

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А.И. Лоскутов, С.В. Сирота, А.Н. Сакулин

Предложен новый подход к повышению эффективности принятия решений при испытаниях объектов ракетно-космической техники — на основе использования свойств искусственного интеллекта, воспроизводимых при разработке динамической экспертной системы.

Ключевые слова: испытания, система принятия решений, искусственный интеллект, динамическая экспертная система.

ВВЕДЕНИЕ

На всех стадиях жизненного цикла объектов ракетно-космической техники различного типа (космических аппаратов, ракет-носителей и разгонных блоков) оценивается степень соответствия функционирования бортовых систем исходным представлениям о правильном их поведении. Для этого создаются системы контроля технического состояния проверяемых объектов, а также испытательные комплексы. Проведение контроля и правильное принятие решений по результатам испытаний являются одними из эффективных мер обнаружения неисправностей объектов РКТ в общей системе обеспечения надежности бортовой аппаратуры [1].

Принятые сокращения:

БА — бортовая аппаратура;
ИИ — искусственный интеллект;
ИИК — интеллектуальный информационный комплекс;
ИК — испытательный комплекс;
НС — нейронная сеть;
ОИ — объект испытаний;
РКТ — ракетно-космическая техника;
СПР — система принятия решений;
ТС — техническое состояние;
ЭС — экспертная система.

Характерная черта совершенствования различных типов объектов РКТ состоит в непрерывном усложнении вновь создаваемых образцов. Сложность бортовой аппаратуры возрастает в настоящее время вследствие увеличения числа элементов, а также широкого применения электронно-вычислительных устройств в целях повышения эффективности объектов РКТ, расширения их функциональных возможностей. Несмотря на постоянное повышение уровня надежности элементной базы БА, возрастание номенклатуры и сложности бортовых систем приводит к недостаточной надежности оборудования изделий РКТ в целом.

В то же время высокая сложность БА обуславливает необходимость создания адекватных аппаратных, алгоритмических и интеллектуальных средств, позволяющих синтезировать эффективные системы контроля. Применение ЭВМ и микропроцессорной техники позволило создать достаточно совершенные аппаратные средства интеллектуального, автоматизированного контроля ИК. Существенный недостаток систем контроля заключается в ограниченности их применения областью достаточно простых объектов контроля и отсутствии формализованных методов и средств принятия решений. Это связано с тем, что наряду с интенсивным развитием аппаратных средств автоматизированного контроля сложных технических систем многие задачи алгоритмизации и интеллектуализации основных процессов испытаний объектов РКТ остаются недостаточно иссле-



дованными, а известные методы их решения не позволяют удовлетворить современным требованиям по оперативности и достоверности испытаний.

Повышение автоматизации и интеллектуализации испытаний объектов РКТ на различных этапах эксплуатации предполагает разработку интеллектуальной системы принятия решений по выбору адекватной математической модели функционирования бортовых систем.

1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Согласно ГОСТ 16504—81 [2], испытания есть экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта как результата воздействия на него.

В процессе испытаний, 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 ОИ, которая, в свою очередь, распадается на подзадачи [2] контроля технического состояния, поиска места и определения причин отказа (неисправности), прогнозирования ТС.

Эксплуатационные испытания объектов РКТ можно разделить на [3]:

— заводские испытания, где устанавливается соответствие БА требованиям нормативно-технической документации, обнаруживаются дефекты производства;

— полигонные испытания, где определяются дефекты, возникающие при хранении и транспортировке, а также при сборке объектов РКТ на полигоне;

— летные испытания (которые не всегда проводятся, но проверяется работоспособность БА перед каждым сеансом управления).

Проведению заводских испытаний предшествует построение модели объекта испытаний (решается задача идентификации), в ходе которого исследуется поведение бортовых систем под воздействием команд управления. Очевидно, что модель должна обеспечивать максимально возможную полноту проверки объекта. Функционирование БА контролируется, в основном, с помощью параметров оперативного контроля и телеметрируемых параметров.

При полигонных испытаниях оказывается невозможным использовать все мыслимые комбинации команд управления, чтобы полностью проверить всю БА по используемой модели. Поэтому полигонные испытания в этом смысле не являют-

ся полными, работа БА проверяется частично. Разработчику модели объекта и программы испытаний важно аргументировано выбрать те режимы работы БА, которые наиболее полно характеризуют проверку ее исправности.

Полигонные испытания обычно подразделяются на [4]:

— автономные испытания, когда испытываются отдельные подсистемы объектов РКТ с помощью контрольно-испытательной аппаратуры;

— комплексные испытания, когда испытывается вся БА по заданной программе. Оценивается взаимодействие отдельных подсистем и их влияние на качество функционирования всей БА в целом. Эти испытания проводятся при помощи автоматизированных ИК.

Летные испытания, реализующие проверку работоспособности БА для выполнения целевых задач, предполагают использование более упрощенной модели. Данная модель позволяет проверить только основные блоки и команды управления, а также спрогнозировать последствия возникновения неисправностей в БА.

В современных условиях дальнейшее повышение эффективности эксплуатационных испытаний возможно путем совершенствования ИК, а именно, технологии обработки информации, циркулирующей в контуре СПР при управлении и функционировании ИК. Объясняется это, прежде всего, следующими обстоятельствами [5].

- Переход от отдельно функционирующих ИК к комплексным системам и сетям ИК привел не только к простому увеличению объемов данных, но и к существенному усложнению задач, связанных с их переработкой.
- Появление встроенных средств обработки данных в виде локальных микропроцессоров, используемых наряду с большими компьютерами, в центрах сбора информации характеризует тенденцию распределения средств обработки. В связи с этим возникают не только задачи рационального распределения функций и организации обработки информации в контуре управления ИК, но и задачи распределения (в зависимости от текущей обстановки) отдельных функций обработки между компонентами обрабатывающей системы.
- Цена последствий несвоевременности реакции на аварийные ситуации в ИК резко возросла.

Важное место при эксплуатации ИК занимает проблема совершенствования технологии обработки измерительной информации о ТС проверяемых систем ОИ. Основные решаемые при этом задачи представлены в таблице.

В силу отмеченных особенностей эксплуатации и применения объектов РКТ испытательные ком-

плексы должны удовлетворять следующим требованиям [5]:

— решение задач наблюдения должно быть ориентировано на обеспечение целевого функционирования ОИ;

— в механизмах обработки измерительной информации необходимо учитывать динамический аспект не только на уровне данных, но и на уровне моделирования символьных рассуждений;

— соблюдение открытости для подключения хорошо отработанных существующих и вновь созданных моделей и процедур обработки знаний и данных;

— возможность контроля и управления выводом решения пользователем автоматизированной системы;

— необходимость получения результатов обработки в темпе, соизмеримым с поступлением данных о процессах функционирования ОИ;

— учет неопределенности обрабатываемых данных и знаний — для обеспечения устойчивости результатов обработки к частичным искажениям измерительной информации, не «выловленным» на этапе первичной обработки.

Задачи, решаемые испытательными комплексами

Контроль текущего состояния ОИ	Определение вида технического состояния элементов аппаратуры до необходимого уровня детализации (блоки ОИ, приборы) в фиксированный момент времени или на фиксированном интервале времени
Контроль правильности функционирования ОИ	Определение «траекторий» (последовательностей) технических состояний компонентов ОИ. Типичный пример — операции функционирования ОИ, состоящие из последовательностей режимов ОИ
Выявление отклонений и анализ причин отклонений	Диагностика неисправностей и отклонений ОИ, понимаемая в расширенном смысле: не только выявление и локализация места дефекта, но и установление его причины
Прогноз последствий отклонений	Определение степени тяжести последствий отклонений в интервалы времени, через которые эти последствия могут возникнуть; выявление возможных ограничений на выполнение целевых функций ОИ, которые возникают при развитии последствий
Парирование отклонений	Формирование рекомендаций по устранению или компенсации отклонений. Сюда относится, в частности, задача функционального резервирования блоков ОИ

Современным ИК присущи значительные ограничения по применению из-за жесткости схем анализа информации; слабых возможностей по накоплению опыта предшествующей работы; отсутствия хорошей инструментальной поддержки по вводу исходных данных и эвристических знаний; трудностей описания и обработки данных и знаний с существенной динамикой; отсутствия согласования разнородных механизмов обработки и анализа информации; слабой проработанности реализации режима реального времени и т. п.

Активно развиваются и внедряются на практике интеллектуальные информационные технологии, основанные на нейросетевых моделях. Особенность их заключается в переходе от обработки данных с помощью набора процедур к обработке знаний параллельными структурами.

2. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Испытания бортовой аппаратуры представляют собой совокупность большого числа взаимосвязанных процессов [6]: формирование воздействий, получение результатов испытаний (измерений), информационный обмен, обработка информации, принятие решений.

Соответственно этим процессам при испытаниях объектов РКТ различают системы, которые их обеспечивают и вместе с другими системами и ОИ образуют контур испытаний (рис. 1).

В качестве элементов измерительной системы ИС выступают: ИК при регистрации параметров оперативного контроля, информационно-телеметрическая система, которая применяется как при летной эксплуатации, так и при наземных испытаниях, а также разнообразная контрольно-измерительная и контрольно-испытательная аппаратура, используемая только при наземных испытаниях.

Системой формирования воздействий могут быть: автоматизированный ИК, штатная система управления, предназначенная для летной эксплуатации (командно-измерительная система), дополнительные источники специальных воздействий (генераторы стандартных сигналов), а также средства имитации окружающей среды, условий реальной эксплуатации (барокамера, термостат, вибростенд, аэродинамическая труба и др.).

Элементами системы информационного обмена служат каналы и линии передачи измерительной и управляющей информации, магистрали, интерфейсы.

Система обработки информации обычно подразделяется на систему первичной обработки, где производятся операции масштабирования, повышения достоверности результатов испытаний, их

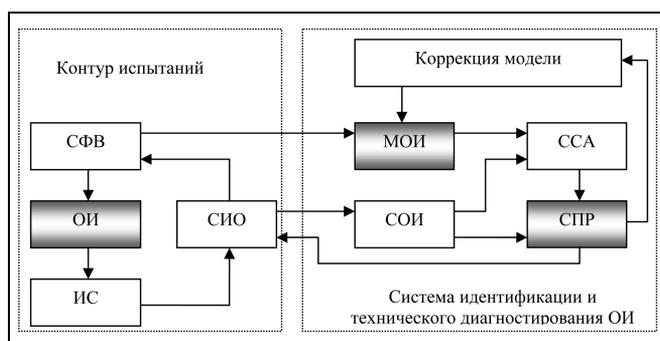


Рис. 1. Схема испытаний:

СФВ — система формирования воздействий; *ОИ* — объект испытаний; *ИС* — измерительная система; *СИО* — система информационного обмена; *СОИ* — система обработки информации; *МОИ* — модель ОИ; *ССА* — система сравнительного анализа; *СПР* — система принятия решения

дешифровка, привязка ко времени, и на систему вторичной обработки, где оценивается техническое состояние ОИ.

В качестве модели ОИ или эталона может служить физическая модель ОИ, математическая модель (аналитическая или имитационная) в формализованном виде, а также вербальная (описательная) модель в неформализованном виде, представленная в форме технической документации.

Система принятия решений предназначена для управления процессом испытаний в целом. Она принимает решения, каким воздействиям и когда следует подвергнуть ОИ. При этом СПР должна оценивать результаты испытаний. Таким результатом может быть, например, заключение об исправности ОИ. Если ОИ исправен, то испытания заканчиваются, иначе же следует либо определить дефектный элемент, либо установить причину неисправности (т. е. диагностировать).

В свою очередь, для диагностирования может потребоваться проведение дополнительных (диагностических) испытаний, связанных с реализацией дополнительной последовательности воздействий (тестов). При этом возникает задача определения последовательности воздействий, которая бы позволяла локализовать неисправность. Главная цель испытаний заключается в обнаружении дефектов, а дефекты обнаруживаются на основании модели при помощи тестов, то главная функция СПР при испытаниях БА состоит в адекватном выборе моделей и соответственно генерации тестов в определенной последовательности.

В процессе применения РКТ по назначению структура системы управления функционированием БА не отличается от структуры, представленной на рис. 1. Как при управлении, так и при испытаниях реализуются воздействия и обрабатывается

измерительная информация. Однако при летной эксплуатации последовательности воздействий (команд управления), обеспечивающие достижение БА целевого состояния согласно полетному заданию, не играют, вообще говоря, роль тестов. Напротив, при испытаниях БА последовательности воздействий должны быть тестами в том смысле, что с их помощью можно обнаружить или локализовать все неисправности из некоторого класса, если они имеют место в БА. В этом заключается основное принципиальное отличие испытаний от управления. Иначе говоря, верно высказывание «если объект испытывается, то он управляется»; обратное, вообще говоря, неверно.

При эксплуатационных испытаниях БА объектов РКТ как бы действует презумпция исправности БА и требуется построить программу испытаний так, чтобы доказать ее неисправность. Если при реализации такой программы испытаний доказать неисправность БА не удастся, то остается принять, что БА исправна. При управлении же БА в процессе летной эксплуатации такая задача обычно не ставится.

Таким образом, в контуре испытаний (см. рис. 1) слабоформализованным процессом является процесс принятия решений, а также связанный с ним процесс обработки информации. Разнообразие состава и объема проверок, воздействие внешних неконтролируемых факторов, наличие неопределенностей на различных этапах эксплуатации объектов РКТ требуют правильного (адаптивного!) выбора адекватной модели, т. е. качественного решения задачи структурной идентификации системой принятия решений. Очевидно, что это возможно благодаря использованию искусственного интеллекта в СПР при решении слабоформализованной задачи структурной идентификации.

3. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Как уже отмечалось, задачи структурной идентификации и принятия решений слабоформализованные или вовсе неформализованные. Для их решения разрабатываются и принимаются пригодные для этого модели и методы представления данных и знаний, средства общения с пользователями и представления им результатов, учитываются формы и методы интеллектуальной деятельности по принятию решений. Следовательно, повышение уровня интеллектуальности процесса испытаний — перспективное направление повышения его эффективности.

Для повышения надежности функционирования систем, оперативности управления и обеспечения работы в режиме реального времени целесообразно в контуре испытаний включать перспектив-

ные информационные комплексы, реализующие функции искусственного интеллекта.

Среди наиболее важных прикладных задач информационных комплексов, решаемых с помощью систем искусственного интеллекта, отметим:

- выделение предметных областей, допускающих представление знаний о них программными и алгоритмическими средствами, и составление их описаний;
- решение слабоформализованных задач;
- обучение конечных пользователей оцениванию штатных (стереотипных) ситуаций и принятию решений о способе деятельности;
- оказание помощи конечным пользователям в виде справок и советов в штатных ситуациях;
- определение всех штатных ситуаций, что позволяет обратить внимание конечных пользователей на возникновение различных аномалий;
- выявление негативных последствий принимаемых решений в данной предметной области;
- активизация мыслительной деятельности конечного пользователя (постановка перед ним новых вопросов, опровержение его ответов и др.).

Интеллектуальные информационные комплексы в ходе испытаний должны обеспечить:

- решение задачи структурной идентификации в процессе испытаний;
- информационную поддержку принятия решений для руководителей работ и операторов при проведении испытаний.

Перспективное направление по выполнению предъявленных требований и реализации функций искусственного интеллекта представляет собой использование в качестве основного элемента ИИК динамической экспертной системы на основе нейросетевых правил принятия решений. Основные цели разрабатываемой экспертной системы состоят в адаптивном выборе в реальном масштабе времени адекватных математических моделей на всех стадиях проведения испытаний и организации возможности выработки рекомендаций руководителю работ и операторам в нештатных ситуациях в рабочем режиме.

Отличительная особенность представляемого ИИК — обеспечение структурной идентификации процесса испытаний и конечного пользователя информацией о сложных процессах принятия решений, а также оценки и выбора полезного решения. Он поддерживает решения различных классов задач выработки и выбора решений: уникальных, повторяющихся, многокритериальных.

В общем случае модель принятия решений описывается кортежем $M_{\text{ПР}} = \langle \Xi, Z, I, L, R, P \rangle$, где Ξ — экспертная система; Z — множество задач, проблем, ситуаций; I — множество исходных данных;

L — множество критериев, показателей качества, ожидаемых результатов; $R, R \in \Xi$ — множество допустимых альтернатив, стратегий; $P, P \in \Xi$ — множество правил выбора решений (инструкций, таблиц решений, решающих правил, отношений предпочтения).

Качество принятия решений определяется качеством синтеза экспертной системы Ξ , а именно, входящих в нее правил $P, P \in \Xi$ и альтернатив $R, R \in \Xi$ при внешних условиях I и L . Экспертная система должна обеспечить поддержку динамического процесса принятия решений, зависящих от следующих особенностей принятия решений (внешних условий): неопределенности; неформализованности; многоцелевого характера; в реальном масштабе времени; индивидуального или группового принятия решений.

Процесс принятия решений в ЭС при испытаниях будет итеративным. Можно выделить следующие этапы: анализ объекта и среды; распознавание проблемы (ситуации); выбор критериев и оценка возможных моделей; отнесение ситуации к модели; выбор модели функционирования объекта РКТ по результатам наблюдения объекта и среды, а также в зависимости от представленных критериев; оценка соответствия результатов действия и ожидаемого эффекта по достижению целей испытаний.

В модели принятия решений экспертная система становится основным элементом, эффективность действия которого будет определять уровень интеллектуальности принятия решений.

4. СТРУКТУРА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Модель ЭС включает в себя базу знаний (БЗ), систему управления базой знаний (СУБЗ); базу данных (БД), систему управления базами данных (СУБД); банк моделей, систему управления банком моделей (СУБМ); собственно ядро искусственного интеллекта (подсистему обработки ситуаций или решатель), реализующее функции: сбора информации о ситуации (наблюдение); распознавания ситуации; решения задачи классификации по выбору и анализу модели.

Обобщенная модель ЭС включает в себя интеллектуальный интегрированный интерфейс «пользователь — система»; подсистему управления и диалога (диалоговый монитор); многофункциональную подсистему решения задач принятия решений (ядро ИИ); инструментальную и сервисную подсистемы; подсистемы управления: СУБЗ, СУБД и СУБМ; базы данных, моделей и знаний.

Общая схема динамической экспертной системы представлена на рис. 2.

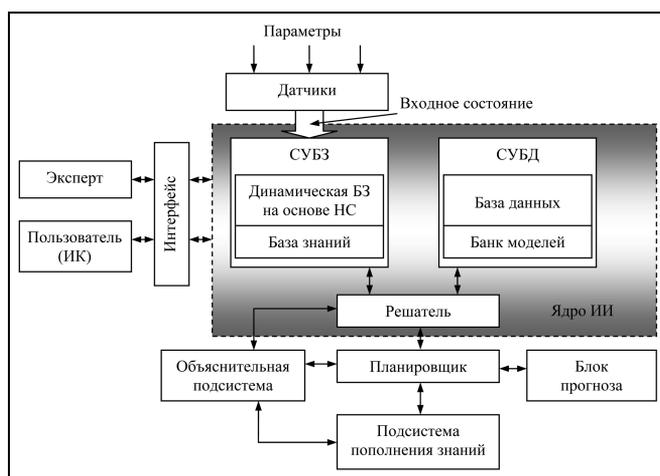


Рис. 2. Динамическая экспертная система

Решатель (машина логического вывода) ЭС является комплексным, так как наряду с известными методами и знаниями (логика предикатов, семантические сети, фреймы, продукционный вывод) в ЭС могут применяться методы, основанные на мягких вычислениях (нечеткой логике), генетических алгоритмах, нейронных сетях, когнитивных сетях, вероятностном выводе (эвристики).

Комбинация методов и расширение их элементами мягких вычислений с подключением к планировщику банков алгоритмов и моделей увеличивает мобильность вычислительного процесса решателем ЭС и, как следствие, качество принимаемых решений. С помощью мощного решателя, ЭС сравнительно легко адаптируется к внешней динамической модели, позволяя ставить и решать прямые, обратные и смешанные задачи. В качестве решателя целесообразно принять НС вследствие возможности параллельной обработки данных в реальном масштабе времени.

В процессе работы системы «объект—среда», ЭС в темпе реального времени осуществляет структурную идентификацию, прогнозирование и оценку эффективности испытаний объекта РКТ.

Базы знаний ЭС хранят декларативные и процедурные знания. К процедурным относятся базы концептуальных знаний: понятия в виде формул, зависимости, таблицы, процедуры и т. д. К декларативным относятся базы экспертных знаний, носящие описательный (качественный) характер. Эти базы должны взаимодействовать между собой, постоянно проверяя знания на непротиворечивость (избыточность). В процессе взаимодействия собственной БЗ с системой «объект—среда» ЭС (см. рис. 2) осуществляет обучение и самообучение. В режиме сканирования в темпе реального времени проверяются факты и знания. Новая ситуация «образует» прецедент и запоминается в БЗ.

Традиционные средства моделирования в ЭС осуществляют: математическое (имитационное) моделирование ОИ; хранение априорных и апостериорных данных в базе данных ЭС (исходную информацию и результаты испытаний). Дополнительная «гибкость» и мобильность БЗ в ЭС достигается путем сопряжения моделей искусственного интеллекта и математической модели ОИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа возможностей совершенствования системы испытаний установлено, что:

- повышение уровня интеллектуальности принятия решений по выбору моделей (решение задачи структурной идентификации) возможно благодаря применению системы искусственного интеллекта, в которой реализуются в определенной мере функции интеллекта человека;
- синтезированная модель принятий решений позволила выделить экспертную систему в качестве основного элемента искусственного интеллекта. Исходными предпосылками синтеза экспертной системы для принятия решений при испытаниях выступают требования оперативности решения задач (в реальном масштабе времени), а также слабая формализованность и неопределенность условий задач. Это предопределило выбор нейросетевых алгоритмов в качестве основы экспертной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочелаев Ю.С. Автоматизированные испытательные комплексы. Оптимизация алгоритмов автоматизированного тестового контроля. — СПб.: МО РФ, 1992. — 118 с.
2. ГОСТ 16504—81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
3. Дунаев В.В., Поляков О.М., Фролов В.В. Алгоритмические основы испытаний. — Л.: МО СССР, 1991. — 427 с.
4. Меньшиков В.А. Полигонные испытания: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, слушателей академий и специалистов в области космической техники. — М.: КОСКО, 1997. — 416 с.
5. Автоматизированные системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения / В.И. Полянский и др. — СПб.: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1997. — 332 с.
6. Козырев Г.И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем. — СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2001. — 110 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Лоскутов Андрей Иванович — докторант, ✉ rujenz@mail.ru,

Сирота Сергей Васильевич — зам. нач. кафедры, ✉ bogs_s@mail.ru,

Сакулин Александр Николаевич — нач. факультета, ✉ omd_am@mail.ru,

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, ☎ (812) 347-99-34.