

# ОБОБЩЁННАЯ СИТУАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ИСПЫТАНИЙ И ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ<sup>12</sup>

**Бурдун И.Е.**

ООО «ИНТЕЛНИКА»

630009, г. Новосибирск, ул. Никитина, 15-76, тел /факс: (383) 266-20-92,

e-mail: [info@intelonics.com](mailto:info@intelonics.com)

Даётся обзор современных возможностей и направлений развития обобщённой ситуационной математической модели поведения системы типа «оператор (автомат) – мобильный аппарат (летательный, подводный, надводный, сухопутный) – эксплуатационная среда» в сложных ситуациях. Модель реализована в программно-моделирующем комплексе VATES и длительное время использовалась в авиационной отрасли. Движение мобильного робота – независимо от природы внешних сил и технического исполнения – описывается системой обыкновенных дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений первого порядка с нелинейной правой частью в форме Коши. Поэтому комплекс, в принципе, позволяет изучать динамику управляемого движения любого мобильного робота, имеющего шесть степеней свободы. Тем не менее, определяются необходимые доработки комплекса для обеспечения описания особенностей поведения роботов «поверхностных» классов в дополнение к возможности моделирования летательных и подводных аппаратов. Оценивается потенциал модели как инструмента научно-технического сопровождения жизненного цикла мобильных роботов.

## **Введение**

Требования по снижению затрат и сокращению сроков создания новых образцов человеко-машинных и робототехнических систем вынуждают разработчиков шире внедрять методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, начиная с ранних этапов проектирования. Эксперимент с математической моделью системы дополняет (и в ряде случаев может заменить) натурный и полунатурный эксперимент в задачах анализа, прогнозирования, испытаний, оценки характеристик безопасности и эффективности перспективных и существующих образцов мобильной техники, прежде всего – в многофакторных и неизвестных условиях применения.

Обобщённая ситуационная математическая модель [1] поведения системы «оператор (автомат) – мобильный аппарат (летательный, подводный, надводный, сухопутный) [2] – эксплуатационная среда» реализована в программно-моделирующем комплексе (ПМК) VATES [3]. Комплекс изначально был создан для параметрических исследований динамики, управления и безопасности поведения летательных аппаратов в многофакторных ситуациях. Опыт приложений ситуационной модели составляет 30 типов летательных аппаратов и проектов и более типов 500 сценариев ситуаций в течение 30 лет. Движение мобильного робота – независимо от природы внешних сил и технического исполнения – описывается системой обыкновенных дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений первого порядка с нелинейной правой частью в форме Коши, а также системой вспомогательных соотношений. Поэтому ПМК VATES в принципе позволяет изучать динамику управляемого движения любого мобильного робота с шестью степенями свободы.

Введём некоторые необходимые определения. Эксплуатационная среда – это совокупность разнородных факторов из трёх основных групп: ошибки или сбои в работе

---

<sup>1</sup> © 2010 год, ООО «ИНТЕЛНИКА», ГОУ ВПО «СибГУТИ».

<sup>2</sup> Доклад на Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», СибГУТИ, г. Новосибирск, 9 – 13 августа 2010 года.

оператора, отказы бортовых подсистем, неблагоприятные внешние воздействия. Ситуационная модель системы – это теоретико-экспериментальная математическая модель, которая приближённо описывает поведение системы как зависимость набора значений параметров состояния от времени. ПМК VATES [3] – это программа, которая позволяет изучать поведение системы в автономном вычислительном эксперименте, то есть без участия оператора-исследователя и применения специального оборудования, в ускоренном (1:100... 1:200) масштабе времени. Более подробное описание возможностей метода и технологии ситуационного моделирования для задач исследования полёта пилотируемых и беспилотных объектов авиационной техники приводится в [4].

### Отличительные особенности ПМК VATES

Подтверждённые отличительные особенности комплекса включают: нечувствительность к уровню сложности ситуации; возможность изучения причинно-следственных отношений на системном уровне; невысокая стоимость эксперимента; независимость от оператора и специального оборудования; возможность оценки влияния комплекса факторов и «тонких» эффектов; возможность использования в течение всего жизненного цикла изделия; возможность моделирования движения в ускоренном масштабе времени; гибкость эксперимента по методу «что ..., если ...?»; унификация входных данных аппаратов различных классов; сохранность и повторяемость сценариев; возможность контроля хода эксперимента. Необходимо подчеркнуть, что пределы применимости метода и адекватность моделирования зависят от того, насколько достоверным является «параметрическое определение» аппарата, используемое в модели.

### Направления доработки комплекса для задач моделирования мобильных роботов

В ПМК VATES реализованы основные функции, которые могут использоваться для моделирования поведения мобильных аппаратов неавиационных классов. Однако часть необходимых функций в модели не реализована ввиду особенностей кинематики и динамики движения надводных и сухопутных роботов.

Оценим соответствие комплекса задачам моделирования движения роботов основных классов [3]: UAV, UUV, USV, UGV. Сведения о применимости функций комплекса к классам мобильных роботов приводятся в таблице 1. Знак минус в таблице «-» указывает на отсутствие необходимой функции в составе комплекса. Пустая графа означает неприменимость функции к данному классу аппаратов.

Таблица 1 – Применимость функций ПМК VATES к классам мобильных роботов

Группа функций и функция	Соответствие классу роботов			
	UAV	UUV	USV	UGV
<b>(1) Настройка системной модели</b>				
«Параметрическое определение» <sup>3</sup> робота	•	•	•	•
Сценарий заданной ситуации	•	•	•	•
Тактика управления движением робота в заданной ситуации	•	•	•	•
Эксплуатационные ограничения	•	•	•	•
«Генотип» ситуационного дерева	•	•	•	•
Управление вычислительным экспериментом	•	•	•	•
<b>(2) Моделирование пространственного движения</b>				
Аэродинамические силы и моменты <sup>4</sup>	•			•
Гидродинамические силы и моменты		•	-	
Аэростатические силы и моменты	•	•	•	
Гидростатические силы и моменты (сила Архимеда)		•	•	
Динамика движения <sup>5</sup> (поступательное движение центра масс)	•	•	•	•

<sup>3</sup> массив исходных проектных данных мобильного робота

<sup>4</sup> экспериментально-расчётная модель на основе «параметрического определения» аппарата

<sup>5</sup> нелинейная дифференциальная модель движения мобильного робота с шестью степенями свободы

Динамика движения (вращательное движение вокруг центра)	•	•	-	-
Силовая установка, в том числе вектор тяги	•	•	•	•
Силовые приводы системы управления	•	•	•	•
Датчики	•	•	•	•
Моменты инерции, в том числе переменные от перемещения частей	•	•	•	•
Гироскопические моменты	•	•	•	•
Присоединённые массы среды и моменты присоединённых масс среды	•	•	-	-
Шарнирные моменты органов управления	•	•	•	•
Реакция шасси при контакте с поверхностью <sup>6</sup>	•	•	•	-
Другие реакции связей (внешняя подвеска, сцепка <sup>7</sup> и пр.)	•	-	-	-
Влияние вариаций «параметрического определения»	•	•	•	•
<b>(3) Моделирование управления и содержания ситуации</b>				
Ручное управление <sup>8</sup> на основе заданной тактики и наблюдений	•	•	•	•
Наблюдение текущего состояния аппарата	•	•	•	•
Разовые управляющие действия	•	•	•	•
События	•	•	•	•
Автоматическое управление <sup>9</sup>	•	•	•	•
Заданные программные процессы	•	•	•	•
Содержание ситуации	•	•	•	•
<b>(4) Моделирование факторов эксплуатационной среды</b>				
Ошибки и невнимательность оператора	•	•	•	•
Механические отказы силовой установки	•	•	•	-
Отказы и ошибки в работе алгоритмов системы управления <sup>10</sup>	•	•	•	•
Ошибки в работе бортового программного обеспечения <sup>11</sup>	•	•	•	•
Ветровые возмущения (произвольный детерминированный профиль)	•	•	•	-
Подводные течения (произвольный детерминированный профиль)		•	-	
Атмосферная турбулентность	•		-	-
Волнение на море		-	-	
Дождь, ливень (влияние на аэродинамику)	•			
Обледенение (влияние на аэродинамику и моменты инерции) <sup>12</sup>	•	•	•	•
Состояние опорной поверхности (покрытая осадками, сухая, мокрая)	•	-	-	-
Геометрия и динамика опорной поверхности (уклон, перемещение)	•	-	-	-
Другие реакции связей (сцепка, внешняя подвеска и т.п.)	•	•	•	•
Состояние атмосферы или воды (температура, давление, плотность)	•	•	•	•
Вариации массы, моментов инерции и центровки аппарата	•	•	•	•
Вариации аэро-(гидро-)динамической конфигурации аппарата	•	•	•	•
Препятствия, противодействие	•	•	•	•
Вариации профиля движения и сценария управления	•	•	•	•
Произвольные сочетания вышеперечисленных факторов	•	•	•	•
<b>(5) Анализ и оценка свойств безопасности системы</b>				
Определение хронологии событий и процессов	•	•	•	•
Оценка степени нарушения ограничений	•	•	•	•
Оценка уровня безопасности ситуации	•	•	•	•
Оценка уровня сложности ситуации	•	•	•	•
Оценка уровня безопасности дерева ситуаций	•	•	•	•
Классификация дерева ситуаций по критериям безопасности	•	•	•	•
Упорядочивание дерева ситуаций по уровню безопасности	•	•	•	•
Идентификация аномальных ситуаций в дереве ситуаций	•	•	•	•
Определение объектов топологии окна безопасности	•	•	•	•

<sup>6</sup> экспериментально-расчётная модель

<sup>7</sup> при наличии модели соответствующих связей

<sup>8</sup> на основе заданного сценария управления полётом

<sup>9</sup> на основе заданных алгоритмов системы (автомата) управления

<sup>10</sup> на основе заданных алгоритмов системы (автомата) управления

<sup>11</sup> на основе заданных алгоритмов бортовых систем

<sup>12</sup> при наличии аэро-(гидро-)динамических характеристик аппарата с учётом влияния наростов льда

Оценка характеристик объектов топологии окна безопасности	•	•	•	•
<b>(6) Отображение результатов моделирования и анализа</b>				
Простейшие формы (графики, таблицы, статистика и др.)	•	•	•	•
Граф сценария ситуации	•	•	•	•
Протокол развития сценария ситуации во времени	•	•	•	•
Протокол событий	•	•	•	•
Нечёткие ограничения	•	•	•	•
Частные спектры безопасности ситуации	•	•	•	•
Интегральный спектр безопасности полётной ситуации	•	•	•	•
Диаграмма сложности ситуации	•	•	•	•
Хронология нарушения и восстановления нечётких ограничений	•	•	•	•
Лента «траектория-крен»	•	•	•	•
Двух- и трёхмерная фазовая диаграмма	•	•	•	•
Лента «траектория-крен» и интегральный спектр безопасности		•	•	•
Диаграмма «события – траектория движения»	•	•	•	•
Диаграмма «события – лента траектория-крен»	•	•	•	•
«Кинограмма» движения аппарата	•	•	•	•
Ситуационное дерево (дерево родственных ситуаций)	•	•	•	•
Семейство диаграмм интегральных спектров безопасности дерева	•	•	•	•
Диаграмма причинно-следственного механизма безопасности дерева	•	•	•	•
Семейство диаграмм сложности ветвей ситуационного дерева	•	•	•	•
Секторная диаграмма распределения шансов безопасности дерева	•	•	•	•
Окно безопасности для ситуационного дерева	•	•	•	•
Семейство окон безопасности	•	•	•	•

Из таблицы 1 видно, что ПМК VATES может использоваться практически без ограничений для исследования поведения подводных и авиационных роботов. Чтобы моделировать движение сухопутных и надводных роботов, необходимо включить в состав комплекса недостающие модели: реакций нестандартных связей, влияния волн и др.

### **Цели применения ситуационной модели**

Научно-прикладные цели ситуационного моделирования состоят в том, чтобы уменьшить неопределённость знаний пользователя (конструктора, испытателя, оператора) о границах диапазона допустимых режимов движения и управления робота (проекта) в сложных ситуациях, а также неопределённость знаний о тактике управления для обеспечения безопасности и эффективности применения аппарата. Эти виды неопределённостей желательно минимизировать как можно раньше в течение жизненного цикла робота. Другими словами, ситуационное моделирование призвано помочь снизить следующие виды рисков: недооценённая опасность, переоценённая опасность, неизвестная (пропущенная) опасность и искусственно введённая опасность.

Направления получения полезного социального и экономического эффекта: повышение безопасности (эффективности) применения роботов, сокращение затрат на НИОКР, расширение множества сложных ситуаций, исследуемых до постройки опытного образца, сокращение сроков создания, испытаний и сертификации, разработка новых типов роботов и новых методов выполнения работ (в составе «стай» [3] и др.).

### **Примеры моделирования акробатического полёта летательного аппарата**

На рис. 1 показаны примеры ситуационного моделирования акробатических фигур и так называемых «сверхманёвров» (сложных пространственных манёвров, выполняемых за пределами эксплуатационных ограничений по углу атаки летательного аппарата) для гипотетического высокоманевренного самолёта, оснащённого управляемым вектором тяги (УВТ). Моделирование проведено с помощью ПМК VATES [3].

На рисунке представлены следующие акробатические фигуры и «сверхманёвры»: горка, вертикальный набор высоты и переворот на  $360^\circ$  по крену, петля с поворотом на  $\frac{1}{4}$  оборота, петля  $\frac{3}{4}$  с помощью УВТ, полная петля и  $1\frac{1}{2}$  «сальто», двойная петля, вираж  $1\frac{1}{2}$  с набором высоты, фиксация вертикального положения («стойка») при нулевой скорости, медленное двойное «сальто» с помощью УВТ, снижение на средних и малых углах тангажа с помощью УВТ, излом траектории («колокол») – без УВТ и с УВТ, «кобра Пугачёва», медленное «сальто»  $\frac{1}{2}$ , снижение хвостом вниз (тангаж  $90^\circ$ ) при помощи УВТ, вертикальное «причаливание» сваливание в плоский штопор и др. Видно, что большинство маневров на малой скорости выполнено с помощью управляемого вектора тяги.

Для отображения результатов вычислительного эксперимента используются следующие графоаналитические формы или «карты знаний» [4]: лента «траектория – крен», протокол событий в привязке к ленте «траектория – крен», «кинограмма» полёта. Последняя форма – это траектория движения и хронологическая последовательность «кадров» – аксонометрических проекций силуэта самолёта, построенных с шагом 1 с. Для наглядности масштаб силуэта самолёта увеличен по отношению к траектории.

### Заключение

Автономная ситуационная модель (ПМК VATES) является высокопроизводительным и экономичным инструментом получения априорных знаний о поведении системы в сложных (многофакторных) ситуациях.

Модель может использоваться для исследования границ эксплуатационного диапазона проектов мобильных роботов авиационного и подводного классов в сложных условиях применения. Цель состоит в том, чтобы выявить потенциально опасные аномалии в поведении системы заблаговременно.

Метод дополнителен к лабораторному и натурному эксперименту. Применение системной модели целесообразно, в частности, в задачах сравнительного анализа и оценки характеристик безопасности (эффективности) альтернативных вариантов аэро-(гидро-) динамической компоновки аппарата. Модель позволяет в сжатые сроки проверить большое количество сложных эксплуатационных сценариев поведения будущей системы в вычислительном эксперименте.

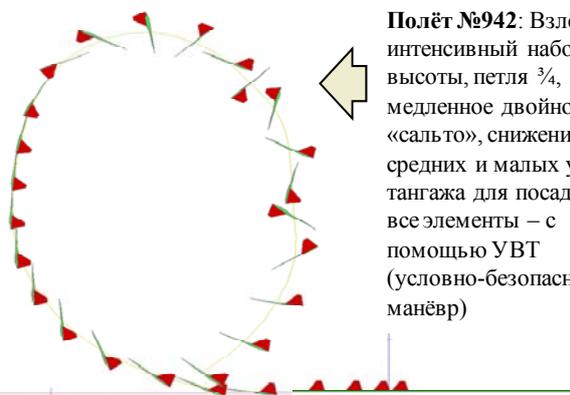
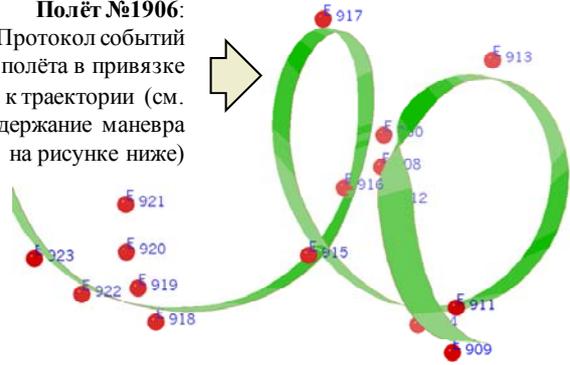
### Литература

- 1 Пospelов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука. – 1986.
- 2 Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений (доклад в настоящем сборнике).
- 3 Программно-моделирующий комплекс (ПМК) для исследований безопасности поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – летательный аппарат (ЛА) – эксплуатационная среда» в сложных (многофакторных) полётных ситуациях (ПМК VATES) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613256, выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ. Автор: Бурдун И.Е. Правообладатель: ООО «ИНТЕЛЛОНИКА». – М. – 2007. – 1 С.
- 4 Бурдун И.Е. Метод и технология обеспечения «встроенной» безопасности полёта летательного аппарата в сложных (многофакторных) условиях на основе ситуационного моделирования // Сб. трудов VIII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO '09), Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова (ИПУ) РАН, г. Москва, 26-30 января 2009 года. – Статья № 4206. – М. – 2009. – 44 С.

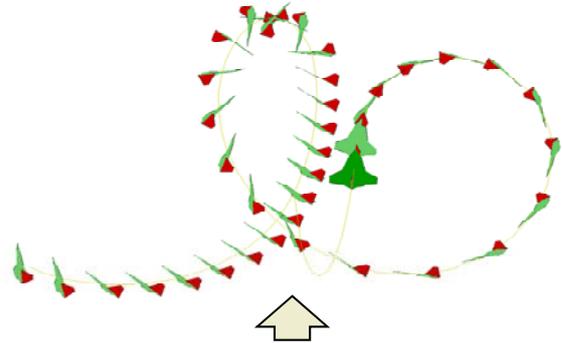


**Полёт №750:** Снижение с разгоном, двойная петля, вираж  $1\frac{1}{2}$  с набором высоты, площадка с разгоном, вертикальный набор высоты и переворот на  $360^\circ$  по крену, сваливание в плоский штопор (опасный манёвр)

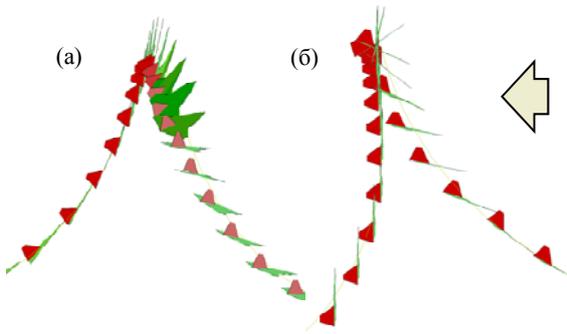
**Полёт №1906:** Протокол событий полёта в привязке к траектории (см. содержание маневра на рисунке ниже)



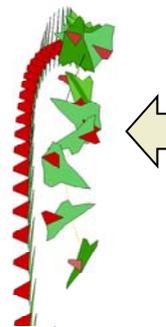
**Полёт №942:** Взлёт, интенсивный набор высоты, петля  $\frac{3}{4}$ , медленное двойное «сальто», снижение на средних и малых углах тангажа для посадки; все элементы – с помощью УВТ (условно-безопасный манёвр)



**Полёт №1906:** Петля с поворотом на  $\frac{1}{4}$  оборота, петля  $\frac{3}{4}$ , полная петля и  $1\frac{1}{2}$  «сальто», снижение на средних углах тангажа (безопасный манёвр)

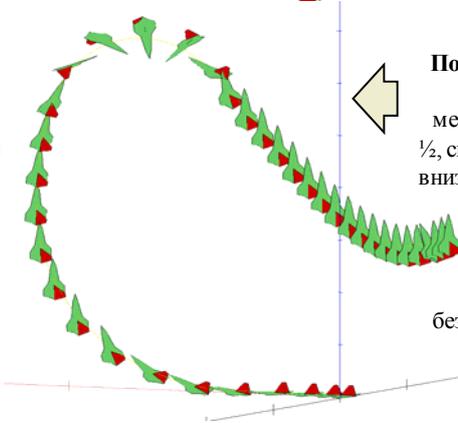
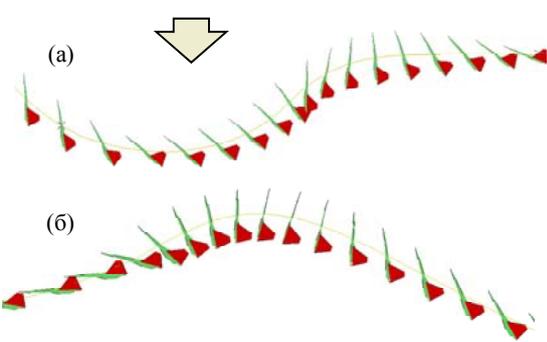


**Полёт №1906:** Горка, фиксация вертикального положения при нулевой скорости, излом траектории («колокол»), снижение с разгоном: (а) без УВТ и (б) с УВТ (безопасные маневры)



**Полёт №1672:** Вертикальный набор высоты, фиксация вертикального положения («стойка») при нулевой скорости, сваливание (опасный манёвр)

**Полёт №1906:** Варианты «кобры Пугачёва» при ошибках выдерживания скорости  $V_{пр}$ : (а)  $V_{пр}$  занижена, (б)  $V_{пр}$  завышена (безопасные маневры)



**Полёт №950:** Взлёт, горка, петля  $\frac{1}{2}$  и медленное «сальто»  $\frac{1}{2}$ , снижение хвостом вниз (тангаж  $90^\circ$ ) при помощи УВТ, вертикальное «причаливание» (условно-безопасный манёвр)

Рис. 1. Примеры ситуационного моделирования акробатических фигур и «сверхманёвров» гипотетического высокоманевренного самолёта с управляемым вектором тяги (УВТ)