

УДК 004.94+629.58

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АДЕКВАТНОГО ПОВЕДЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

А.В. Инзарцев

В.В. Грибова, А.С. Клещев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН²

Контрольно-аварийная система (КАС) является одним из основных компонентов информационно-управляющей системы автономного подводного робота (АПР). КАС обеспечивает как безопасность робота под водой, так и его устойчивость к сбоям подсистем, что повышает вероятность выполнения задания. Основной информацией для распознавания неисправностей являются сигналы, вырабатываемые средствами самодиагностики подсистем робота, а также измеряемые датчиками параметры. В настоящее время работа КАС аппарата основана на гипотезе об изолированности сигналов. Для случая нескольких квазиодновременных сигналов реакция робота не всегда является адекватной.

Для реализации предлагаемого интеллектуального КАС (далее ИКАС) используется онтологический подход, который позволяет избавиться от упомянутых недостатков существующей версии КАС. ИКАС функционирует как агент тактического уровня информационно-управляющей системы, способный выполнять диагностические действия (подмиссии) при необходимости. ИКАС формируется компилятором по заданной базе знаний и описанию конфигурации робота с использованием облачной платформы IASaaS. Знания представляются семантической сетью. Архитектура ИКАС АПР состоит из трех основных блоков: блока формирования знаний о диагностике неисправностей АПР, транслятора знаний в программный код и собственно КАС АПР.

В ближайшее время планируются реализация ИКАС для программной платформы АПР разработки ИПМТ ДВО РАН и её всестороннее тестирование.

ВВЕДЕНИЕ

Автономные подводные роботы (АПР) находят всё более широкое применение для выполнения длительных океанографических исследований или технологических операций. При осуществлении таких работ крайне актуальна надёжность функционирования робота и его способность в максимальной степени выполнить предусмотренные задачи.

АПР можно рассматривать как устройство для генерации целенаправленного и адекватного поведения. Целенаправленность означает, что поведение робота ориентировано на решение поставленных перед ним задач, которые описываются

миссией (программой-заданием). Адекватность его поведения определяется способностью разумным образом реагировать как на события, происходящие во внешней среде (например, возникновение препятствий и способность к их обходу), так и на события, возникающие во внутренней среде (например, возникновение неисправностей отдельных устройств аппарата), сохраняя целенаправленность поведения (рис. 1).

Адекватность поведения АПР поддерживается контрольно-аварийной системой (КАС), которая входит в состав информационно-управляющей системы (ИУС) и тем или иным образом проводит диагностику робота. Основной инфор-

мацией, которой оперирует КАС, являются сигналы, вырабатываемые средствами самодиагностики функциональных модулей аппарата (внутренняя информация), а также параметры, измеряемые датчиками внешней среды и навигационной системой АПР (внешняя информация). К числу основных задач, решаемых КАС, можно отнести:

- диагностику состояния АПР на основе анализа внутренних и внешних событий и измеряемых параметров;

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел.: 8(423)2215545. E-mail: inzar@marine.
febras.ru

² 690041, Владивосток, ул. Радио 5.
Тел/факс: (423)2310452. E-mail: gribova@iacp.
dvo.ru



Рис. 1. Отношения основных понятий, используемых в статье

- локализацию аварийных ситуаций путём выполнения действия по восстановлению, использованию альтернативных режимов движения или работы бортового оборудования;
- трансформацию миссии при невозможности выполнить её целиком.

В настоящее время работа КАС аппарата основана на гипотезе об изолированности сигналов, т.е. КАС реагирует на эту информацию реактивно – при появлении того или иного сигнала выполняется связанный с этим сигналом программный модуль [1]. Во многих случаях такое поведение аварийной системы оправданно, однако существуют ситуации, когда единичная авария может вызвать появление нескольких сигналов квазиодновременно. Кроме того, одна авария может повлечь последовательность других аварий. В существующей версии КАС эта проблема частично разрешается путём настройки временных задержек на реакцию по каждому сигналу. Однако в общем случае реакция робота на такие неисправности не всегда является адекватной. Это может приводить к преждевременному прекращению миссии в ситуациях, когда она может быть продолжена за

счёт использования дублирующих бортовых устройств, альтернативных режимов движения или хотя бы в сокращенном варианте.

Целью работы является описание интеллектуальной контрольно-аварийной системы (ИКАС), основанной на декларативных базах знаний и позволяющей формировать адекватное поведение АПР в аварийных ситуациях.

Обзор литературы

Для сложных динамических систем (в частности, для АПР) большое значение имеет решение задач функциональной самодиагностики, когда управление и диагностика неисправностей осуществляются в реальном масштабе времени в процессе управляемых движений динамических систем. ИУС должна быть снабжена системой самоконтроля состояния робота, позволяющей распознавать неисправности его подсистем и осуществлять отказоустойчивое управление с использованием аппаратных и/или программных средств [2–4]. Особо отмечается сложность реализации таких систем [4]. Можно выделить три основных подхода к реализации подсистем самодиагностики роботов.

1. Подход, основанный на алгоритмической обработке сенсорных сигналов [2, 3, 5], можно считать традиционным. Он использует методы математической статистики, теории вероятности, а также численные методы оптимизации. Развитием данного подхода является самодиагностика с использованием аналитической модели. Такой подход может использоваться в системах, имеющих точную математическую модель процессов управления и движения робота. Однако в реальных приложениях такую модель, особенно при наличии неопределенных факторов, построить очень трудно [2].

2. Машинное обучение с использованием нейросетей [6–8] и иммунных искусственных сетей [9]. Наиболее полный обзор применения данного подхода в существующих решениях представлен в [6]. Автору удалось обобщить многие доступные для анализа реализации и представить их в виде графической диаграммы. Однако, несмотря на достигнутые успехи, в работе [7] отмечается, что попытки нейросетевой реализации в настоящее время «не имеют впечатляющих решений». В работе [8] автор также замечает, что использование нейросетевого подхода до настоящего времени не позволило решить проблему самодиагностики в полном объеме. Для улучшения алгоритмов работы этих систем в некоторых случаях используются гибридные подходы [8], объединяющие традиционные статистические методы с методами обучения на основе нейронных сетей.

3. Методы искусственного интеллекта, основанные на базах знаний [2, 10, 11], используются в наиболее сложных ситуациях, когда другие методы не дают удовлетворительных решений. При этом отмечается, что современные исследования по обнаружению неисправностей и восстановлению системы выполняются главным образом на моделирующих устройствах или в лабораторных условиях. В общем случае технология создания такой системы состоит из следующих основных этапов [2]:

а) выявление особенностей состояний, позволяющих отличить аварийную ситуацию от штатной;

б) формулирование предположений о последовательностях событий, характерных для таких ситуаций;

в) представление этих последовательностей на дереве состояний виртуального робота;

г) разработка программных алгоритмов для проверки заданных последовательностей состояний (реализация алгоритма, реализующего обход дерева состояний);

д) интеграция алгоритмов в структуру симулятора и последующее согласование с работой ИУС в режиме реального времени.

База знаний при этом представляется в виде системы правил с реализацией на языке высокого уровня.

Общим недостатком продукционного подхода к формированию баз знаний является сложная модификация и сопровождение системы в процессе эксплуатации. Поэтому в настоящее время наибольшее распространение получает онтологический подход к реализации интеллектуальных программных систем, который устраняет многие недостатки продукционного подхода, а также позволяет включить в процесс разработки и сопровождения экспертов предметной области [12, 13].

Исходные предпосылки для разработки интеллектуальной КАС АПР

Как отмечалось во введении, во время работы АПР могут возникать различные диагностические ситуации – совокупности неисправностей, появившихся практически одновременно, хотя и объединенных причинно-следственными отношениями. Некоторые из диагностических ситуаций являются однозначными, т.е. требуют вполне определенных действий, связанных с прекращением миссии, ее корректировкой или продолжением. Другие диагностические ситуации

не являются однозначными. Они требуют приостановки миссии и выполнения тестовых действий, необходимых для получения дополнительной информации и позволяющих прийти к однозначным диагностическим ситуациям.

В настоящей работе предполагается, что знания о диагностических ситуациях, их связях с внутренней и внешней информацией, а также действиями, выполнение которых необходимо в этих ситуациях, представлены экспертами в базе знаний. В случае, если датчики и сенсорные системы выдают информацию о наличии неисправностей, интеллектуальный КАС АПР приостанавливает выполнение миссии и на основе базы знаний определяет возникшую диагностическую ситуацию. Если она является неоднозначной, АПР выполняет связанные с ней тестовые действия до тех пор, пока не удастся определить, в какой однозначной диагностической ситуации он находится. После этого либо миссия прекращается, либо, если это возможно, ее выполнение продолжается в первоначальном или усеченном варианте.

Основные понятия

В этом разделе вводятся основные понятия, в терминах которых описывается ИКАС.

Устройство АПР. Здесь и далее АПР рассматривается как носитель полезной нагрузки. Диагностика полезной нагрузки на данном этапе не является предметом исследования. С этой точки зрения АПР состоит из движительно-рулевого комплекса (ДРК), системы энергообеспечения (СЭО), навигационно-пилотажных датчиков (НПД) и инерциальной навигационной системы (ИНС), датчика глубины (ДГ), эхолокационной системы (ЭЛС), доплеровского и относительного (вертушечного) лагов (ДЛ и ВЛ соответственно), регуляторов движения (РД) и миссии.

В зависимости от модели робота указанные устройства могут иметь различные конфигурации. Например, количество двигателей в ДРК может колебаться от трёх до девяти, а АПР может иметь носовые и кормовые подруливающие двигатели или вовсе не иметь их. СЭО может состоять из различного количества батарейных модулей (БМ). Пример графического представления описа-

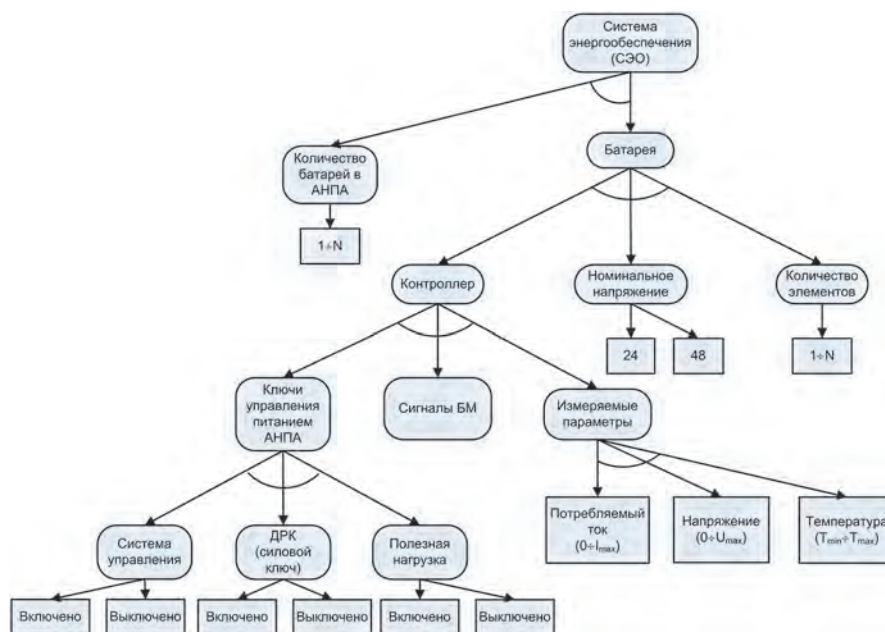


Рис. 2. Графическое представление описания системы энергообеспечения. Сегменты окружности возле вершин графа, соединяющие исходящие дуги, обозначают объединение по И (конъюнкцию). Необъединенные исходящие дуги обозначают альтернативу

ния СЭО приведен на рис. 2. НПД служат для измерения магнитного курса, крена, дифферента, а также угловых скоростей по курсу и дифференту. Если НПД есть в составе любого аппарата, то ИНС из-за габаритов и стоимости может быть установлен только на относительно большие АПР и т.д. Детальное описание всех бортовых устройств АПР выходит за рамки данной статьи.

Сигналы. Программы самодиагностики отдельных устройств АПР вырабатывают бинарные данные, называемые далее сигналами. Сигналы являются первичной информацией для ИКАС. Название сигнала связано с причиной, которая может его вызвать. Например, двигатели могут вырабатывать следующие сигналы: *короткое замыкание в двигателе, перегрузка двигателя, перегрев двигателя, ошибка датчика положения ротора* и т.п. При этом каждый такой сигнал может иметь как одну, так и несколько возможных причин.

Параметры. Датчики и системы АПР циклически вырабатывают двоичные коды – значения измеряемых параметров. Например, с НПД связаны следующие параметры: $\varphi_{\text{НПД}}$, $\dot{\varphi}_{\text{НПД}}$ – измеряемые курс

и скорость изменения курса; $\psi_{\text{НПД}}$, $\dot{\psi}_{\text{НПД}}$ – измеряемые дифферент и скорость изменения дифферента; $\gamma_{\text{НПД}}$ – измеряемый крен. А регуляторы генерируют такие параметры, как: $\Delta H(t)$ – ошибка стабилизации вертикального канала управления; $\Delta \varphi(t)$ – ошибка стабилизации горизонтального канала управления; $S_{\Delta H}(t) = \int_{t-\Delta t}^t \Delta H(t)dt$ – интеграл ошибки стабилизации вертикального канала управления за интервал времени Δt , предшествующий текущему моменту; $S_{\dot{H}}(t) = \int_{t-\Delta t}^t \dot{H}_{\text{ДГ}}(t)dt$ – интеграл скорости изменения глубины за интервал времени Δt , предшествующий текущему моменту и т.п.

Признаки. На основе значений параметров ИКАС вычисляет бинарные значения признаков. Значения признаков, как и значения сигналов, используются ИКАС для определения диагностических ситуаций.

Например, на основе значений параметров БМ вычисляются значения следующих признаков: *аномальное энергопотребление БМ* ($I_{\text{БМ}} \approx I_{\text{max}}$); *повышенное энергопотребление БМ* ($I_{\text{ном}} < I_{\text{БМ}} < I_{\text{max}}$).

Для РД, например, вычисляется признак *большая статическая ошибка стабилизации вертикального канала управления* ($|S_{\Delta H}(t)| \geq T_{1H}$ при $S_{\dot{H}}(t) \approx 0$).

Атомарные аварии. В системах и устройствах АПР могут возникать «атомарные» аварии (состояния), диагностируемые ИКАС с использованием базы знаний. Описание атомарной аварии (состояния) представляет собой условие, выполнение которого означает, что эта атомарная авария (состояние) имеет место. Условие имеет вид либо конъюнкции $\& a_i$, либо дизъюнкции $\vee b_i$, где a_i есть либо сигнал, либо признак, либо атомарная авария (точнее, условие, являющееся ее описанием), либо элемент модели АПР, либо необязательный элемент, либо отрицание, либо дизъюнкция, а b_i есть либо сигнал, либо признак, либо атомарная авария, либо элемент модели АПР, либо обязательный элемент, либо отрицание, либо конъюнкция.

Например, для ДРК определены следующие атомарные аварии: *реальное короткое замыкание в двигателе, мнимое короткое замыкание в двигателе, перегрузка двигателя, несанкционированное выключение*

Фрагмент базы знаний о диагностических ситуациях

Ситуация	Определение ситуации	Выполняемые действия
Необходимость прекращения миссии	Вода в двигателе $\vee$ Вода в БМ $\vee$ Вода в навигационно-пилотажных датчиках (НПД) $\vee$ Вода в ИНС $\vee$ Вода в ДГ $\vee$ Отказ ДГ $\vee$ Нет связи с ДГ $\vee$ Вода в ЭЛС $\vee$ Нет связи с ЭЛС $\vee$ Авария контроллера ЭЛС $\vee$ Вода в ДЛ $\vee$ Проблема с контроллером или микропрограммой ЭЛС $\vee$ (Необходимость переключения на другую батарею $\&$ Нет работоспособных батарей) $\vee$ (Отказ ВЛ $\&$ Отказ ДЛ) $\vee$ (Отказ ИНС $\&$ Отказ НПД) $\vee$ (Авария ЭЛС как измерителя высоты $\&$ Отказ ДЛ)	Дается команда на прекращение миссии
Необходимость переключения на другую батарею	Неработоспособный БМ n $\&$ [Несанкционированное выключение питания двигателей]	Переключение на другую батарею. Если все батареи уже были использованы – прекращение миссии.
Переход с ИНС на НПД	Отказ ИНС $\vee$ Нет связи с ИНС	Навигационной программе дается команда «Использовать НПД» (или прекращение миссии, если НПД отсутствует или «Отказ НПД»)

питания двигателя, вода в двигателе, остановка двигателя, авария датчика положения ротора двигателя, сбой работы программы микроконтроллера в двигателе, нет связи с микроконтроллером, перегрев двигателя.

Действия. ИКАС может взять управление аппаратом на себя для выполнения определенных действий (в том числе, диагностических), например: «Вывести двигатель *N* из списка работоспособных», «Переход в режим зависания на глубине *X*», «Увеличение заданной скорости движения на один квант» и др.

Диагностические ситуации.

Диагностическая ситуация – это совокупность аварий, которая может возникнуть в аппарате. Если эта диагностическая ситуация описана в базе знаний, то АПР должен вести себя адекватно, в соответствии с описанием этой ситуации в базе знаний. Описание диагностической ситуации состоит из условия, выполнение которого означает, что эта диагностическая ситуация имеет место; из действия, которое должно выполняться первым в этой ситуации; и последовательности элементов, каждый из которых является либо действием, либо множеством диагностических ситуаций. Если ИКАС устанавливает, что диагностическая ситуация имеет место, выполняется первое действие. Если следующим элементом последовательности является действие, то выполняется оно. Если следующим элементом последовательности является множество диагностических ситуаций, то устанавливается, какая из диагностических ситуаций имеет место, и выполняются действия, связанные с этой диагностической ситуацией и т.д. Примеры диагностических ситуаций приведены в таблице.

Место интеллектуальной КАС в составе ИУС АПР

Интеллектуальный КАС ориентирован на использование в составе программной среды АПР, разра-

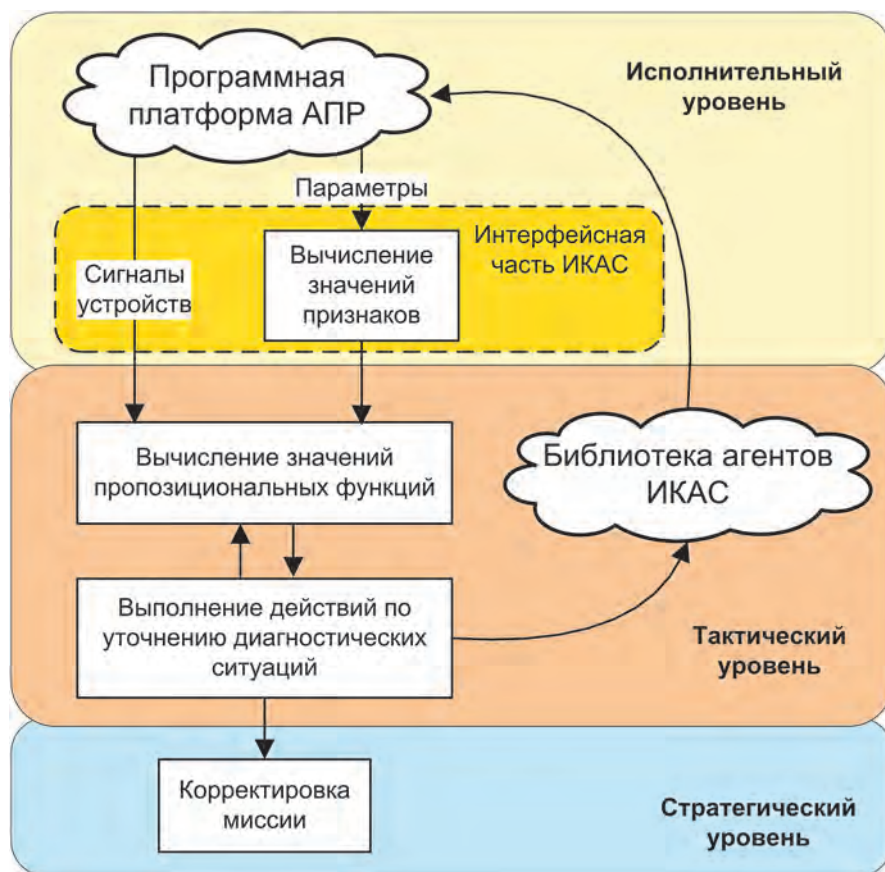


Рис. 3. Концептуальная схема ИКАС

батываемых и эксплуатируемых в ИПМТ ДВО РАН. ИКАС функционирует как компонент тактического уровня [14], способный приостанавливать ход основной миссии и выполнять диагностические действия (подмиссии) при необходимости. Диагностические действия выполняются путём активизации того или иного компонента из состава библиотеки агентов ИКАС, которая является подмножеством библиотеки агентов тактического уровня робота. Для выполнения перечисленных действий в рамках программной платформы ИКАС подписан на необходимые сигналы (бинарные данные, вырабатываемые программами диагностики отдельных устройств АПР) и параметры ИУС (рис. 3). С использованием этих данных определяются значения признаков (предикатов, вычисляемых на основе значений параметров) и пропозициональных функций (функций с двоичным результатом, вычисляемых на основе значений сигналов

и признаков). Далее эти значения используются выводящей машиной для работы с базой знаний.

Машина вывода является ресурсом объектом для бортовой вычислительной сети АПР. Для минимизации вычислительной нагрузки на сеть используется интерфейсная часть ИКАС, размещаемая на исполнительном уровне. В её задачи входят вычисление признаков и генерация событий для ИКАС в случае изменения какого-либо признака. Таким образом, каждый цикл работы выводящей машины привязан к появлению того или иного события. Событийно-ориентированный подход позволяет значительно уменьшить вычислительную нагрузку на бортовую сеть при интеграции ИКАС в состав ИУС робота.

Архитектура и реализация ИКАС

ИКАС формируется компилятором по заданной базе знаний и опи-

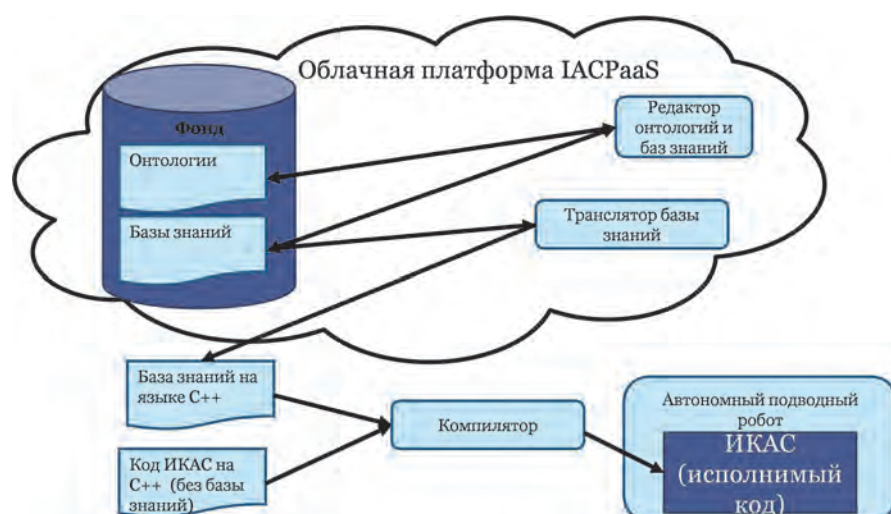


Рис. 4. Схема формирования исполнимого кода ИКАС

санию конфигурации робота. База знаний разрабатывается и сопровождается на облачной платформе IACPaaS [15]. Платформа представляет собой программно-информационный интернет-комплекс для обеспечения поддержки разработки, управления и удаленного использования прикладных и инструментальных облачных сервисов (прежде всего интеллектуальных) и их компонентов.

База знаний разрабатывается на основе двухуровневого подхода: сначала разрабатывается метainформация (онтология базы знаний), в терминах которой формируется и сопровождается база знаний через редактор баз знаний, который, в свою очередь, является сервисом платформы. Знания представляются семантической сетью. Разработанная на платформе база знаний транслируется в код на языке C++. Трансляция базы знаний в код на C++ осуществляется с использованием транслятора базы знаний, который является сервисом платформы. Исходный код базы знаний и код ИКАС с «пустой» базой знаний компилируются в исполнимый код АПР. В ходе выполнения миссии база знаний не изменяется (рис. 4). В случае необходимости внесения изменений в базу знаний ее модификация осуществляется на облачной платформе с последующим выполнением действий, описанных выше. Основное преимущество предло-

женного подхода заключается в том, что сопровождение базы знаний может осуществляться удаленно группой экспертов, а имеющиеся на платформе сервисы позволяют ее представлять и модифицировать в форме, удобной и понятной экспертам: по онтологии автоматически генерируется интерфейс редактора баз знаний. Таким образом, использование платформы позволяет значительно упростить создание и сопровождение баз знаний.

Обязательными информационными компонентами платформы являются онтологии, описывающие системы понятий, в терминах которых формируются соответствующие

щие базы знаний и непосредственно базы знаний. К настоящему времени на платформе IACPaaS разработаны онтология диагностических ситуаций, онтология сигналов и признаков, а также онтология устройства АПР.

Онтология диагностических ситуаций является управляющей онтологией, по которой формируется база знаний о диагностических ситуациях. Онтология состоит из множества ситуаций, каждая из которых содержит антецедент, задающий условия выполнения ситуации, и консеквент, задающий множество действий, которые должны быть выполнены, если условие истинно. Условие содержит список конъюнктов и/или дизъюнктов, каждый из которых описывает альтернативу, элементом которой выступает атомарная авария, сигнал или признак. При этом может учитываться элемент модели АПР. На рис. 5 приведена копия экрана онтологии диагностических ситуаций, реализованной на платформе IACPaaS.

На основе данной онтологии разработана база знаний о диагностических ситуациях (см. таблицу).

Онтология признаков и сигналов является вспомогательной онтологией и содержит описание множества признаков, сигналов и атомарных аварий. Атомарные аварии описываются как множество альтер-

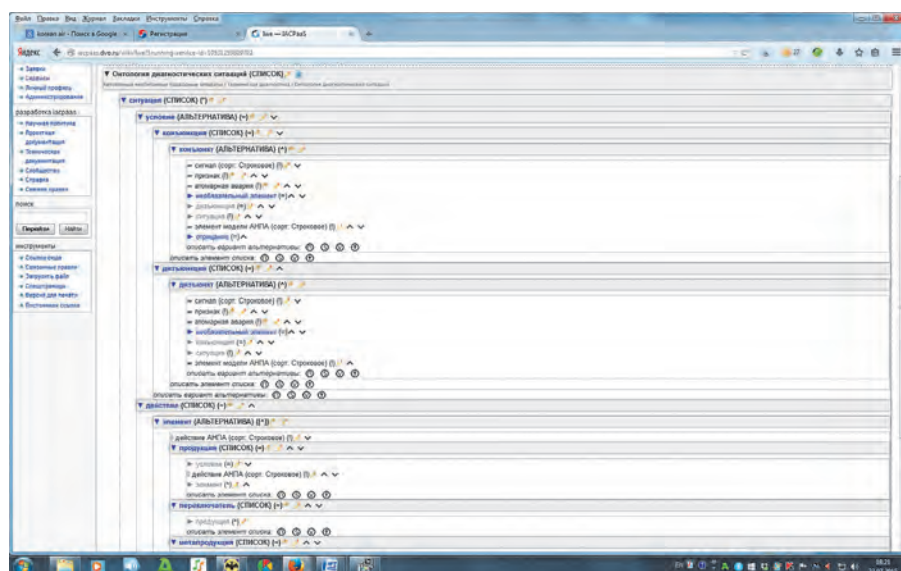


Рис. 5. Копия экрана онтологии диагностических ситуаций

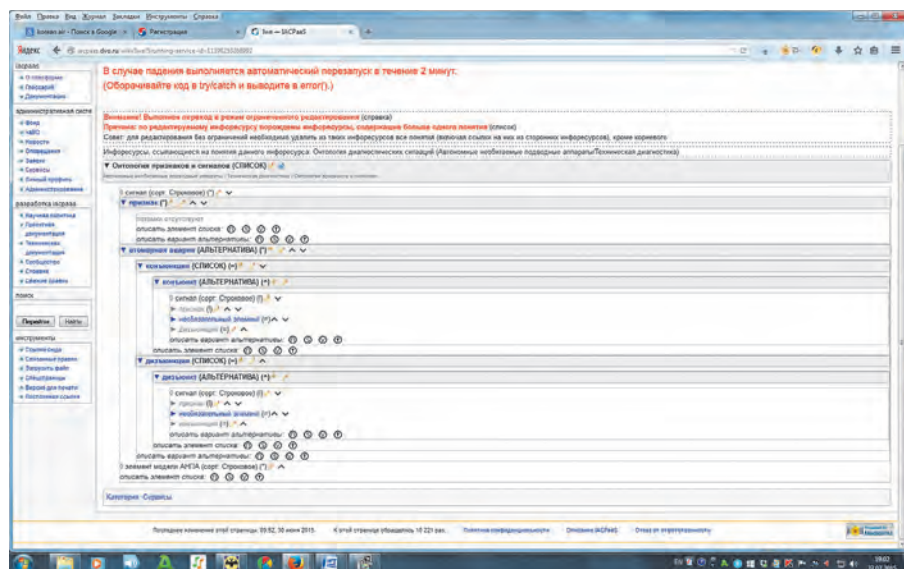


Рис. 6. Копия экрана онтологии признаков и сигналов

натив; каждая альтернатива – список конъюнктов и/или дизъюнктов, необходимых для описания аварии в терминах сигналов. На рис. 6 приведена копия экрана онтологии признаков и сигналов, реализованный на платформе IAS PaaS.

Онтология устройства АПР представляет собой структуру, определяющую состав конкретной модификации АПР, структура которого описана в разделе «Основные понятия». Пример детального описания онтологии устройств приведен на рис. 7.

Концептуальная архитектура интеллектуального комплекса диа-

гностики неисправностей АПР состоит из трех основных блоков:

- формирования знаний о диагностике неисправностей АПР;
- транслятора знаний в программный код;
- собственно КАС АПР.

Блок формирования знаний включает программные и информационные компоненты на платформе IAS PaaS. Информационными компонентами являются упомянутые выше онтология, база знаний о диагностических ситуациях, а также баз данных о сигналах и признаках и устройстве АПР. Программными компонентами являются редак-

тор онтологий и редактор знаний, управляемый онтологиями, с помощью которых создаются и модифицируются соответствующие информационные ресурсы.

На платформе эксперты предметной области осуществляют формирование и отладку баз знаний, после чего она компилируется в программный код и связывается с кодом КАС. Такой подход обеспечивает нетрудоёмкую модификацию базы знаний при необходимости, а также низкую вычислительную ресурсоёмкость получаемой системы диагностики за счёт проведения её компиляции.

Для реализации возможности перепланирования миссия специфицируется в виде набора неделимых задач (целей), который, вообще говоря, может меняться в процессе работы АПР. В общем случае цели могут достигаться как в порядке перечисления, заданном на момент старта АПР, так и в оптимальном порядке (например, в смысле минимизации общей длины траектории или энергозатрат). Очередная задача для выполнения выбирается планировщиком ИУС путём соотношения цели и имеющихся в наличии средств для её достижения с учётом минимизации указанного функционала. В свою очередь, ИКАС формирует список доступных средств на основе проведённых операций по тестированию и локализации возможных аварий.

В настоящее время задачи миссии выполняются роботом в порядке перечисления. В этих условиях ИКАС может корректировать миссию, инициализируя пропуск задач, которые не могут быть выполнены в текущем состоянии АПР.

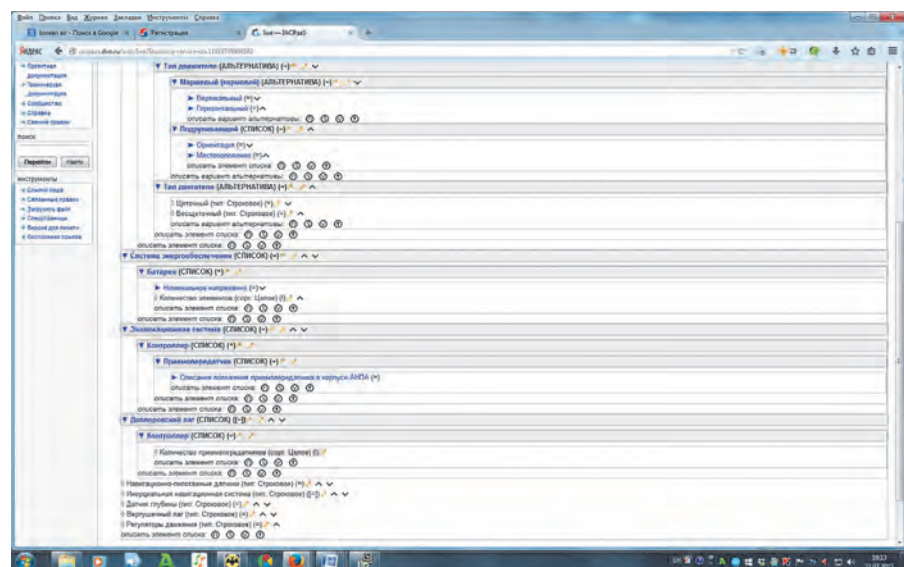


Рис. 7. Копия экрана онтологии устройств АПР



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеллектуальный КАС для АПР, разработанных в ИПМТ ДВО РАН, проходит этап становления. Принципиальным отличием ИКАС от аналогов является реализация системы на основе знаний с использованием онтологического подхода. При этом онтологии и знания разрабатываются и сопровождаются на облачной платформе IASPaas, содержащей специализированные редакторы знаний, генерируемые по онтологиям. Это позволяет в структурном виде просматривать и модифицировать базы знаний и включать в этот процесс экспертов предметной области.

На данный момент разработана архитектура ИКАС, определен состав и структура каждого компонента, реализованы онтологии и базы знаний, которые доступны на платформе IASPaas. Разработана схема компиляции баз знаний в программный код на C++. В ближайшее время планируются реализация ИКАС для программной платформы АПР разработки ИПМТ ДВО РАН и её всестороннее тестирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.]. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Частиков А.П., Тотухов К.Е., Урвачев П.М. Теоретические основы интеллектуальной диагностики виртуального робота [Электронный ресурс] // Соврем. проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: www.science-education.ru/107-8310.
3. Ando N. [et al.]. Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots // Second International Conference, SIMPAR 2010: Proceedings. Darmstadt: Springer, 2010. 558 p.
4. Cully A., Clune J., Baptiste J. Mouret. Robots that can adapt like natural animals. [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/pdf/1407.3501.pdf>.
5. Chirikjian G.S. Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations // Distributed Autonomous Robotic Systems. 2009. No. 8. P. 273–281.
6. Mohamed A.H. Fuzzy Neural Network Fault Diagnostic System // Journ. of Nuclear Technology in Applied Science. 2014. Vol. 2, No 4. P. 483–490.
7. Самарин А.И. Модель адаптивного поведения мобильного робота, реализованная с использованием идей самоорганизации нейронных структур [Электронный ресурс]. URL: http://www.library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2003/4_konf_neuro_02/106.pdf.
8. Кожевников М.М. Нейросетевой подход к мониторингу состояния промышленных роботов манипуляторов // Робототехника и мехатроника. 2013. №1 (3). С. 42–48.
9. Самигулина Г.А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Теоретическая информатика. 2009. Вып. 4. С. 15–22.
10. Kayla S., Joshi K., Di Giandomenico F. Failure Diagnosis of Complex Systems // Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems. Springer, 2012. P. 239–261.
11. Lanigan P.E., Kavulya S., Fuhrman T.E., Narasimhan P. and Salman M.A. Diagnosis in automotive systems: A survey. Technical Report CMU-PDL-11-110. Carnegie Mellon University PDL, 2011. May.
12. Грибова В.В., Клещев А.С. Технология разработки интеллектуальных сервисов, ориентированных на декларативные предметные базы знаний. Часть 1. Информационные ресурсы // Информационные технологии. 2013. № 9. С. 7–11.
13. Schalkoff R.J. Intelligent Systems: Principles, Paradigms and Pragmatics. Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers, 2011. 758 p.
14. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1(15). С. 4–16.
15. Грибова В.В., Клещев А.С., Крылов Д.А. и др. Проект IASPaas – развиваемый комплекс для разработки, управления и использования интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 27–35.

