

УДК 681.36:58.362

В.П. Ларин, В.А. Смирнов

## Интеллектуализация технологии приемочного контроля сложных технических объектов

Рассмотрены вопросы проектирования систем приемочного контроля сложных технических объектов. Показано, что для обеспечения высокой эффективности приемочного контроля необходима интеллектуальная автоматизация процесса принятия решений по полученным результатам. Предложена методика формирования моделей прецедентов и библиотеки прецедентов для применения в интеллектуальной системе поддержки принятия решений при анализе и оценке результатов контроля и диагностирования.

**Ключевые слова:** приемочный контроль, проектирование технологии контроля, техническое состояние объекта, инциденты в результатах контроля, принятие решений, операции с прецедентами, модель прецедентов, библиотека прецедентов.

Происходящие в последние годы неудачные запуски ракет различного назначения и разных классов являются свидетельством серьезных проблем с приемочным контролем аппаратуры ракетной техники. Стремительное развитие конструирования и технологии электронной аппаратуры, увеличение степени её конструктивной интеграции и уровня функциональности, к сожалению, не сопровождаются адекватным развитием теории и практики приемочного контроля бортовой аппаратуры летательных аппаратов.

Целью данной публикации является рассмотрение научно-методических вопросов технологического проектирования системы приемочного контроля сложных технических объектов на примере бортовых автоматизированных систем управления (БАСУ). Специфические особенности БАСУ как объекта контроля и диагностирования подробно рассмотрены в [1].

Конечной целью технологического проектирования является создание технологической системы приемочного контроля, выполняющей в свете современных требований задачи принятия объективных и достоверных решений о состоянии объекта контроля. Объективная и достоверная оценка состояния означает полное исключение принятия ошибочных решений по результатам контроля с максимальным устранением человеческого фактора из этого процесса.

Рассматриваемая аппаратура БАСУ относится к группе аппаратуры изделий одноразового использования (ракеты, гиперзвуковые ЛА разового использования), входящей в класс бортовой аппаратуры ЛА. Отсюда следуют специфические требования и ограничения при ее отработке на надежность [2], которая заключается в достижении высокого уровня безотказности на протяжении времени использования по назначению, т.е. при ограниченном ресурсе.

Практика проведения приемочного контроля сложных технических изделий свидетельствует о значительных затратах времени на принятие решений при некоторых неопределенностях, возникающих в виде инцидентов в результатах проверок. Виды и содержание таких неопределенностей при контроле бортовой аппаратуры подробно рассмотрены в публикациях [2, 3].

Таким образом, эффективность контроля состояния БАСУ существенно зависит от вероятности правильного распознавания его технического состояния, которое непосредственно влияет на качество функционирования аппаратуры, что в конечном итоге определяет вероятность выполнения полетного задания. Необходимо использование наряду с классическими подходами новых интеллектуальных методов, позволяющих эффективно и качественно осуществлять процесс контроля параметров изделия с учетом неполноты и неопределенности полученной при контроле информации. Интеллектуальные методы основываются на определенной базе знаний, построенной с использованием различных моделей представления знаний, таких как продукционная модель, семантические сети, базы, основанные на прецедентах.

В области разработки и реализации эффективных методов и алгоритмов весьма актуальными являются задачи моделирования правдоподобных рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР). При этом для получения эффективно

функционирующего изделия необходимо, чтобы соответствующим выходным эффектом обладала и система контроля и диагностирования, используемая при приемочном контроле, т.е. необходимо обеспечить ее нахождение в заданном классе состояний. Следовательно, необходимо расширение функциональных возможностей контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) за счет организации интеллектуальной поддержки принятия решения. Это условие характерно для систем диагностического контроля, систем предполетного обслуживания и т.п. Проектирование приемочного контроля должно проводиться с использованием системного подхода, заключающегося в целостном представлении объекта контроля, процесса контроля, КПА и лица, принимающего решения (ЛПР), в виде технологической системы контроля в соответствии с ГОСТ 27.202 [4].

Методы рассуждения на основе прецедентов, или СВР-методы, широко применяются в системах экспертной диагностики. Данные механизмы позволяют активно использовать накопленный системой опыт при решении новых, неизвестных задач. Наличие подобных механизмов позволяет ЛПР осуществлять выбор более адекватных управляющих воздействий при управлении процессами различной природы и сложными объектами в условиях жестких временных ограничений и при наличии различного рода неопределенностей как в исходной информации, так и в экспертных знаниях.

Прецедент представляется в виде совокупности следующих характеристик:

$$\text{Case} = (I, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{Z}\mathbf{N}_T, D, G, T_{\Pi}, F_{\text{дп}}, F_{\text{мп}}, Z_n, P_o, P_{\Pi}, W, Y_T, Y_B, Y_{\text{нп}}),$$

где  $I$  – идентификатор прецедента;  $\mathbf{X}_1$  ( $\mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ ) – множество параметров технической системы, описывающее данный прецедент в булевском формате, соответствующее 1-му (2-, 3-му) уровню глубины поиска;  $\mathbf{Z}\mathbf{N}_T$  – множество параметров, соответствующих 3-му уровню глубины поиска, в числовом формате;  $D$  – диагноз;  $G$  – номер группы, характеризующей отказ;  $T_{\Pi}$  – дополнительная текстовая информация;  $F_{\text{дп}}$  – дата формирования прецедента;  $F_{\text{мп}}$  – место формирования прецедента;  $Z_n$  – заводской номер БАСУ, в которой зафиксирован инцидент;  $P_o$  – общее число применений;  $P_{\Pi}$  – число положительных применений;  $W$  – вес (оценка применимости). Внешние воздействующие факторы описываются следующими характеристиками:  $Y_T$  – температура окружающей среды;  $Y_B$  – относительная влажность воздуха;  $Y_{\text{нп}}$  – характеристики напряжений электрического питания. Характеристика  $D$  – предполагаемое решение задачи поиска неисправностей, представленное в виде текстового описания наименования и заводского номера составной части БАСУ, в которой зафиксирован инцидент. Характеристика  $T_{\Pi}$  представляет собой текстовое описание характера инцидента, рекомендации ЛПР, реализованных мероприятий, перечень выполненных операций, а также мероприятий по предупреждению повторяемости инцидента. Характеристика  $W$  выражает числовую оценку применимости данного прецедента. Данная настройка в структуре прецедента влияет на выбор извлекаемых прецедентов и позволяет учитывать предысторию их применения (адаптации) с точки зрения результативности. Значение  $W$  определяется из следующего выражения:

$$W = \begin{cases} 0, & P_o = 0; \\ \frac{P_{\Pi}}{P_o}, & P_o \neq 0. \end{cases}$$

После каждого извлечения прецедента необходима коррекция  $W$ , которая осуществляется на основании продукционного правила:

Если «Case был извлечен», то « $P_{\Pi}, P_o, W$  обновить», иначе « $P_{\Pi}, P_o, W$  не обновлять».

В процессе совершенствования стратегий извлечения и адаптации прецедентов в продукционную модель знаний могут добавляться новые правила, изменяться или удаляться старые.

Характеристика  $G$  имеет свой числовой идентификатор и показывает, после произведенного анализа, к какой группе отнесен инцидент. Для описания инцидента предлагается использовать следующие группы и идентификаторы:

- 1 – отказы комплектующих (электронных компонентов) при их работе в режимах, предусмотренных в технических условиях;
- 2 – схемные инциденты, возникшие из-за ошибок разработчиков схемной документации (ошибки в схемных решениях, неправильный выбор режимов работы электронных компонентов и т.д.);
- 3 – конструкционные отказы, возникшие в результате нарушения установленных правил и (или) норм конструирования БАСУ (неправильный выбор материалов, допусков, теплового режима, неправильное размещение и сопряжение узлов и деталей, ошибки в конструкторской документации и т.п.);
- 4 – производственные инциденты БАСУ, возникшие в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления [1];

5 – эксплуатационные инциденты, возникшие в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации БАСУ;

6 – самоустраняющиеся инциденты, причина которых не установлена, а также перемежающиеся (многократно возникающие самоустраняющиеся) отказы БАСУ;

7 – инциденты, находящиеся на исследовании, у которых анализ причин их возникновения не завершен.

Описание характеристик прецедента для оценивания классифицированных инцидентов имеет разный формат: числовой, булевский, описательный в виде текстового комментария.

Прецедент представляет собой некоторый случай, решение, имевшее место в прошлом при функционировании БАСУ и состоящее в самом общем виде из задачи (информации, описывающей инцидент) и решения (диагноза и рекомендаций). В каком-то смысле прецедент является подобием производственного правила вида «Если..., то..., иначе...».

Предлагается использование комбинации табличного, производственного и математического представления моделей, образующих комбинированную модель описания прецедента.

Для обеспечения возможности машинной обработки лингвистические оценки результатов тестовых проверок и значений параметров перекодируются в булевские переменные: «в норме» – 0, «не в норме» – 1, «годен» – 0, «не годен» – 1. Исходя из особенностей организации существующей тестовой системы контроля и диагностирования, а также структуры БАСУ для обеспечения эффективности процесса извлечения прецедентов предлагается трехуровневая модель поиска подобных прецедентов. При диагнозе малой глубины (1-й уровень глубины поиска) в качестве параметров используются значения тестовых проверок. При диагнозе большой глубины (3-й уровень) – значения параметров. При диагнозе средней глубины (2-й уровень) используется некоторая часть значений параметров совместно с группами параметров, объединяющих другую их часть. Состав параметров 2-го уровня определяется экспертами на основании их знаний.

В основу построения ИСППР положен комбинированный подход, основанный на различных методах оценки результатов и принятия решений. Комбинация подходов призвана компенсировать недостатки раздельного использования методов. В частности, объектно-ориентированное моделирование обеспечивает целостное представление предметной области (предметные понятия и отношения между ними). Прецедентный подход позволяет за короткое время находить решение, но только при наличии прецедентов (опыта). В случае отсутствия прецедентов используется метод рассуждений на основе модели, содержащей информацию о зависимостях между предметными сущностями, процессами, явлениями. Использование данного метода требует большего объема исходных данных и знаний, сбор которых в свою очередь сопряжен со значительными временными затратами, так как необходимо проведение дополнительных аналитических исследований изучаемого объекта, экспериментов и испытаний. В свою очередь некоторые элементы решения могут быть определены без привлечения методов искусственного интеллекта, но с помощью аналитических функций.

В основе принятия решений лежит процедура выбора одного из возможных вариантов решений или действий. Формально сущность задачи выбора можно записать в виде

$$\{X, V\} \rightarrow X^*,$$

где  $X$  – исходное множество возможных решений (альтернатив);  $V$  – принцип выбора (правило предпочтения);  $X^*$  – выбранная альтернатива (может быть не одна).

В каждой конкретной задаче альтернативы  $X^*$  и правило предпочтения  $V$ , а также алгоритм решения в принципе могут быть изначально известны, но в большинстве задач какие-то элементы являются неизвестными.

Анализ показал, что рассуждения по прецедентам и качественные рассуждения по оценке результатов контроля адекватны задачам интеллектуальной поддержки инженерного анализа технологического искусственного интеллекта [5, 6]. Особенностью данного класса задач является то, что ЛППР не может рассчитать значение критериев для выбранной альтернативы и оценить последствия принимаемых решений из-за необходимости учета множества качественных и количественных параметров и взаимного влияния управляющих воздействий, что влечет за собой замедление процесса принятия решения и снижение его качества и обоснованности. Данные задачи относятся к классу задач принятия решения в условиях неопределенности.

Одним из способов обеспечения более качественного и быстрого принятия решения для данного класса задач является использование специальных систем поддержки принятия решений [5]. Реализация такой системы подразумевает разработку формального представления знаний в предметной области и автоматизацию процесса принятия решения с использованием этих знаний. Поэтому ак-

туальными задачами являются разработка ИСППР, учитывающей особенности рассматриваемого класса задач, использующей разнородные знания экспертов для поддержки ЛПР, а также разработка архитектуры и принципов функционирования данной системы. Ключевым вопросом создания ИСППР в структуре системы приемочного контроля является разработка методики формирования моделей прецедента и библиотеки прецедентов, ориентированных на применение в рамках ИСППР при выполнении оценки результатов проверок по программе приемочного контроля БАСУ.

Построение модели прецедента и библиотеки прецедентов предусматривает выполнение нескольких этапов.

*Этап 1.* Определяется перечень задач использования ИСППР при различных видах вывода результатов контроля и способах их объективного оценивания. Для достижения единства оценивания результатов контроля целесообразна формулировка исходных задач ИСППР для всех стадий жизненного цикла изделия – производства, эксплуатации и проектирования новых изделий на основе данного прототипа.

*Этап 2.* Результаты первого этапа позволяют сформулировать перечень функций, который должна выполнять ИСППР, к числу которых относятся:

- классификация инцидентов, возникающих при проведении проверок по программе контроля БАСУ;
- идентификация неработоспособных состояний БАСУ при зафиксированных инцидентах по накопленной информации;
- выявление причинно-следственного комплекса факторов, которые привели к инциденту;
- идентификация инцидента с последующим внесением соответствующего прецедента в базу;
- прогнозирование критичности инцидента;
- разработка необходимых рекомендаций по предотвращению инцидентов;
- развитие и адаптация библиотеки прецедентов;
- разработка рекомендаций по обеспечению и восстановлению работоспособности БАСУ и минимизации различного рода потерь.

*Этап 3.* Формирование правил оценивания инцидентов на основе признаков, используемых экспертами. За основу формирования правил взят нечетко-множественный подход, рассмотренный в [5], но правила оценивания разработаны с учетом основных особенностей БАСУ с точки зрения ее контроля и диагностирования.

*Этап 4.* На основе данных предыдущего этапа составляется список инцидентов, предполагаемых к появлению в результатах проведения проверок БАСУ. Все инциденты (отказы, сбои, повреждения или неопределенные события), требующие анализа и оценки ЛПР, подлежат индексации для их хранения в классифицированном массиве и последующего формирования соответствующей индексации прецедентов на основе решений этапа 2.

*Этап 5.* Подготовка необходимого набора данных и знаний, предназначенного для построения прецедента и библиотеки прецедентов, проводится с учетом результатов предыдущих этапов. Она предполагает детальную проработку каждого признанного полезным источника информации, в котором отражены связи между вариантами решений и влияющими на них факторами. К таким источникам информации относятся высококвалифицированные специалисты (ЛПР) и документы, относящиеся к информационной поддержке изделия на стадии изготовления:

*Этап 6.* Выбор способов представления и хранения прецедентов. Предлагается использовать комбинированную модель представления прецедентов, состоящую из табличной, продукционной, математической и графовой моделей.

Комбинированный способ разработан на основе известных способов представления и хранения прецедентов: объектно-ориентированных, параметрических, специальных [5, 6].

Параметрический способ моделирования характеристик прецедента в виде табличной формы имеет следующие достоинства: наглядность, полная открытость для анализа и изменения структур данных и алгоритмов решения задачи, способность концентрировать в себе информацию о большом количестве вариантов решения однотипных по постановке и целям задач, простота интеграции этой модели в цикл рассуждений по прецедентам. Табличные модели нашли широкое применение в практике создания различных автоматизированных систем. Продукционные правила обеспечивают формализацию рекомендаций и профессиональных знаний экспертов. Преимуществами этого способа представления знаний являются простота реализации, пополнения и модификации правил, естественность механизмов логического вывода, модульность организации. Это является важным мо-

ментом, поскольку позволяет легко совершенствовать набор производственных правил для адаптации прецедентов. Математическая модель, построенная с использованием формул, позволяет уточнять отдельные характеристики табличной модели. Иерархическая модель в виде ориентированного ациклического графа дает возможность наглядно представить логическую и физическую структуру организации процесса поиска подходящего прецедента.

*Этап 7.* Формирование прецедента как модуля знаний, в котором структурирована информация о проблеме, решении и контексте.

Библиотеку прецедентов можно представить в виде совокупности следующих характеристик:

Library Of Cases = (Cases,  $Z_{бп}$ ,  $F_{дбп}$ ,  $F_{мбп}$ ,  $ZN_{дн}$ ,  $ZN_{дв}$ ,  $T_{бп}$ ,  $V$ ,  $O$ ,  $WX$ ),

где Cases – набор прецедентов;  $Z_{бп}$  – название и заводской номер КПА;  $F_{дбп}$  – дата формирования библиотеки прецедентов;  $F_{мбп}$  – место формирования библиотеки прецедентов;  $ZN_{дн}$ ,  $ZN_{дв}$  – множества числовых значений, характеризующих нижнюю и верхнюю границу допустимых значений параметров, соответствующих 3-му уровню глубины поиска;  $T_{бп}$  – дополнительная текстовая информация в виде рекомендаций эксперта и инженера по знаниям. Настройки в структуре библиотеки прецедентов предназначены для ее поддержки в актуальном состоянии (адаптации) и используются в решающих правилах правдоподобного вывода. Порог  $V$  применяется на этапе выбора подходящих прецедентов. Расстояние между ними и текущей ситуацией, рассчитанное методом ближайшего соседа, должно быть не больше порогового значения. Значение порога определяется для каждого уровня глубины поиска на основании правил производственного типа. Например, для 1-го уровня набор производственных правил выглядит следующим образом:

Правило 1: Если « $k \leq 20$ », то « $V = 1$ », иначе «Выполнить Правило 2».

Правило 2: Если « $k > 20$ », то « $V = 0$ »,

где  $k$  – количество прецедентов 1-го уровня сравнивается с числом, которое задается экспертом.

Ограничитель  $O$ , заданный экспертом, используется на этапе формирования окончательного состава предлагаемого решения. Числовое значение  $O$  уменьшает количество рассматриваемых прецедентов, которые ранжированы по возрастанию метрических расстояний и с учетом веса  $W$  каждого прецедента.

Множество весовых коэффициентов  $WX$  позволяет учитывать относительную ценность каждого параметра, входящего в  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , при извлечении прецедентов из библиотеки прецедентов. Значение весового коэффициента измеряется в интервале от 0 до 1 и назначается экспертом. По умолчанию оно считается равным 1.

Таким образом, модель библиотеки прецедентов представляет собой комбинацию табличной, производственной и графовой моделей.

Дополнительно можно отметить, что эффективность адаптации прецедента и библиотеки прецедентов существенно повышается при применении ИПИ-технологии интеграции данных, аналогичных ИСППР.

### Литература

1. Смирнов В.А. Анализ процесса контроля, наладки и диагностирования сложной радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Смирнов, Д.В. Смирнов // Сб. ст. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». – СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2012. – Ч. 2. – С. 143–147.
2. Ларин В.П. Проблемы обеспечения надежности аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов // Науч. сессия ГУАП: сб. докл. – Ч. I: Технические науки. – СПб.: СПб ГУАП, 2010. – С. 28–30.
3. Смирнов В.А. Поиск неисправностей в бортовых системах управления в процессе приемочного контроля // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2(63). – С. 24–28.
4. ГОСТ 27.202. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – М.: Госстандарт, 1983. – 40 с.
5. Варшавский П.Р. Разработка модели представления знаний для интеллектуальной системы на основе прецедентов / П.Р. Варшавский, С.М. Пчелина // Вычислительные сети. Теория и практика. – 2011. – № 2 (19). – С. 72–75.
6. Николайчук О.А. Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем / О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин // Искусственный интеллект (Донецк: Наука і освіта). – 2006. – № 4. – С. 459–468.

**Ларин Валерий Павлович**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения СПбГУАП  
Тел.: 8-921-758-12-88  
Эл. почта: larinvp39@yandex.ru

**Смирнов Владимир Александрович**

Ведущий инженер-электроник ЗАО «НПП «Аквамарин», аспирант СПбГУАП  
Тел.: 8-921-391-62-68  
Эл. почта: vlad.sm2010@yandex.ru

Larin V.P., Smirnov V.A.

**Intellectualization of acceptance control technology of complex technical objects**

The paper considers the topics on engineering of control acceptance systems for complex technical devices. It is shown that providing a high efficiency of acceptance system requires intelligent automation of solution acceptance process on obtained results. A method of forming precedent models and library of precedents is proposed for applying in intelligent decision support system with analysis and evaluation of monitoring and diagnosing results.

**Keywords:** acceptance control, engineering control technology, assessment of the technical state of object, incidents in the control, intellectualization of decision-making, operations with precedents, library of precedents.

---