

## ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ

И. Г. Иванов

*Рассмотрена возможность применения методов на основе прецедентов (накопленного опыта) в системах поддержки принятия решений при проведении государственных испытаний образцов космических средств. Основное внимание уделяется методам извлечения прецедентов. Предложенный аппарат предлагается использовать для автоматизации процессов анализа испытаний и оперативного поиска разрешения нештатных и аварийных ситуаций в процессе испытаний космических средств.*

*Ключевые слова:* поддержка принятия решений, система испытаний, космическое средство, государственные испытания, главная оперативная группа управления.

### Введение

Современные исследования и разработки по созданию перспективных образцов космических средств (КСр) сталкиваются с необходимостью применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) на этапе проведения испытаний КСр. Существующие ИСППР непосредственно связаны с актуальной в области искусственного интеллекта (ИИ) проблемой моделирования правдоподобных рассуждений, так называемых рассуждений «здравого смысла» [1, 2]. Использование рассуждений в ИСППР для мониторинга и управления такими сложными техническими объектами, как КСр, и процессами различной природы позволяет осуществлять оперативный анализ проблемной ситуации и помогает лицам, принимающим решения (ЛПР), в качестве которых выступает эксплуатирующий персонал испытательной организации, члены главных оперативных групп управления (ГОГУ), разработчики образцов КСр, находить адекватные и эффективные управляющие воздействия с целью разрешения нештатных и аварийных ситуаций. На ГОГУ возложены задачи по оперативному руководству испытаниями и отработкой программ летных (государственных) испытаний КСр, контролю выполнения работ, организации взаимодействия эксплуатирующего персонала и представителей промышленности, анализу выполнения программы испытаний, разработке и выдаче рекомендаций по восстановлению функционирования образца КСр при возникновении аварийных и нештатных ситуаций.

Наряду с достаточно широко используемыми в ИИ методами правдоподобного вывода на основе индукции, абдукции, аргументации и аналогии (например, [1 – 4]) в последнее время стали активно применяться методы на основе прецедентов [4 – 6]. Данные методы могут быть эффективны в ИСППР

для анализа испытаний КСр и поиска разрешения нештатных (аварийных) ситуаций, а также для обучения и тренировки эксплуатирующего персонала.

До настоящего времени разработано большое количество различных, в основном зарубежных систем, реализующих механизмы рассуждений на основе прецедентов и успешно применяемых в разных областях (медицина, экономика, образование, технические системы и т. д.). Несмотря на имеющиеся отечественные теоретические и прикладные работы в данной области [7 – 9], сегодня ощущается острая нехватка отечественных программных продуктов для моделирования рассуждений на основе прецедентов для интеллектуальных систем типа ИСППР, которые смогли бы автоматизировать процесс парирования нештатных (аварийных) ситуаций при проведении испытаний перспективных образцов КСр. Основное внимание уделяется способам представления прецедентов и их извлечения из библиотеки прецедентов (БП) системы для последующего применения. С этой целью рассмотрим возможность использования нескольких методов извлечения прецедентов с учетом коэффициентов важности параметров, задаваемых экспертами в исследуемой области.

### Постановка задачи

В настоящее время актуальной проблемой в области ИИ является проблема конструирования ИСППР, ориентированных на открытые и динамические сложные области [10]. В основе таких систем лежит интеграция способных к адаптации, модификации и обучению моделей представления и оперирования знаниями, ориентированных на специфику проблемной (предметной) области и соответствующий тип неопределенности, что отражает их способность к развитию и изменению своего состояния.

При реализации методов на основе прецедентов в ИСППР необходимо учитывать специфику подобных систем:

- необходимость получения решения в условиях временных ограничений, определяемых особенностями испытаний КСр, например, для испытываемого космического аппарата (КА) – это фактор космического пространства, вид КА, особенности управления и применения КА;

- необходимость учета временного фактора при описании нештатной (аварийной) ситуации и в процессе поиска решения, когда промедление при принятии решения может привести к физической утрате образца КСр;

- невозможность получения всей объективной информации, необходимой для решения, и в связи с этим использование субъективной, экспертной информации;

- многовариантность поиска;

- необходимость применения методов правдоподобного вывода и активного участия в процессе поиска ЛПР;

- наличие недетерминизма, необходимость коррекции и введения дополнительной информации в базу знаний системы при поиске решения.

Обобщенная структура ИСППР представлена на рис. 1.

База данных включает: нормативно-технические документы по созданию и организации испытаний КСр; результаты испытаний предшествующих КСр; отчетные материалы по результатам анализа нештатных и аварийных ситуаций; отчеты по результатам рекламационной работы и сообщений о неисправности КСр и т. д.

База знаний включает: программы, методы и методики испытаний КСр; методы оценки и контроля результатов испытаний КСр; алгоритмы и программы обработки статистической и динамической информации в ходе проведения испытаний КСр; алгоритмы и способы обработки экспертной информации и т. д.



Рис. 1. Обобщенная структура ИСППР

Методы поиска решения на основе прецедентов могут применяться во многих блоках ИСППР (анализаторе, блоках поиска решения, объяснения, моделирования и прогнозирования) и позволяют повысить эффективность и оперативность принятия решений ЛПР в различных нештатных (аварийных) ситуациях при проведении испытаний перспективных образцов КСр.

Необходимо провести исследования по оценке возможности применения методов на основе прецедентов в ИСППР в процессе испытаний перспективных КСр.

### Решение задачи

В процессе испытаний КСр в настоящее время применяется следующий подход: с одной стороны, экспериментально определяются характеристики объекта испытаний, т. е. решается задача идентификации, а с другой – проверяется соответствие их предъявляемым требованиям или решается задача технического диагностирования образца КСр, которая, в свою очередь, распадается на подзадачи контроля технического состояния (ТС), поиска места и определения отказа (неисправности), прогнозирования ТС [11]. При определении причины отказа (неисправности) специалисты эксплуатирующей организации оформляют рекламационный акт, в котором на основании обработки телеметрической информации (статистической информации об отказе) и экспертном мнении специалистов указывают предполагаемую причину возникновения отказа (выхода из строя) образца КСр.

Недостатками существующего подхода являются:

- низкая оперативность принятия решения в процессе испытаний;

- отсутствие автоматизированного процесса поддержки принятия решений на основе прецедентов с учетом базы прецедентов;

- отсутствие аппарата поддержки принятия решений при необходимости проведения форсированного испытания перспективных КСр в угрожаемый период.

К преимуществам предлагаемого подхода можно отнести:

- возможность напрямую использовать опыт, накопленный системой, без интенсивного привлечения эксперта в той или иной предметной области;

- возможность сокращения времени поиска решения за счет использования уже имеющегося решения для подобной задачи;

- возможность исключения повторного получения ошибочного решения;

- отсутствие необходимости углубленного изучения и использования всех имеющихся знаний по

предметной области, так как можно ограничиться учетом только существенных особенностей предметной области;

– возможность применения эвристик, повышающих эффективность процесса поиска решения.

К числу недостатков рассуждений на основе прецедентов относятся:

– поверхностные знания о предметной области при описании прецедентов, которыми обычно и ограничиваются;

– наличие большого количества прецедентов может привести к снижению производительности системы;

– определение критериев для индексации и сравнения прецедентов является проблематичным;

– сложности с отладкой алгоритмов определения подобных (аналогичных) прецедентов;

– невозможность получения решения задач, для которых нет прецедентов или степень их сходства (подобия) меньше заданного порогового значения.

Основная цель использования аппарата прецедентов в рамках ИСППР заключается в выдаче готового решения ЛПР для текущей ситуации на основе прецедентов, которые уже имели место в прошлом при проведении испытаний предшествующих образцов КСр.

Существует целый ряд методов извлечения прецедентов и их модификаций. Рассмотрим наиболее распространенные методы.

Метод ближайшего соседа (NN – Nearest Neighbor) – наиболее используемый метод сравнения и извлечения прецедентов. Он позволяет вычислять степень сходства текущей проблемной ситуации и прецедентов из БП. Для определения степени сходства на множестве параметров, используемых для описания прецедентов и текущей ситуации, вводится некоторая метрика. Далее, в соответствии с выбранной метрикой, определяется расстояние от целевой точки, соответствующей текущей проблемной ситуации, до точек, представляющих прецеденты из БП, и выбирается ближайшая точка к целевой.

Различные модификации метода ближайшего соседа широко применяются для решения задач классификации, кластеризации, регрессии и распознавания образов. Обычно решение выбирается на основе нескольких ближайших точек (соседей), а не одной (метод  $k$  ближайших соседей).

Основными преимуществами метода ближайшего соседа являются простота реализации и универсальность в смысле независимости от специфики конкретной проблемной области. К существенным недостаткам метода можно отнести сложность выбора метрики для определения степени сходства и прямую зависимость требуемых вычислительных ресур-

сов от размера БП, а также неэффективность при работе с неполными и плохо определенными (так называемыми «зашумленными») исходными данными.

Метод извлечения прецедентов на основе деревьев решений базируется на нахождении требуемых прецедентов путем разрешения вершин дерева решений. Каждая вершина дерева указывает, по какой ее ветви следует осуществлять дальнейший поиск решения. Выбор ветви производится на основе информации о текущей проблемной ситуации. Необходимо добраться до концевой вершины, которая соответствует одному или нескольким прецедентам.

Если концевая вершина связана с некоторым подмножеством прецедентов, то тогда для выбора наиболее подходящего из них может использоваться метод ближайшего соседа. Такой подход рекомендуется применять для больших БП, так как основная часть работы по извлечению прецедентов выполняется заранее на этапе построения дерева решений, что значительно сокращает время поиска решения.

Метод извлечения прецедентов на основе знаний, в отличие от предыдущих методов, позволяет учесть знания экспертов (ЛПР) по конкретной предметной области (коэффициенты важности параметров, выявленные зависимости и т. д.) при извлечении прецедентов. Данный метод реализует подход, основанный на индексации прецедентов специальным образом (семантической индексации). При определении прецедентов учитываются важности параметров прецедентов, заданные экспертом или ЛПР, и другая информация, позволяющая учесть знания о конкретной предметной области. За счет этого значительно сокращается время поиска решения, что является существенным достоинством данного метода.

Процесс выполнения индексации усложняется с ростом числа прецедентов в БП и необходимостью проводить индексацию динамически. Для реализации метода требуется предусмотреть в структуре прецедентов и БП возможности представления и хранения семантической информации, а также дополнительные затраты на поддержание БП для учета знаний о конкретной предметной области. Этот метод может успешно применяться совместно с другими методами извлечения прецедентов, особенно когда БП имеет большие размеры и предметная область является открытой и динамической.

Рассмотрим метод извлечения прецедентов с учетом их применимости. В большинстве систем, использующих механизмы рассуждений на основе прецедентов, предполагается, что наиболее схожие с текущей проблемной ситуацией прецеденты яв-

ляются и наиболее применимыми в этой ситуации. Однако это не всегда так. В основе методов извлечения на основе применимости прецедентов лежит тот факт, что извлечение прецедентов базируется не только на их сходстве с текущей проблемной ситуацией, но и на том, насколько хорошую для желаемого результата модель они собой представляют. Таким образом, на выбор извлекаемых прецедентов влияет возможность их успешного применения (адаптации) в конкретной ситуации, т. е. наличие сведений о их применимости в сложившейся ситуации. В некоторых системах эта проблема решается путем сохранения прецедентов вместе с комментариями по их применению. Использование данного метода позволяет сделать поиск решения более эффективным, заранее отбрасывая часть заведомо неперспективных прецедентов.

Помимо рассмотренных методов извлечения прецедентов могут успешно применяться и другие методы (например, аппарат искусственных нейронных сетей – ИНС).

Рассмотрим предлагаемый механизм поиска решения на основе прецедентов в ИСППР. Обобщенная архитектура модели поиска решения на основе прецедентов – конструктор БП (КБП) – приведена на рис. 2.

Основными компонентами КБП, отражающими его функциональные возможности, являются:

- блок анализа текущей ситуации, сложившейся на объекте, предназначенный для предварительной обработки информации о состоянии образца КСр (данных о системах КСр, оперативной БД, ЛПР);

- блок настройки БП, обеспечивающий возможность работы эксперта с БП (формирование структуры БП, загрузка БП, сохранение БП и т. д.);

- блок поиска решения, реализующий механизмы правдоподобных рассуждений на основе прецедентов (осуществляет извлечение прецедентов для проблемной ситуации);

- блок выдачи результатов, осуществляющий вывод результатов (диагнозов и рекомендаций) пользователю (ЛПР) для проблемной ситуации на основе уже имевших место прецедентов с указанием степени сходства указанных прецедентов с текущей ситуацией;

- БП с прецедентами, уже имевшими место при управлении данным объектом и его подсистемами или заданными экспертом на основе его собственного опыта;

- интерфейс с пользователями (экспертом и ЛПР) и внешней средой.

Инструментальное средство КБП возможно применить в прототипе ИСППР для решения задач

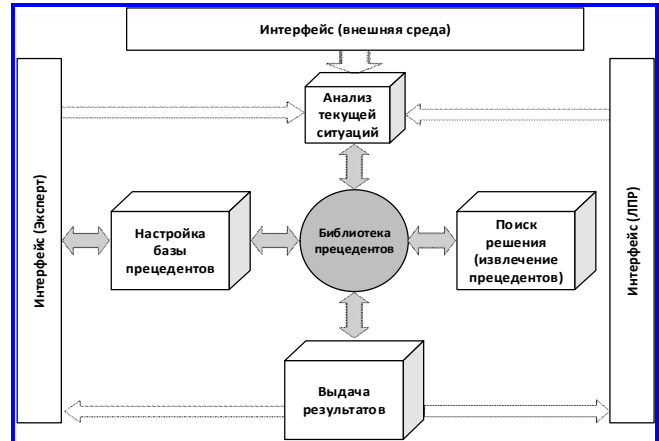


Рис. 2. Структура модели поиска решения на основе прецедентов



Рис. 3. Структура системы сбора, обработки и анализа данных о функционировании КСр

экспертной диагностики и оперативного управления таким сложным объектом, как КСр. Как правило, сложные объекты декомпозируются на технологические подсистемы (в КА это система управления движением, бортовая аппаратура командно-измерительной системы, бортовая цифровая вычислительная машина, система электропитания и др.) и могут функционировать в различных режимах.

Для анализа результатов испытаний и статистики отказов образца КСр информация аккумулируется подразделениями, ответственными за проведение испытания образца КСр (анализ испытаний). В случае, когда требуется немедленное вмешательство в процесс испытания (выявленное несоответствие характеристик образца КСр требованиям заказчика), информация анализируется на предмет выявления признаков, характеризующих показатели качества, надежности и выполнения целевой задачи. Далее экспертами принимается решение о



целесообразности проведения дальнейшего этапа испытаний. В случае, когда мероприятия по оценке неисправности (нештатной ситуации) КСр основываются на собранной за продолжительный период статистике, требуется собрать всю информацию о качестве из отчетов по ее анализу (рис. 3).

Для описания сложного объекта и его подсистем используется конечное множество параметров, состояние объекта характеризуется набором значений этих параметров. В случае появления аномальных значений телеметрируемых параметров возникает необходимость применения методов правдоподобных рассуждений, в частности, методов поиска решения на основе прецедентов для оперативного принятия решения. Дальнейшая работа связана с исследованием возможности более сложного структурированного представления прецедентов (в частности, объектно-ориентированного) и реализацией извлечения прецедентов на базе методов структурной аналогии и аналогии на основе парного соответствия с применением элементов онтологического подхода.

### Заключение

Исследованы актуальные вопросы из поставленной задачи. Рассмотрены основные способы представления и извлечения прецедентов в плане их применения в ИСППР на этапе проведения испытаний образцов КСр. Основное внимание уделено проблеме извлечения прецедентов из БП системы.

Предложен механизм поиска решения на основе прецедентов в ИСППР, который предлагается использовать для решения задач диагностики в реальном масштабе времени в ходе оценки технического состояния образца КСр на этапе проведения летных (государственных) испытаний космической системы (комплекса) военного и двойного назначения.

### Литература

1. Поспелов Д. А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов / Д. А. Поспелов. – Москва : Радио и связь, 1989. – 184 с.

2. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. / В. Н. Вагин, Е. Ю. Головина, А.А. Загорянская [и др.] ; под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. – 2-е изд. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 712 с.

3. Об интеллектуальном анализе данных / В. К. Финн // Новости искусственного интеллекта. – 2004. – № 3. – С. 3 – 18.

4. Реализация методов поиска решения на основе аналогий и прецедентов в системах поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Вестник МЭИ. – 2006. – № 2. – С. 77 – 87.

5. Использование прецедентов для обоснования мероприятий по предотвращению отказов механических систем / А. Ф. Берман, О. А. Николайчук, А. И. Павлов [и др.] // Труды 11-й национальной конференции по ИИ с международным участием (КИИ-2008, г. Дубна, Россия). – В 3-х т. – Т. 2. – М. : 2008. – С. 106 – 113.

6. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 2. – С. 45 – 57.

7. Карпов Л. Е., Юдин В. Н. Методы добычи данных при построении локальной метрики в системах вывода по прецедентам / Л. Е. Карпов, В. Н. Юдин. – Москва : ИСП РАН, 2006. – № 18. [препринт].

8. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 3. – С. 39 – 62.

9. Реализация методов поиска решения на основе аналогий и прецедентов в системах поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Вестник МЭИ. 2006. – № 2. – С. 77 – 87.

10. Остроух А. В. Интеллектуальные системы / А. В. Остроух. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2015. – 110 с.

11. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 24 с.

Поступила в редакцию 03.12.2019

*Игорь Геннадьевич Иванов, старший научный сотрудник, т. 8 (916) 889-60-29, e-mail: igorivanov-90@yandex. (Главный испытательный космический центр МО РФ имени Г.С. Титова).*

## SUPPORT OF DECISION MAKING DURING TESTS OF PERSPECTIVE SPACE AREAS BASED ON PRECEDENTS

I. G. Ivanov

*The paper considers the possibility of applying methods based on precedents (accumulated experience) in decision support systems during state tests of spacecraft samples. The focus is on use case extraction methods. The proposed apparatus is proposed to be used to automate*

*the processes of test analysis and the operational search for the resolution of emergency and emergency situations during the testing of space vehicles.*

**Key words:** *decision support, test system, space vehicle, state tests, main operational control group.*

### References

1. Pospelov D. A. Modeling of reasoning. Experience in analyzing thought processes / D. A. Pospelov. – Moscow : Radio and communications, 1989. – 184 p.
2. Authentic and credible inference in intelligent systems. / V. N. Vagin, E.Iu. Golovina, A.A. Zagorianskaia [et al.] ; edited by V. N. Vagin, D. A. Pospelov. – 2<sup>nd</sup> ed. – Moscow : FIZMATLIT, 2008. – 712 p.
3. About intellectual analysis of data / V. K. Finn // Artificial intelligence news. – 2004. – No. 3. – Pp. 3 – 18.
4. Implementation of methods of search for solutions based on analogies and precedents in decision support systems / P. R. Varshavskii, A. P. Ereemeev // Bulletin of Moscow Power Engineering Institute. – 2006. – No. 2. – Pp. 77 – 87.
5. Use of precedents for justification of measures for prevention of failures in mechanical systems / A.F. Berman, O. A. Nikolaichuk, A.I. Pavlov [et al.] // Proceedings of the 11<sup>th</sup> National Conference on Artificial Intelligence with International Participation (CAI-2008, Dubna, Russia). – In 3 volumes. – Vol. 2. – M. : 2008. – Pp. 106 – 113.
6. Modeling of reasoning based on precedents in intelligent decision support systems / P. R. Varshavskii, A. P. Ereemeev // Artificial intelligence and decision-making. – 2009. – No. 2. – Pp. 45 – 57.
7. Karpov L. E., Iudin V. N. Methods of data mining during construction of local metrics in precedent-based inference systems / L. E. Karpov, V. N. Iudin. – Moscow : Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2006. – No. 18. [preprint].
8. Methods of credible reasoning based on analogies and precedents for intelligent decision support systems / P. R. Varshavskii, A. P. Ereemeev // Artificial intelligence news. – 2006. – No. 3. – Pp. 39 – 62.
9. Implementation of methods of search for solutions based on analogies and precedents in decision support systems / P.R. Varshavskii, A. P. Ereemeev // Bulletin of Moscow Power Engineering Institute. 2006. – No. 2. – Pp. 77 – 87.
10. Ostroukh A. V. Intelligent systems / A. V. Ostroukh. – Krasnoyarsk : Scientific and Innovation Center, 2015. – 110 p.
11. GOST 16504–81. The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. – Moscow : Standartinform, 2011. – 24 p.

**Igor Gennadevich Ivanov**, Senior Researcher, tel.: +7 (916) 889-60-29,  
e-mail: igorivanov-90@yandex.  
(Titov Main Test and Space Systems Control Centre).