

## Рекуррентные нечеткие ситуационно-прецедентные модели для оперативного управления сложными техническими объектами

А.М. Соколов<sup>1</sup>, В.В. Борисов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
г. Москва, 111250, Россия

<sup>2</sup> Смоленский филиал Национального исследовательского университета МЭИ,  
г. Смоленск, 214013, Россия

### Ссылка для цитирования

Соколов А.М., Борисов В.В. Рекуррентные нечеткие ситуационно-прецедентные модели для оперативного управления сложными техническими объектами // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 4. С. 554–565. doi: 10.15827/0236-235X.148.554-565

### Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.1

Поступила в редакцию: 14.06.2024

После доработки: 17.07.2024

Принята к публикации: 30.07.2024

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы оперативного управления сложными техническими объектами (СТО), функционирующими в динамически изменяющихся, неопределенных условиях внешней среды, рисков возникновения опасных и аварийных ситуаций. Проведен анализ подходов к ситуационному управлению СТО, который показал, что перспективным решением для оперативного управления этими объектами является применение нечетких моделей типа «ситуация–действие». Основными ограничениями моделей данного типа являются необходимость дополнительной экспертной информации для актуализации нечеткой базы знаний, а также отсутствие учета возможности переходов в различные ситуации при применении сходных управляющих воздействий. Для устранения указанных недостатков предлагается применение прецедентного подхода, который предполагает накопление информации о функционировании СТО в базе нечетких прецедентов с целью их дальнейшего использования при выборе управленческих решений. Предложены новый тип рекуррентных нечетких ситуационно-прецедентных моделей, а также способ и алгоритмы оперативного управления СТО по прецедентам на основе этих моделей. Авторское решение отличается применением итерационной процедуры поиска последовательности прецедентных управляющих решений. Данная процедура обеспечивает повышение эффективности функционирования СТО при условии адаптации к изменениям внутренних и внешних факторов. Разработаны алгоритмические и программные средства, реализующие предложенные модели, способ и алгоритмы управления СТО. В ходе вычислительных экспериментов подтверждена адекватность предложенных моделей. Выполнена оценка эффективности оперативного управления СТО по прецедентам с использованием созданных моделей, способа и алгоритмов в условиях неопределенности по сравнению с экспертной нечеткой ситуационной моделью «ситуация–действие».

**Ключевые слова:** рекуррентная нечеткая ситуационно-прецедентная модель, нечеткая ситуационная модель «ситуация–действие», прецедент, оперативное управление

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках госзадания, проект № FSWF-2023-0012

**Введение.** В различных отраслях промышленности *сложные технические объекты* (СТО) используются для решения широкого спектра задач. Эти объекты характеризуются многокомпонентной структурой со сложными взаимосвязями между компонентами, а также большим числом влияющих на их работу внутренних и внешних факторов в условиях неопределенности. Указанные особенности значительно затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным построение аналитических моделей, что обуславливает целесообразность использования ситуационных моделей управления.

Среди СТО можно выделить отдельный класс специальных роботизированных объектов, предназначенных для решения задач в открытом мире и функционирующих в динамически изменяющихся и неопределенных усло-

виях внешней среды. К таким СТО могут быть отнесены оснащенные манипуляторами и системами технического зрения автономные робототехнические комплексы, обеспечивающие контроль и проведение технологических операций при строительстве и техническом обслуживании, например, в добывающей промышленности, в подводной инфраструктуре, на линиях коммуникаций [1, 2]. Примером таких СТО являются также мобильные роботы, выполняющие исследовательские и разведывательные работы в полевых условиях [3], и снабженные манипуляторами беспилотные аппараты, обслуживающие технику в космическом пространстве [4].

Отличительными особенностями СТО рассматриваемого класса являются сложность прогнозирования ситуаций в процессе эксплуатации объектов, а также большое число опас-

ных и аварийных ситуаций, требующих оперативного реагирования [5]. В таких случаях в качестве критерия управления целесообразно рассматривать достижение целевой ситуации за наименьшее число управляющих решений при обеспечении требуемого уровня безопасности. При этом из-за сложности оценки и неопределенности влияния совокупности факторов на результаты управления СТО возможны случаи, когда одинаковым управляющим решениям будут соответствовать различные итоговые ситуации.

Таким образом, развитие моделей, способов и алгоритмов для ситуационного управления СТО в условиях неопределенности, учитывающих возможность вариативности результатов применения управляющих решений, является актуальной и практически значимой задачей.

### Ситуационный подход к управлению СТО в условиях неопределенности

Создание адекватных аналитических моделей для управления СТО в условиях неопределенности является нетривиальной и ресурсоемкой задачей, что обосновывает целесообразность применения интеллектуальных моделей, базирующихся на положениях теории нечетких множеств и нечетких вычислений [6].

Одним из современных подходов к решению проблемы учета влияния динамически изменяющихся воздействий внешней среды при управлении СТО является создание интеллектуальных систем на основе комбинирования нечеткой логики и алгоритмов обучения с подкреплением [7, 8]. Данный подход предполагает непрерывную адаптацию в процессе управления СТО с учетом мониторинга их взаимодействия со средой функционирования и закрепления положительного опыта управления [9]. Эвристический характер формирования паттернов управления СТО снижает результативность обучения с подкреплением при наличии аварийных режимов работы и чрезвычайных ситуаций, поскольку при этом цена ошибки значительно возрастает.

Для управления СТО в условиях неопределенности распространение получили типы моделей состояний и управления, абстрагирующиеся от внутренней структуры объекта и ориентированные на представление различных ситуаций и/или состояний, а также моделей реализации различных способов переходов между ними, а именно: нечеткие когнитивные модели, нечеткие ситуационно-сетевые модели, нечеткие модели типа «ситуация–действие».

Нечеткие когнитивные модели, представляющие СТО в виде множества концептов и нечетких отношений между ними, позволяют при решении задач управления этими объектами осуществлять предварительный анализ СТО [10], вырабатывать рекомендации по их усовершенствованию [11], использовать такие модели СТО в составе более сложных композиционных моделей [12]. Несмотря на наглядность и возможность учета динамики поведения СТО и изменений внешней среды, данный тип моделей затруднительно использовать для ситуационного управления при наличии множества параметров (характеристик) возможных ситуаций.

Нечеткие ситуационно-сетевые модели представляются в виде графа, вершины которого соответствуют нечетким ситуациям, а дуги – управляющим решениям, переводящим СТО из одного состояния в другое. Они предназначены для определения результата применения последовательности управляющих решений, а также стратегии управления, приводящей к требуемой нечеткой ситуации.

Авторами работы [13] предложен способ нечеткого ситуационного управления СТО на основе комбинирования нечетких ситуационно-сетевых моделей и композиционного гибридного моделирования, применение которого проиллюстрировано на примере моделирования управления центробежными компрессорами. Основным преимуществом данного подхода является возможность формирования наилучших с точки зрения выбранных критериев стратегий управления СТО. К недостаткам метода управления относится то, что учет динамики изменения СТО осуществляется только на уровне композиционных моделей, но не отражается непосредственно на структуре нечетких ситуационно-сетевых моделей, а также отсутствие в этом методе гибкого механизма адаптации модели к изменяющимся условиям функционирования СТО. Это обуславливает необходимость привлечения дополнительной экспертной информации для построения и актуализации модели.

В работе [14] рассмотрены нечеткие ситуационные модели (НСМ) типа «ситуация–действие», которые в явном виде задают соответствия между ситуациями и управляющими решениями, тем самым формируя нечеткую базу знаний. Эти модели ориентированы на определение наиболее близкой эталонной ситуации и на выдачу соответствующего (для ее достижения) управляющего решения, обладают более высоким быстродействием, что определяет

целесообразность их применения для оперативного управления СТО в условиях неопределенности. НСМ типа «ситуация–действие» не учитывают различные стратегии управления СТО, что является их основным ограничением. Однако, как отмечалось ранее, при управлении в аварийных и опасных ситуациях, если в качестве критерия эффективности управления рассматривается минимизация количества управляющих решений для достижения целевой ситуации, указанное ограничение не настолько существенно. Отдельным вопросом при построении НСМ типа «ситуация–действие» являются формирование и адаптация нечеткой базы знаний, которая, как правило, задается экспертно, что не позволяет в полной мере учитывать влияние динамически изменяющихся факторов внешней среды в условиях неопределенности. Еще одним ограничением этих моделей следует назвать отсутствие учета возможности переходов в различные нечеткие ситуации при применении сходных управляющих воздействий.

Как известно, при моделировании функционирования СТО, для которых полное описание невозможно или затруднено из-за структурной и параметрической сложности, а также влияния на их работу стохастических и нестохастических внешних воздействий, применяется прецедентный подход [15–17]. Он предполагает накопление и использование ретроспективной информации о функционировании объекта.

В данной статье для повышения эффективности оперативного управления СТО в условиях неопределенности предлагаются новый тип *рекуррентных нечетких ситуационно-прецедентных моделей* (РНСПМ), а также способ и алгоритмы управления СТО по прецедентам на основе этих моделей.

### Способ оперативного управления СТО по прецедентам на основе РНСПМ

Использование прецедентного подхода для построения и адаптации РНСПМ предполагает создание *базы нечетких прецедентов* (БНП) для накопления актуальной информации о положительном опыте управления СТО и результатов моделирования.

Прецеденты в БНП представляются в виде  $\tilde{c}_n = \langle \tilde{S}_n^h, \tilde{S}_n^k, \tilde{R}_n \rangle$ , (1)

где  $n = 1, \dots, N$  – номер прецедента,  $N$  – число прецедентов;  $\tilde{S}_n^h$  – начальная нечеткая ситуа-

ция, в которой находится СТО;  $\tilde{S}_n^k$  – конечная нечеткая ситуация, в которую переходит СТО в результате воздействия управляющего решения  $\tilde{R}_n$ .

Каждая нечеткая ситуация  $\tilde{S}_i$  задается набором ситуационных признаков  $\tilde{P}$  в виде нечетких множеств 2-го уровня [18]:

$$\tilde{P} = \{ \tilde{p}_m^i \} = \begin{cases} \mu_h(p_1)/p_1, \\ \dots \\ \mu_h(p_m)/p_m, \\ \dots \\ \mu_h(p_M)/p_M, \end{cases}$$

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

где  $p_m$  – значение  $m$ -го нечеткого ситуационного признака,  $m = 1, \dots, M$ ;  $\mu_h(p_m)/p_m$  – значение функции принадлежности признака  $\tilde{p}_m$  к  $h$ -му терм-множеству,  $h = 1, \dots, H$ .

Оценка степени близости нечетких ситуаций может осуществляться на основе вычисления псевдометрических расстояний, например, нечеткого расстояния Евклида:

$$d_E(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sqrt{(\mu_i(\tilde{p}_m^i) + \mu_j(\tilde{p}_m^j))^2}, \quad (2)$$

при этом ситуации считаются нечетко схожими, если степень нечеткой близости между ними не превышает заданного порога:

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

Если ситуации являются нечетко схожими, то может быть проведено их объединение:

$$\tilde{S}_{avg}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left( \left\{ \begin{matrix} \mu_i(\tilde{p}_m^i) / \tilde{p}_m^i + \\ \mu_j(\tilde{p}_m^j) / \tilde{p}_m^j \end{matrix} \right\} \right) \right\}_{m=1, \dots, M}. \quad (3)$$

При достаточном объеме статистических данных возможность перехода СТО из нечеткой ситуации  $\tilde{S}_i$  в нечеткую ситуацию  $\tilde{S}_j$  в результате воздействия управляющего решения  $\tilde{R}_{ij}$  можно оценить следующим образом:

$$Z(\tilde{S}_i, \tilde{R}_{ij}) = N_{\tilde{R}_{ij}}^* / N_{\tilde{R}_{ij}},$$

где  $N_{\tilde{R}_{ij}}^*$  – число раз, когда СТО перешло из  $\tilde{S}_i$  в  $\tilde{S}_j$  при общем числе  $N_{\tilde{R}_{ij}}$  воздействий управляющего решения  $\tilde{R}_{ij}$ .

Учитывая, что подобные сведения могут быть неопределенными, целесообразно перейти к нечеткой оценке возможности перехода из ситуации  $\tilde{S}_i$  в ситуацию  $\tilde{S}_j$ :

$$\tilde{Z}(\tilde{S}_i, \tilde{R}_{ij}) = \left\{ \mu_{\tilde{Z}(\tilde{S}_i, \tilde{R}_{ij})}(Z) / Z \right\}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\tilde{Z}(\tilde{S}_i, \tilde{R}_j)}(Z)$  – степень принадлежности нечеткого множества  $\tilde{Z}(\tilde{S}_i, \tilde{R}_j)$  к значению базового множества  $Z \in [0, 1]$ .

Предлагается способ оперативного управления СТО на основе РНСПМ, заключающийся в рекуррентном поиске прецедентов и применении последовательности соответствующих им управляющих решений для достижения целевой ситуации с использованием наименьшего количества прецедентов:

$$w_{\tilde{S}_i, \tilde{S}_j}^* = \min_n \{w_{\tilde{S}_{тек}, \dots, \tilde{S}_n, \dots, \tilde{S}_{цел}}\},$$

где  $w_{\tilde{S}_i, \tilde{S}_j}^*$  – последовательность, состоящая из наименьшего числа прецедентов, применение управляющих решений которых позволяет перевести СТО из текущей ситуации  $\tilde{S}_{тек}$  в целевую  $\tilde{S}_{цел}$ ;  $w_{\tilde{S}_{тек}, \dots, \tilde{S}_n, \dots, \tilde{S}_{цел}}$  –  $n$ -я последовательность применения прецедентных управляющих решений для перевода СТО из ситуации  $\tilde{S}_{тек}$  в ситуацию  $\tilde{S}_{цел}$ .

Другим условием целесообразности применения способа является достаточно большое число возможных ситуаций и управляющих переходов.

Предлагаемый способ оперативного управления СТО по прецедентам на основе РНСПМ включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Идентификация нечеткой текущей ситуации  $\tilde{S}_{тек}$ , в которой находится СТО, на основе информации от контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков.

Этап 2. Задание целевой нечеткой ситуации  $\tilde{S}_{цел}$  предельного значения  $d_{кр}$  для оценки степени сходства между ситуациями.

Этап 3. Поиск в БНП прецедента, для которого выполняется следующее условие:

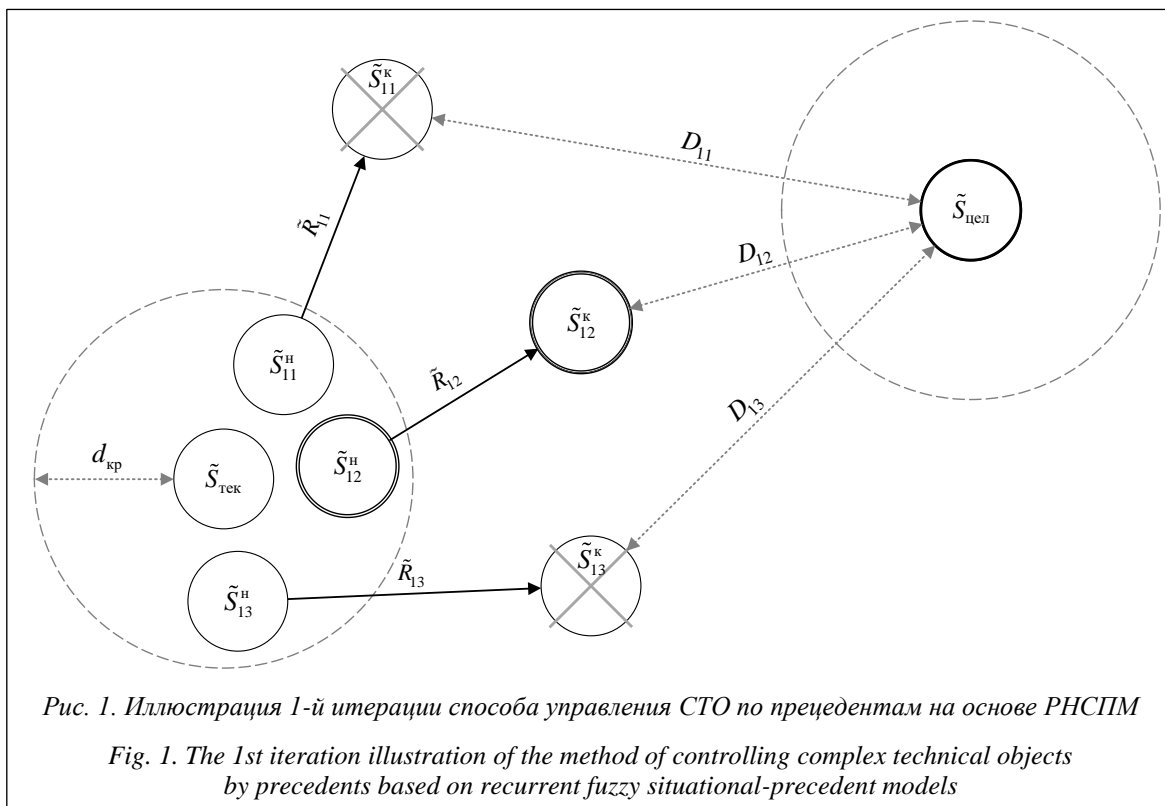
$$\tilde{c}_n : \min_{n=1, \dots, N} \{D_n\},$$

$$D_n = d_E(\tilde{S}_{тек}, \tilde{S}_n^h) + d_E(\tilde{S}_n^k, \tilde{S}_{цел}), \quad (5)$$

где  $n$  – номер прецедента в БНП,  $n = 1, \dots, N$ ,  $N$  – количество прецедентов в БНП;  $\tilde{S}_n^h, \tilde{S}_n^k$  – начальная и конечная ситуации  $n$ -го нечеткого прецедента соответственно;  $d_E$  – мера близости (например, нечеткое расстояние Евклида).

Этап 4. Итерационный поиск прецедентов и применение соответствующих управляющих решений до достижения  $\tilde{S}_{цел}$ . При этом на очередной итерации в качестве  $\tilde{S}_{тек}$  рассматривается конечная ситуация последнего из найденных прецедентов.

На рисунках 1 и 2 изображены итерации предложенного способа; для наглядности используется двойная индексация нечетких ситуаций  $\tilde{S}_{ij}$  и расстояний  $D_{ij}$ , где  $i$  – номер итерации при поиске прецедента;  $j$  – порядковый номер прецедента.



На рисунках 3 и 4 проиллюстрирован поиск последовательности прецедентов с наименьшим количеством прецедентных управляющих решений.

Предложенный способ может быть применен и для случаев, если критерием эффективности управления СТО является минимизация числа управляющих решений для перехода в

целевую ситуацию без учета сопутствующих затрат, например, при игнорировании переходов СТО через промежуточные нежелательные ситуации, соответствующие аварийным режимам работы.

Отдельно следует рассмотреть случай, когда имеются прецеденты, у которых начальные ситуации и управляющие решения близки,

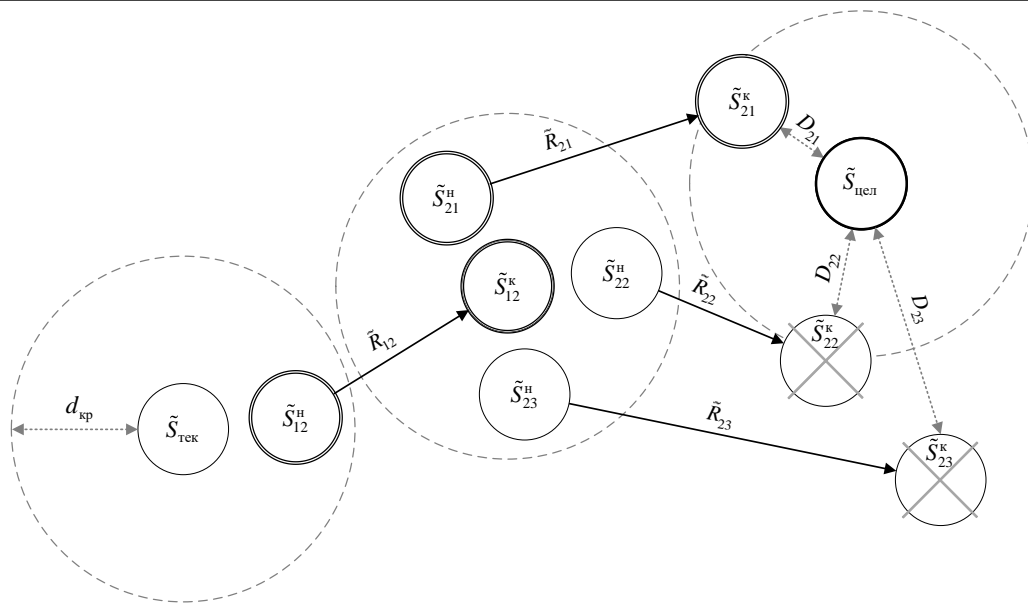


Рис. 2. Иллюстрация 2-й итерации способа управления СТО по прецедентам на основе РНСПМ

Fig. 2. The 2nd iteration illustration of the method of controlling complex technical objects by precedents based on recurrent fuzzy situational-precedent models

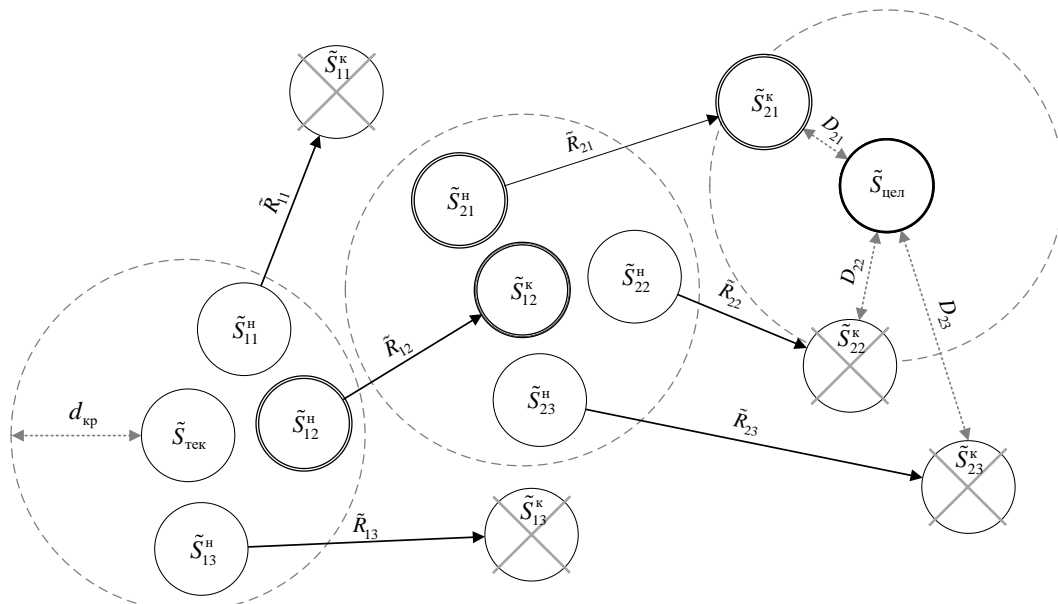


Рис. 3. Иллюстрация поиска последовательности прецедентов с наименьшим количеством прецедентных управляющих решений

Fig. 3. Example of searching for a sequence of precedents with the least number of precedent decisions

а конечные ситуации различны. Далее будем называть такие прецеденты связанными. Выбор и применение одного из связанных прецедентов не исключает возможности перехода СТО в незапланированные или даже нежелательные ситуации. Пример подобной ситуации приведен на рисунке 5.

Предположим, установлено, что при воздействии одного и того же управляющего решения  $\tilde{R}_n$  или группы схожих управляющих решений  $\{\tilde{R}_{n,h}\}$ , где  $\tilde{R}_{n,1} \cong \tilde{R}_{n,2} \cong \dots \cong \tilde{R}_{n,H}$ , возможны переходы из ситуации  $\tilde{S}_n$  сразу в несколько ситуаций  $\{\tilde{S}_h\}$ ,  $h = 1, \dots, H$ . Считаем, что переход в незапланированную ситуацию (если она не является нежелательной) будет допустимым, тогда расстояние для всей группы связанных прецедентов может быть определено с использованием выражения

$$D_n^{(H)} = (D_1 \tilde{\tau} \tilde{Z}(\tilde{S}_n, \tilde{R}_{n1})) \tilde{\tau} \dots \tilde{\tau} (D_h \tilde{\tau} \tilde{Z}(\tilde{S}_n, \tilde{R}_{nh})) \tilde{\tau} \dots \tilde{\tau} (D_H \tilde{\tau} \tilde{Z}(\tilde{S}_n, \tilde{R}_{nH})), \quad (6)$$

где  $H$  – общее число связанных прецедентов в группе;  $D_h$  – расстояние до  $h$ -го прецедента,

вычисляемое по (5);  $\tilde{Z}(\tilde{S}_n, \tilde{R}_{nh})$  – нечеткая возможность перехода в нечеткую ситуацию  $\tilde{S}_h$ ; « $\tilde{\tau}$ », « $\tilde{\rightarrow}$ » – операции нечеткого умножения и сложения соответственно.

Выражение (6) является обобщением выражения (5), которое используется для случая несвязанных прецедентов.

Если хотя бы один из связанных прецедентов предполагает возможность перехода в нежелательную ситуацию, все эти прецеденты исключаются из дальнейшего рассмотрения. Пример исключения связанных прецедентов с нежелательной ситуацией  $\tilde{S}_{14}$  приведен на рисунке 6.

Для повышения оперативности реагирования СТО на аварийные и опасные ситуации значения ситуационных признаков целевой ситуации  $\tilde{S}_{\text{цел}}$  и предельное значение  $d_{\text{кр}}$  могут быть заранее согласованы в соответствии с требованиями к обеспечению безопасности СТО (см. 2-й этап способа). Также может быть определено множество допустимых целевых ситуа-

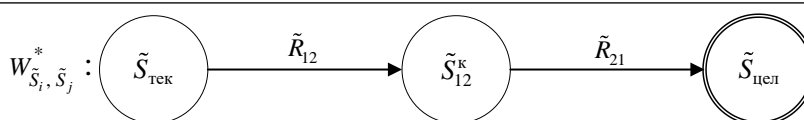


Рис. 4. Результат поиска последовательности прецедентов с наименьшим количеством прецедентных решений

Fig. 4. Search result for the sequence of precedents with the smallest number of precedent solutions

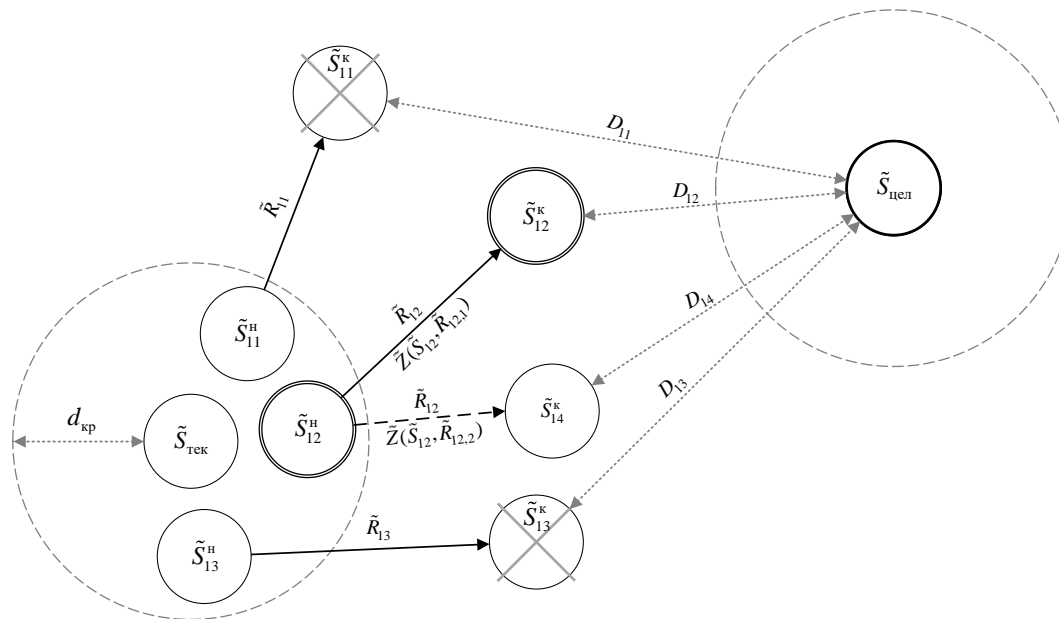


Рис. 5. Пример случая с возможностью перехода в незапланированную ситуацию

Fig. 5. Case example with the possibility of transition to an unplanned situation

ций, в которые возможен перевод СТО при возникновении аварийных и опасных ситуаций:

$$\{\tilde{S}_{\text{цел}}^1, \dots, \tilde{S}_{\text{цел}}^l, \dots, \tilde{S}_{\text{цел}}^L\},$$

где  $l = 1, \dots, L$ ,  $L$  – число допустимых целевых ситуаций.

Особенностью данного варианта является то, что выбор предпочтительной целевой ситуации будет выполняться не на основе выбранного критерия эффективности управления СТО, а на результатах оценки степени ее бли-

зости к текущей ситуации. С учетом этого на первом этапе способа дополнительно может осуществляться выбор допустимой целевой ситуации, наиболее близкой к текущей  $\tilde{S}_{\text{тек}}$ :

$$\tilde{S}_{\text{цел}} : \min_{l=1, \dots, L} (d(\tilde{S}_{\text{тек}}, \tilde{S}_{\text{цел}}^l)).$$

На рисунке 7 проиллюстрирован выбор из множества допустимых целевых ситуаций.

Применение предложенного способа управления СТО с определением набора допустимых целевых ситуаций целесообразно также, если

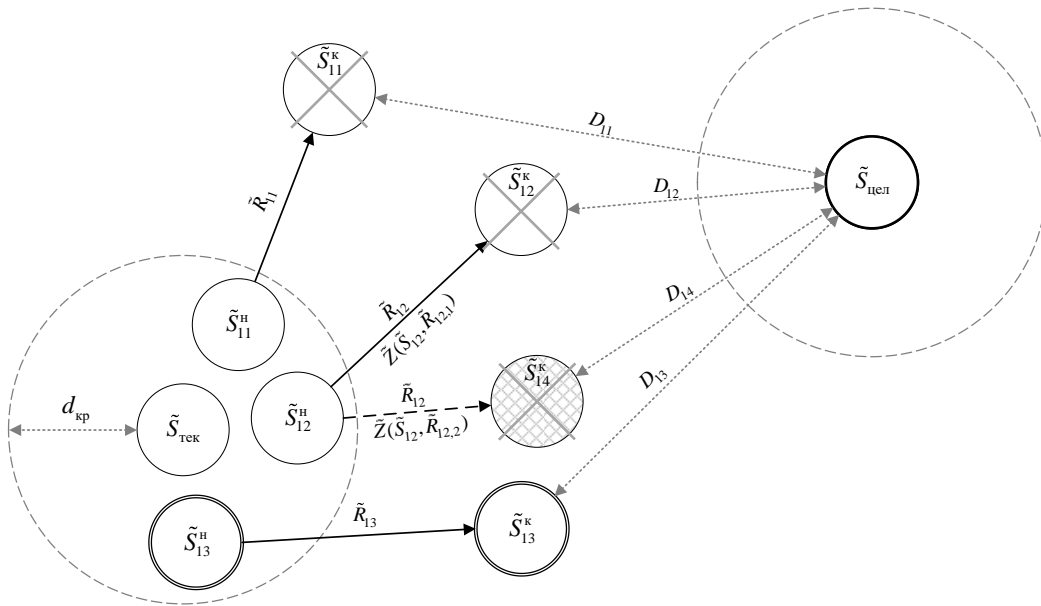


Рис. 6. Пример исключения связанных прецедентов с нежелательной ситуацией

Fig. 6. Exclusion example of related precedents with undesirable situation

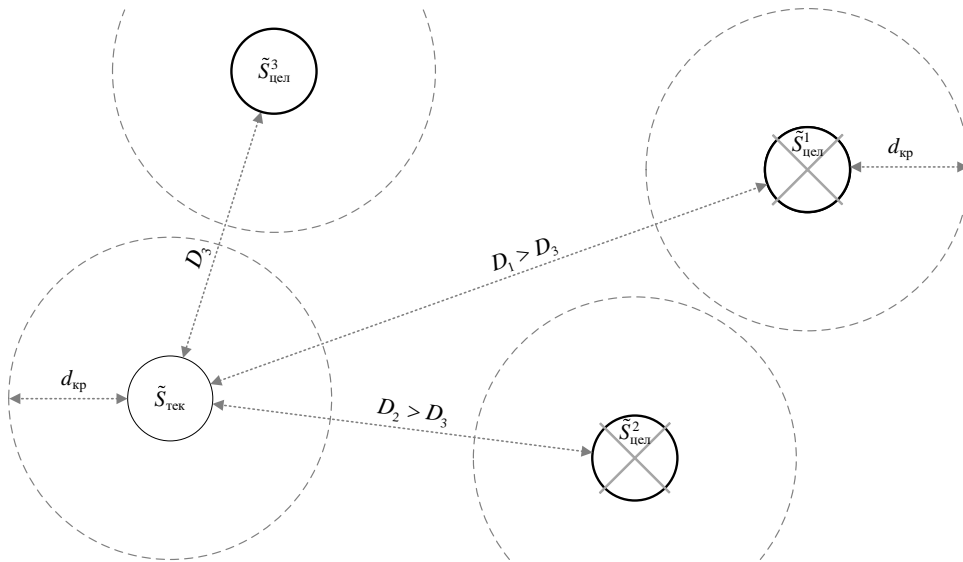


Рис. 7. Пример выбора из множества нечетких целевых ситуаций

Fig. 7. Choice example from a set of fuzzy target situations

в качестве нечетких ситуационных признаков, помимо показателей самих СТО, используются параметры, существенно зависящие от динамически изменяющихся факторов внешней среды.

### Алгоритмическая и программная реализация

На рисунке 8 приведена блок-схема алгоритма предложенного способа оперативного управления СТО по прецедентам на основе РНСПМ с критерием эффективности управления, заключающимся в минимизации числа управляющих решений для достижения целевой ситуации.

Исходными данными алгоритма является информация о нечеткой текущей ситуации  $\tilde{S}_{\text{тек}}$  и нечеткой целевой ситуации  $\tilde{S}_{\text{цел}}$ , в которую необходимо перевести СТО. Рассматривается пример алгоритма, в котором целевая ситуация задается в явном виде, при этом при необходимости может быть реализован дополнительный этап выбора ближайшей ситуации из набора  $\{\tilde{S}_{\text{цел}}^1, \dots, \tilde{S}_{\text{цел}}^l, \dots, \tilde{S}_{\text{цел}}^L\}$  допустимых целевых ситуаций. Также задается предельное значение  $d_{\text{кр}}$  степени близости ситуаций.

В блоке 4 алгоритма в качестве начальной устанавливается текущая нечеткая ситуация. Далее последовательно для каждого прецедента  $\tilde{c}_n, n = 1, \dots, N$ , из БНП определяются связанные прецеденты  $\{\tilde{c}_h\}, h = 1, \dots, H$ , то есть такие, у которых начальные ситуации  $\tilde{S}_h^n$  близки к начальной ситуации  $\tilde{S}_n^n$  рассматриваемого  $n$ -го прецедента, а схожие управляющие решения  $\tilde{R}_h^n \cong \tilde{R}_n^n$  приводят к различным конечным ситуациям  $\tilde{S}_h^k \not\cong \tilde{S}_n^k$ . Если связанные прецеденты не найдены, то для прецедента  $\tilde{c}_n$  определяется значение  $D_n$  (блок 11), вычисляемое в соответствии с выражением (5). Если для рассматриваемого  $n$ -го прецедента найдены связанные прецеденты, то для каждого из них, помимо вычисления значения  $D_h$  (блок 12), дополнительно оценивается возможность перехода  $\tilde{Z}_h$  (блок 10) в соответствии с выражением (4).

В блоке 13 рассчитывается скорректированное значение  $D$  с учетом риска перехода в незапланированные ситуации на основе обобщенной формулы (6), при этом, если связанные прецеденты не были найдены, возможность перехода устанавливается равной единице.

Если полученное значение  $D$  является минимальным, информация об управляющем решении и конечной ситуации данного прецедента сохраняется.

После рассмотрения всех прецедентов в БНП и определения наилучшего управляющего решения последнее включается в искомую последовательность. Затем осуществляется проверка достижения целевой ситуации (блок 19) в соответствии с выражением  $d(\tilde{S}_n^k, \tilde{S}_{\text{цел}}) \leq d_{\text{кр}}$ . Если целевая ситуация не была достигнута, то в качестве новой начальной ситуации устанавливается конечная ситуация  $\tilde{S}_n^k$  выбранного прецедента и алгоритм переходит к следующей итерации (блок 5). В противном случае осуществляется возврат сформированной последовательности управляющих решений и алгоритм завершает работу.

Для проверки адекватности и оценки эффективности предложенных РНСПМ и способа управления СТО по прецедентам разработаны программные средства, включающие в себя программные модули формирования БНП и прецедентного управления.

Реализация программных средств выполнена на языке Python 3.12.1, сильной стороной которого является гибкий механизм реализации объектно-ориентированного подхода к написанию кода, что позволяет значительно упростить процесс проектирования и поддержки сложных программных систем. Также важным преимуществом языка Python является наличие большого числа сторонних расширений и библиотек с открытым исходным кодом для решения широкого класса задач. Для осуществления математических операций с аппаратом нечеткой арифметики разработано собственное решение на основе библиотеки NumPy, предоставляющей поддержку векторных и матричных операций, а также возможность работы с многомерными массивами данных. Указанная библиотека реализована на языке C, что позволяет повысить скорость вычислений. Для формирования и администрирования БНП, взаимодействия с программными модулями, обмена данными применялась объектно-реляционная СУБД PostgreSQL.

### Результаты вычислительных экспериментов

С использованием разработанных программных средств проведены вычислительные эксперименты, целью которых явились про-



верка адекватности предложенных РНСПМ и оценка эффективности их применения. С помощью разработанной цифровой модели последовательного робота-манипулятора [19] была получена выборка из 1 000 опытов для формирования БНП. Эксперимент предполагал моделирование захвата деталей при трех различных начальных ситуациях:  $\tilde{S}_1$  – функциони-

рование в нормальных условиях;  $\tilde{S}_2$  – работа в условиях ограниченной видимости;  $\tilde{S}_3$  – наличие внешних воздействий на привод последовательного робота-манипулятора. Для сравнения использовалась экспертная НСМ типа «ситуация–действие», нечеткая база знаний которой сформирована на основе экспертной информации.

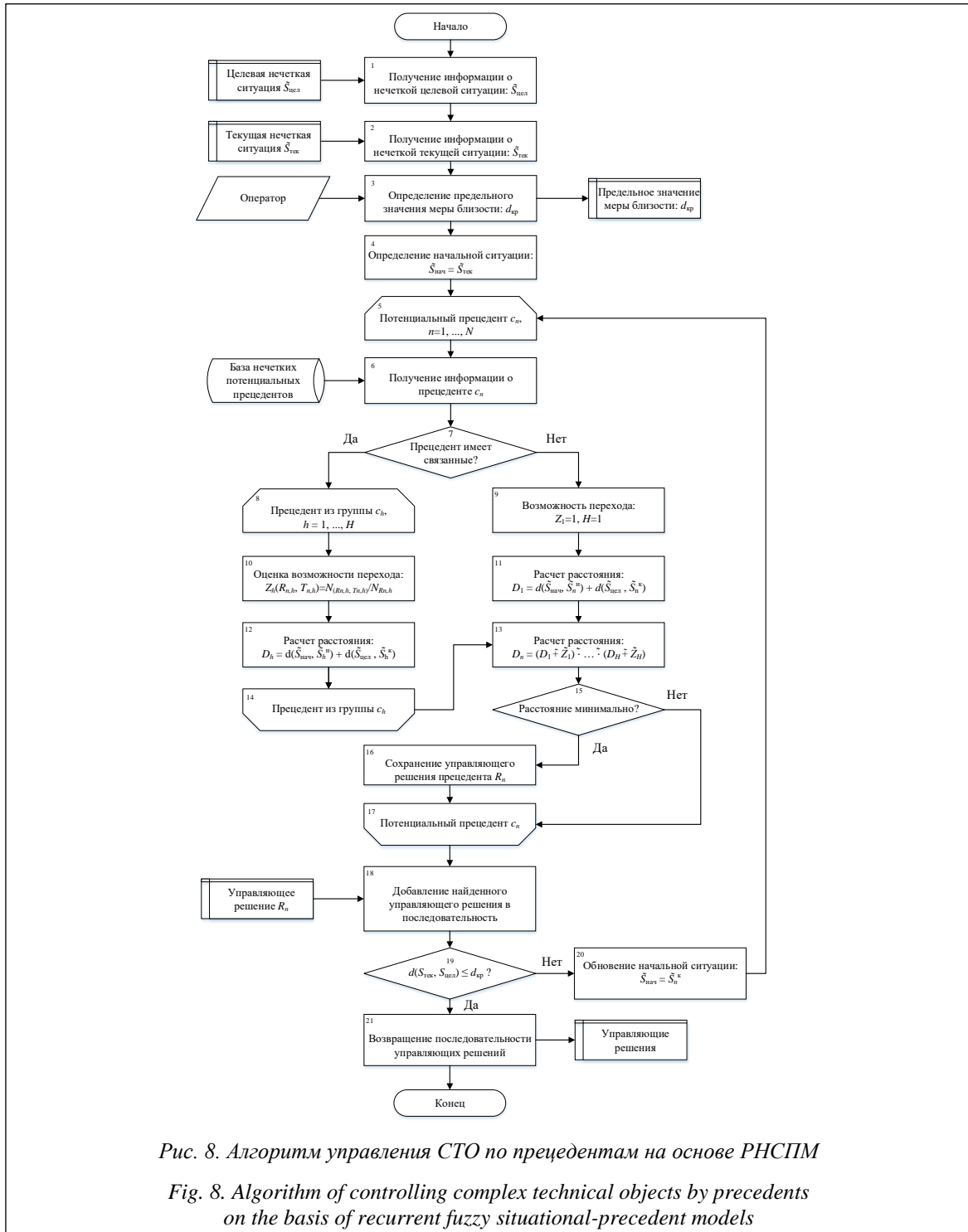


Рис. 8. Алгоритм управления СТО по прецедентам на основе РНСПМ

Fig. 8. Algorithm of controlling complex technical objects by precedents on the basis of recurrent fuzzy situational-precedent models

В таблице приведены результаты сравнительного анализа применения предложенной РНСПМ и экспертной НСМ типа «ситуация–действие» для различных вариантов начальной ситуации.

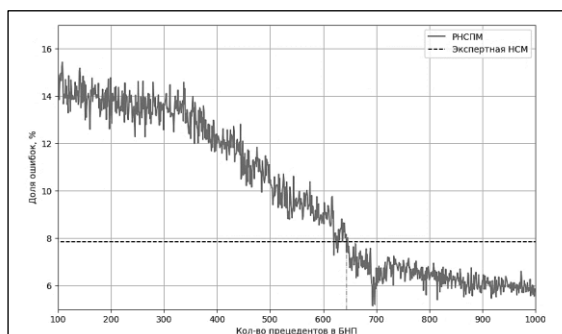
**Доля успешных захватов детали последовательного робота-манипулятора, %**

**Percentage of successful a detail by a robot-manipulator, %**

Начальная нечеткая ситуация	Экспертная НСМ «ситуация–действие»	РНСПМ
$\tilde{S}_1$	96	97
$\tilde{S}_2$	83	94
$\tilde{S}_3$	71	93

Из таблицы видно, что РНСПМ обеспечивает более высокую долю успешных захватов последовательного робота-манипулятора в условиях неопределенности и при возможности различной реакции СТО на одинаковые управляющие воздействия.

На рисунке 9 показано изменение эффективности применения РНСПМ при увеличении числа прецедентов в БНП (начальная ситуация  $\tilde{S}_2$ ). Для сравнения также приведены ре-



*Рис. 9. Доля ошибок при захвате детали роботом-манипулятором*

*Fig. 9. The percentage of errors when capturing a detail by a robot-manipulator*

зультаты применения экспертной НСМ типа «ситуация–действие» (которые не зависят от накопления прецедентов).

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что использование разработанных РНСПМ и способа управления СТО по прецедентам на базе этих моделей обеспечивает повышение эффективности управления последовательным роботом-манипулятором и при превышении определенного числа сформированных прецедентов (на рисунке 9 этому значению соответствуют 643 прецедента) обеспечивает лучшие результаты по сравнению с аналогом.

### Заключение

Для повышения эффективности оперативного управления СТО в условиях неопределенности предлагаются новый тип РНСПМ, а также способ и алгоритмы управления СТО по прецедентам на основе таких моделей.

Предложенный способ оперативного управления СТО по прецедентам отличается использованием итерационной процедуры поиска последовательности прецедентных управляющих решений. Он также обеспечивает повышение эффективности функционирования СТО при условии адаптации к изменению внутренних и внешних факторов.

Разработаны алгоритмические и программные средства, реализующие предложенные модели, способ и алгоритмы управления СТО.

В результате вычислительных экспериментов (на примере управления последовательным роботом-манипулятором) подтверждена адекватность предложенных моделей и выполнена оценка эффективности оперативного управления СТО по прецедентам с использованием созданных моделей, способа и алгоритмов в условиях неопределенности по сравнению с экспертной нечеткой ситуационной моделью типа «ситуация–действие».

### Список литературы

1. Филаретов В.Ф., Климчик А.С., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю., Зуев А.В. Интеллектуальные подводные робототехнические комплексы для выполнения осмотровых и технологических операций на морских газопроводах и добычных комплексах // Газовая промышленность. 2020. № 8. С. 30–38.
2. Балабанов А.Н., Безуглая А.Е., Шушляпин Е.А. Управление манипулятором подводного робота // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 6. С. 1307–1332. doi: 10.15622/ia.20.6.5.
3. Тимофеев А.Н., Ракшин Е.А., Заруцкий Н.В. Робототехническая система для ремонта и мониторинга труднодоступного оборудования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 4. С. 193–196.
4. Мещанов А.С., Губаева Э.И. Управление манипуляторами летательных аппаратов на скользящих режимах при инерционности приводов и инвариантности к возмущениям // Вестн. Технологического университета. 2020. Т. 23. № 7. С. 100–108.

5. Косицын А.А., Богомолов А.С., Кушников В.А. Задача снижения вероятности развития аварийных комбинаций событий в беспилотных авиационных системах // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 4. С. 18–34. doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-4-18-34.
6. Игнатъев В.В. Компенсация разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 423–431. doi: 10.15827/0236-235X.143.423-431.
7. Еремеев А.П., Сергеев М.Д., Петров В.С. Интеграция методов обучения с подкреплением и нечеткой логики для интеллектуальных систем реального времени // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 600–606. doi: 10.15827/0236-235X.144.600-606.
8. Goharimanesh M., Mehrkish A., Janabi-Sharifi F. A fuzzy reinforcement learning approach for continuum robot control. *J. of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, vol. 100, pp. 809–826. doi: 10.1007/s10846-020-01237-6.
9. Пучков А.Ю., Дли М.И., Тиндова М.Г. Метод решения обратной задачи кинематики на основе обучения с подкреплением при управлении роботами-манипуляторами // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 6. С. 120–133.
10. 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.
11. Chen C.-T., Chiu Y.-T. A study of dynamic fuzzy cognitive map model with group consensus based on linguistic variables. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, vol. 171, art. 120948. doi: 10.1016/j.techfore.2021.120948.
12. Nair A., Reckien D., van Maarseveen M.F.A.M. A generalised fuzzy cognitive mapping approach for modelling complex systems. *Applied Soft Computing*, 2019, vol. 84, art. 105754. doi: 10.1016/j.asoc.2019.105754.
13. 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.
14. Starodubtsev M., Bilousov M., Kamardin S., Makarenko H., Shybanov S. Models of technological processes management under conditions of uncertainty. *J. of Natural Sci. and Tech.*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 254–258.
15. Добрынин А.С., Гудков М.Ю., Койнов Р.С. Прецедентный подход к управлению инцидентами в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Программные системы и вычислительные методы. 2020. № 2. С. 45–52. doi: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040.
16. Черновалова М.В. Нечеткие прецедентные модели для управления проектами с использованием мультионтологического подхода // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 2. С. 4–16. doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-4-16.
17. Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечеткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоемкими системами на основе прецедентов // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 5. С. 59–76. doi: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-59-76.
18. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
19. Борисов В.В., Соколов А.М., Жарков А.П., Култыгин О.П. Решение обратной задачи кинематики для последовательных роботов манипуляторов на основе нечетких численных методов // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 113–126. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-113-126.

### Recurrent fuzzy situational-precedent models for operational control of complex technical objects

Andrey M. Sokolov<sup>1</sup>, Vadim V. Borisov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation

<sup>2</sup> Smolensk Branch of the Moscow Power Engineering Institute, Smolensk, 214013, Russian Federation

#### For citation

Sokolov, A.M., Borisov, V.V. (2024) ‘Recurrent fuzzy situational-precedent models for operational control of complex technical objects’, *Software & Systems*, 37(4), pp. 554–565 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.148.554-565

#### Article info

Received: 14.06.2024

After revision: 17.07.2024

Accepted: 30.07.2024

**Abstract.** The paper deals with the issues of operational management of complex technical objects (CTO) functioning in dynamically changing, uncertain environmental conditions, risks of dangerous and emergency situations. The authors analyzed the approaches to situational management of CTO. The analysis showed that a promising solution for operational management of these objects is the use of fuzzy models of the “Situation-Action” type. The main limitation of these models is the need for additional expert information to update the fuzzy knowledge base, as well as the lack of consideration of transition to different situations when applying similar control actions. To eliminate these disadvantages, the authors propose the application of the precedent approach. It involves accumulation of information about the CTO functioning in the base of fuzzy precedents for the purpose of their further use in the choice of management decisions. The authors proposed a new type of recurrent fuzzy situational-precedent models, as well as a method and algorithms for operational management of CTO by precedents based on these models. The author's solution differs in the application of iterative procedure of search and application of a sequence of precedent control decisions. This procedure provides an increase in the efficiency of CTO functioning under the condition of adaptation to changes in internal and external factors. The authors designed algorithmic and software tools that implement the proposed models, method and algorithms of CTO control. In the course of computational experiments, they confirmed the adequacy of the proposed models. The authors evaluated the effectiveness of oper-

ational CTO management by precedents using the created models, method and algorithms in conditions of uncertainty in comparison with the expert fuzzy situational network of the “Situation-Action” model.

**Keywords:** recurrent fuzzy situational-precedent model, fuzzy situational network of the “Situation-Action” model, precedent, operational management

**Acknowledgements.** The paper was carried out under the government assignment, project no. FSWF-2023-0012

### References

1. Filaretov, V.F., Klimchik, A.S., Yukhimets, D.A., Konoplin, A.Yu., Zuev, A.V. (2020) ‘Intelligent underwater robotics for inspection and process operations on offshore gas pipelines and production systems’, *Gas Industry J.*, (8), pp. 30–38 (in Russ.).
2. Balabanov, A.N., Bezuglaya, A.E., Shushlyapin, E.A. (2021) ‘Underwater robot manipulator control’, *Informatics and Automation*, 20(6), pp. 1307–1332 (in Russ.). doi: 10.15622/ia.20.6.5.
3. Timofeev, A.N., Rakshin, E.A., Zarutskiy, N.V. (2022) ‘A robotic system for repair and monitoring of hard-to-reach equipment’, *Science and Business: Ways of Development*, (4), pp. 193–196 (in Russ.).
4. Meshchanov, A.S., Gubaeva, E.I. (2020) ‘Control of aircraft manipulators in sliding modes with drive inertia and non-invariance to perturbations’, *Herald of Technological University*, 23(7), pp. 100–108 (in Russ.).
5. Kositsyn, A.A., Bogomolov, A.S., Kushnikov, V.A. (2024) ‘The task of reducing the probability of developing combinations of emergency events in unmanned aerial vehicles’, *J. of Applied Informatics*, 19(4), pp. 18–34 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2024-19-4-18-34.
6. Ignatyev, V.V. (2023) ‘Compensation of various types of uncertainties when controlling a technical object using intelligent controllers’, *Software & Systems*, 36(3), pp. 423–431 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.143.423-431.
7. Eremeev, A.P., Sergeev, M.D., Petrov, V.S. (2023) ‘Integration of reinforcement learning methods and fuzzy logic for intelligent real-time systems’, *Software & Systems*, 36(4), pp. 600–606 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.144.600-606.
8. Goharimanesh, M., Mehrkish, A., Janabi-Sharifi, F. (2020) ‘A fuzzy reinforcement learning approach for continuum robot control’, *J. of Intelligent & Robotic Systems*, 100, pp. 809–826. doi: 10.1007/s10846-020-01237-6.
9. Puchkov, A.Yu., Dli, M.I., Tindova, M.G. (2023) ‘A method for solving the inverse kinematics problem based on reinforcement learning for controlling robotic manipulators’, *J. of Applied Informatics*, 18(6), pp. 120–133 (in Russ.).
10. Borisov, V.V. (2020) ‘Fuzzy cognitive models for the research of complex systems and processes’, *Speech Technology*, (1-2), pp. 48–62 (in Russ.). doi: 10.58633/2305-8129\_2020\_1-2\_48.
11. Chen, C.-T., Chiu, Y.-T. (2021) ‘A study of dynamic fuzzy cognitive map model with group consensus based on linguistic variables’, *Technological Forecasting and Social Change*, 171, art. 120948. doi: 10.1016/j.techfore.2021.120948.
12. Nair, A., Reckien, D., van Maarseveen, M.F.A.M. (2019) ‘A generalised fuzzy cognitive mapping approach for modelling complex systems’, *Applied Soft Computing*, 84, art. 105754. doi: 10.1016/j.asoc.2019.105754.
13. Borisov, V.V., Avramenko, D.Yu. (2021) ‘Fuzzy situational control of complex systems based on their composite hybrid modeling’, *Systems of Control, Communication and Security*, (3), pp. 207–237 (in Russ.).
14. Starodubtsev, M., Bilousov, M., Kamardin, S., Makarenko, H., Shybanov, S. (2024) ‘Models of technological processes management under conditions of uncertainty’, *J. of Natural Sci. and Tech.*, 3(1), pp. 254–258.
15. Dobrynin, A.S., Gudkov, M.Yu., Koynov, R.S. (2020) ‘A precedent approach to incident management in automated process control systems’, *Software Systems and Computational Methods*, (2), pp. 45–52 (in Russ.). doi: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040.
16. Chernovalova, M.V. (2021) ‘Fuzzy case models for project management using a multi-ontology approach’, *J. of Applied Informatics*, 16(2), pp. 4–16 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-4-16.
17. Dli, M.I., Chernovalova, M.V., Sokolov, A.M., Morgunova, E.V. (2023) ‘Fuzzy dynamic ontological model for decision support of energy-intensive systems management based on precedents’, *J. of Applied Informatics*, 18(5), pp. 59–76 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-59-76.
18. Melikhov, A.N., Bershteyn, L.S., Korovin, S.Ya. (1990) *Situational Advising Systems with Fuzzy Logic*. Moscow, 272 p. (in Russ.).
19. Borisov, V.V., Sokolov, A.M., Zharkov, A.P., Kulygin, O.P. (2022) ‘Solving the inverse kinematics problem for sequential robot manipulators based on fuzzy numerical methods’, *J. of Applied Informatics*, 17(4), pp. 113–126 (in Russ.). doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-113-126.

### Авторы

**Соколов Андрей Максимович**<sup>1</sup>,  
аспирант, ansokol98@mail.ru

**Борисов Вадим Владимирович**<sup>2</sup>,  
д.т.н., профессор, vbor67@mail.ru

### Authors

**Andrey M. Sokolov**<sup>1</sup>, Postgraduate Student,  
ansokol98@mail.ru

**Vadim V. Borisov**<sup>2</sup>, Dr.Sci. (Engineering),  
Professor, vbor67@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»,  
г. Москва, 111250, Россия

<sup>2</sup> Смоленский филиал Национального  
исследовательского университета МЭИ,  
г. Смоленск, 214013, Россия

<sup>1</sup> National Research University “MPEI”,  
Moscow, 111250,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Smolensk Branch of the Moscow  
Power Engineering Institute,  
Smolensk, 214013, Russian Federation