi: 10.15827/0236-235X.143.451-458.

8. Starodubtsev M., Bilousov M., Kamardin S. et al. Models of technological processes management under conditions of uncertainty. J. of Natural Sci. and Tech., 2024, vol. 3, no. 1, pp. 254–258.

9. Борисов В.В. Нечеткие когнитивные модели как основа для исследования сложных систем и процессов // Речевые технологии. 2020. № 1-2. С. 48–62. doi: 10.58633/2305-8129_2020_1-2_48.

10. Борисов В.В., Курилин С.П., Прокимнов Н.Н., Черновалова М.В. Нечеткое когнитивное моделирование неоднородных электромеханических систем // Прикладная информатика. 2021. № 1. С. 32–39. doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-32-39.

11. Иванова О.Е., Шмидт Ю.И., Задворнева Е.П. Модель управления затратами с применением подхода нечетких когнитивных карт в цифровой промышленности // Экономика и предпринимательство. 2023. № 12. С. 932–937. doi: 10.34925/EIP.2023.161.12.182.

12. Nápoles G., Ranković N., Salgueiro Y. On the interpretability of fuzzy cognitive maps. Knowledge-Based Sys., 2023, vol. 281, art. 111078. doi: 10.1016/j.knosys.2023.111078.

13. Harmati I.Á., Hatwágner M.F., Kóczy L.T. Global stability of fuzzy cognitive maps. Neural Comput. Application, 2023, vol. 35, pp. 7283–7295. doi: 10.1007/s00521-021-06742-9.

14. Бобряков А.В., Борисов В.В., Мисник А.Е., Прокопенко С.А. Нейро-нечеткие сети Петри для разработки и управления информационно-аналитическими процессами в киберфизических системах // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 33. № 8. С. 38–50.

15. Салманова М.Н., Будагов И.С. Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением треугольных временных нечетких сетей Петри // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 7. С. 75–82. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_7_75.

16. Борисов В.В., Авраменко Д.Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 207–237.

17. Соколов А.М., Черновалова М.В., Прокимнов Н.Н. Сетевые нечеткие ситуационно-прецедентные модели систем управления сложными техническими объектами // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 6. С. 4–17. doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-4-17.

18. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6. С. 102–121. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121.

19. Незамаев С.В., Орехов В.А., Бобков В.И. Экспериментальное обследование и анализ теплового режима процесса термической обработки рудного сырья в обжиговой конвейерной машине // Химическая промышленность сегодня. 2024. № 5. С. 31–36.

20. Дли М.И., Пучков А.Ю., Максимкин М.В. Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 6. С. 96–112. doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112.

21. Пучков А.Ю., Соколов А.М., Федотов В.В. Нейросетевой метод анализа процессов термической обработки окомкованного фосфатного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 5. С. 62–76. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-62-76.

Software & Systems doi: 10.15827/0236-235X.151.389-402 2025, 38(3), pp. 389–402

Constructing local fuzzy models for complex object situational control based on precedents

Maksim I. Dli [1]✉, Andrey M. Sokolov [2], Margarita Yu. Vorotilova [1]

[1] Smolensk Branch of the Moscow Power Engineering Institute,
Smolensk, 214013, Russian Federation
[2] National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation

For citation
Dli, M.I., Sokolov, A.M., Vorotilova, M.Yu. (2025) ‘Constructing local fuzzy models for complex object situational control based on precedents’, *Software & Systems*, 38(3), pp. 389–402 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.151.389-402
Article info
Received: 07.02.2025 After revision: 10.03.2025 Accepted: 07.04.2025

Abstract. The paper discusses the issues of optimal control of various nature complex objects in dynamically changing environmental uncertainty factors. The authors analyzed existing control approaches for this category of objects, taking into account specific requirements for developing modern intelligent decision support systems. The paper proved the effectiveness of fuzzy situational-precedent modeling, where past cases form the knowledge base and enable clear visualization of optimal management decisions. The results indicate that model implementation faces adaptation challenges when management conditions evolve, primarily due to the extensive set of incorporated situations and their transition dynamics. Authors present innovative fuzzy situational-precedent models confined to specific feature space domains, designed to represent situational control parameters. The main feature of the proposed models is a limited area of their construction to a certain space around the current and target situations, which greatly simplifies the process of adapting the network structure when internal and external factors change. The authors proposed three alternative approaches for defining the

feature space domain and, consequently, determining the network structure complexity of the model based on specifying a localization coefficient. The paper describes a method for constructing local fuzzy models that involves merging similar fuzzy precedents upon reaching target situations, thereby simplifying model structure and enhancing situational control responsiveness for complex objects. The software implementation of the proposed method is made in Python 3.12. using the Numpy library and the NetworkX package for network visualization for fuzzy calculations. The authors conducted a computational experiment demonstrating the effectiveness of local fuzzy situational-precedent models for managing complex objects under dynamic uncertainty compared to fixed-structure situational models.
Keywords: local fuzzy model, situational control, precedent approach, complex objects
Acknowledgements. The reported study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 25-21-00353

References

1. Merkurev, S.A., Palyukh, B.V., Vetrov, A.N. (2024) 'Continuous multistage production diagnostics: Software implementation using a dynamic expert system', *Software & Systems*, 37(4), pp. 622–628 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.148.622-628.
2. Sinyavsky, Yu.V., Kirillova, E.A. (2021) 'Intelligent control algorithm for autonomous integrated power plants for Arctic regions', *J. of Applied Informatics*, (4), pp. 74–82 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-74-82.
3. Dulyasova, M.V., Tutov, S.V. (2024) 'Increasing the competitiveness of enterprises producing large-scale polymers', *J. of Modern Competition*, (4), pp. 99–111 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0657-2024-18-4-99-111.
4. Kulik, E.I. (2024) 'Features of the region's competitiveness in modern conditions', *J. of Modern Competition*, (3), pp. 37–47 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0657-2024-18-3-37-47.
5. Trushakov, R.V., Bobkov, V.I., Mishchenko, M.N. (2022) 'Computerized decision-making system for energy supply on a regional scale', *Energy Saving and Water Treatment*, (2), pp. 29–34 (in Russ.).
6. Sklyuev, A.M., Khabarov, V.I., Musatova, I.V., Popova, O.V. (2022) 'Organizational and managerial innovations in the Russian electronics industry: Current trends', *J. of Modern Competition*, (6), pp. 103–116 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0657-2022-16-6-103-116.
7. Yemelyanov, V.A., Chernyi, S.G., Yemelyanova, N.Yu. (2023) 'An architecture of the decision support system for monitoring a technical condition of critical equipment', *Software & Systems*, 36(3), pp. 451–458 (in Russ.). doi: 10.15827/0236- 235X.142.451-458.
8. Starodubtsev, M., Bilousov, M., Kamardin, S. et al. (2024) 'Models of technological processes management under conditions of uncertainty', *J. of Natural Sci. and Tech*., 3(1), pp. 254–258.
9. Borisov, V.V. (2020) 'Fuzzy cognitive models for the research of complex systems and processes', *Speech Tech*., (1-2), pp. 48–62 (in Russ.). doi: 10.58633/2305-8129_2020_1-2_48.
10. Borisov, V.V., Kurilin, S.P., Prokimnov, N.N., Chernovalova, M.V. (2021) 'Fuzzy cognitive modeling of heterogeneous electromechanical systems', *J. of Applied Informatics*, (1), pp. 32–39 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-32-39.
11. Ivanova, O.E., Schmidt, Yu.I., Zadvorneva, E.P. (2023) 'Cost management model using fuzzy cognitive maps approach in digital industry', *J. of Economy and Entrepreneurship*, (12), pp. 932–937 (in Russ.). doi: 10.34925/EIP.2023.161.12.182.
12. Nápoles, G., Ranković, N., Salgueiro, Y. (2023) 'On the interpretability of fuzzy cognitive maps', *Knowledge-Based Systems*, 281, art. 111078. doi: 10.1016/j.knosys.2023.111078.
13. Harmati, I.Á., Hatwágner, M.F., Kóczy, L.T. (2023) 'Global stability of fuzzy cognitive maps', *Neural Comput. Application*, 35, pp. 7283–7295. doi: 10.1007/s00521-021-06742-9.
14. Bobryakov, A.V., Borisov, V.V., Misnik, A.E., Prokopenko, S.A. (2020) 'Neuro-fuzzy Petri nets for development and control of information-analytical processes in cyber-physical systems', *Soft Measurements and Computing*, 33(8), pp. 38–50 (in Russ.).
15. Salmanova, M.N., Budakov, I.S. (2021) 'Modeling of dynamic interaction processes with application of triangular fuzzy timed Petri nets', *Math. Methods in Tech. and Eng*., (7), pp. 75–82 (in Russ.). doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_7_75.
16. Borisov, V.V., Avramenko, D.Yu. (2021) 'Fuzzy situational control of complex systems based on composite hybrid modeling', *System of Control, Communication and Security*, (3), pp. 207–237 (in Russ.).
17. Sokolov, A.M., Chernovalova, M.V., Prokimnov, N.N. (2024) 'Network fuzzy situational precedent models of control systems for complex technical objects', *J. of Appied Informatics*, 19(6), pp. 4–17 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-4-17.
18. Puchkov, A.Yu., Dli, M.I., Prokimnov, N.N., Shutova, D.Yu. (2022) 'Multilevel algorithms for evaluating and making decisions on the optimal control of an integrated system for processing fine ore raw materials', *J. of Applied Informatics*, 17(6), pp. 102–121 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121.
19. Nezamaev, S.V., Orekhov, V.A., Bobkov, V.I. (2024) 'Experimental examination and analysis of thermal regime of ore raw material thermal treatment process in roasting conveyor machine', *Chemical Industry Developments*, (5), pp. 31–36 (in Russ.).
20. Dli, M.I., Puchkov, A.Yu., Maksimkin, M.V. (2024) 'Software model of an intelligent control system for complex processes of small-scale ore processing', *J. of Applied Informatics*, 19(6), pp. 96–112 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112.

21. Puchkov, A.Yu., Sokolov, A.M., Fedotov, V.V. (2022) 'Neural network analysis method of heat treatment processes of pelletized phosphate ore raw materials', *J. of Applied Informatics*, 17(5), pp. 62–76 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-62-76.

Авторы
Дли Максим Иосифович [1],
д.т.н., профессор, заместитель директора
по научной работе, midli@mail.ru
Соколов Андрей Максимович [2],
аспирант, ansokol98@mail.ru
Воротилова Маргарита Юрьевна [1],
младший научный сотрудник,
rita.vorotilova@mail.ru

[1] Смоленский филиал Национального
исследовательского университета «МЭИ»,
г. Смоленск, 214013, Россия
[2] Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва, 111250, Россия

Authors
Maksim I. Dli [1], Dr.Sci. (Engineering),
Professor, Deputy Director
on Scientific Work, midli@mail.ru
Andrey M. Sokolov [2],
Postgraduate Student, ansokol98@mail.ru
Margarita Yu. Vorotilova [1],
Junior Researcher,
rita.vorotilova@mail.ru

[1] Smolensk Branch of the
Moscow Power Engineering Institute,
Smolensk, 214013, Russian Federation
[2] National Research University "MPEI",
Moscow, 111250, Russian Federation