

**АНДРИКОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА  
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
ТЕКУЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель: Разумный Юрий Николаевич  
доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии РУДН, директор департамента механики и процессов управления инженерной академии РУДН

Официальные оппоненты: Матюшин Максим Михайлович  
доктор технических наук, первый заместитель генерального директора – начальник Центра управления полетами АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»)

Воронцов Виктор Александрович  
доктор технических наук, профессор кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение» и кафедры 604 «Системный анализ и управление» института № 6 «Аэрокосмический» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Эйсмонт Натан Андреевич  
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита диссертации состоится 16.06.2023 в \_\_\_:\_\_\_ на заседании диссертационного совета ПДС 2022.010 по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан 16.05.2023.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.010  
кандидат технических наук

О.Е. Самусенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Проведение фундаментальных космических исследований тесно связано с миссиями по анализу поверхностей планет с помощью автономных средств передвижения. Создание транспортных средств, способных в автономном режиме и, в том числе по целеуказаниям оператора, передвигаться по поверхности небесного тела, характеризуется единичным производством. Системы управления подобными объектами действуют в условиях неопределённости поверхности передвижения. Это приводит к отсутствию статистики наработки на отказ в реальных условиях движения, и появляется задержка в канале передачи сигналов ручного управления оператором. Классические подходы синтеза систем управления не работают: например, нельзя эффективно компенсировать внешние возмущения или построить адекватный математический модуль из-за широкого диапазона неопределённостей внешней среды и параметров объекта управления.

Адаптивные методы управления, робастные, нейро-нечеткие требуют либо серьезной уточненной математической модели объекта управления, либо процедуры обучения в релевантных условиях, например, такие как, моделирование атмосферы другой планеты на Земле. Необходима универсальная методика управления в плохо прогнозируемых и сложных изменяющихся условиях. Для этого нужно рассматривать объект управления как структурно-функциональную сложную систему – а именно, декомпозировать объект управления и внешнюю среду по блокам описания модели движения. Закон управления строить на основе рекомендации для принятия решений в условиях неопределенности и принимать во внимание влияние человека (оператора) на управление движением.

Выработку рекомендаций проектирует инженер-разработчик системы управления, имеющий наглядный инструмент контроля решений, принимаемой системой. Одним из таких инструментов является графо-продукционная модель представления объекта управления, которую дополняем набором состояний поверхности движения и характеристиками действий оператора. В соответствии с принципами обратной связи, в теории управления для выработки правил, необходим анализ текущих параметров движения. Классические методы анализа, такие как статистическая обработка, или авторегрессия ввиду малой выборки и высокой неопределенности возмущений не дают эффективного управления.

Графо-продукционная модель формирует классификацию состояний транспортного средства (ТС), внешней среды (ВС) и целеуказаний оператора (О) (сокр. «ТС-ВС-О»), в том числе учитывает движение в автономном режиме. Данный подход позволяет комплексно рассмотреть их взаимодействие: выделить переменные состояния каждого объекта и с помощью ветвей графа наглядно показывать изменения состояний. Это позволяет обеспечить прослеживаемость решений интеллектуальной системы – показать наглядно, как и почему были приняты конкретные решения системой управления. Управление ТС связывается с решением таких фундаментальных задач, как 1) построение адекватной модели реагирования на меняющиеся параметры внешней среды 2) формализация знаний о внешней среде для эффективного планирования и исполнения управленческих операций в режиме реального времени с учетом возможного запоздания в канале связи.

В связи с этим возникает объективное противоречие между требованием наглядности (аудируемости) алгоритма принятия решений и возможностью составить адекватную инженерную модель объекта управления. Например, существуют методы, позволяющие на выходе алгоритма получить решение, но проследить как система принимала это решение практически невозможно. В условиях высокой автономности движения по поверхности планеты необходим алгоритм в виде графа, показывающий наглядно оператору прогноз развития ситуации. Развитие опасных ситуаций рассматривалось, как внешние возмущения, которые необходимо компенсировать. В представленном исследовании, в рамках интеллектуального анализа, создается прогноз развития опасных ситуаций и с помощью графо-продукционной модели инженеру-разработчику позволяет наглядно прослеживать стратегию митигирования рисков аварийных ситуаций.

### **Степень разработанности темы исследования**

По рассматриваемым проблемам за последние годы проведено большое количество исследований, в частности разработаны модели и методы оценки состояния поверхности движения, созданы алгоритмы на основе нейро-нечетких систем управления, совмещающих расчетно-логические вычисления и элементы технологии искусственного интеллекта. Вопросы анализа поведения сложных человеко-машинных систем в составе с ТС рассматривались в трудах исследователей РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша, МИРЭА, МАДИ и других специалистах в области теории управления. В исследованиях ученых ВКА им. А.Ф. Можайского проводятся исследования, связанные с решением задач построения и совершенствования интеллектуальных систем управления космических роботов, в том числе задач, связанных с адаптивной обработкой измерительной информации подвижных объектов. Однако в трудах этих ученых не рассматриваются задачи интеллектуального анализа информации о параметрах движения транспортных средств. Таким образом, актуальной является научно-техническая задача, посвященная разработке математических моделей и методов оценивания состояния и алгоритмизации управления движением ТС (как пример – малые мобильные роботизированные передвижные комплексы) в условиях неопределенности движения по планете с учетом неопределенных возмущений, заданных стохастическими процессами, возникающих в человеко-машинных системах «ТС-ВС-О».

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является повышение устойчивости движения транспортного средства на поверхности планеты в условиях неопределенностей системы «Транспортное средство – внешняя среда – целеуказания оператора».

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Построение информационно-кинематической схемы контроля состояния системы «ТС-ВС-О», разработка формализованных характеристик внешней среды и действий оператора, существенных для прогнозирования движения и развития риска аварийной ситуации.

2. Разработка математической модели системы «ТС-ВС-О» для оценки состояний ТС, в частности моделирование торможения как основного фактора риска развития аварийной ситуации.

3. Разработка программного обеспечения для анализа временных рядов, представленных параметрами движения, которые получены с измерительных устройств с учетом неопределенностей.

4. Разработка математического аппарата интеллектуального анализа текущих параметров движения ТС для оценки прогнозирования аварийной ситуации.

5. Разработка графо-продукционной модели для формирования базы данных управляющих воздействий по стабилизации ТС.

### **Объект исследования**

Система управлением движения транспортного средства на поверхности планеты, функционирующая в условиях априорно-неопределенных возмущающих факторах.

### **Предмет исследования**

Математические модели и алгоритмы интеллектуального анализа данных для управления движением ТС в условиях неопределенности с учетом движения по поверхности планет.

### **Научная новизна полученных результатов**

1. Предложена структурная схема бортовой интеллектуальной системы управления, основанная на декомпозиции главной цели на дерево подцелей и введении в контур управления двух обратных связей с интеллектуальным анализом текущих параметров движения для оценки прогнозирования динамически опасной ситуации. Это позволяет проводить оценку угловых скоростей вращения колес, что обеспечивает контроль вращения ТС относительно заблокированного колеса и позволяет контролировать режим (качение, скольжение, блокировка) движения колеса в рамках одной математической модели

2. В части методики управления системы «ТС-ВС-О» создана графо-продукционная

модель для формирования базы правил, состоящая из автономных модулей под выделенные состояния графа для формирования базы данных алгоритмизации управления. Взаимодействие элементов системы учитывает подходы теории игр и реализует коалиционное взаимодействие: когда алгоритм управления не просто компенсирует вредные возмущения, а подстраивает своё поведение под изменяющиеся неопределенные условия среды. Графо-продукционная модель позволяет применять унифицированные условия переходов от состояния к состоянию и выдавать упреждающие рекомендации оператору при дистанционном управлении, например, изменение курса, скорости в режиме торможения.

#### **Теоретическая значимость работы**

Создана схема иерархического контроля состояния ТС и оценок внешней среды. Разработана двухуровневая схема контроля состояния ТС, кроме аппаратно-ориентированных и расчетных алгоритмов (первый уровень) введен уровень вычислений на основе моделей знаний (нечеткая логика, графо-продукционная модель). В отличие от кинематической схемы (замкнутая система контроля ТС) ценность данной иерархической схемы контроля состояния ТС заключается в модульной структуре, учитывающей через правила базы знаний, характеристики внешней среды и действий оператора.

#### **Практическая значимость работы**

Получены диаграммы оценки соотношений пар угловых скоростей как ключевых параметров развития динамически опасной ситуации. Это позволяет дать первичную оценку развития потенциального риска неуправляемого движения, связанному, в частности, с блокированием колес при торможении. В работе проанализированы с помощью метода хаотической динамики свойства диаграммы как свойства аттрактора.

#### **Методология и методы исследования**

Исследования проводились с применением методов теории автоматического управления, теории принятия решений, теории выбора, теории конфликта, методах искусственного интеллекта, методах интеллектуального анализа данных.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Структурная схема бортовой интеллектуальной системы управления, учитывающая декомпозицию главной цели на дерево подцелей и введении в контур управления двух обратных связей, обеспечивающий интеллектуальный анализ данных параметров движения для оценки прогнозирования динамически опасной ситуации.

2. Графо-продукционная модель, учитывающая связи состояний графа (в вершинах содержатся параметры пространства состояния системы «ТС-ВС-О») для формирования базы данных алгоритмизации управления, где для каждой вершины разработаны группы автономных правил.

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных апробированных методов и подтверждается совпадением отдельных результатов, полученных для частных случаев, с подтвержденными результатами иных известных работ.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты работы докладывались на Международном научно-техническом форуме IAA/AAS SciTech Forum (г. Москва, РУДН, 2019 г.), на 12-й Международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск, 2015 г.), на форуме Медико-Экологические информационные технологии (г. Курск, 2018 г.), на 13-й Всероссийской научно-практической конференции (г. Ростов-на-Дону, 2018 г.).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс инженерной академии РУДН.

#### **Публикация результатов исследования**

По теме диссертации опубликовано 14 работ в рецензируемых научных изданиях.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведен анализ современного состояния создания и развития электронных бортовых систем управления ТС, показаны особенности и ограничения кинематических моделей, формирующих детерминированную реакцию на внешние условия движения. Синтезирована информационно-кинематическая схема контроля состояния, способствующая формированию характеристик внешней среды.

Приводится описание математических моделей процесса движения ТС, в том числе процесс торможения как самый важный для развития динамически опасной ситуации, которые позволяют использовать собственные операции и функции параллельной проверки множества условий движения и обработки данных. Разработана структурная схема интеллектуальной системы управления, отличающаяся введением в контур управления двух обратных связей.

Задача управления ТС в неопределенных условиях движения требует разработки и использования таких методов проектирования и исследования, которые позволяли бы наиболее полно учитывать, во-первых, наличие взаимосвязей между большим числом факторов, определяющих свойства и поведение рассматриваемой системы, и, во-вторых, неопределенность поведения системы в целом и составляющих ее частей. Одна из основных трудностей в обработке информации и управлении состоит в необходимости принимать решения или рекомендации в условиях неопределенности или при неполных знаниях о возможных последствиях предпринимаемых действий, т.е. трактовки ТС как части метасистемы, как элемента внешней среды.

Взаимодействия элементов в метасистеме можно формализовать с помощью теории конфликта. Объекты «ТС» ( $S_1$ ) и «Внешняя среда» ( $S_2$ ) погружены в метасистему и взаимодействуют между собой через объект «Оператор» ( $C$ ). Объекты и внутренняя среда вместе с отношениями ( $R$ ) между ними образуют метасистему  $S = \{S_1, S_2, C, R\}$  – систему управления транспортным средством.

В отличие от замкнутых систем, стремящихся к сохранению энергии покоя, открытые системы с несколькими активными объектами образуют различные коалиции. Коалиция стремится подчинить себе «проигравшие» элементы метасистемы и обеспечить далее экстремум коалиционной функции. В зависимости от предыстории и внешних условий возможны коалиции:

- а) Оператор – ТС;
- б) ТС – внешняя среда.

В первой коалиции проигравшим элементом становится объект «Внешняя среда». Коалиционная функция - минимизация отклонения от курса движения. Во второй коалиции проигравшим элементом становится объект «Оператор». Коалиционная функция – минимизация количества действий по формированию курса движения (без оператора).

Такой подход описания конфликтного взаимодействия сталкивается с рядом ограничений:

- а) неполная модель игрока «Внешняя среда»;
- б) неизвестные априорные вероятности игроков метасистемы (распределение вероятностей);
- в) разнородные данные, которые описывают конфликтные взаимодействия (детерминированными, случайными, чёткими, нечёткими и т.п.).

Одним из путей преодоления данных ограничений является разработка структуры бортовой системы управления с интеллектуальным анализом текущих данных (ИСУ). Для бортовой ИСУ управления движением, в том числе в условиях торможения, характерна главная цель (ГЦ) – повышение управляемости и устойчивости в процессе торможения. Как важнейшая интеллектуальная функция в ИСУ входят методы и алгоритмы не только по нейтрализации развития динамически опасной ситуации (ДОС), но и по упреждению попадания в нештатную ситуацию, способную перейти в аварийную.

Схема функционирования бортовой ИСУ описывается следующей структурной схемой, в которой реализуется интеллектуальный анализ данных для управления движением ТС (рис.1).

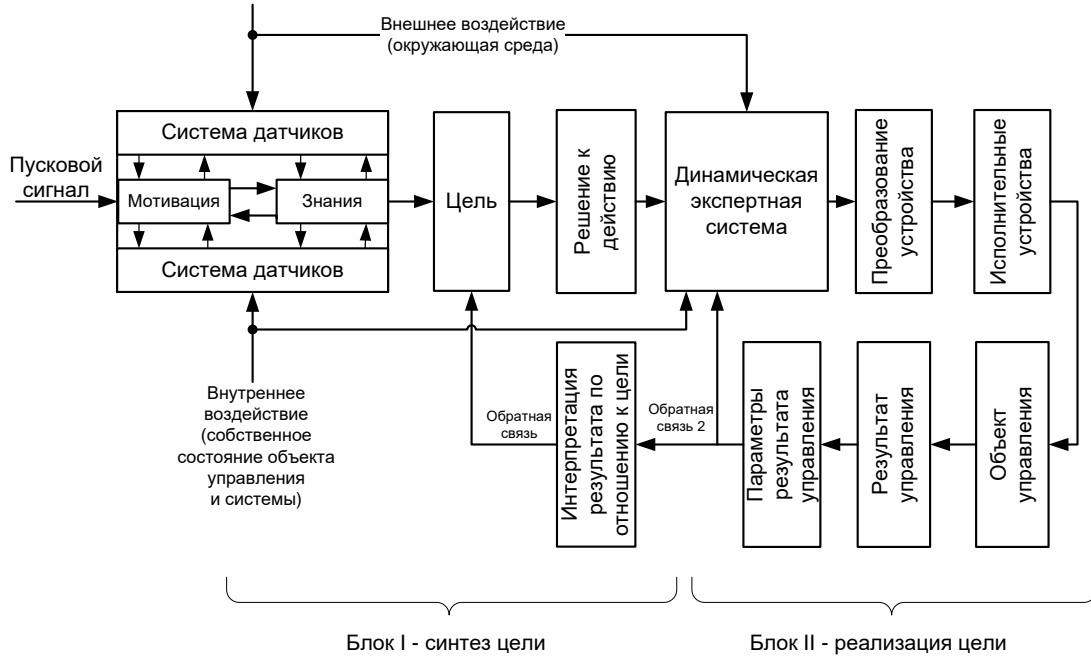
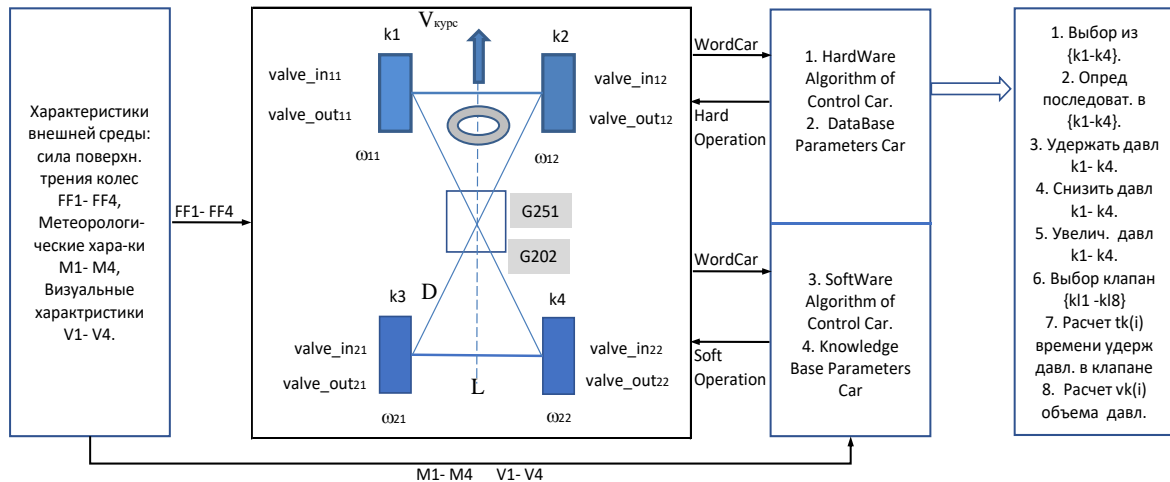


Рис.1. Структурная схема бортовой интеллектуальной системы управления

Динамическая экспертная система (ДЭС) – ядро бортовой ИСУ, находящаяся на границе блоков синтеза и реализации цели. В работе выбрана продукционная модель знаний в составе ДЭС, способная обеспечить нейтрализацию развития ДОС и расширить базу знаний новыми правилами. Тем не менее, она не способна учитывать изменения состояние оператора, а также классифицировать характеристики внешней среды, влияющие на формирование коалиций.

Для уменьшения данного ограничения бортовой ИСУ создана информационно-кинематическая схема контроля состояния системы «ТС-ВС-О» (рис.2).



*WordCar* – слово состояния ТС, *HardOperation* – расчетно-логические операции типовых алгоритмов ABS, ESP, *SoftOperation* – нечеткие операции, операции на основе правил из базы знаний динамической ЭС

Рис. 2. Схема иерархического контроля состояния системы «ТС-ВС-О»

Данная схема контроля состояния расширена уровнем вычислений на основе моделей знаний (продукционная модель), что позволяет сочетать расчетные вычисления (типовые алгоритмы ABS, ESP) с «мягкими» вычислениями, учитывающими субъективные оценки внешней среды и ретроспективные данные (анализ временных рядов) и знания.

**Во второй главе** рассмотрены методы и алгоритмы в составе бортовой ИСУ, применяемые для стабилизации движения ТС, на основе кинематико-механического подхода. Показано главное ограничение типовых алгоритмов ABS, ESP, состоящее в ответной детерминированной реакции на сложившуюся ДОС. Несмотря на то, что реакция на ДОС осуществляется автоматически по принципу отрицательной обратной связи, формируемые коалиции не всегда подчиняются закону сохранения энергии. В результате бесконечно малые

возмущения отдельных характеристик внешней среды или состояния ТС резонансно приводят к неуправляемому движению ТС.

В работе на основе матричного подхода формализована модель вскрытия и анализа условий появления коалиции «ТС-ВС-О» на основе кинематической схемы (рис.3). Согласно данной схеме колеса имеют линейную нумерацию (k1, k2, k3, k4) и относительную нумерацию по осям (11,12, 21,22) соответственно.

Известно, что в процессе торможения колесо, вступая в сцепление с покрытием, замедляет свое вращение от текущего значения (свободного качения) до полной блокировки колеса, что является первым признаком неуправляемого движения.

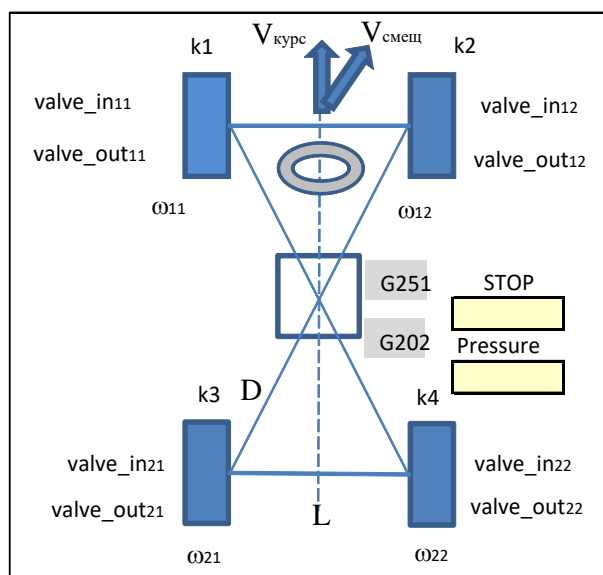


Рис. 3. Кинематическая схема ТС

Для описания взаимных влияний колес движущегося ТС и оценки последствий блокировки некоторых из колес вводится матрица 4x4 соотношения угловых скоростей пар колес в их абсолютной нумерации в ТС: 1 - 2 - 3 - 4.

$$MATRIX\_W = \begin{pmatrix} - & \Delta w_{12} & \Delta w_{13} & \Delta w_{14} \\ \Delta w_{21} & - & \Delta w_{23} & \Delta w_{24} \\ \Delta w_{31} & \Delta w_{32} & - & \Delta w_{34} \\ \Delta w_{41} & \Delta w_{42} & \Delta w_{43} & - \end{pmatrix} \quad (1)$$

Исходя из законов кинематики движения ТС возникновение вращающегося момента сил наиболее сильно определяется блокировкой:

- продольно расположенных колес;
- задних (ведущих) колес;
- передних (ведущих) колес
- одного (ведущего) колеса.

В соответствии с данными приоритетами вводится матрица весов взаимного влияния блокируемых колес следующего вида.

$$MATRIX\_K = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 8 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 8 \\ 8 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 8 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

В отличие от стандартной кинематической модели движения ТС предлагается подход вычисления разворачивающего момента силы ТС с учетом матричных взаимосвязей угловых скоростей между всеми колесами независимо от их состояния. Матрица MATRIX\_W является количественной оценкой управляемости движения ТС. Согласно кинематической схеме (рис. 3), блокируемое колесо ij (i=1-2, j=1-2) обязательно входит в два контура вращения – поперечный и продольный контуры. В связи с этим, момент силы вращения MROTATE предлагается оценивать через отношение произведений моментов в продольной и поперечной осях к силе тяги:



$$\begin{aligned}
M_{ROTATE} &= F_{CAR} v_{\max}(R1, R2) v_{\text{[det(MATRIX}_W) * MATRIX_K]} = \\
&= M_{CAR} V_{CAR} v_{\max}(R1, R2) v_{\text{[det(MATRIX}_W) * MATRIX_K]} = \\
&= M_{CAR} v_{\max}(R1, R2) v_{V_{CAR} v_{\text{[det(MATRIX}_W) * MATRIX_K]} \quad (3)
\end{aligned}$$

где  $F_{CAR}$  – сила тяги ТС,  $R1, R2$ ; – плечи вращения ТС в продольной и поперечной осях;  $R1 = \varphi_1(L, D, W)$ ,  $R2 = \varphi_2(L, D, W)$ ;  $M_{CAR}$  – масса ТС;  $V_{CAR}$  – линейная скорость ТС;  $det()$  – определитель матрицы.

Главная особенность вычисления  $M_{ROTATE}$  заключается в отделении индивидуальных характеристик ТС ( $L, D, M_{TC}, V_{CAR}$  и др.), от соотношения угловых скоростей и взаимосвязи между колесами в виде определителя от произведения двух матриц. Определитель является интегральной характеристикой управляемости, устойчивости любого ТС, через который можно выделить ряд динамически опасных состояний и далее задать правила переходов между ними и соответственно модель прогноза движения ТС.

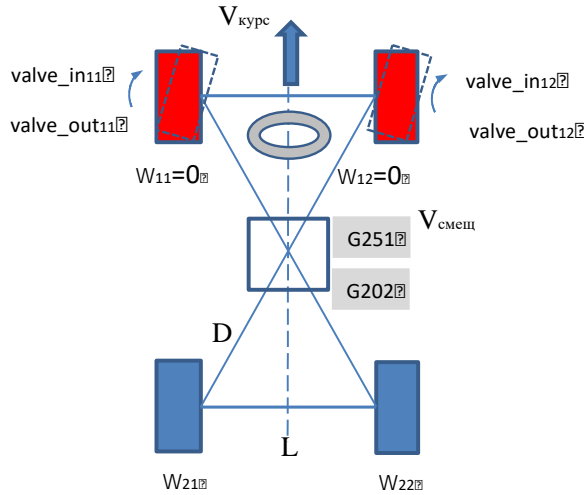


Рис.4. Схема ТС с блокировкой передних колес

Из формулы определения  $M_{ROTATE}$  выделяется самостоятельное выражение количественной оценки скоростных характеристик ТС, существенных для возникновения вращения при экстренном торможении -  $K_{SPEED}$

$$K_{SPEED} = V_{CAR} v_{\text{[det(MATRIX}_W) * MATRIX_K]} \quad (4)$$

Далее в работе применительно к  $K_{SPEED}$  рассмотрены ДОС, связанные с блокировкой одного или двух колес и имеющие явные кинематические условия для возникновения вращения ТС и учитывающие желаемый (оператором) и фактический курс ТС. В качестве одной из рассматриваемых ДОС анализируется блокировка передних ведущих колес (колеса выделены красным) (рис.4).

Согласно рис. 4 в ТС матрица взаимных влияний колес с учетом заблокированных передних колес 11 и 12 имеет вид

$$MATRIX\_W = \begin{pmatrix} 0 & \Delta w_{12} & \Delta w_{13} & \Delta w_{14} \\ \Delta w_{21} & 0 & \Delta w_{23} & \Delta w_{24} \\ \Delta w_{31} & \Delta w_{32} & 0 & 0 \\ \Delta w_{41} & \Delta w_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Тогда формируется следующее произведение матриц для  $K_{SPEED}$

$$\begin{pmatrix} 0 & \Delta w_{12} & \Delta w_{13} & \Delta w_{14} \\ \Delta w_{21} & 0 & \Delta w_{23} & \Delta w_{24} \\ \Delta w_{31} & \Delta w_{32} & 0 & 0 \\ \Delta w_{41} & \Delta w_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 8 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 8 \\ 8 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 8 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Для (6) конкретные парные изменения угловых скоростей относительно колес 11 и 12 связаны с линейной скоростью  $V_{CAR}$ , действиями оператора и условиями движения. Они моделируются полным перебором соотношений угловых скоростей в матрице вида (1).

В итоге разработана матричная модель оценки угловых скоростей колес, оригинальность которой заключается, с одной стороны, в инвариантности ее значений к линейной скорости

ТС и, с другой стороны, в *пропорциях* изменения падений угловой скорости между парами колесами, задаваемой через ступенчатую функцию, что позволяет учесть кумулятивный эффект при продольно-поперечного развороте ТС.

**В третьей главе** обоснован выбор аппарата продукционных систем (ПС) для параллельной обработки асинхронно изменяющихся параметров движения ТС, характеристик внешней среды, состояния оператора.

Для формализации продукционных правил при торможении ТС разработана графовая модель прогноза движения ТС, содержащая штатное –  $Z_0$  ( $Z_{NORMAL}$ ), пограничные –  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ;  $Z_{21}$ ; нестабильные  $Z_{30}$ ,  $Z_{31}$ ,  $Z_{32}$ ,  $Z_{33}$ ; опасные –  $Z_{41}$ ,  $Z_{42}$ ; критические  $Z_{51}$ ,  $Z_{52}$ ;  $Z_{53}$ ; неуправляемое  $Z_{54}$  ( $Z_{CRASH}$ ) состояния.

Графовая модель отличается тем, что каждая вершина графа помечается двумя состояниями (состояние ТС и состояние оператора), что позволяет индивидуализировать действия оператора в различных условиях. Графовая модель имеет И-ИЛИ структуру, позволяющую задать множество путей, сходящихся в одной вершине и осуществлять тем самым выбор лучших условий для движения ТС при формировании коалиции.

На основе графовой модели построены продукционные правила для оценки ДОС и выдачи рекомендаций по управлению ТС. Для метасистемы «ТС – внешняя среда - оператор» выделены переменные для каждого участника коалиции: ТС, внешняя среда, оператор. В частности, для участника «внешняя среда» введены такие переменные как

- *Temp* – температура воздуха.
- *Rain/Snow (R/S)* – интенсивность выпадения осадков;
- *CarThread (CT)* – переменная плотности потока;
- *Distance\_Car (DC)* – расстояние до попутного/встречного объекта;
- *Roughness (RN)* – однородность структуры покрытия.

Для оперативной проверки нестабильных и критических состояний графовой модели и потенциальных ДОС эти переменные будут иметь следующие уровня значений: {Пусто, Низкий, Средний, Высокий}.

Исходя из особенностей метасистемы «ТС-ВС-О» структура продукционного правила имеет вид:

$$Z_{OLD}, A_{OLD}, V_{CAR}, Angle, WordCar, Meteo, Way\_Z_{NEW}, A_{NEW}, Ind, ABS, ESP \quad (7)$$

где  $Z_{OLD}$ ,  $Z_{NEW}$  – текущее, новое состояние ИСУ;  $A_{OLD}$ ,  $A_{NEW}$  – текущее, рекомендуемое состояние оператора в ИСУ;  $Meteo=\{Temp, Rain/Snow\}$  – метеорологические условия;  $Way=\{CarThread, Distance\_Car, Roughness\}$  – дорожные условия;  $Ind=\{ANGLE, V_{CAR}, STOP/GAZ\}$  – индикаторы для оператора;  $Angle=\{N, Left, Righth\}$  – угол поворота руля;  $ABS=(On, Off)$ ,  $ESP=(On, Off)$  – рекомендация в ИСУ включать/отключать систему ABS или включать/отключать систему ESP.

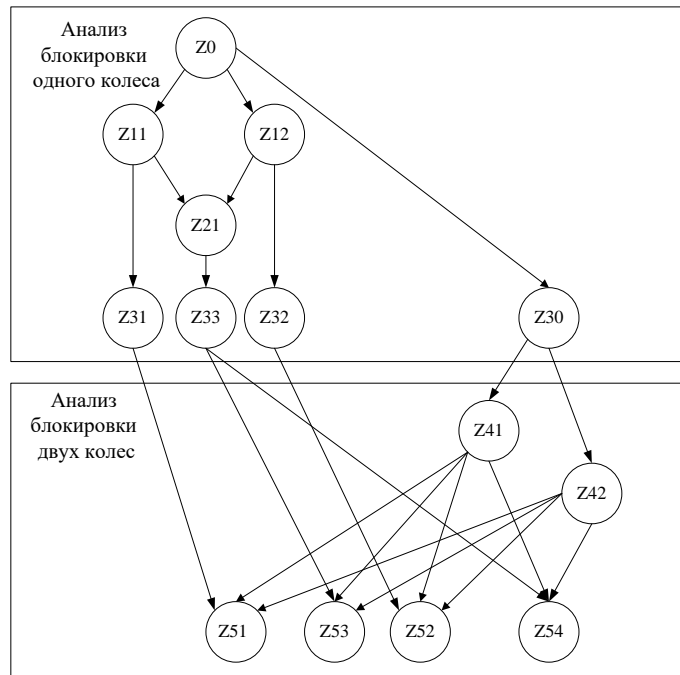


Рис. 5. Графовая модель изменения ДОС при торможении колес ТС

Главная особенность предлагаемого продукционного правила (7) – трактовка левой и правой части как теоретико-конструктивных объектов. Это означает, что каждая переменная имеет фиксированное место, поэтому в отличие от строковых или списковых структур (конструктивные объекты) пропуск незначащих переменных фактически отражается единым служебным значением NIL (сокр. will not). Служебное значение позволяет исключить известную для продукционных систем проблему частичного пересечения конструктивных объектов и избыточные затраты времени на их грамматический разбор.

В итоге в третьей главе создана графо-продукционная модель, состоящая из автономных модулей под выделенные состояния графовой модели «ТС-ВС-О» (рис. 6). Графо-продукционная модель, отличается заданием унифицированных условий переходов между модулями, позволяющих выдавать упреждающие рекомендации оператору (курс, скорость, торможение). Полный перечень продукции под состояния графа приведен в работе и содержит более тысячи продукции.

Условия переходов между автономными модулями:

- $U_1 = (Temp=L, R/S=H \vee M)$ ;
- $U_2 = (RN=L, DC=H \vee M, TC=H)$ ;
- $U_3 \subset U_1 \cup U_2 = (R/S=H \vee M, RN=L, DC=H \vee M)$ .

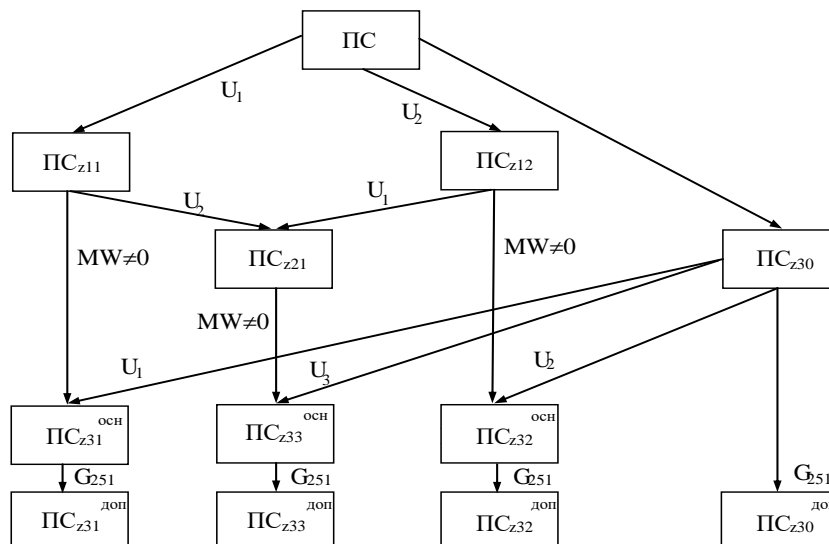


Рис. 6. Графо-продукционная модель стабилизации движения ТС

Научная новизна структуры ПС связана с ее инвариантностью к переменным, что позволяет использовать структуру ПС для ТС с произвольным (расширяемым) набором датчиков по оценке внешней среды и действий оператора.

Рассмотрен и применен аппарат хаотической динамики для прогнозирования поведения метасистемы «ТС-ВС-О». Такие математические модели позволяют учесть формализованное описание неопределенностей, действующих на объект.

Метод прогнозирования, связанный с трактовкой объекта управления как неустойчивой системы, учитывает «фазовые» переходы между состояниями. Такие переходы связаны с возникновением в объекте управления «скрытых» степеней свободы, не имеющих алгоритмических описаний в традиционном понимании этого процесса (конечность, массовость, повторяемость, результативность). ТС, подготовленное и специально спроектированное для движения в условиях неопределенностей, находится под воздействием антагонистических и сонаправленных сил, связанных с динамическим изменением момента инерции и ускорения. Система может выступать как неустойчивая система, в которой «бесконечно малые» изменения управляющих параметров приводят к «бесконечно большим» изменениям выходных величин. В процессе торможения представляется целесообразным использовать элементы аппарата хаотической динамики для обнаружения таких переходов и последующего прогнозирования области допустимых значений параметров и их дальнейшей обработки. Переход «от порядка к хаосу» порождает риск развития динамически опасной ситуации, который возникает при:

1) резком торможении (при любых начальных условиях траектории движения ТС становятся аperiodическими);

2) резком переходе с одного дорожного покрытия с большим коэффициентом сцепления, к покрытию с меньшим коэффициентом сцепления (при сколь угодно близких начальных условиях две траектории во времени становятся различными).

Риск развития динамически опасной ситуации понимается как событие, способное в случае реализации оказать влияние на контролируемый процесс. Для количественно-качественной оценки создания блока формы параметров требуется такая форма, которая будет включать ясные и формализованные подходы. Риск  $R$  обычно трактуется как произведение таких величин как вес риска  $V$ , стоимость риска  $C$ , частота (вероятность) проявления  $P$ :

$$R=V \times C \times P \quad (8)$$

Одним из возможных решений (8) является применение систем моделирования и анализа процессов, поддерживающих функции описания риска и интерпретации текущих, пограничных состояний во времени. Именно из-за такой высокой чувствительности к начальным условиям затруднено прогнозирование поведения системы «ТС-ВС-О» в условиях нестабильной внешней среды.

Применительно к задаче стабилизации движения ТС необходимо прогнозировать переход метасистемы «ТС-ВС-О» в неустойчивое состояние при изменении управляемых параметров (скорость разгона) плавно (рис. 7) и резко (рис. 8).

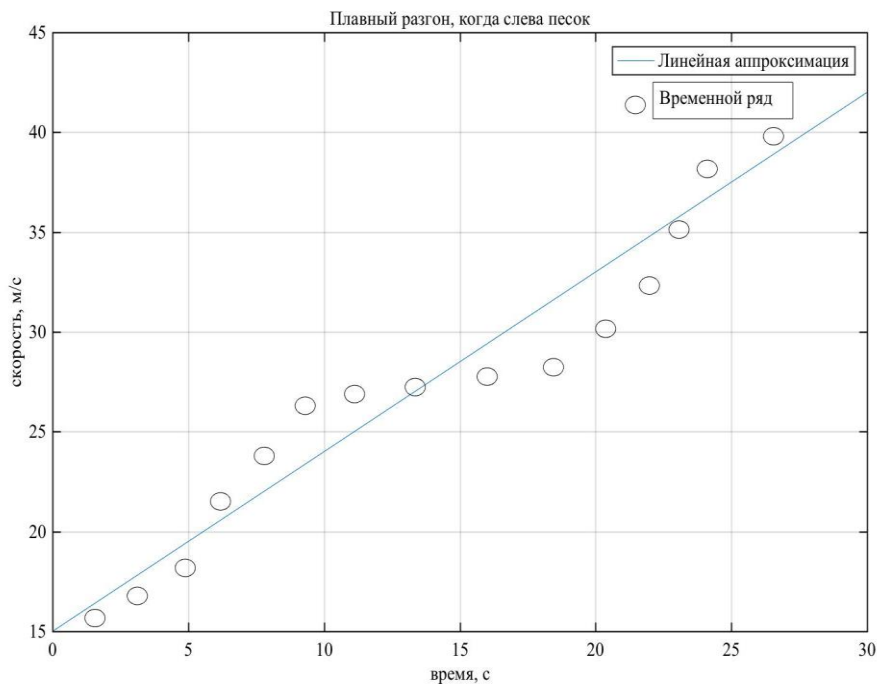


Рис. 7. Временной ряд и линейная аппроксимация при плавном разгоне с дорожным покрытием песок (слева по борту) (коэфф. детерминации  $R^2=0,87$ )

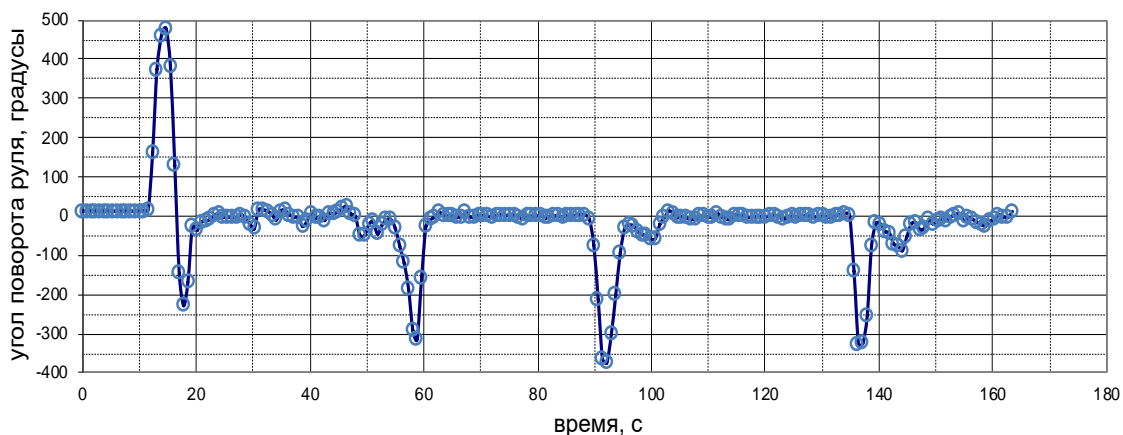


Рис. 8. Динамика изменения угла поворота руля

В то же время в исследуемой системе (рис. 7 и рис. 8) можно выделить состояния – аттракторы, к которым притягиваются траектории движения системы (под движением системы понимается движение не только транспортного средства, но и изменения параметров среды и оператора).

Согласно рис. 8 ТС ведет себя в этот момент как неустойчивая система, совершающая «фазовый» переход к новой области допустимых значений (скорость разгона). Такое поведение описывается специальным математическим инструментом – странным аттрактором. Переход метасистемы «ТС-ВС-О» в режим «странного аттрактора» означает возникновение сложных непериодических колебаний, которые очень чувствительны к незначительным изменениям начальных условий - угол поворота руля, давление в тормозной системе, угловые скорости колёс и др.

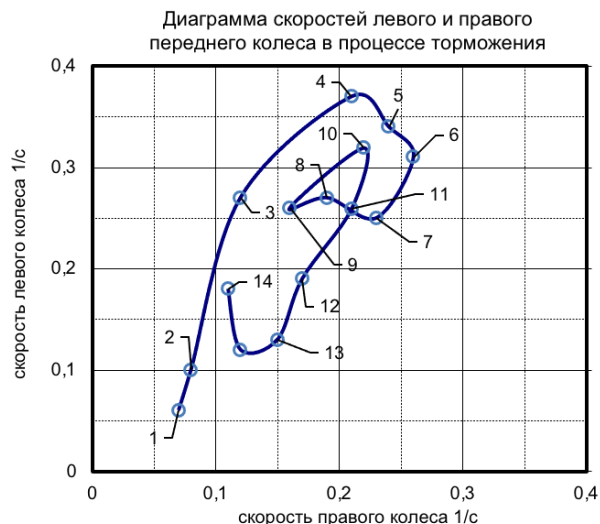


Рис. 9. Анализ движения системы на участке «торможение по диаграмме скоростей колес

Если система находится в неустойчивом состоянии, то её траектории могут притягиваться к так называемому «странному аттрактору». В этой ситуации две близкие траектории со временем перестают быть близкими (система находится на границе двух состояний). Это обуславливает невозможность точного прогнозирования состояния системы («эффект бабочки» - бесконечно малого возмущения характеристики внешней среды).

Далее определяется адекватность описанного подхода. Для этого проведем обработку экспериментальных данных параметров системы «ТС-ВС-О». Для участка движения построим сечение Пуанкаре, которое в общем случае задается нелинейным дискретным уравнением, размерность которого равна размерности секущей Пуанкаре.

Таким образом, нашей метасистеме «ТС-ВС-О» ставится в соответствие  $n-1$ -мерное фазовое пространство, которым является секущая гиперповерхность. Фазовым траекториям ставятся в соответствие последовательность точек  $X(k)$  на секущей. Каждая последующая точка  $X(k+1)$  получается путем применения нелинейного преобразования  $W$  к предыдущей точке:

$$X_k = W(X_{k-1}), k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Задача исследования динамической системы с непрерывным временем сводится к задаче изучения соответствующего отображения Пуанкаре. При этом структура динамической системы однозначно определяет структуру порождаемого ею точечного отображения. Для данного участка построим диаграмму скоростей колес в системе (рис. 9).

На рис. 10 показано, что полином 5-й степени не может аппроксимировать данную зависимость.

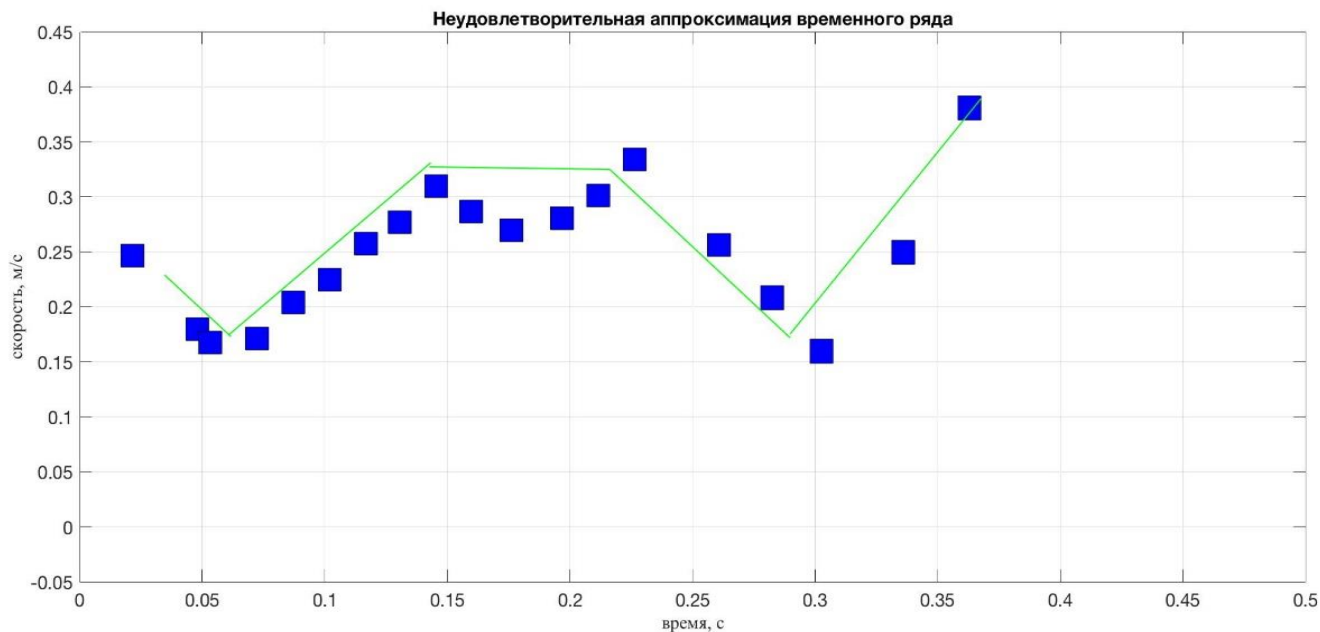


Рис. 10. Неудовлетворительная аппроксимация временного ряда полиномом 5 степени (коэф. детерминации  $R^2=0,65$ )

На рис. 11 построена диаграмма скоростей левого и правого колеса, но участок движения изменили – теперь транспортное средство движется по гравию, что характеризует низкую степень сцепления колес с поверхностью.

Таким образом исходя из приведенных исследований, можно выделить состояния (аттракторы) системы «ТС-ВС-О». Данные состояния и переходы между ними с информационной точки зрения, удобно представить в виде графа. Математическая модель хаотической динамики позволяет построить граф состояний и перейти к синтезу интеллектуальной системе управления на основе продукционных моделей и нечёткой логики.

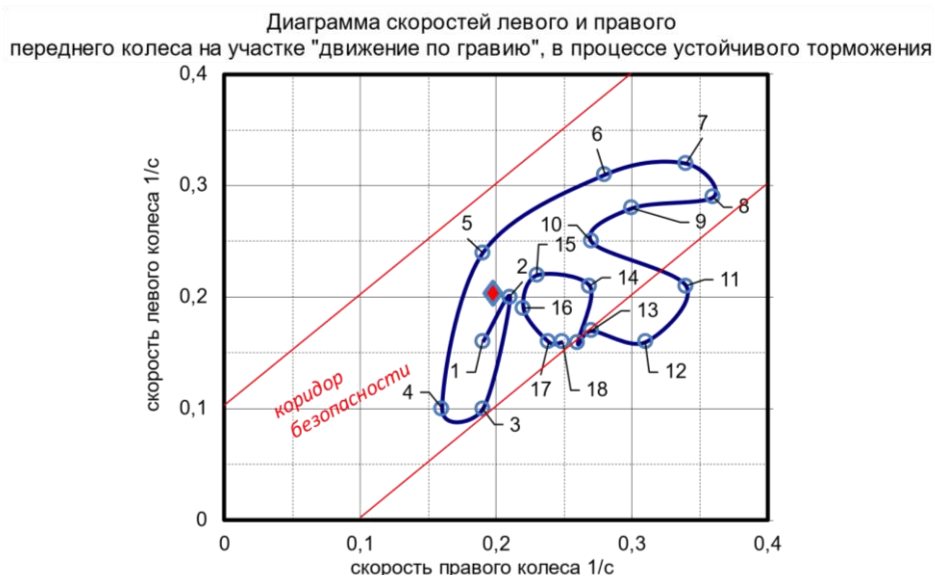


Рис. 11. Диаграмма скоростей левого и правого переднего колеса на участке «движение по гравию», в процессе устойчивого торможения

Анализ диаграмм (рис. 9 и рис. 11) показывает коалиционное взаимодействие системы «ТС-ВС-О» в процессе развития динамически опасной ситуации. Таким образом, для прогнозирования поведения математической модели взаимодействия «ТС-ВС-О» на основе анализа временных рядов. Далее с учетом рекомендаций графо-продукционной модели, формируется коридор безопасности. Характерно видно при скорости 0,2 левого и правого

колеса (отмечено красной звездой в центре). Недостаток классического подхода в необходимости расчета целой группы параметров (угол поворота, продольное ускорение, боковой снос и так далее). Для решения поставленной в работе задачи предлагаем к рассмотрению подход, основанный на теории хаотической динамики (построение аттракторов). Коридор безопасности формируются за счет 10-15% допустимого отклонения движения колеса с проскальзыванием. Из результатов моделирования видны переходы ТС из одного устойчивого состояния в другое (они описываются моноучастками временных рядов) обуславливаются резкими изменениями значений угла поворота и давления в тормозной системе. ТС ведет себя в этот момент как неустойчивая система, совершающая «фазовый» переход к новой области допустимых значений (скорость, сила давления в тормозных цилиндрах, угол поворота руля, значение датчиков продольного и поперечного ускорений). Если система находится в устойчивом состоянии, то аттрактором является точка фазового пространства, описывающего динамику движения системы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача повышения устойчивости движения транспортного средства на поверхности планеты, заключающаяся в применении наглядного описания альтернатив принятия решений на основе интеллектуального анализа текущих параметров движения. Применение подходов теории игр позволило создать коалиционный характер взаимодействия элементов системы «ТС-ВС-О», что обеспечивает повышение устойчивости в режиме развития динамически опасной ситуации. Применяя механическую аналогию – это позволило определить оптимальную стратегию взаимодействия элементов системы, а не бороться с внешними параметрами для прямолинейного достижения целеуказаний оператора. Графо-продукционная модель является наглядным описанием рассматриваемых альтернатив принятия решений и отражает коалиционный характер учета нестационарных процессов при движении ТС со стороны активных субъектов – оператора и поверхности торможения.

В итоге получены следующие результаты:

1. Построена информационно-кинематическая схема на основе комплексного анализа современных подходов по управлению и анализу данных разработана структурная схема бортовой интеллектуальной системы управления, основанная на декомпозиции главной цели на дерево подцелей и введении в контур управления двух обратных связей. Показано, что ключевой элемент схемы составляет динамическая экспертная система, способная обеспечить нейтрализацию развития динамически опасной ситуации и расширить базу знаний новыми правилами.

2. Разработана математическая модель системы и показана нецелесообразность описания временных рядов в условиях неопределенности взаимодействия объектов «ТС-ВС-О» средствами статистического моделирования. Предложен, проверен и экспериментально обоснован аппарат хаотической динамики. Это позволяет получить дополнительную информацию о возможных траекториях движения в виде характеристик странного аттрактора и комплексно вести решение задачи повышения устойчивости движения системы.

3. Разработано программное обеспечение для математической модели интеллектуального анализа текущих параметров движения оценки прогнозирования динамически опасной ситуации на основе анализа временных рядов хаотической динамики, представленных параметрами движения, полученных с измерительных устройств с учетом неопределенностей. Повышение устойчивости достигается за счет применения импульсного весового параметра эффективности объекта в процессе развития динамически опасной ситуации, который необходим для поиска минимума по Парето. Решением будут параметры для формирования количественного критерия по множеству Парето, что обеспечивает коалиционное разрешение конфликтной ситуации (неустойчивое движение).

4. Разработан математический аппарат интеллектуального анализа данных, с помощью которого сформирована база данных алгоритмизации управления объектом, где каждая вершина графа представляет собой группу автономных правил, имеющих параллельный



механизм исполнения. Структура производственных правил построена так, что без потерь времени на анализ отсутствующих переменных выполняется проверка условий срабатывания продукций (за счет трактовки левой части правил как набора переменных).

5. Создана графо-производственная модель, состоящая из автономных модулей под выделенные состояния графа системы «ТС-ВС-О», отличающаяся заданием унифицированных условий переходов между модулями, позволяющая выдавать предупреждающие рекомендации оператору (курс, скорость, торможение). Научная новизна структуры ПС связана с ее инвариантностью к переменным, термам-множествам из них и значениям, что позволяет использовать структуру ПС для ТС с произвольным (расширяемым) набором датчиков по оценке внешней среды и действий оператора.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Андриков Д.А. Матричный подход для оценки устойчивости транспортного средства для обработка временных рядов и прогнозирование поверхности состояний // Научно-Технический Вестник Поволжья. 2020. № 10. С. 7-9.
2. Андриков Д.А. Метод использования в управлении производственно-графовой модели для выработки управления транспортного средства // Научно-Технический Вестник Поволжья. 2022. № 8. С. 39-42.
3. Andrikov D., Razoumny Y.N. Criteria for evaluating the condition of a vehicle for efficient movement through cosmic land // IAA-AAS-SciTech2-036, Moscow. 2019. p. 938-943.
4. Андриков Д.А., Неусыпин К.А. Прогнозирование состояния поверхности дороги для оценки устойчивости движения и управления транспортным средством // Приборы и системы. Управление, контроль диагностика. 2022. № 6, С. 1-9.
5. Андриков Д.А. Копейкин Р.Е. Алгоритм производственно-графовой модели стабилизации движения транспортного средства // Научно-Технический Вестник Поволжья. 2023. № 1. С. 49-51.
6. Andrikov D., Dereviankina A. Control design of ship robust active rolling stabilizer // XIIth International Symposium intelligent systems, INTELS, Moscow, 2016, p. 470-474.
7. Andrikov D., Droh Mecapeu C.P. Design of flat wheel braking control system with three modes of motion: Rolling, Sliding, Locking // XIIth international Symposium «Intelligent Systems», INTELS, Moscow, 2016, p. 466-469.
8. Андриков Д.А., Гривачев А.В., Титенко Е.А., Халин Ю.А. Информационно-кинематический подход к управлению транспортным средством // Издательство «Радиотехника», Москва, 2017, С. 13-16.
9. Андриков Д.А., Титенко Е.А., Халин Ю.А. Нечёткая логическая модель такаги-сугено для управления транспортным средством в условиях торможения // Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции, ЮЗГУ, Курск, 2017, С. 46-48.
10. Андриков Д.А., Титенко Е.А., Ворощак П.А. Подход к обеспечению управляемости транспортного средства на основе динамических экспертных систем // Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции, ЮЗГУ, Курск. 2017. С. 43-45.
11. Андриков Д.А., Бурловский В.Л., Титенко Е.А., Халин Ю.А., Емельянов С.Г. Методы оценки устойчивости системы // Вестник Воронежского государственного технического университета, №4, Воронеж, 2018, С.46-51.
12. Андриков Д.А., Титенко Е.А., Халин Ю.А. Подход к оценке устойчивости средства передвижения // Медико-Экологические информационные технологии, Курск, 2018. С. 122-125.
13. Андриков Д.А. Матричный подход и теория хаоса для оценки устойчивости // XIII Всероссийская научно-практическая конференция. Ростов-на-Дону. 2018. С. 163-168.
14. Андриков Д.А., Андриков Дм.А., Дро Мекапе К.П. Разработка надежной тормозной системы с параметрической неопределенностью // Труды научно-практической конференции с международным участием "Инженерные системы-2019". Под общей редакцией М.Ю. Мальковой. Москва. 2019. С. 37-42.

## **АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ**

**Андриков Дмитрий Анатольевич**

### **Методика управления движением транспортного средства на поверхности планеты на основе интеллектуального анализа текущих параметров движения**

На основе комплексного анализа современных подходов по анализу данных разработана методика управления движением в динамически опасной ситуации. В том числе применение теории игр позволило разработать коалиционный принцип взаимодействия элементов системы управления, на которую воздействуют внешние факторы, характерные для движения по поверхности планеты. Предлагается структурная схема бортовой интеллектуальной системы управления, базирующаяся на декомпозиции главной цели и введении в контур управления двух обратных связей с интеллектуальным анализом текущих параметров движения для оценки прогнозирования динамически опасной ситуации. Алгоритм управления не просто компенсирует вредные возмущения, а подстраивает своё поведение под изменяющиеся неопределенные условия среды. Графо-продукционная модель позволяет применять универсальные условия переходов от состояния к состоянию и рекомендовать оператору, например, изменение курса, скорости в режиме торможения. Проведено моделирование и экспериментальный сбор данных. Полученные диаграммы оценивают развитие потенциального риска неуправляемого движения. Проанализированы свойства диаграммы как свойства аттрактора. Предложена графо-продукционная модель, учитывающая связи состояний графа и математический аппарат интеллектуального анализа данных, с помощью которого сформирована база данных алгоритмизации управления объектом, где для каждой вершины графа представляет собой группу автономных правил, имеющих параллельный механизм исполнения.

## **DISSERTATION ABSTRACT**

**Andrikov Dmitry Anatolevich**

### **Method for controlling the movement of a vehicle on the surface of the planet based on intelligent analysis of actual setting parameters motion**

Based on the complex analysis of modern approaches to data analysis, a method for controlling motion in a dynamically dangerous situation has been developed. In particular, the application of game theory allowed us to develop a coalition principle of interaction between elements of the control system, which is affected by external factors characteristic of movement on the surface of the planet. A block diagram of an on-board intelligent control system is proposed, based on the decomposition of the main goal and the introduction of two feedbacks into the control loop with intelligent analysis of actual traffic parameters to assess the prediction of a dynamically dangerous situation. The control algorithm not only compensates adverse disturbances, but also adjusts its behavior in order to change uncertain environmental conditions. The graph-production model allows to apply universal conditions for transitions from state to state and recommend to the operator, for example, changing the course or speed in braking mode. Modeling and experimental data collection were performed. The obtained diagrams assess the development of the potential risk of uncontrolled motion. The properties of the diagram as an attractor are analyzed. A graph-production model is proposed that takes into account the relationships of graph states and the mathematical apparatus of data mining, which is used to create a database of object control algorithmization, where for each vertex of the graph there is a group of autonomous rules with a parallel execution mechanism.