

А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов

Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата

Аннотация. Рассмотрена концепция построения системы мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным. Концепция основывается на анализе стандартов, современных подходов космической отрасли и создании интеллектуальных инструментальных средств, опирающихся на применении искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова и фразы: концепция, космический аппарат, мониторинг, контроль, диагностика, прогнозирование, телеметрические данные, искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть.

Введение

Одним из способов обеспечения высокого уровня эксплуатационной надежности космического аппарата (КА) является проведение текущего контроля его подсистем с использованием методов и средств технической диагностики, неразрушающего контроля и прогнозирования состояния. Планируется, что перенос на борт КА функций контроля и диагностики состояния систем уже к 2020 году позволит продлить жизненный цикл отечественных КА. В настоящее время накоплено большое количество различных алгоритмов технической диагностики и анализа сложных систем. Однако в космических системах и, в особенности, на борту на практике могут использоваться

Работа выполнена в рамках СЧ НИР шифр «Мониторинг-СГ-1.2.5.1» по Программе Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проекты № 15-07-00925-а «Разработка, исследование и теоретическое обобщение методов интеллектуального управления беспилотными летательными аппаратами для решения траекторных задач в реальном времени» и № 15-29-06945-офи_м «Развитие моделей, методов и программных средств обработки мультиспектральных снимков, видео-потоков и данных телеметрии для задач космического мониторинга арктической зоны».

© А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов, 2015

© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН, 2015

© Программные системы: теория и приложения, 2015

лишь самые простые из-за существенных ограничений на бортовые вычислительные ресурсы.

Необходимы новые подходы к совершенствованию систем контроля и диагностики, способные прогнозировать нештатные ситуации (НШС), обнаруживать аномалии в работе бортовой аппаратуры в реальном времени. Для решения данных задач требуется оптимизация существующего программного обеспечения и совершенствование существующего. Для выработки концепции построения системы мониторинга подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным необходим аналитический обзор международных стандартов, учет рекомендаций в области повышения надежности КА. Перспективы связываются с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ), основанных на применении искусственных нейронных сетей (ИНС).

Внедрение интеллектуальных технологий является одним из основных направлений совершенствования средств контроля, диагностики и управления космических аппаратов. Использование технологий искусственного интеллекта в космических системах позволяет увеличить их автономность, повысить оперативность обработки информации, сократить технологический цикл управления и обеспечить продление жизненного цикла КА. Система мониторинга состояния и поведения подсистем КА по телеметрическим данным необходима для непрерывного выполнения задач управления, измерения орбитальных параметров, контроля и поддержания технических характеристик КА, находящихся в ориентированных и неориентированных режимах. Возрастание требований к характеристикам таких систем и срокам эксплуатации требует пересмотра используемых технологий и проведения ряда мероприятий, включая:

- создание средств комплексного информационно-навигационного обеспечения и мониторинга;
- внедрение методов искусственного интеллекта для контроля, диагностики и поддержки принятия решений;
- создание многофункционального наземного комплекса для приема, регистрации и обработки всех видов космической информации.

Под диагностикой обычно понимают установление технического состояния объектов, выявление дефектов и измерение их параметров, обнаружение и прогнозирование развития НШС. Эффективность

методов контроля и диагностики зависит от используемой концептуальной модели предметной области. Применительно к объектам космической отрасли диагностика может рассматриваться, например, как измерение параметров текущего состояния объекта, определение ситуации и прогнозирование надежности работы подсистем на основе знаний экспертов.

1. Анализ стандартов и патентов, необходимых для построения перспективных систем мониторинга подсистем космических аппаратов

Рассмотрим отечественные стандарты, определяющие построение систем контроля и диагностики. ГОСТ 20911–89 [1] устанавливает термины и определения основных понятий в области технического диагностирования и контроля состояния объектов, что важно для всех сложных технических систем, включая космические аппараты. В перечень важнейших из них входят «объект технического диагностирования», «техническое состояние объекта», «техническая диагностика», «техническое диагностирование». Например, термин «прогнозирование технического состояния» интерпретируется как «определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени».

Национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 13374–2–2011 [2] устанавливает требования к информационной модели и модели обработки информации, которым должна соответствовать открытая архитектура систем контроля состояния и диагностики машин в целях обеспечения их совместимости. В стандарте представлена модульная (блочная) архитектура системы, которая описывает процедуры обмена и обработки данных. Каждый блок системы должен быть соответствующим образом конфигурирован. Важными составляющими общей архитектуры являются модуль сбора (мониторинга) данных, модуль определения состояния (контроля) и диагностики. Данные, полученные из блока сбора данных, после соответствующих преобразований приобретают вид рекомендаций на выходе блока составления рекомендаций. Модуль определения состояния (диагностики) осуществляет сравнение данных со значениями базовой линии или предельными значениями эксплуатационных параметров, чтобы сформировать сигнал оповещения при превышении соответствующих границ. Блок составления диагноза использует экспертные правила или вычислительные процедуры для определения текущего состояния машин и выявления возможных

неисправностей. Модуль составления прогноза осуществляет контроль технического состояния объекта в последующие моменты времени с использованием разнообразных прогностических моделей и алгоритмов, включая модели развития будущих отказов.

Международное сотрудничество в космосе, выполнение крупных международных космических проектов (МКС, космические системы глобального мониторинга, создание глобальных систем космической связи и т.д.) требуют проведения крупномасштабной интеграции космических средств. Рассмотрим наиболее важные пункты требований NASA к разработчику космической системы, так или иначе затрагивающие проблемы безопасности и продления жизненного цикла:

- (1) Наличие системы управления качеством (QMS — Quality Management System), которая должна быть согласована с американским Национальным Институтом Стандартов (ANSI) и американским Обществом по качеству (ASQ) [3].
- (2) Поддержка требований (Requirements) и гарантий действий (Assurance Activities) к элементам наземной системы (GS) и их обслуживанию. Эти требования должны включать функциональность, надежность, доступность и ремонтпригодность, безопасность и тесты/проверки на все время жизненного цикла системы. Требования обращены к интерфейсам, аппаратным средствам, программному обеспечению и другим компонентам. Они определяют следующие критерии по обслуживанию: модульность, оптимальную доступность, точную диагностику ошибки, стандартизацию.
- (3) Проверка соответствия между архитектурой и требованиями к элементам системы, включая тестирование на ранних стадиях проектирования, разработку инструментов поддержки (тренажеры, эмуляторы, и т.д.) и специальных эксплуатационных режимов, выявление непредвиденных обстоятельств и неноминальных условий для облегчения координации тестирования, моделирование поведения системы в случае непредвиденных обстоятельств и обучение оператора.
- (4) Поддержка баз данных, включая действия типа сквозного контроля, определения состояния, тестирования и принятия решений о несоответствиях системы базы данных.
- (5) Гарантии безопасности (Security Assurance и System Safety) для идентификации и уменьшения рисков. Риски должны быть оценены и проанализированы на вероятность возникновения. Должна

иметься программа безопасности для определения степени угрозы и обеспечения безопасности критических элементов.

Серия стандартов Европейской космической кооперации ECSS (European Cooperation for Space) является результатом совместных усилий ESA (European Space Agency) — Европейского космического агентства, национальных космических агентств и европейских ассоциаций промышленности в направлении развития и поддержания общих стандартов. Требования в этом стандарте определены в терминах того, что должно быть достигнуто. Рассмотрим, например, положения ECSS-E-70-31A — одного из ряда стандартов ECSS, предназначенных для управления, проектирования и обеспечения надежности космических проектов и приложений [4]. Формулировки этого стандарта принимают во внимание документы Международной организации по стандартизации ISO 9000. В соответствии с ним космическая система состоит из взаимосвязанных компонентов аппаратных средств и программного обеспечения. Стандарт требует учета знаний о системе в течение полного жизненного цикла (проект, развитие, интеграция, проверки и операции) и ее экспертизы (качество, управление и проектирование). Описание системы строится согласно формальной структуре. С этой целью стандарт вводит понятие модели космической системы (SSM — Space System Model). SSM строится иерархически по принципу сверху вниз в элементах системы (SE), отражающих функциональные устройства космической системы. Элемент системы — структура данных, свойства которой есть описание некоторого знания. Событие (или случай) — это возникновение условия или группы условий эксплуатационного значения. Понятия элементов системы и их особенностей позволяют получить полное, высокоуровневое описание космической модели, независимо от конфигурации системы. Описание может многократно использоваться на любом уровне интеграции, тестирования и выполнения операций в течение выполнения полета.

Основой и необходимым условием является унификация и международная стандартизация аппаратно-программных комплексов автоматизации, средств связи и информационного обмена с КА. Эта стандартизация широко проводится в рамках работ Консультативного комитета по системам передачи космических данных (CCSDS — Consultative Committee for Space Data Systems) в дополнение к усилиям Международной организации по стандартизации (ISO) и Международного союза электросвязи (ITU). Существует несколько стандартов CCSDS, которые определяют понятия и требования к обработке и кон-

тролю информации в космических системах. Так, например, стандарт CCSDS 350.0-G-2 определяет рекомендации по контролю и обработке данных КА и требования к уровню безопасности или защиты данных [5]. Стандарт CCSDS 350.4-G-1 предназначен для космического сообщества и предоставляет правила (рекомендации) для безопасной межсистемной связи космического агентства [6], CCSDS 350.2-G-1 определяет наиболее подходящие стандарты шифрования [7], CCSDS 350.3-G-1 определяет наилучшие алгоритмы аутентификации и достоверности [8]. Далее рассмотрим ряд зарубежных патентов, ориентированных на использование нейронных сетей для решения задач контроля и диагностики сложных технических систем.

Система и метод для обнаружения ошибок предлагаются в патенте US Patent 7,233,932 [9]. Реализована возможность выявления симптомов сбоев в системах, в которых присутствуют нелинейные связи между двумя или более переменными. Система определения ошибок использует нейронную сеть для классификации состояний.

В патенте WO/2002/048959 [10] описан модуль обнаружения аномальных отклонений, основанный на иерархически упорядоченных нейронных сетях. Обнаружение происходит при помощи наблюдения за поведением определенных частей компьютерной сети. Выходные значения одного слоя нейронных сетей служат входами нейронных сетей следующего уровня. Результирующее значение единственной нейронной сети последнего слоя представляет собой реакцию модуля на поведение компьютерной сети. Данный метод способствует уменьшению количества ложных тревог, которые возможны при функционировании подобного анализатора.

В патенте WO/2002/048958 [11] приводится алгоритм обучения модуля, состоящего из иерархически упорядоченного множества нейронных сетей. Для обучения используются примеры известного поведения компьютерной сети. После обучения модуль способен опознавать аномальные отклонения компьютерной сети, основываясь на информации, полученной во время обучения.

Одним из возможных способов уменьшения количества ложных тревог, выдаваемых автоматическими средствами выявления аномалий в данных, является проведение корреляционного анализа показаний от различных источников. В патенте US Patent 7,234,166 [12] авторы предлагают объединять взаимосвязанные события в последовательности. Основная идея предлагаемого метода заключается в том, что появление определенных последовательностей событий позволяет

выявлять аномальные отклонения в сетевых потоках данных с большей степенью уверенности, нежели появление отдельных событий, составляющих эти последовательности.

2. Перспективные разработки в области мониторинга и диагностики КА

Как правило, задача принятия решения о техническом состоянии КА осложняется низким качеством информации или же полным ее отсутствием. Чтобы эффективно решать эту задачу, целесообразно применять системы с искусственным интеллектом. В качестве программного обеспечения системы контроля и диагностики КА может быть выбрана экспертная система (ЭС) [13]. Система должна самостоятельно в соответствии с текущей ситуацией и целевой установкой своевременно формулировать и решать поставленные задачи, такие как экспресс-контроль, контроль по обобщенным параметрам, диагностирование дефектов, определение последствий отказа, прогнозирование и др.

При разработке надежной отказоустойчивой системы управления крайне важно, чтобы возникшие изменения немедленно определялись и диагностировались для введения корректирующих действий с целью реконфигурации системы и ее адаптации к этим изменениям [14]. Есть предложения по использованию аппарата адаптивной логики в алгоритмах контроля и диагностики КА [15]. В работе [16] рассмотрен адаптивный подход к разработке системы контроля и диагностики, подход включает реализацию гибкой логики работы системы и учитывает фактическое состояние бортовой аппаратуры. Система диагностики и контроля должна решать две основные задачи: обнаружение повреждения, его парирование и исключение. Определение неисправности заключается в принятии альтернативного решения: либо все исправно, либо в системе где-то произошел сбой. Для реконфигурации системы относительно неисправностей в задаче диагностики необходима их идентификация. При таком подходе строятся диаграммы состояния системы [17, 18], временные циклограммы режимов управления, на математических стендах моделируются типовые отказы разных классов. Разработанные диаграммы и набор оценок важности отказов определяют структуру программного обеспечения. После определения факта отказа и причины отказа система должна предпринять определенные действия для восстановления работоспособности системы и произвести реконфигурацию. В работе [18]

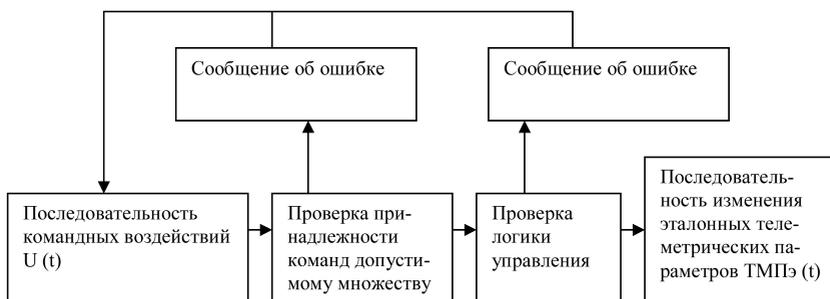


Рис. 1. Схема функционирования модели оценки работоспособности бортовых систем

описаны различные алгоритмы и циклограммы восстановления работоспособности, обеспечивающие функционирование при отказах и повышающие коэффициент готовности КА. Можно поддерживать функционирование с помощью дополнительных бортовых алгоритмов, имитирующих неисправную аппаратуру, или принудительным переходом на циклограммы управления без обратной связи при исправной работе устройств и кратковременных сбоях в линиях связи.

В работе [19] предложен общий подход к решению проблемы быстрой диагностики автоматических КА, основанный на создании адекватных моделей анализа и диагностики функционирования бортовых систем и алгоритмов автоматизированной выработки рекомендаций по воздействию на КА. Это позволяет существенно повысить эффективность работы аппаратуры, в том числе за счет оперативного устранения возникающих на борту нештатных ситуаций. Предлагается ввести поэтапное проектирование модели оценки работоспособности бортовых систем. На рис. 1 приведена схема функционирования такой модели.

На этапе проектирования модели происходит интерпретация и диагностика работоспособности бортовой аппаратуры, выполняется сравнительный анализ эталонных телеметрических параметров с реальными, получаемыми в сеансе связи. Для повышения быстродействия можно сравнивать данные с применением алгоритма выделения иерархических групп телеметрических параметров [20]. Интерпретация состояния работоспособности бортовых систем заключается в автоматизированной выдаче системой сообщений типа «норма» или «не норма» для каждой бортовой подсистемы. При этом имеется воз-

возможность детального анализа работоспособности отдельных элементов, входящих в состав системы, что позволяет определять источник нарушения функционирования и провести диагностику состояния бортовых систем.

В работе [21] рассмотрены методы, использующие деревья поиска состояний для поддержки принятия решений при комплексной оперативной оценке бортовых систем космического аппарата. Во время сеанса связи или проведения активных работ с системой делается сравнительный анализ спрогнозированных значений параметров телеметрии и реальных значений, поступающий с борта КА. В случае выявления отклонений в показаниях параметров от прогноза, специалист анализирует качество получаемой телеметрической информации и вырабатывает рекомендации по работе с системой: прекратить работу, перейти на резервный комплект, реконфигурировать систему и т.д. Затем формулируются причины и суть изменения параметров состояния системы, возможные последствия отклонений, предлагаются действия по управлению. Для эффективного анализа работы КА в исследовании предлагается формализовать процесс контроля бортовой системы КА векторами состояний. Телеметрическая информация и параметры подсистем рассматриваются как математические множества со стандартными для множеств операциями и отношениями: вложенность, пересечение, объединение и т.д. Для оперативного выявления нештатного состояния системы по вектору параметров авторы используют метод «деревьев». Для некоторых подсистем КА вполне обоснованно можно использовать аппарат графов состояний, что позволяет ускорить процесс анализа информации и частично автоматизировать этот процесс на ЭВМ.

Представляют интерес методы моделирования и алгоритмы обнаружения причин аномальной работы автоматизированных систем управления, а также методы последовательной классификации отказов бортового оборудования [21, 22]. Текущие тенденции в области построения методов диагностики неисправности можно разделить на два класса: модельный подход с использованием оценки параметров и их соответствие нормам; подходы, использующие искусственный интеллект, в том числе аппарат нечеткой логики и нейронные сети. В указанных источниках описан многоуровневый метод диагностики неисправностей, использующий математическую логику и уравнения состояния объектов. На нижнем уровне рассматриваются доступные физические переменные (параметры системы), такие, как сила то-

ка, напряжение, температура, скорость, ускорение и др. На среднем уровне происходит мониторинг контура управления (по параметрам крена, рыскания и тангажа). На высоком «системном» уровне находится основной контур управления и диагностики, на нем также происходит сравнение параметров с нормальными значениями и определяются нештатные ситуации.

В работе [23] описан процесс анализа телеметрии космического аппарата «Юбилейный» посредством наземного комплекса обслуживания. Упор делается на интерполирование телеметрических данных во времени и восстановление искаженных значений на основе соседних данных. Статья содержит графики, позволяющие визуально оценить показания различных датчиков.

Иерархическая структура процесса диагностики, которая состоит из древовидно расположенных уровней, предлагается в [24]. Внизу дерева расположен уровень, содержащий множество сенсоров, подключенных к наблюдаемым подсистемам космического аппарата. В случае сбоя сенсоры выдают тревожный сигнал функциональному уровню выше, который проводит диагностику неисправности, а именно: изолирует проблему, классифицирует ее и передает эту информацию на уровень выше. Сама диагностика на функциональном уровне проходит тоже по иерархическому принципу, где граф — это база знаний, в которой хранятся связанные друг с другом признаки той или иной проблемы. Благодаря такому представлению базы знаний скорость поиска неисправности достаточно велика.

Отметим важность стабильности и надежности системы электропитания для космического аппарата. Для повышения качества ее работы целесообразно использовать еще на этапе проектирования КА моделирование на ЭВМ. Так, в работе [25] рассмотрены вопросы моделирования автоматизированной системы электропитания. Оператор с помощью специализированного программного обеспечения задает необходимые настройки и тем самым обеспечивает мониторинг подсистемы питания КА как на этапе моделирования и проектирования КА, так и на этапе сопровождения полета.

В серии работ [26–30] рассмотрены вопросы контроля космических подсистем на основе нейросетевого подхода. Обнаружение неисправности сведено к задаче распознавания двух классов «исправно» и «неисправно», проведен сравнительный анализ качества контроля с применением персептрона и вероятностной нейронной сети (ВНС). Показано, что ВНС достаточно уверенно разделяет ситуацию на два

класса и может быть использована для решения задачи анализа работы подсистем КА [26]. Задача обнаружения отклонений в работе технической подсистемы рассматривается как задача распознавания. Метод состоит из трех шагов: построение таблиц прецедентов, обучение ИНС, распознавание. В работе [27] описана нейросетевая технология решения задачи контроля датчиков положения КА. Рассмотрены общие вопросы организации мониторинга и обработки потоков информации, такие, как приближение и интерполирование экспериментальных данных. Приведены результаты решения задач обработки информационных потоков с использованием кластерного вычислителя, что позволило повысить скорость и общую эффективность данного метода. Показано, что показатели некоторых датчиков коррелируют между собой, что дает дополнительные возможности контроля неисправностей. Кроме того, благодаря особенностям полета в космосе, некоторые показатели (например, углы или скорость) не могут сильно отличаться от своих соседних по времени значений. Это позволяет аппроксимировать некоторым полиномом функцию изменения таких параметров движения КА. ИНС обучается методом обратного распространения ошибки и позволяет прогнозировать значения датчиков, а места сбоев обнаруживает путем сравнения реального и прогнозного значений корреляции.

Метод диагностики неисправностей группы КА, заключающийся в двухуровневой обработке информации на основе динамических нейронных сетей, описан в работе [28]. На нижнем уровне иерархии системы диагностики полета динамическая ИНС обучается посредством абсолютных измерений состояния каждого спутника и отвечает за исправность каждого спутника по отдельности. Однако, есть такие неисправности, которые требуют дополнительной проработки на другом (высоком) уровне. Для этого используется ИНС типа динамического многослойного персептрона. Предлагаемая двухуровневая схема контроля и диагностики позволяет эффективно обнаруживать и классифицировать, а также исправлять ошибки бортовых подсистем.

В работе [29] описан подход к построению автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры сложных технических систем на основе использования математической конечно-автоматной модели и динамических нейросетевых структур. На прикладном уровне в качестве сложной технической системы рассматривается бортовая информационно-телеметрическая система, устанавливаемая на большинстве современных космических аппаратов различного целевого

назначения. Предлагается структура перспективной контрольно-испытательной аппаратуры бортовой информационно-телеметрической системы, построенная с использованием синтезированной конечно-автоматной модели и программной реализации динамической нейронной сети.

Отметим работу [30], в которой рассмотрены вопросы применения нейросетевых технологий для решения задач обработки бортовых данных объектов космической техники. Здесь изложены принципы и методы построения основных компонентов нейросетевого обеспечения бортовых комплексов управления космических аппаратов для повышения автономности и эффективности их функционирования, предложены нейросетевые средства диагностирования бортового оборудования.

В книге [31] рассматриваются вопросы построения основанных на знаниях эффективных систем для обработки различных типов задач диагностики. Предложены различные варианты построения таких систем: комплексные системы диагностики, деревья неисправностей, модельная система диагностики и другие. Метод диагностики неисправностей для космических аппаратов на основе интеллектуального анализа телеметрических данных и анализа «дерева неисправностей» предложен в [32]. Деревья решений строятся на основе архива телеметрических данных КА и используются для обнаружения неисправности, анализа причины неисправности и степени ее влияния.

Обзор новой системы мониторинга и диагностики для японских космических спутников AKARI и HINODE дан в работе [33]. Система ISACS-DOC (Intelligent SATellite Control Software — DOctor) разработана в Японском агентстве аэрокосмических исследований (JAXA). Она способна быстро и точно анализировать телеметрическую информацию и из общего потока данных выделять аномальные отклонения сигналов без участия специалистов. Система успешно прошла тестирование на нескольких реальных КА и доказала свою эффективность.

Разработка и исследования системы диагностики космического аппарата проведены в рамках европейской космической программы SEIS (Space Environment Information System) [34]. Система основывается на нейронных сетях и базе знаний, использует механизм логических правил для определения неисправностей. Система делится на несколько модулей (например, модуль визуализации неисправности, модуль диагностики и т.д.) и обеспечивает контроль состояния подсистем КА как в режиме отложенного действия, так и в режиме реального времени.

3. Основы концепции интеллектуальной поддержки работоспособности космических систем

Предлагаемая концепция заключается в разработке новых и совершенствовании существующих методов и средств интеллектуального анализа, обработки информации и управления сложными системами с целью повышения эффективности, надежности и качества космических систем. Концепция и теоретическое обоснование встраиваемой системы информационной поддержки в целом опираются на следующие элементы:

- теоретические работы в области ИИ;
- стандарты, установленные для космических систем, в том числе стандарты на сжатие и передачу данных;
- отечественный и зарубежный опыт разработки перспективных космических систем;
- технологии построения динамических интеллектуальных систем;
- высокопроизводительные программные и аппаратные средства.

Построение компьютеризированных контрольно-измерительных комплексов, современных датчиков-сенсоров, систем и приборов создает предпосылки для решения задач диагностики, поддержания работоспособности служебных и целевых систем, обработки информации, управления и других интеллектуальных задач. Системы ИИ основаны на использовании моделей предметной области и правил вывода, организованных в виде баз данных и знаний.

С учетом стандартов и предложений ряда работ может быть предложена концепция построения архитектуры системы интеллектуальной поддержки космических систем, в том числе на основе использования методов высокопроизводительных вычислений.

Работа системы ориентирована на охват таких перспективных направлений как интеллектуальное управление, когнитивная графика, нейронные сети. Предполагается, что встраивание средств ИИ осуществляется путем установки программного обеспечения на управляющую ЭВМ. Управление КА предполагает, что с ним поддерживается хорошо налаженная, устойчивая двусторонняя радиосвязь, которую обеспечивает антенная система. Необходимо обозначить исходные данные, выделить основные параметры, определяющие решение задачи управления, а также выбрать методы ее решения.

Предполагается модульный принцип организации системы контроля и управления полетом КА, приема и обработки информа-

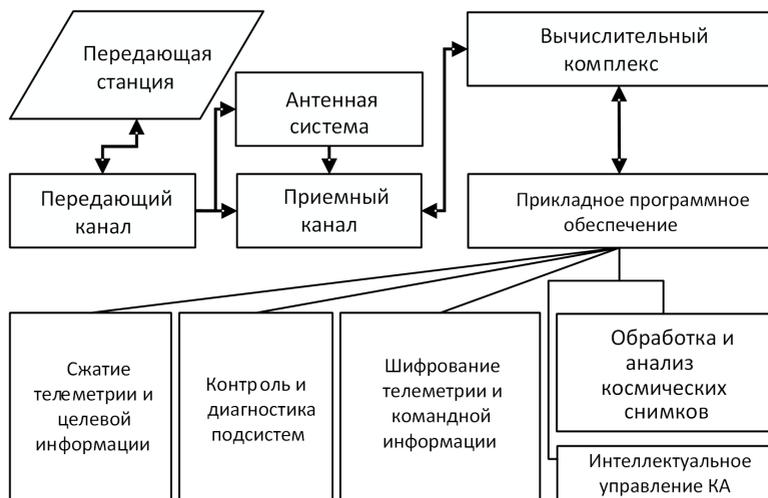


Рис. 2. Архитектура системы обработки информации

ции (см. рис. 2). Формализация основывается на создании информационной модели. Первичная информационная модель системы контроля и диагностики строится путем формализации описания ее модулей в виде сводных таблиц, содержащих сведения о входах, выходах, допусках сигналов, типах кодирования, контролируемых параметрах и т.д. Должны быть реализованы программы обработки информации, оценки точностных характеристик, расчета маневров и ограничений, прогноза, расчета управлений, подготовки к обработке и т.д. Полезную информацию предоставляет функциональная модель, включающая циклограммы описания динамики работы подсистем. Функциональная и информационная модели позволяют описать предметную область в виде базы знаний. Она описывается множествами объектов различного типа. Каждый тип объекта соответствует некоторому понятию предметной области.

Помимо описания набора статических свойств объекта задается множество продукционных правил, описывающих динамику поведения объекта. Правила могут быть построены на основе изучения циклограмм, а также знаний экспертов по выходу из НШС. Такой подход позволяет осуществлять построение имитационных моделей как по принципу «от общего — к частному», когда сначала строится общая модель системы, а потом детализируются модели входящих

в нее компонентов, так и «от частного — к общему», когда сначала разрабатываются модели элементарных компонентов, а потом из них строится общая модель. Таким образом, система предоставляет возможность построения моделей большой степени сложности с заданием собственной модели поведения для каждого отдельного компонента. В совокупности данные таблиц, циклограмм, алгоритмов обработки информации и правил являются основой для базы данных динамической экспертной системы (ДЭС). ДЭС реализуется в виде программно встраиваемой системы, функционирующей параллельно со штатной системой в фоновом режиме на дублирующей ЭВМ. На ее основе можно решать различные задачи анализа, оптимизации управления, поддержки принятия решений и обработки информации.

Цель, стоящая перед системой контроля и диагностики, как правило, задается в виде оптимизационной задачи, часть параметров которой может задаваться неявно. Кроме того, важнейшим требованием является функционирование в реальном режиме времени, т.е. в любой ситуации должен быть построен план управляющих воздействий, обеспечивающий безопасное функционирование КА на планируемом этапе управления.

В основу всех вычислительных процедур могут быть положены искусственные нейронные сети. Известно, что типовые ИНС, к которым можно отнести сети прямого распространения, рециркуляционные сети, сети Хемминга, Хопфилда и Кохонена, позволяют успешно решать следующие задачи: распознавание образов и классификация, принятие решений и управление, кластеризация, прогнозирование и аппроксимация, сжатие данных, шифрование и диагностика. Основная, до сих пор не решенная теоретическая задача, — получение оптимальной конфигурации ИНС. В связи с этим для конкретной задачи приходится экспериментально выбирать число слоев, скорость обучения и коэффициенты торможения, осуществлять селекцию обучающей выборки, определять информативные признаки.

Поддержание отказоустойчивого режима подсистем КА возможно за счет осуществления прогнозирования состояния оборудования нейронными сетями [34–37]. В основе прогнозирования лежит принцип непрерывности. Источником объективной используемой для прогнозирования информации о техническом состоянии КА при его эксплуатации является измерение параметров бортовых систем. В случае получения достоверного прогноза относительно технического состояния исследуемого оборудования возможно подключение резервного

комплекса, что позволяет обеспечить непрерывное функционирование КА.

Таким образом, представленная концепция охватывает все этапы, предусмотренные стандартами построения систем контроля и диагностики.

Заключение

Внедрение перспективных интеллектуальных технологий является одним из основных направлений совершенствования космических систем, обеспечивающих улучшение системных характеристик, уменьшение затрат на эксплуатацию средств управления. Внедрение интеллектуальных технологий позволит повысить функциональность и автономность систем управления КА, решить задачу повышения надежности и срока функционирования, ускорит создание новых технологий управления и научно-технического задела для разработки и изготовления перспективной космической техники, конкурентоспособной на мировом рынке космической продукции и услуг. Применение новых интеллектуальных технологий позволяет качественно классифицировать ошибки, осуществлять многоуровневую диагностику систем космического аппарата и прогнозировать их будущее поведение, тем самым увеличивая эффективность, скорость принятия решений и надежность работы узлов КА.

Отметим, что максимальной эффективности и скорости обучения и, в целом, работы таких систем контроля на основе ИНС можно добиться, применяя высокопроизводительные параллельные вычисления. Прогнозная модель может быть дообучена и даже переобучена в процессе применения объектов бортовой аппаратуры по целевому назначению.

Список литературы

- [1] *Техническая диагностика. Термины и определения*, ГОСТ 20911–89 ↑ 23.
- [2] *Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 2. Обработка данных*, ГОСТ Р ИСО 13374–2–2011 ↑ 23.
- [3] *ANSI/ISO/ASQ Q9001: 2000 American National Standard Quality Systems – Model for Quality Assurance in Design, Development, Production, Installation and Servicing NASA-STD, 8719.13A NASA Software Safety Standard, 2000* ↑ 24.

- [4] ESA Requirements and Standards Division ESTEC, ECSS-E-70-31A. *Space Engineering Ground Systems and Operations – Monitoring and Control Data Definition*, 2007, 210 p ↑ 25.
- [5] *The Application of CCSDS Protocols to Secure Systems. Green Book*, CCSDS 350.0-G-2, January 2006, 48 p ↑ 26.
- [6] *CCSDS Guide for Secure System Interconnection. Green Book*, CCSDS 350.4-G-1, November 2007, 51 p ↑ 26.
- [7] *Encryption Algorithm Trade Survey. Green Book*, CCSDS 350.2-G-1, March 2008, 16 p ↑ 26.
- [8] *Authentication/Integrity Algorithm Issues Survey*, CCSDS 350.3-G-1, March 2008, 17 p ↑ 26.
- [9] *Fault Detection System and Method Using Approximate Null Space Base Fault Signature Classification*, US Patent 7,233,932 ↑ 26.
- [10] *A Hierarchical Neural Network Intrusion Detector*, WO/2002/048959 ↑ 26.
- [11] *Method for Training a Hierarchical Neural-network Intrusion Detector*, WO/2002/048958 ↑ 26.
- [12] *Event Sequence Detection*, US Patent 7,234,166 ↑ 26.
- [13] А. М. Барановский, А. Е. Привалов. «Контроль и диагностирование состояния малых космических аппаратов», *Известия вузов. Приборостроение*, **52:4** (2009), с. 51–56 ↑ 27.
- [14] С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский, А. В. Силаев. «Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах», *Автоматика и телемеханика*, 1996, №1, с. 3–20 ↑ 27.
- [15] А. И. Заведеев, А. Ю. Ковалев. «Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата», *Труды МАИ*, №54, URL <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29688> ↑ 27.
- [16] Г. П. Шибанов. *Контроль функционирования больших систем*, Машиностроение, М., 1978, 586 с. ↑ 27.
- [17] Е. А. Микрин. *Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения*, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2003, 652 с. ↑ 27.
- [18] А. Ю. Ковалев, М. А. Шатский, «Метод построения ориентации космического аппарата, заданной относительно солнца, с использованием дискретного датчика», *Труды XVIII-го Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации»*, Издательство «МИРЭА», М., 2009, 148 с. ↑ 27.
- [19] Н. Л. Соколов. «Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций», *Успехи современного естествознания*, 2007, №6, с. 16–20 ↑ 28.

- [20] Н. Л. Соколов, В. А. Удалой. «Использование расчетно-логических систем для повышения эффективности управления автоматическими КА», *Успехи современного естествознания*, 2004, №11, с. 70–74 ↑ 28.
- [21] Х. В. Саркисян, М. М. Матюшин. «Использование деревьев поиска состояний для поддержки принятия решений при комплексной оперативной оценке бортовых систем космического аппарата», *Наука и образование*, 2011, №5, URL <http://technomag.bmstu.ru/doc/182938.html> ↑ 29.
- [22] E. Somov, V. Makarov, V. Matrosov. “Diagnosis and Reconfiguration of the Spacecraft Fault Tolerant Gyromoment Control Systems”, IFAC Workshop “Aerospace Guidance, Navigation and Flight Control Systems” (2009), URL <http://lib.physcon.ru/doc?id=3cad8987bc9e> ↑ 29.
- [23] С. В. Беневольский, В. И. Майорова, Д. А. Гришко, Н. Н. Ханеня. «Анализ телеметрии с космического аппарата «Юбилейный»», *Наука и образование*, 2011, №8, URL <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-telemetrii-s-kosmicheskogo-apparata-yubileynyy.pdf> ↑ 30.
- [24] Y. Hong, J. Changwei, “A research on development in fault diagnosis system of spacecraft”, *Space Mission Operations and Ground Data Systems*, Proceedings of the Fourth International Symposium SpaceOps '96, European Space Agency, Paris, 1996, pp. 838–843 ↑ 30.
- [25] Ю. М. Казанцев, Ю. А. Кремзуков. «Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата», *Известия Томского политехнического университета*, **314:4** (2009), с. 138–141 ↑ 30.
- [26] Ю. Г. Емельянова, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов, «Нейросетевой метод обнаружения неисправностей в космических подсистемах», *Труды международной конференции «Программные системы: теория и приложения»*. Т. 1 (Переславль-Залесский, 2009), с. 133–143 ↑ 30, 31.
- [27] Ю. Г. Емельянова, К. А. Константинов, С. В. Погодин, А. А. Талалаев, И. П. Тищенко, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов. «Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата», *Программные системы: теория и приложения*, **1:1(1)** (2010), с. 45–59, URL http://psta.psirar.ru/read/psta2010_1_45-59.pdf ↑ 30, 31.
- [28] M. S. Mousavi. *Neural Network-based Fault Diagnosis of Satellites Formation Flight*, A thesis in The Department of Electrical and Computer Engineering, Canada, 2013, 241 p ↑ 30, 31.
- [29] А. И. Лоскутов, В. Б. Вечеркин, О. Л. Шестопалова. «Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур», *Информационно-управляющие системы*, 2012, №2(57), с. 74–81 ↑ 30, 31.

- [30] В. В. Ефимов, Г. И. Козырев, А. И. Лоскутов, А. В. Назаров, В. А. Яковкин. *Нейрокомпьютеры в космической технике*, Радиотехника, М., 2004, 317 с. ↑ 30, 32.
- [31] C. Price. *Computer-Based Diagnostic Systems*, Springer, 1999, 156 p ↑ 32.
- [32] X. Gao, T. Zhang, H. Liu, J. Gong, “Spacecraft Fault Diagnosis Based on Telemetry Data Mining and Fault Tree Analysis and Design of Expert System”, *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 1062–1066 ↑ 32.
- [33] R. Takaki, H. Honda. “Development of Automatic Monitoring and Diagnostic System for Space Science Satellites”, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2009), URL <https://enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-461.pdf> ↑ 32.
- [34] M. Pantoquillo, J. Neto, N. Viana, R. Ribeiro, J. Moura-Pires. “Online and Offline Monitoring and Diagnosis of Spacecraft and Space Weather Status”, 2004, URL <http://centria.di.fct.unl.pt/~jmp/page11/page14/files/EUROFUSE-2004.pdf> ↑ 32, 35.
- [35] А. А. Талалаев, И. П. Тищенко, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов. «Анализ эффективности применения искусственных нейронных сетей для решения задач распознавания, сжатия и прогнозирования», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2008, №2, с. 24–33 ↑ 35.
- [36] В. М. Хачумов, В. П. Фраленко. «Эксперименты с прогнозированием, сжатием и фильтрацией данных на основе нейронных сетей», *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, 2008, №9, с. 35–42 ↑ 35.
- [37] В. М. Хачумов, В. П. Фраленко, «Прогнозирование и сжатие данных на основе аппарата нейронных сетей», *Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование*, Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Т. 13, Издательство Политехнического университета, СПб., 2008, с. 126–127 ↑ 35.

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. Непейвода Н. Н.

Об авторах:



Александр Анатольевич Талалаев

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, автор и один из основных разработчиков программно-инструментального комплекса для организации конвейерно-параллельной обработки данных на мультипроцессорных системах.

e-mail:

arts@arts.botik.ru



Виталий Петрович Фраленко

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, искусственный интеллект и принятие решений, параллельные алгоритмы, сетевая безопасность, диагностика сложных технических систем.

e-mail:

alarmod@pereslavl.ru



Вячеслав Михайлович Хачумов

Д.т.н., профессор, заведующий Лабораторией интеллектуального управления ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, автор более 180 публикаций.

e-mail:

vmh48@mail.ru

Пример ссылки на эту публикацию:

А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов. «Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата», *Программные системы: теория и приложения*, 2015, **6:3(26)**, с. 21–43. URL http://psta.psiras.ru/read/psta2015_3_21-43.pdf

Aleksandr Talalaev, Vitaly Fralenko, Vyacheslav Khachumov. *Review of standards and the conceptual design of tools for spacecraft monitoring, control and diagnostics.*

ABSTRACT. The article show conceptual design of tools for spacecraft system of monitoring the status and behavior of the subsystems for spacecraft telemetry data. The concept is based on the analysis of the standards of modern approaches to the space industry and the creation of intellectual tools based on artificial neural networks. (in Russian).

Key Words and Phrases: concept, spacecraft, monitoring, control, diagnosis, prognosis, telemetry data, artificial intelligence, artificial neural network.

References

- [1] *Technical Diagnostics. Terms and Definitions*, GOST 20911–89 (in Russian).
- [2] *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Data Processing, Communication and Presentation. Part 2. Data Processing*, GOST R ISO 13374–2–2011 (in Russian).
- [3] *ANSI/ISO/ASQ Q9001: 2000 American National Standard Quality Systems – Model for Quality Assurance in Design, Development, Production, Installation and Servicing NASA-STD, 8719.13A NASA Software Safety Standard, 2000.*
- [4] ESA Requirements and Standards Division ESTEC, ECSS–E–70–31A. *Space Engineering Ground Systems and Operations – Monitoring and Control Data Definition*, 2007, 210 p.
- [5] *The Application of CCSDS Protocols to Secure Systems. Green Book*, CCSDS 350.0–G–2, January 2006, 48 p.
- [6] *CCSDS Guide for Secure System Interconnection. Green Book*, CCSDS 350.4–G–1, November 2007, 51 p.
- [7] *Encryption Algorithm Trade Survey. Green Book*, CCSDS 350.2–G–1, March 2008, 16 p.
- [8] *Authentication/Integrity Algorithm Issues Survey*, CCSDS 350.3–G–1, March 2008, 17 p.
- [9] *Fault Detection System and Method Using Approximate Null Space Base Fault Signature Classification*, US Patent 7,233,932.
- [10] *A Hierarchical Neural Network Intrusion Detector*, WO/2002/048959.
- [11] *Method for Training a Hierarchical Neural-network Intrusion Detector*, WO/2002/048958.
- [12] *Event Sequence Detection*, US Patent 7,234,166.
- [13] A. M. Baranovsky, A. E. Privalov. “Onboard monitoring and diagnostic system of small space vehicles”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, **52**:4 (2009), pp. 51–56 (in Russian).
- [14] S. D. Zemlyakov, V. Yu. Rutkowski, A. V. Silaev. “Reconfiguration of aircraft control systems under faults”, *Automation and Remote Control*, **57**:1 (1996), pp. 1–13.

- [15] A. I. Zebedee, A. Yu. Kovalev. "State diagnostic and principles of the improving of onboard spacecraft control system failurestable", *Trudy MAI*, no.54 (in Russian), URL <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29688>.
- [16] G. P. Shibanov. *Functional testing of large systems*, Mashinostroenie, M., 1978 (in Russian), 586 p.
- [17] E. A. Mikrin. *Spacecraft board control and designing their software*, Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, M., 2003 (in Russian), 652 p.
- [18] A. Yu. Kovalev, M. A. Shatsky, "The method of constructing the orientation of the spacecraft, given relative to the sun, with using a discrete sensor", *Proceedings of XVIII International Scientific and Technical Workshop "Modern technology in control, automation and information processing"*, Izdatel'stvo "MIRJeA", M., 2009 (in Russian), 148 p.
- [19] N. L. Sokolov. "The basic principles of diagnostics of serviceability of the onboard equipment automatic (SV) and development of the recommendations on elimination of not regular situations", *Advances in Current Natural Sciences*, 2007, no.6, pp. 16–20 (in Russian).
- [20] N. L. Sokolov, V. A. Udaloy. "Using computational and logical systems to improve management efficiency by automatic spacecraft", *Advances in Current Natural Sciences*, 2004, no.11, pp. 70–74 (in Russian).
- [21] X. V. Sargsyan, M. M. Matyushin. "Using of the search tree states to support decision-making in an integrated assessment of operational systems on board the spacecraft", *Science & Education*, 2011, no.5 (in Russian), URL <http://technomag.bmstu.ru/doc/182938.html>.
- [22] E. Somov, V. Makarov, V. Matrosov. "Diagnosis and Reconfiguration of the Spacecraft Fault Tolerant Gyromoment Control Systems", IFAC Workshop "Aerospace Guidance, Navigation and Flight Control Systems" (2009), URL <http://lib.physcon.ru/doc?id=3cad8987bc9e>.
- [23] S. V. Benevolsky, V. I. Mayorov, D. A. Grishko, N. N. Hanenya. "Analysis of telemetry from the spacecraft "Jubilejnyj"", *Science & Education*, 2011, no.8 (in Russian), URL <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-telemetrii-s-kosmicheskogo-apparata-yubileynyy.pdf>.
- [24] Y. Hong, J. Changwei, "A research on development in fault diagnosis system of spacecraft", *Space Mission Operations and Ground Data Systems*, Proceedings of the Fourth International Symposium SpaceOps '96, European Space Agency, Paris, 1996, pp. 838–843.
- [25] Yu. M. Kazantsev, Yu. A. Kremzukov. "The automated control system of power energy conversion spacecraft equipment", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, **314**:4 (2009), pp. 138–141 (in Russian).
- [26] Yu. G. Yemel'yanova, A. A. Talalayev, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov, "Failure detection in space subsystems based on artificial neural networks", *Proceedings of the International Conference "Program Systems: Theory and Applications"*. V. 1 (Pereslavl'-Zalesskiy, 2009), pp. 133–143 (in Russian).
- [27] Yu. G. Yemel'yanova, K. A. Konstantinov, S. V. Pogodin, A. A. Talalaev, I. P. Tishchenko, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov. "Monitoring system of spacecraft orientation angle-data and distance transmitters based on artificial neural

- networks”, *Programmnyye Sistemy: Teoriya i Prilozheniya*, 1:1(1) (2010), pp. 45–59 (in Russian), URL <http://psta.psir.ru/read/psta2010.1.45-59.pdf>.
- [28] M. S. Mousavi. *Neural network-based fault diagnosis of satellites formation flight*, A Thesis in The Department of Electrical and Computer Engineering, Canada, 2013, 241 p.
- [29] A. I. Loskutov, V. B. Vecherkin, O. L. Shestopalova. “Automation of complicated technical systems state control based on using of finally automatic model and neuronet structures”, *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)*, 2012, no.2(57), pp. 74–81 (in Russian).
- [30] V. V. Efimov, G. I. Kozyrev, A. I. Loskutov, A. V. Nazarov, V. A. Yakovkin. *Neurocomputers the space equipment*, Radiotekhnika, M., 2004 (in Russian), 317 p.
- [31] C. Price. *Computer-based diagnostic systems*, Springer, 1999, 156 p.
- [32] X. Gao, T. Zhang, H. Liu, J. Gong, “Spacecraft fault diagnosis based on telemetry data mining and fault tree analysis and design of expert system”, *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 1062–1066.
- [33] R. Takaki, H. Honda. “Development of automatic monitoring and diagnostic system for space science satellites”, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2009), URL <https://enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-461.pdf>.
- [34] M. Pantoquilha, J. Neto, N. Viana, R. Ribeiro, J. Moura-Pires. “Online and offline monitoring and diagnosis of spacecraft and space weather status”, 2004, URL <http://centria.di.fct.unl.pt/~jmp/page11/page14/files/EUROFUSE-2004.pdf>.
- [35] A. A. Talalaev, I. P. Tishchenko, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov. “Analysis of the efficiency of applying artificial neuron networks for solving recognition, compression and prediction problems”, *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2008, no.2, pp. 24–33 (in Russian).
- [36] V. M. Khachumov, V. P. Fralenko. “Data prediction, compression and filtering experiments based on neural networks”, *Neurocomputers: Development and Application*, 2008, no.9, pp. 35–42 (in Russian).
- [37] V. M. Khachumov, V. P. Fralenko, “Data prediction and compression using neural networks apparatus”, *Vysokie tehnologii, fundamental’nye i prikladnye issledovaniya, obrazovanie*, Sbornik trudov Pjatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokih tehnologij v promyshlennosti”. V. 13, Izdatel’stvo Politehnicheskogo universiteta, SPb., 2008, pp. 126–127 (in Russian).

Sample citation of this publication:

Aleksandr Talalaev, Vitaly Fralenko, Vyacheslav Khachumov. “Review of standards and the conceptual design of tools for spacecraft monitoring, control and diagnostics”, *Program systems: theory and applications*, 2015, 6:3(26), pp. 21–43. (In Russian.) URL http://psta.psir.ru/read/psta2015_3_21-43.pdf