



УДК 004.89 : 62-75

¹С. С. Самонов, ²В. А. Углев, ^{1,2}Ю. М. Князькин

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ БОРТОВАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрена экспериментальная интеллектуальная система поддержки принятия решений, предназначенная для повышения безопасности процесса автомобильного транспортирования космических аппаратов. Рассмотрена архитектура системы, а также затронуты вопросы её программной и аппаратной реализации.

Ключевые слова: транспортирование, космический аппарат, автоматизация, система поддержки принятия решений, искусственный интеллект, база знаний.

¹S. S. Samonov, ²V. A. Uglev, ^{1,2}Yu. M. Knyazkin

¹JCS «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»
Zheleznogorsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

ONBOARD INTELLECTUAL SYSTEM OF DECISION SUPPORT FOR TRANSPORTATION OF SPACECRAFT

The article describes an experimental intelligent decision support system designed to improve the safety of road transportation spacecraft. The system architecture, as well as the issues of its software and hardware implementation is considered.

Key words: transportation, spacecraft, automation, decision support systems, artificial intelligence, knowledge base.

Транспортирование космического аппарата (КА) от завода-изготовителя до космодрома осуществляется автомобильным, авиационным и железнодорожным транспортом. Согласно требованиям к условиям транспортирования космических аппаратов [1] в процессе автотранспортировки, как минимум, должен осуществляться мониторинг ударных

нагрузок, вибрации, температуры и влажности внутри контейнера с КА [2]. С учетом специфики отечественных дорог именно механические воздействия представляют наибольшую опасность для КА [3]. Поэтому их стараются минимизировать, в том числе с применением средств автоматизации [4]. Рассмотрим эту проблему применительно к этапу автотранспортирования спутников связи, создаваемых на АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

1. Технология транспортирования

Технология транспортирования КА постоянно совершенствуется [5]. Начиная с 1964 года космические аппараты по прибытии на космодром необходимо было повторно испытывать, что влекло затраты времени на изготовление и развёртывание дополнительного комплекта контрольно-проверочной аппаратуры, а также на проведение повторных комплексных испытаний. С 1995 года технология была изменена: комплексный контроль условий транспортировки и минимизация механических воздействий позволили не проводить дополнительных испытаний КА по прибытии на космодром. Это было достигнуто за счёт регулирования скоростных режимов транспортирования, применения специализированных транспортных средств и предварительных проездов с весовыми макетами.

Технологию транспортирования можно описать в виде последовательности ряда укрупнённых этапов (рис. 1).

Этап 1. Предварительно (до отправки самолета) проверяется трасса от завода-изготовителя до аэропорта и составляется карта скоростного режима (КСР) согласно состоянию дорожного покрытия. Предполагается наличие весового макета, в специальный контейнер устанавливаются датчики для регистрации механических воздействий. В проезде принимает участие специалист по прочности, отмечающий на карте проблемные участки маршрута. Задачи предварительного проезда [1]:

- регистрация механических воздействий на опорах крепления КА внутри контейнера;
- проезд с соблюдением рекомендуемого скоростного режима;
- оперативный анализ полученной информации, выдача рекомендаций по скоростному

режиму транспортирования на обратный маршрут.

Этап 2. По завершении предварительного проезда вся зарегистрированная датчиками информация о механических воздействиях, дорожной обстановке и скорости транспортирования передается для более детального анализа специалистом по прочности. Результатом анализа является КСР, которая сопровождается выпуском методического указания для водителя по скоростному режиму транспортирования изделия.

Этап 3. Производится погрузка и транспортирование контейнера с КА от завода-изготовителя до аэропорта согласно КСР и методическому указанию. В процессе перевозки специалист по прочности вновь едет с водителем, напоминая ему о проблемных участках на маршруте и рекомендуемой скорости.

Этап 4. После отправки самолета с КА анализируются полученные в ходе транспортирования данные и корректируются (при необходимости) КСР в случае регистрации отклонений от изначально ожидаемых условий транспортирования для уточнения скоростного режима при будущих транспортировках.

Пунктирная обратная связь на рис. 1 показывает, что учёт ошибок, допущенных специалистом по прочности на втором и третьем этапах, происходит лишь при возникновении необходимости транспортирования следующего КА. Поэтому такая технология обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, недостаточно точное отражение в КСР маршрута состояния дорожного полотна: специалист по прочности может не учесть, пропустить или забыть отметить отдельные точки маршрута, в которых есть риск повреждения аппарата. Во-вторых, недостаточная оперативность и эффективность взаимодействия водителя и специалиста по прочности

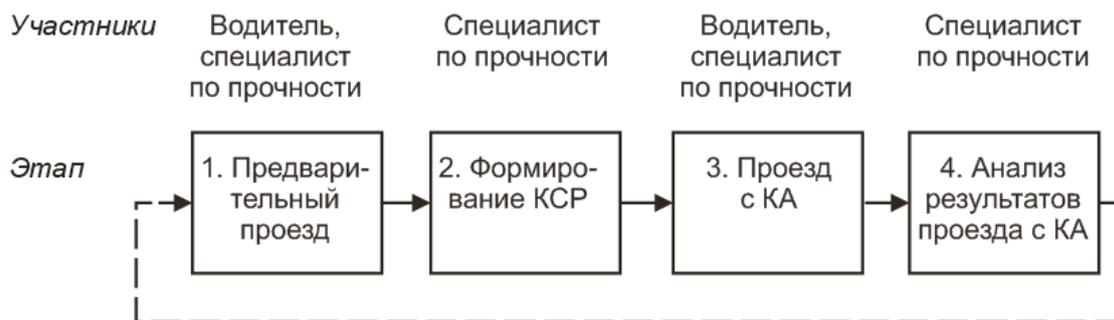


Рис. 1. Этапы технологии автомобильного транспортирования КА

во время перевозки КА: КСР периодически нарушается по причинам невнимательного или несвоевременного обращения к карте маршрута или непредвиденных обстоятельств на дороге. При этом состояние дорожного полотна каждый раз изменяется, а условия перевозки (погодные условия, видимость и пр.) при предварительном проезде и перевозке КА могут не совпадать. Результатом такого подхода к управлению скоростным режимом является повышенный риск повреждения КА из-за «человеческого фактора» (второй и третий этапы на рис. 1). Очевидно, что исключить специалиста по прочности и водителя из этого процесса полностью нельзя – слишком много внешних факторов и имеется специфика отечественных дорог. Но вклад «человеческого фактора» можно снизить, применяя современные методы автоматизации для формирования оперативного контура управления непосредственно в процессе перевозки КА.

2. Повышение степени автоматизации

Процесс транспортирования КА сопровождается регистрацией механических воздействий (ударных нагрузок и вибрации аппарата) по всем трем осям координат специальными датчиками. Дополнительно к этому осуществляется видеорегистрация условий перевозки с детальной привязкой к карте маршрута по сигналу с GPS/ГЛОНАСС-навигатора. Но, несмотря на детальный сбор информации, её анализ производится «в ручном» режиме. Вследствие этого на всём маршруте автомобильного транспортирования (а это более 110 км) на КСР выделяют 20–60 проблемных точек. Очевидно, что повреждения многих точек маршрута, где дорожное полотно имеет значительные разрушения, недооцениваются. Кроме того,

в процессе транспортирования КА специалист по прочности производит «визуальный» контроль соблюдения скоростного режима (особенно в условиях плохой видимости), что в значительной мере повышает риск повреждения перевозимого изделия.

Анализ предметной области показал, что повышение степени автоматизации процесса анализа состояния дорожного полотна (составление КСР), а также процесса контроля соблюдения скоростного режима при перевозке КА позволит снизить риски от влияния «человеческого фактора». Для этого должна быть разработана и внедрена система поддержки принятия решений, позволяющая повысить результативность работы специалиста по прочности, а кое-где и заменить его. Это требует соответствующего уровня интеллектуализации системы, а также корректировки технологии транспортирования. Для обозначения этой системы будем применять сокращение ИСППР – бортовая интеллектуальная система поддержки принятия решений.

Рассмотрим модифицированный вариант технологии транспортирования в разрезе тех же четырёх этапов (рис. 2).

Этап 1. Предварительно проверяется трасса и составляется КСР. Предполагается наличие весового макета, на контейнер устанавливаются датчики для регистрации силы механических воздействий. В проезде принимает участие специалист по прочности, отмечающий на карте проблемные участки маршрута.

Этап 2. Исходные данные о механических воздействиях, дорожной обстановке и скорости транспортирования анализируются специалистом по прочности, и формируется предварительная КСР. Далее модуль анализа маршрута ИСППР автоматически проводит детальный анализ всех существенных зареги-

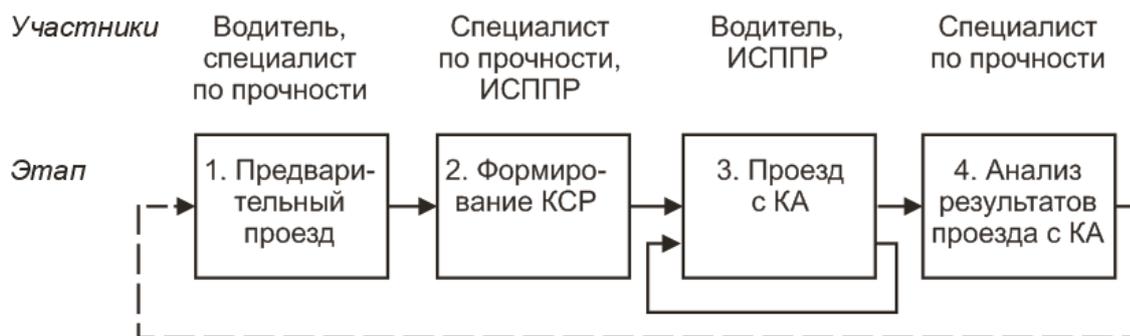


Рис. 2. Этапы модифицированной технологии автомобильного транспортирования КА

стрированных механических воздействий при предварительном проезде и автоматически дополняет КСР дополнительными точками. Далее КСР поступает на экспертизу к специалисту по прочности с последующим формированием методических указаний.

Этап 3. Производится погрузка и транспортирование контейнера с КА от завода-изготовителя до аэропорта согласно КСР и методическому указанию. Специалист по прочности на этом этапе уже не участвует в перевозке КА, его заменяет программно-аппаратный модуль бортовой ИСППР, анализирующий доступные факторы оперативной обстановки и взаимодействующий с водителем посредством естественно-языкового человеко-машинного интерфейса.

Этап 4. После отправки самолета с КА осуществляется анализ полученных в ходе транспортирования данных и корректировка КСР.

Введение бортовой ИСППР на третьем этапе транспортирования в качестве замены специалиста по прочности позволяет сформировать оперативный контур управления (обратная связь у блока 3 на рис. 2). Детальный анализ данных предварительного проезда и формирование дополнительного автоматизированного оперативного контура управления позволяют значительно снизить вклад «человеческого фактора» на втором и третьем этапах транспортирования, связанных с качеством работы специалиста по прочности.

3. ИСППР

Функциональность ИСППР определяется двумя этапами в технологии автомобильного транспортирования (этапы 2 и 3 согласно рис. 2): сначала осуществляется подготовка (детализация) КСР, а затем происходит сопровождение изделия во время транспортировки (рекомендации скоростного режима). Соответственно, будет рационально выделить два модуля, отвечающие за выполнение этих функций. Для дальнейшего изложения принципов организации и логики работы модулей ИСППР приведём общую схему принятия решений, реализуемых интеллектуальным ядром системы.

Пусть имеется необходимость принятия качественного решения $y_{\text{опт}}$. Тогда постановка задачи принятия решений в общем виде будет записана следующим образом:

$$f(X, Y) \xrightarrow{\min(Z)} y_{\text{опт}}, \quad (1)$$

где X – вектор входных данных (факторов); Z – фактические механические воздействия; $y_{\text{опт}}$ принадлежит множеству альтернатив (рекомендаций) Y . Для принятия наиболее предпочтительного решения вводится принцип оптимальности – $\min(Z)$ [6]. Такая постановка задачи позволяет детализировать все компоненты из (1) для конкретной задачи ИСППР при транспортировании КА. Это, в свою очередь, предполагает исследование предметной области, формирование поля знаний и в результате формализацию структуры базы знаний системы.

Функция дополнения КСР. Отработка ИСППР на этапе 2 происходит на заводе-изготовителе после получения данных предварительного проезда. Поэтому модуль дополнения КСР реализуется в виде программы, состоящей из следующих компонентов:

- компонент импорта данных, обрабатывающий файлы протоколов с устройств регистрации механических воздействий, электронную карту маршрута, а также предварительный вариант КСР, разработанный специалистом по прочности;
- база знаний, хранящая экспертные знания о логике принятия решений при анализе состояния дорожного полотна и специфических участках маршрута;
- интеллектуальный решатель, реализующий обработку базы знаний;
- диалоговый интерфейс системы, позволяющий произвести экспертизу результатов работы модуля специалистом по прочности;
- компонент экспорта данных в КСР (формирование обновлённой карты).

Загружаемые исходные данные анализируются модулем на предмет наличия участков с повышенными механическими нагрузками. Каждый участок, который можно отнести к потенциально опасному для изделия, локализуется (привязывается к карте) в виде точки с координатами. Далее модуль подключает блок экспертной оценки (база знаний и интеллектуальный решатель), принимающий решение о включении данной точки в КСР.

База знаний представляется в виде множества организованных специальным образом продукционных правил [7]. На вход интеллектуальному решателю подаются следующие факторы (вектор X_1): «фактическая механическая нагрузка», «скоростной режим, заданный специалистом по прочности», «расстояние до

предыдущей сигнальной точки», «расстояние до следующей сигнальной точки», «соотношение скоростей», «вид сигнальной точки»*.

Все количественные данные, подаваемые на вход системе, преобразуются в качественную форму (фазифицируются), переводя X_1 в X_1^{\sim} . Для этих целей применяется метод нечёткой логики Л. Заде [8]. На выходе (вектор Y_1) принимается решение по трём позициям:

- следует ли включать точку в КСР (состояния: «включить в КСР», «игнорировать»);
- рекомендуемая скорость на участке (состояния: «до 10», «до 20», «до 30», «до 40», «до 50», «до 60» в км/ч);
- изменить ли предложенный специалистом по прочности скоростной режим участка на подъезде (состояния: «понизить», «без изменений»).

Отображение $f_1(X_1, Y_1)$ в $y_{опт}^1$ для предложенной структуры базы знаний осуществляется согласно (1), опираясь на проверку ряда промежуточных гипотез G_1 («уровень опасности», «необходимость в предварительном изменении скоростного режима», «необходимость в согласовании скорости с соседними сигнальными точками»). Таким образом, архитектуру фрагмента базы знаний для f_1 в графическом виде можно представить с помощью графа (рис. 3).

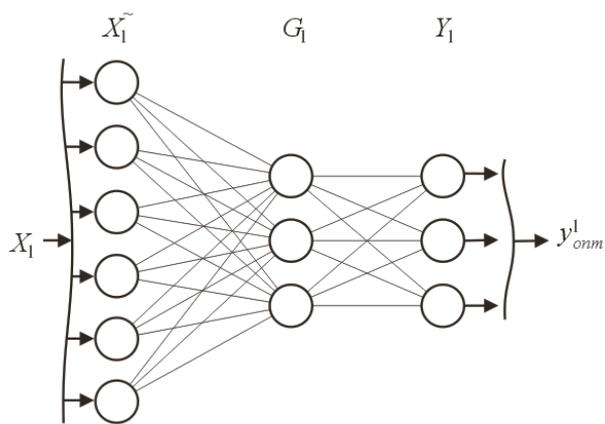


Рис. 3. Архитектура базы знаний для модуля дополнения КСР

Функция сопровождения изделия (рекомендации). Реализация второго модуля ИСППР на борту автомобиля предполагает

* Все сигнальные точки разделены на три класса: «повреждения дорожного полотна», «необходимость маневра», «особые объекты на дорожном полотне».

организацию программно-аппаратного комплекса. Схематично его состав и структура взаимодействия основных элементов представлены на рис. 4.

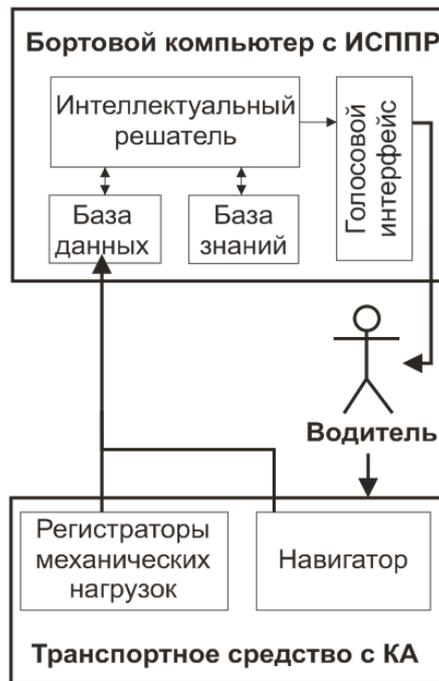


Рис. 4. Схема взаимодействия между элементами системы

Аппаратная составляющая системы предполагает интеграцию следующих компонентов:

- система датчиков (видеореги­стратор, GPS-навигатор, регистратор механических нагрузок);
- бортовой компьютер, находящийся в кабине водителя;
- силовые и информационные линии, объединяющие элементы системы.

Реализация прототипа аппаратной бортовой части системы осуществлялась на базе ПЛИС Arduino и рядом дополнительных плат (vs1053b MP3, wholesale GPS Shield Ublox/u-blox CT-1612UB и пр.).

Программное обеспечение, реализованное на базе бортового компьютера, включает в себя следующие основные компоненты:

- операционная система реального времени, обеспечивающая работу алгоритмов интеллектуального решателя, обращение к КСР и базе знаний, переключение режимов работы, считывание данных о текущих координатах, а также вывод синтезированной

ной диалоговой фразы на акустическую систему;

- интеллектуальный решатель, реализующий модуль экспертного вывода;
- база знаний, регламентирующая логику принятия решений;
- база данных с параметрами КСР (вместе с базой знаний хранятся во внешней памяти (карта Micro SD));
- подсистема синтеза фраз.

Данный модуль активен на протяжении всего пути следования контейнера с изделием до аэропорта. Исходные данные об оперативной обстановке (каждые пять секунд) поступают в бортовой компьютер, предобрабатываются по методу нечёткой логики и подаются на вход блоку экспертной оценки. Интеллектуальный решатель опирается на следующий набор факторов (вектор X_2): «текущая скорость передвижения», «рекомендуемая скорость согласно КСР», «каково расстояние до очередной сигнальной точки по КСР», «динамика изменения скорости за контрольный интервал времени», «вид сигнальной точки», «число повторений рекомендации». На выходе (вектор Y_2) принимается решение по двум позициям:

- момент информирования водителя (состояния: «кратко незамедлительно», «в штатном режиме», «позже»);
- вид фразы (состояния: «напоминание о сохранении рекомендуемого скоростного режима», «плановое изменение скоростного режима», «изменение скоростного режима в связи с появлением особого участка», «напоминание об изменении скоростного режима»).

Для этого случая отображение $f_2(X_2, Y_2)$ в $U_{\text{опт}}^2$ для предложенной структуры базы знаний также опирается на проверку ряда промежуточных гипотез G_2 («как скоро точка реагирования», «необходимое время на реакцию», «необходимость в повторении рекомендации»). Фрагмент архитектуры базы знаний ИСППР для f_2 представлен на рис. 5.

Программная реализация интеллектуальной части обоих модулей ИСППР опирается на общий подход. Это достигнуто за счёт применения модульного исполнения ядра продукционных экспертных систем [9], а также применения единого подхода к описанию и хранению базы знаний в формате flm. Таким образом, реализация логического вывода по (1) позволила применить разделение работы программиста и инженера по знаниям.

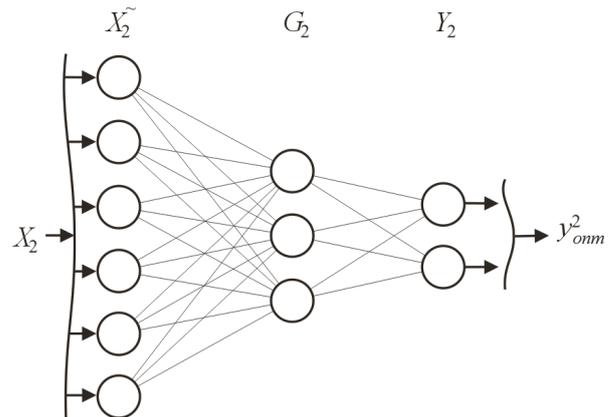


Рис. 5. Архитектура базы знаний для модуля сопровождения изделия

Транспортирование ряда последних космических аппаратов за 2015 год (три КА «Гонец-М» и КА «Экспресс-АМ8») показало, что детальная фиксация состояния дорожного полотна и автоматическое дополнение КСР позволяют повысить уровень контроля ситуации на дороге при перевозке изделия от завода-изготовителя до аэропорта. При этом следует отметить, что даже заводское исполнение и сертификация блока бортовой интеллектуальной системы поддержки принятия решений по рекомендациям скоростного режима для водителя не позволят полностью исключить нештатные ситуации при транспортировке. Это связано как с непредсказуемостью поведения прочих участников движения на дороге, так и с принципиальной сложностью непосредственного управления действиями водителя. По этим причинам рассматриваемая здесь система имеет статус рекомендуемой.

Следующим этапом автоматизации (скорее даже роботизации) процесса автомобильного транспортирования может стать переход к программно-управляемым автомобилям, бортовой компьютер которых позволит заменить водителя (режим автопилота). В таких системах роль точной навигации по ГЛОНАСС/GPS-сигналам значительно повышается, а интеллектуальность бортовых компьютеров выходит на принципиально новый уровень. Разработки в этом направлении активно ведутся рядом ведущих компаний мира (например, беспилотный автомобиль от корпорации Google), но этим технологиям ещё далеко для массового внедрения (особенно с учётом специфики отечественных дорог и нормативной базы).

Библиографические ссылки

1. Программа и методика предварительного проезда трассы перед транспортированием штатных конструкций (154.ПМ - 188). ОАО «ИСС», 2012. 17 с.
2. Аппаратура регистрации условий транспортирования. Руководство по эксплуатации (154.9172 – 000РЭ). ОАО «ИСС», 2009. 50 с.
3. Соустин Б. П., Тестоедов Н. А., Рудометкин А. Г., Алькин А. В. Виброиспытания космических аппаратов. Новосибирск : Наука, 2000. 175 с.
4. Орлов В. С. Автоматизация процесса формирования режимов испытаний космического аппарата по результатам анализа натуральных измерений : дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.07. М.: РГБ, 2009. 128 с.
5. Сорок космических лет: воспоминания о становлении и развитии ракетно-космической деятельности объединения / НПО прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва ; под ред. К. Г. Смирнова-Васильева. Железногорск : Прикладные технологии, 1999. 310 с.
6. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. М. : Логос, 2002. 392 с.
7. Гаврилова Т. А., Хорошавский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2001. 384 с.
8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений : пер. с англ. Математика. Вып. 3. М. : Мир, 1976. 168 с.
9. Углев В. А., Добронез Б. С. Разработка экспертных систем с применением внешних модулей // Молодёжь и наука: начало XXI века : материалы Всероссийской научно-технической конференции. В 3 ч. Ч. 1. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. С. 305–306.

*Статья поступила в редакцию
07.05.2015 г.*