

На правах рукописи

УДК: 629.197.005,629.7.05

НГУЕН НЫЫ МАН

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ  
ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатика, управление и вычислительная техника)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 2013 г.

Работа выполнена на кафедре 303 «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Костюков Вячеслав Михайлович

Официальные оппоненты: Рыбников Сергей Игоревич,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры 301 «Системы  
автоматического и интеллектуального  
управления» МАИ

Некрасов Александр Витальевич,  
кандидат технических наук, научный  
сотрудник ЗАО «Инерциальные  
технологии "Технокомплекса"», доцент  
кафедры ИУ-2 «Приборы и системы  
ориентации, стабилизации, навигации»  
МГТУ им. Баумана

Ведущая организация: ОАО «Центральный научно-исследовательский  
институт автоматики и гидравлики» (ЦНИИ АГ)

Защита состоится « 25 » марта \_\_\_\_\_ 2013 года в 10 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.125.11 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу:  
125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просьба направлять  
по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Горбачев Ю. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для подготовки летательного аппарата (ЛА), осуществляющего перевозку груза, необходимо перемещать большое количество предметов от склада к месту загрузки ЛА и обратно. Использование человеческой силы для этой цели морально устаревшая технология и неэффективная, потому что нужно на ограниченной площадке перемещать много грузов и постоянно имеется риск травмы из-за «человеческого фактора» и угроза задержек в обслуживании ЛА. Погрузочно-разгрузочное устройство (ПРУ) на базе тележки повышенной маневренности, автоматически переводящее груз по некоторой программной оптимальной траектории, сформированной и реализуемой по измерениям измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) и рассчитанной в цифровой вычислительной машине (ЦВМ) тележки, позволяет преодолеть указанные недостатки.

Кроме того, поскольку пространство обслуживания ЛА является ограниченным, включающим в себя много препятствий, главным требованием к ПРУ является всенаправленное и точное управляемое движение. Тележка ПРУ, оснащенная всенаправленными колесами типа «омни» (омни-колесами), имеет ряд характеристик, обеспечивающих всенаправленное движение. В отличие от обычных колес, имеющих движение вперед или назад в плоскости диска, омни-колеса могут одновременно совершить два перпендикулярных движения с помощью роликов, расположенных на периферии диска колеса и свободно вращающихся вокруг своих осей, касательных к окружности диска. С этими особенностями маневра омни-колеса, тележка может достигать определенной точки пространства с заданной ориентацией без необходимости уточняющего движения назад и вперед (как в случае использования обыкновенного колеса), что позволяет уменьшить размер требуемого пространства зоны погрузки и сократить время обслуживания ЛА.

Обход препятствий является не менее важной и актуальной задачей при управлении движением тележки ПРУ. В ограниченном пространстве загрузки ЛА, на рассчитанной траектории движения тележки могут быть расположены и другие объекты. Во избежание столкновения с этими препятствиями, что может приводить к опасной ситуации, нужно осуществлять обход тележки препятствий по траектории, полученной как решение задачи минимизации критерия эффективности, обеспечивающего движение тележки вне запретной зоны, что требует разработки автономной системы измерения и оптимизации траекторий в бортовой ЦВМ.

Погрешности существующих автономных систем управления движением тележки ПРУ могут выводить тележку не в место, где производится установка груза на ЛА, а в место, смещенное на некоторое расстояние относительно планируемого места. Определение этого смещения, что весьма актуально для точного позиционирования ПРУ в месте установки груза на ЛА, требуются более точные методы измерения, чем позиционирование с помощью инерциальной системы. Кроме того, на конечном этапе необходим, очевидно, переход к системе координат, связанной с ЛА. Это в настоящее время можно реализовать с помощью оптической системы распознавания элементов ЛА, участвующих в фиксации грузов на ЛА.

Указанные обстоятельства определяют актуальность разработки структуры, алгоритмов и программного обеспечения (ПО) ИВК подвижной тележки ПРУ повышенной маневренности (с омни-колесами), позволяющие производить доставку грузов со склада до места фиксации груза на ЛА и решающие поставленную задачу в автономном автоматическом режиме в условиях наличия препятствий на траектории движения.

**Целью работы** являются разработка и оптимизация алгоритмов ИВК управления движением ПРУ на базе тележки с тремя омни-колесами, построенных на основе информации о векторе состояния тележки, полученной от бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и оптической системы позиционирования ПРУ на основе распознавания изображений элементов установки груза в целях доставки ПРУ от склада к точке установки груза в месте обслуживания ЛА с заданной точностью.

Достижение поставленной цели потребовало выполнение следующих этапов исследования:

1. Построение математической модели (ММ) движения тележки ПРУ с тремя омни-колесами по неровной опорной поверхности.
2. Разработка алгоритмов идентификации параметров тележки ПРУ.
3. Разработка алгоритма управления движением ПРУ.
4. Разработка оптимального алгоритма обхода ПРУ препятствий.
5. Разработка ПО реализации алгоритмов ИВК.
6. Реализация алгоритма обработки изображения с автономной камеры ПРУ для определения местоположения ПРУ относительно базовых точек загружаемого ЛА.
7. Разработка комплекса сквозного математического моделирования управления движением ПРУ от склада до точки загрузки ЛА с анализом точности реализуемых траекторий.

**Объектом исследований** является контур управления ПРУ на базе тележки с тремя омни-колесами.

**Предметом исследований** являются алгоритмы и ПО бортового комплекса измерения и управления, обеспечивающие необходимую точность решения задачи доставки грузов.

**Методы исследования** базируются на теории измерения, управления, оптимизации, инерциальной навигации, распознании оптических изображений и имитационном моделировании.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Построена наиболее полная динамическая ММ движения тележки ПРУ с тремя омни-колесами, учитывающая не только движение ПРУ на опорной поверхности, но и пространственное движение подпружиненной платформы тележки ПРУ, соединенной с колесами амортизаторами, что позволяет исследовать точность работы БИНС, расположенной на платформе.
2. Реализованы алгоритмы идентификации параметров тележки ПРУ методом адаптивного управления движением ПРУ, обеспечивающем допустимый характер движения ПРУ.

3. Разработан алгоритм и ПО оптимального обхода препятствий, полученный из решения градиентным методом задачи оптимизации заданного критерия качества траектории с модифицированным алгоритмом настройки шага приращения вектора управления.

4. Реализованы бортовые «одношаговый» и «интервальный» алгоритмы и ПО работы БИНС, входящей в ИВК ПРУ.

5. Применены методы определения относительных координат ПРУ и элементов фиксации груза на ЛА с помощью оптико-электронной системы (ОЭС).

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Полная ММ движения тележки ПРУ с тремя омни-колесами по неровной опорной поверхности.

2. Реализация алгоритмов идентификации параметров тележки ПРУ в контуре адаптивного управления движением ПРУ.

3. Модификация градиентного алгоритма решения задачи оптимального обхода ПРУ препятствий.

4. Реализация алгоритма обработки изображения для определения текущего местоположения тележки ПРУ относительно заданных элементов ЛА с использованием трехмерного эталона элементов фиксации грузов на ЛА.

5. Реализация бортового «одношагового» алгоритма работы БИНС.

6. Реализация бортового «интервального» алгоритма работы БИНС.

7. Комплекс имитационного моделирования, реализующий все вышеуказанные алгоритмы на языке С++ (моделирования работы системы «Опорная поверхность – ПРУ – ИВК – САУ»).

**Практическая ценность** результатов работы определяется следующим:

1. Построены наиболее общая математическая модель движения тележки ПРУ с тремя омни-колесами и алгоритмы управления работой ПРУ на ограниченном пространстве.

2. Реализованные алгоритмы ИВК для данного ПРУ имеют универсальный характер и могут использоваться для любых подвижных объектов.

3. Получены требования к характеристикам датчиков гироинерциального блока (ГИБ) БИНС и точности калибровки, обеспечивающие точность управления ПРУ, реализующей последующую коррекцию положения ПРУ по анализу оптического изображения точки загрузки ЛА.

**Внедрение и реализация.** Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» МАИ и включены в материалы, выполненные в НИР по темам 44271-03038 и ПБ847, что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

**Публикации.** По основным результатам диссертационной работы опубликовано 4 научно-технические статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (128 источника) и приложений,

содержащих пояснительный материал. Работа представлена в виде 156 страниц основного текста, 121 страниц приложений, 11 таблиц и 47 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована цель диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, показана практическая ценность работы.

**В первой главе** проведен обзор ПРУ с всенаправленными колесами.

**ПРУ с всенаправленными колесами** имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием обычных колес. Возможность совершения всенаправленного движения позволяет увеличить коэффициент использования площадей на 20...30%, сократить время движения от склада до места обслуживания и повысить точность управления ПРУ.

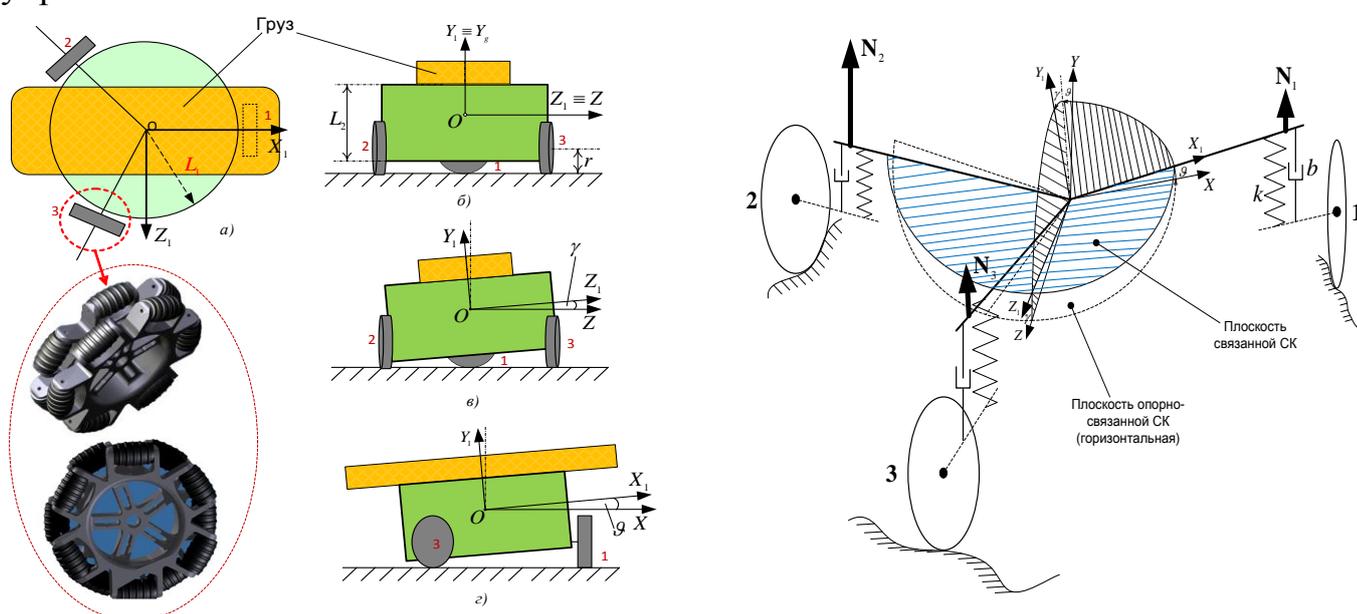


Рис. 1. Обобщенная схема тележки с тремя омни-колесами и ее положения при движении

Среди ПРУ с всенаправленными колесами, ПРУ на базе тележки с тремя омни-колесами (см. рис. 1) обладает следующими преимуществами:

- действительной всенаправленной маневренностью: ПРУ может двигаться по любому направлению и вращаться вокруг любой определенной точки поверхности без проскальзывания;

- устойчивостью: для каждой комбинации вращений колес по скорости и направлению существует только одно возможное движение ПРУ;

- отсутствием конфликта между колесами: для произвольной комбинации вращений колес по скорости и направлению всегда существует соответствующее возможное движение ПРУ.

Эти преимущества обеспечивают возможность высокоточного автоматического управления движением ПРУ.

**Важной характеристикой автономного ПРУ** является возможность планирования движения и реализации движения в рабочем пространстве без участия человека. ИВК САУ ПРУ состоит из системы измерения, определяющей вектор

состояния ПРУ, и БЦВМ, в которой выполняются вычисления, реализующие три этапа задачи автоматического управления (навигацию, управление траекторией и стабилизацию). Схема САУ ПРУ показана на рис. 2.

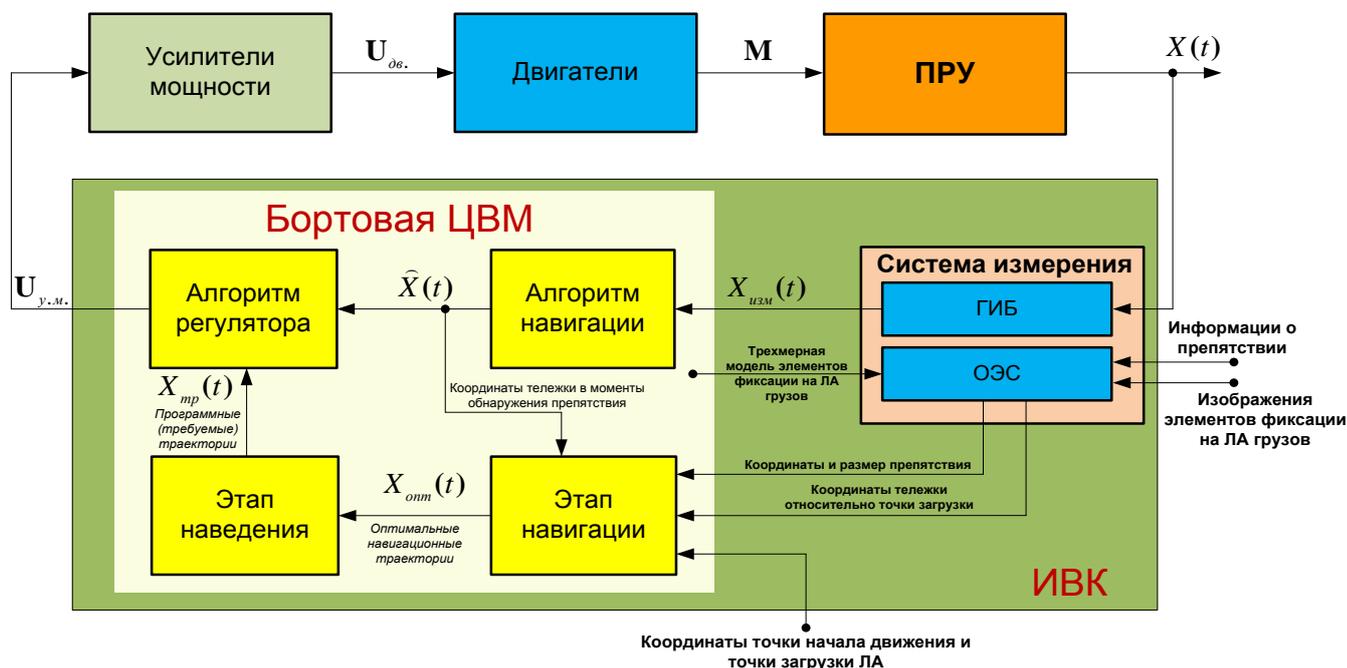


Рис. 2. Схема САУ ПРУ

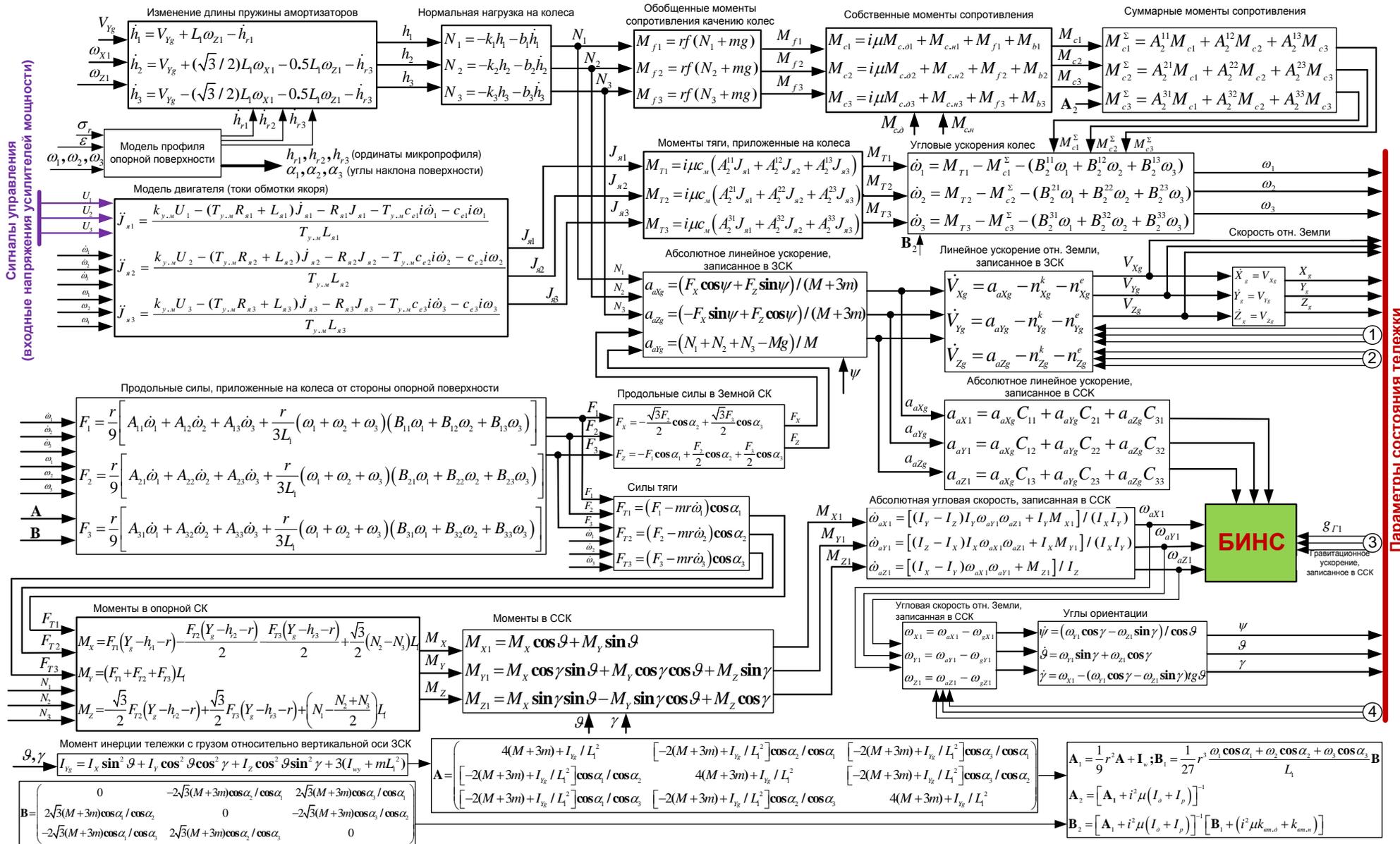
В качестве систем позиционирования тележки выбраны БИНС на базе ГИБ, состоящего из трех датчиков линейных ускорений (ДЛУ), трех датчиков угловых скоростей (ДУС), и оптико-электронная система (ОЭС), т.к. эти системы больше всего обеспечивают автономную и помехоустойчивую работу ИВК, обеспечивающего информацию для формирования законов управления. Кроме того, использование ОЭС намного дешевле по сравнению с повышением требований по точности датчиков ГИБ для обеспечения высокоточного позиционирования ПРУ в конечном пункте.

**Сформулирована техническая постановка решаемой задачи:** Разработать математический макет автономного (на базе ИВК, содержащего БИНС и оптико-электронную систему коррекции БИНС) погрузочно-разгрузочного устройства на базе тележки с тремя омни-колесами, доставляющего грузы от склада до места загрузки ЛА с заданной точностью при возможном наличии на траектории препятствий.

**Вторая глава** посвящена разработке ММ движения загруженной тележки ПРУ с тремя омни-колесами и общего алгоритма комплексного моделирования работы системы «Опорная поверхность – ПРУ – ИВК – САУ».

На рис. 3 показана ММ движения тележки ПРУ по неровной опорной поверхности. Сигналами управления ПРУ являются входные напряжения усилителя мощности электродвигателей. Движение тележки ПРУ описывается в Земной (ЗСК)  $Ox_g Y_g Z_g$  и связанной (ССК)  $Ox_1 Y_1 Z_1$  системах координат.

Сигналы управления (входные напряжения усилителей мощности)



Параметры состояния тележки

M - масса платформы тележки с грузом; m - масса колеса; f<sub>0</sub> - коэффициент сопротивления качению; k<sub>ам,о</sub>, k<sub>ам,н</sub> - коэффициенты вязкого трения подшипников двигателей и колес; i - передаточное число редуктора двигателей; μ - КПД редуктора двигателей; T<sub>у,м</sub>, k<sub>у,м</sub> - параметры усилителя мощности; L<sub>н</sub>, R<sub>н</sub>, c<sub>н</sub>, c<sub>н</sub> - электрические параметры двигателей

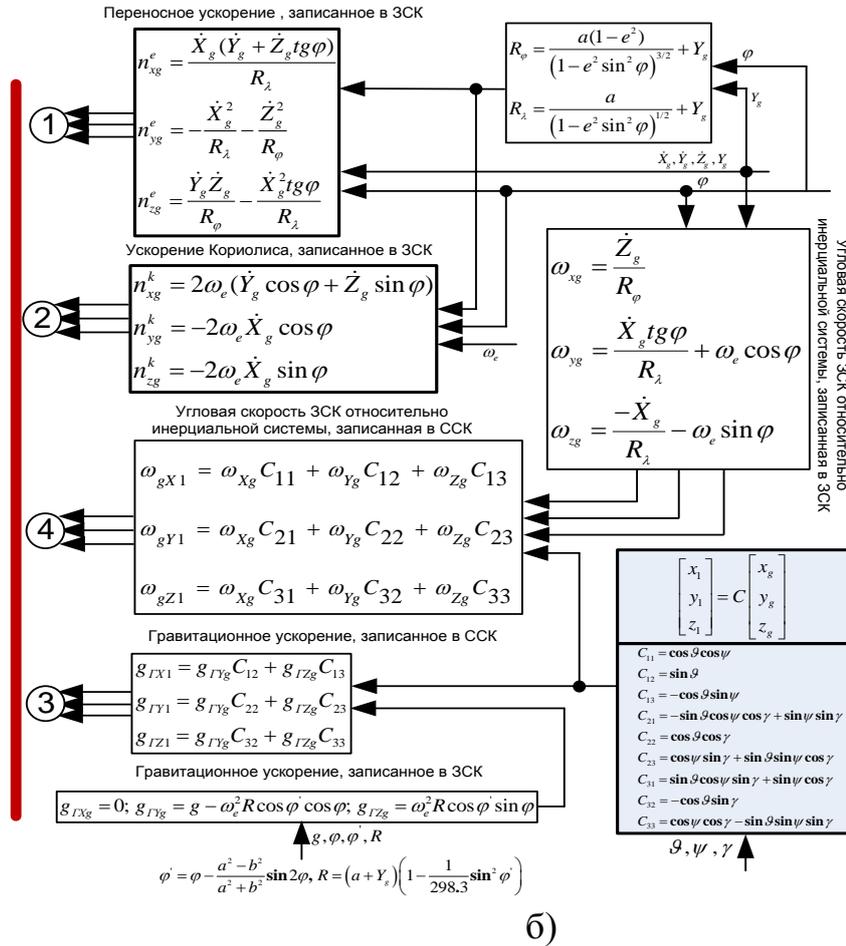


Рис. 3. Математическая модель движения тележки ПРУ

Для стабилизации программной траектории ПРУ в данной работе использован ПИД регулятор, параметры которого получены от решения обратной задачи динамики движения тележки ПРУ:  $U_i^{k+1} = U_i^k + \Delta U_i^{k+1}$ ;  $i = \overline{1..3}$ ,

где  $\Delta U = \mathbf{H} \cdot (\Delta U_{V_{Xg}}, \Delta U_{V_{Zg}}, \Delta U_{\omega})^T$ ;

$$\Delta U_{V_{Xg}} = k_{vx} \frac{d}{dt} (V_{Xg} - V_{Xg_{зад}}) + k_{vx} (V_{Xg} - V_{Xg_{зад}}) + k_x \int_0^t (V_{Xg} - V_{Xg_{зад}});$$

$$\Delta U_{V_{Zg}} = k_{vz} \frac{d}{dt} (V_{Zg} - V_{Zg_{зад}}) + k_{vz} (V_{Zg} - V_{Zg_{зад}}) + k_z \int_0^t (V_{Zg} - V_{Zg_{зад}});$$

$$\Delta U_{\omega} = k_{\dot{\omega}} \frac{d}{dt} (\omega - \omega_{зад}) + k_{\omega} (\omega - \omega_{зад}) + k_{\psi} \int_0^t (\omega - \omega_{зад}),$$

$\mathbf{H}$  - матрица, зависящая от параметров конструкции тележки ПРУ;  $k_{vx}, k_{vz}, k_x, k_z, k_{\dot{\omega}}, k_{\omega}, k_{\psi}$  - коэффициенты;  $V_{Xg_{зад}}, V_{Zg_{зад}}, \omega_{зад}$  - проекции вектора требуемой линейной скорости на оси  $OX_g, OZ_g$  и угловая скорость курса.

Движение ПРУ от склада  $O$  до точки загрузки ЛА  $O_3$  делится на три этапа (рис.4).

На первом этапе ПРУ вращается на месте для идентификации его момента инерции.

На втором этапе ПРУ движется с управлением по БИНС от начальной точки  $O$  до точки  $O_1$ . Ошибка в оценке расстояния  $O_1O_3$ , измеренного БИНС, должна

быть не больше заданной величины  $\Delta R_{\max}$ , чтобы дальше была возможность сработать ОЭС. Значение  $\Delta R_{\max}$  есть требование к погрешности БИНС на втором этапе.

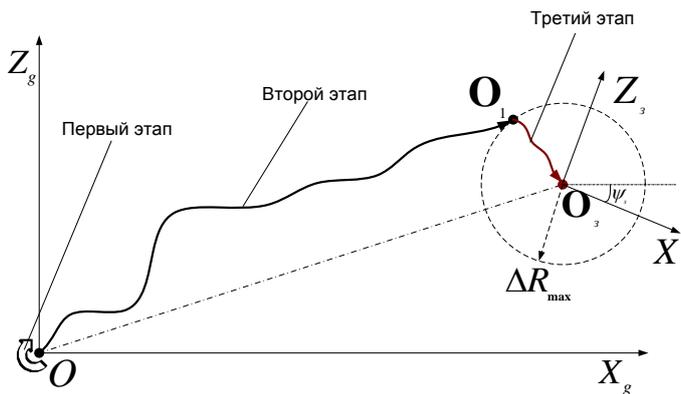


Рис. 4. Два этапа движения ПРУ

В начале третьего этапа производится анализ изображения элементов фиксации грузов на ЛА для определения положения ПРУ в новой системе координат (СК)  $O_3X_3Z_3$ , связанной с точкой  $O_3$  и отличающейся от ЗСК углом курса  $\psi_3$ . В данном этапе ПРУ движется от точки  $O_1$  к точке  $O_3$ . В конечном пункте ПРУ вращается на месте для

получения ориентации платформы, необходимой для дальнейших действий (нулевой угол курса тележки ПРУ в СК  $O_3X_3Y_3Z_3$ ).

**В третьей главе** решена задача идентификации момента инерции загруженной тележки ПРУ в процессе адаптивного управления вращением ПРУ на месте.

В эксплуатации ПРУ транспортирует разные грузы, вследствие чего массо-инерциальные характеристики (масса, моменты инерции, центр масс) загруженной платформы тележки ПРУ изменяются и становятся отличными от расчетных. Это может приводить к увеличению неточности управления движением ПРУ.

Масса платформы тележки ПРУ с грузом определяется по измерению изменения длины пружин амортизаторов, а центр масс определяется по массе груза, массе платформы и положению центра масс груза относительно платформы, причем масса груза определена как разность массы платформы с грузом и массы разгруженной платформы. Перед определением центра масс загруженной платформы необходимо корректировать положение груза относительно платформы для того, чтобы угловое положение загруженной платформы было максимально близко к ее положению, установленному до загрузки.

Поскольку ПРУ главным образом осуществляет вращательное движение по рысканию по опорной поверхности, точность определения момента инерции  $I_{Yg}$  загруженной тележки ПРУ относительно ее вертикальной оси  $OY_g$  оказывает большое влияние на точность движения ПРУ. При движении ПРУ  $I_{Yg}$  в большей мере зависит от момента инерции загруженной платформы тележки относительно ее вертикальной оси симметрии  $I_Y$ :

$$I_{Yg} = I_x \sin^2 \vartheta + I_y \cos^2 \vartheta \cos^2 \gamma + I_z \cos^2 \vartheta \sin^2 \gamma + 3(I_{wy} + mL_1^2),$$

т.к.  $\vartheta$  и  $\gamma$  очень малы.

Для идентификации момента инерции  $I_Y$  используем модель вращения ПРУ на месте, в которой  $\vartheta = 0$  и  $\gamma = 0$ , т.е.  $I'_{Yg} = I_Y + 3(I_{wy} + mL_1^2)$ , где  $I'_{Yg}$  - момент инерции тележки ПРУ относительно вертикальной оси  $OY_g$  в данном режиме

вращения.  $I_Y$  определяется по  $I'_{Yg}$ , входящему в линейную передаточную функцию вращения тележки на месте:

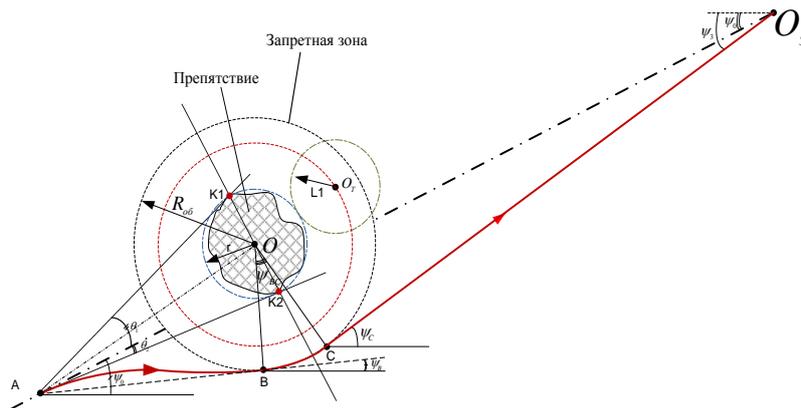
$$W_{\omega}^U(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta U} = \frac{\beta_0}{\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + s^3},$$

где  $\omega$  - угловая скорость тележки относительно оси  $OY_g$ ,  $U$  - сигналы управления (входные напряжения усилителей мощности двигателей колес), коэффициенты  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  являются функциями от искомого  $I'_{Yg}$ . Три коэффициенты  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  определяются классическими методами параметрической идентификации, которые включены в структуру алгоритма адаптивного управления.

Примеры результатов идентификации приведены в седьмой главе.

**Четвертая глава** посвящена решению задачи оптимального управления обходом препятствия, заключающейся в необходимости управлять движением тележки ПРУ, чтобы она оптимальным образом обходила препятствия (рис. 5).

**На уровне этапа навигации**, оптимальный обход (минимальная длина пути) препятствия производится по кругу окружности, отстоящей от препятствия на необходимом расстоянии (запретная зона, рис. 5). Вход в данный круг и сход от него производятся по касательным к данной окружности, входящим от точки А (текущего положения) и  $O_3$  (точки загрузки ЛА).



Вход в круг характеризуется координатами  $X_B, Z_B$ , углом рыскания в точке входа  $\Psi_{pB}$ , а круг обхода и сход от него - углом вращения  $\Psi_{pBC}$  и углом рыскания в точке схода  $\Psi_{pC}$ . Эти параметры определяются в БЦВМ по данным, полученным от ОЭС по анализу

Рис. 5. Схема оптимального обхода от препятствия изображений препятствия:

$$\Psi_{pB} = \Psi_{p0} - \arcsin \frac{R_{об}}{AO} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}; \Psi_{pC} = \Psi_{p0} + \arcsin \frac{R_{об}}{R_0} - \arctg \frac{AO \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}}{AO_3 - AO \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}};$$

$$\Psi_{pBC} = \Psi_{pC} - \Psi_{pB}; X_B = AB \cos \Psi_{pB}; Z_B = AB \sin \Psi_{pB}; AB = \sqrt{AO^2 + R_{об}^2};$$

$$R_{об} = r_{np} + L_1 + \delta_{занас}; AO \approx \frac{AK_1 + AK_2}{2} \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}; R_0 = \sqrt{\left( AO_3 - AO \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right)^2 + AO^2 \sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}},$$

где  $AK_1, AK_2, \theta_1, \theta_2$  получены по анализу изображений препятствия;  $\Psi_{p0}$  - текущий угол рыскания тележки,  $r_{np}$  - условный радиус препятствия, значение которого получено от пассивного ответчика, установленного на препятствии,  $\delta_{занас}$  - принятое запасное расстояние (0.5м).

Для определения оптимальной (программной) траектории входа в круг обхода препятствия, в данной работе используем градиентный метод решения задачи оптимального управления с заданными конечными значениями. В качестве параметров, конечное значение которых задано, выберем следующие: координаты, скорость и угол рыскания тележки в точке входа  $B$ :  $X_B, Z_B, V_B, \Psi_{pB}$ . Критерий

оптимизации принят в виде:  $J = \Phi[x(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt$ ,

где  $\Phi[x(t_f)] = k_1 [X_g(t_f) - X_B]^2 + k_2 [Z_g(t_f) - Z_B]^2$  - терминальный член критерия,

$L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = k_3 [U_1^2(t) + U_2^2(t) + U_3^2(t)] + k_4 [\Psi_p(t) - \Psi_{pB}]^2 + k_5 [\psi(t) - \Psi_{pB}]^2$  -

подынтегральная функция критерия,  $\Psi_p(t)$  - угол рыскания тележки,  $\psi(t)$  - угол курса тележки;

при ограничениях:  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$  (система уравнения движения тележки);

$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$  - начальное состояние;  $\Psi[x(t_f)] = [V_{xg}(t_f) - V_{xB}; V_{zg}(t_f) - V_{zB}; \psi(t_f) - \Psi_{pB}]^T = 0$

- заданные параметры на правом конце интервала управления,  $V_{xB} = V_B \cos \Psi_{pB}, V_{zB} = V_B \sin \Psi_{pB}$ .

В численном алгоритме решения данной задачи реализован классический поисковый градиентный метод, подробно изложенный и реализованный в программе на языке программирования C++. Особенности предлагаемого алгоритма состоят в алгоритме поиска шага приращения вектора управления.

**В пятой главе** исследуется коррекция положения ПРУ относительно базовых точек под крылом ЛА на основе анализа изображения элементов фиксации грузов на ЛА, полученного от ОЭС.

**Автоматизированный анализ изображений** реализуется по схеме, показанной на рис. 6.

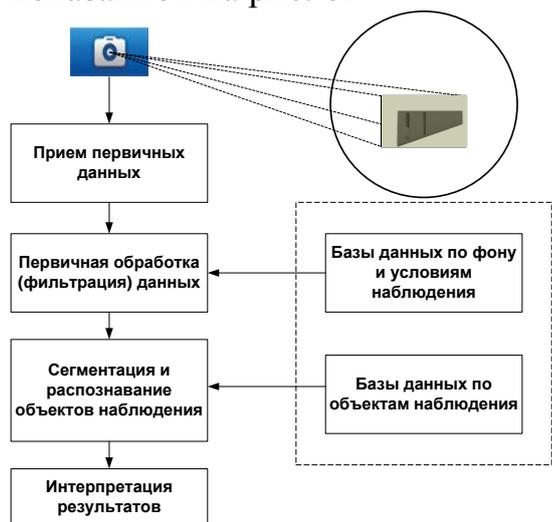
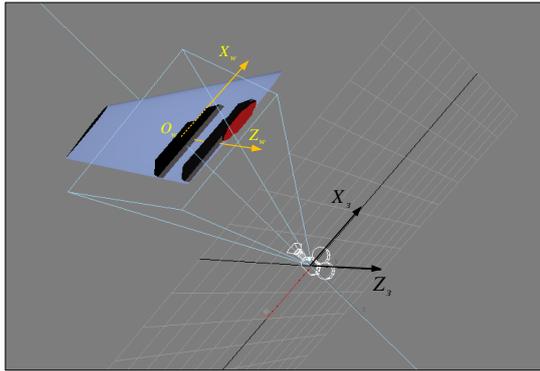


Рис. 6. Основные компоненты задачи анализа изображения

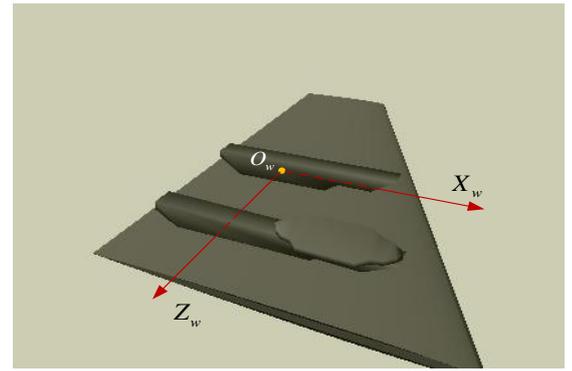
Для решения задачи коррекции положения ПРУ в СК  $O_3X_3Z_3$  по анализу изображения необходимо: 1) создать трехмерную модель сцены получения изображения элементов фиксации грузов (рис.7); 2) разработать алгоритм подготовки сцены для получения с неё эталонов – двухмерных снимков сцены; 3) разработать алгоритм сегментации и распознавания эталонов и подобрать оптимальные параметры алгоритма; 4) разработать алгоритм вращения сцены для получения эталонов, соответствующих различным положениям ПРУ в пределах возможного диапазона координат; 5)

разработать алгоритм распознавания полученных эталонов, и по результатам работы алгоритма сделать вывод о наиболее вероятном положении ПРУ относительно базовых точек ЛА, таким образом, скорректировав координаты ПРУ относительно точки загрузки ЛА.

Результаты анализа изображения элементов фиксации для определения величины  $\Delta R_{\max}$  и положения ПРУ рассмотрены в седьмой главе.



а)



б)

Рис. 7. Сцена получения изображения элементов фиксации в месте, близком точки загрузки ЛА (а) и трехмерная модель элементов фиксации (б)

**Шестая глава** посвящена реализации алгоритмов ИВК на основе БИНС и исследованию точностных характеристик.

**Алгоритм инерциальной навигации** основан на решении двух классических задач теоретической механики:

- решения кинематических уравнений Пуассона, определяющих изменение взаимной ориентации связанной (ССК, индекс  $B$ ) и навигационной (НСК, индекс  $N$ ) систем координат:

$$\dot{C}_B^N = C_B^N (\omega_{BI}^B \times) - (\omega_{NI}^N \times) C_B^N \quad \text{или} \quad \dot{q}_B^N = \frac{1}{2} q_B^N \omega_{BI}^B - \frac{1}{2} \omega_{NI}^N q_B^N,$$

где  $C_B^N$  - матрица перехода от ССК в НСК,  $q_B^N$  - кватернион поворота;

- интегрирования динамических уравнений Ньютона в НСК, причем:

$$a_{fBI}^N = C_B^N a_{fBI}^B \quad \text{или} \quad a_{fBI}^N = q_B^N a_{fBI}^B q_B^{N*},$$

где  $q_B^{N*}$  - сопряженный кватерниона  $q_B^N$ .

Схема общего алгоритма навигации показана на рис. 8.

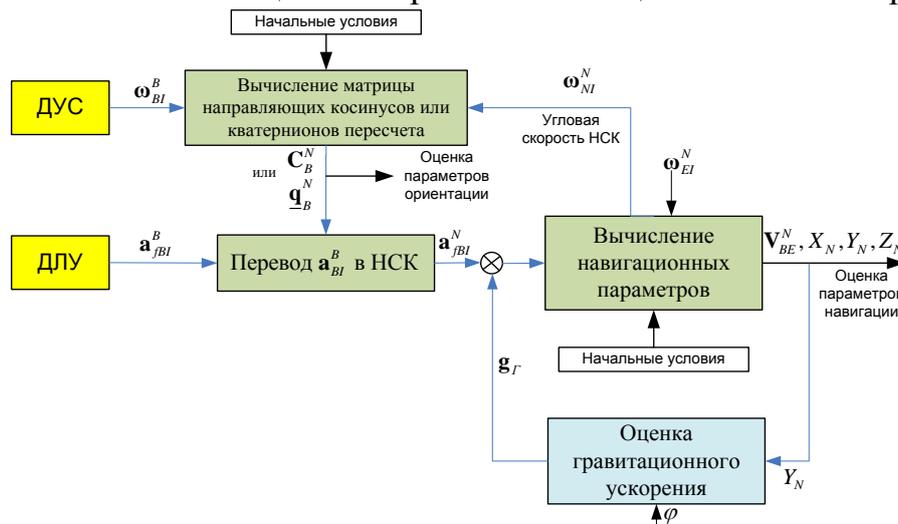


Рис. 8. Схема алгоритма работы БИНС ( $\omega_{BI}^B$  - абсолютная угловая скорость тележки, записанная в ССК;  $a_{fBI}^B$  - кажущееся ускорение тележки, записанное в ССК;  $C_B^N$  - матрица перехода от ССК в НСК;  $a_{fBI}^N$  - кажущееся ускорение тележки, записанное в НСК;  $\omega_{NI}^N$  - абсолютная угловая скорость НСК, записанная в НСК;  $v_{BE}^N$  -

скорость тележки относительно Земли, записанная в НСК;  $X_N, Y_N, Z_N$  - положение тележки относительно Земли, записанное в НСК,  $\varphi$  - оценка географической широты)

Угловая скорость и линейное ускорение измеряются датчиками ГИБ.

**Функциональные зависимости выходного сигнала датчиков ГИБ от измеряемой**

величины имеют вид:

$$x_{имм.} = \frac{1}{K_x} (1 + k_x^M) (x + x_0 + k_x^T \Delta T + \delta x_{rand}),$$

где  $x$  - входная величина;  $x_{имм.}$  - выходная величина (количество импульсов в секунду,  $\mathbf{a}_{имм.}$  или  $\boldsymbol{\omega}_{имм.}$ );  $K_x$  - номинальная цена импульса (коэффициент преобразования);  $x_0$  - смещение нуля;  $k_x^M$  - масштабный коэффициент;  $k_x^T$  - температурный коэффициент изменения смещения нуля;  $\delta x_{rand}$  - случайная составляющая ошибки измерения;  $\Delta T$  - отклонение текущей температуры датчиков от базовой температуры калибровки.

**Существуют формально два алгоритма реализации работы БИНС:**

1. В «одношаговом» алгоритме для вычисления взаимной ориентации СК и интегрирования уравнений навигации используется единый шаг по времени, определяемый частотой опроса датчиков ГИБ;

2. «Интервальный» алгоритм учитывает наиболее распространенный вид выходных сигналов современных датчиков ГИБ, производящих осреднение мгновенных измерений (отчетов) на интервале времени. При этом, частота опроса датчиков ГИБ, частота обработки первичных измерений и частота интегрирования уравнений навигации разные.

В общей схеме моделирования работы БИНС содержатся три основанные модули: модуль измерения, модуль обработки первичных измерений и модуль навигации (рис. 9).

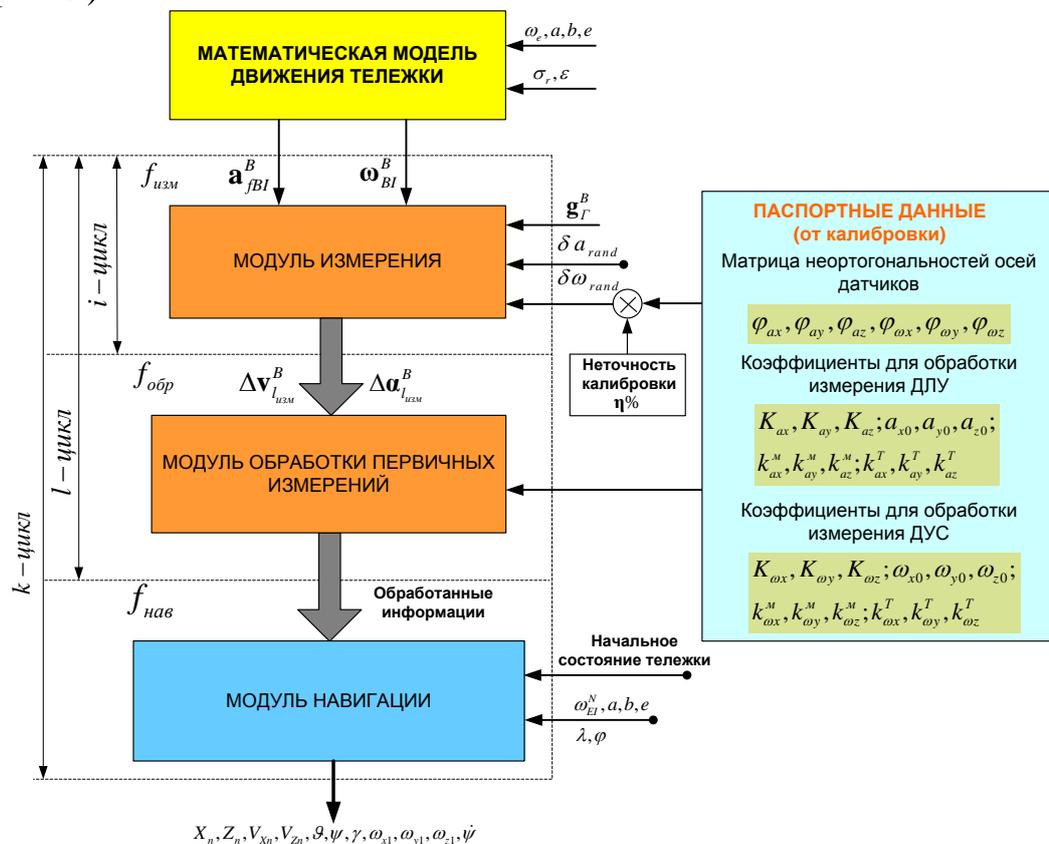


Рис. 9. Общая схема алгоритма моделирования работы БИНС ( $\sigma_r, \varepsilon$  - параметры микропрофиля опорной поверхности,  $\omega_e$  - угловая скорость вращения Земли,  $a, b, e$  - полуоси и первый эксцентриситет Земли)

При моделировании «одношагового» алгоритма навигации модуль измерения выдает в качестве выходных своих данных мгновенные значения измеряемых линейных ускорений и угловых скоростей  $\Delta \mathbf{v}_{l_{изм}}^B = \mathbf{a}_{имп.}$ ,  $\Delta \boldsymbol{\alpha}_{l_{изм}}^B = \boldsymbol{\omega}_{имп.}$ . Частота обновления параметров ориентации и навигации и частота выдачи информации от АЦП датчиков равны частоте опроса датчиков  $f_{изм} = f_{обр} = f_{нав}$ .

При «интервальном» алгоритме навигации выходными сигналами модуля измерения являются суммирование отсчетов измеряемых параметров (в количестве импульсов):  $\Delta \mathbf{v}_{l_{изм}}^B = \sum_{j=1}^{N_i} \text{int}(\mathbf{a}_{имп.} \tau_{изм.})$ ;  $\Delta \boldsymbol{\alpha}_{l_{изм}}^B = \sum_{j=1}^{N_i} \text{int}(\boldsymbol{\omega}_{имп.} \tau_{изм.})$ , где  $\text{int}()$  - функция, отбрасывающая дробную часть числа и возвращающая целое значение;  $N_i$  - число  $i$  - циклов в одном  $l$  - цикле,  $N_i = f_{изм} / f_{обр}$ .

Интервальный алгоритм реализуется в трех циклах с разными частотами  $f_{изм} = N_i f_{обр}$ ;  $f_{обр} = N_l f_{нав}$  по схеме, показанной на рис. 10, где  $N_i, N_l$  - целые числа.

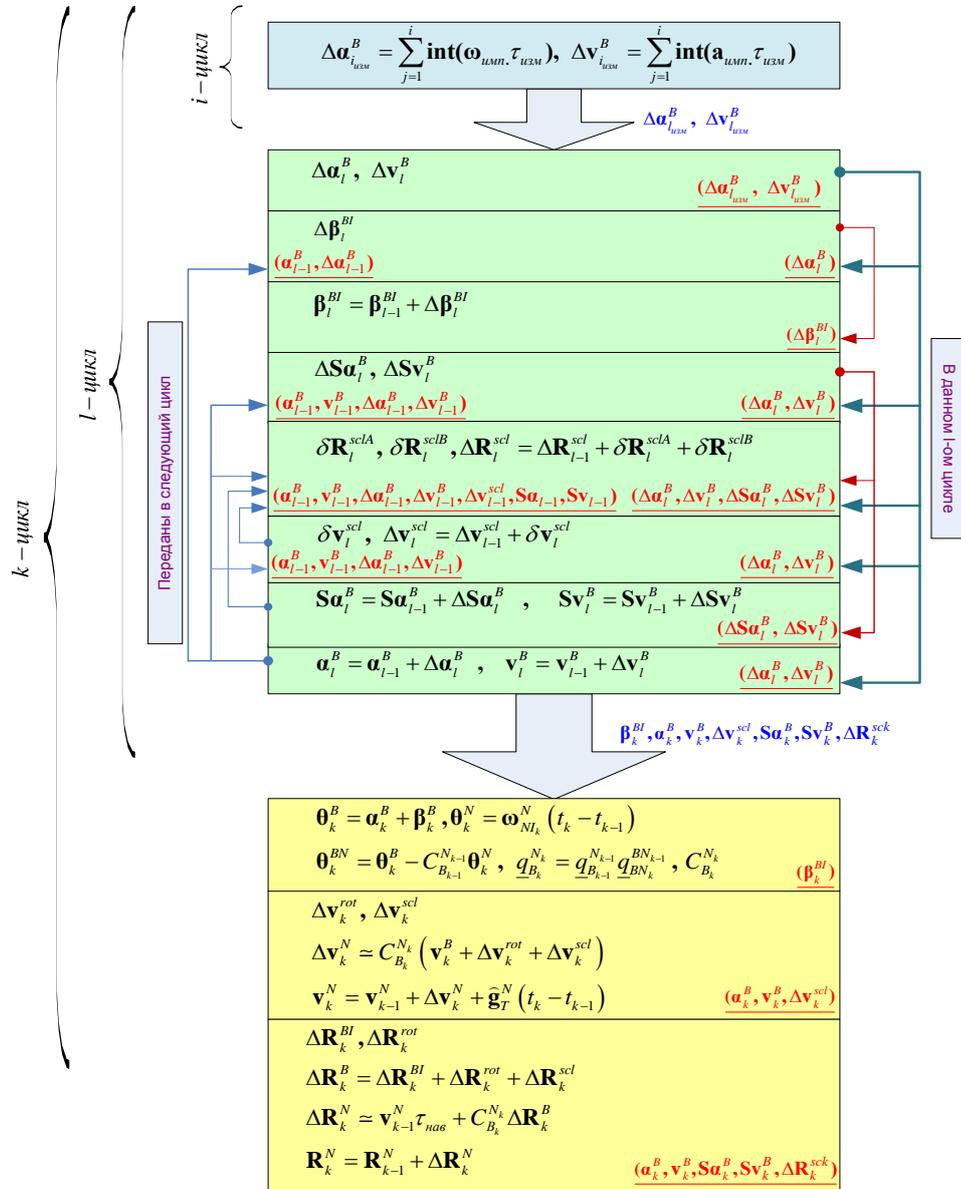


Рис. 10. Численный алгоритм реализации «интервального» алгоритма навигации (судя Paul G. Savage, Strapdown Associates, Inc., США)

Здесь параметры, подчеркнутые и указанные в скобках являются входными для вычисления остальных параметров.

Алгоритмы реализованы и используются в ПО для конкретных датчиков и принятых параметров алгоритмов в главе VII.

**В седьмой главе** произведен анализ результатов комплексного моделирования.

Для исследования поведения ПРУ с ИВК на неровной опорной поверхности построен **комплекс математического моделирования**, структура которого показана на рис. 11.

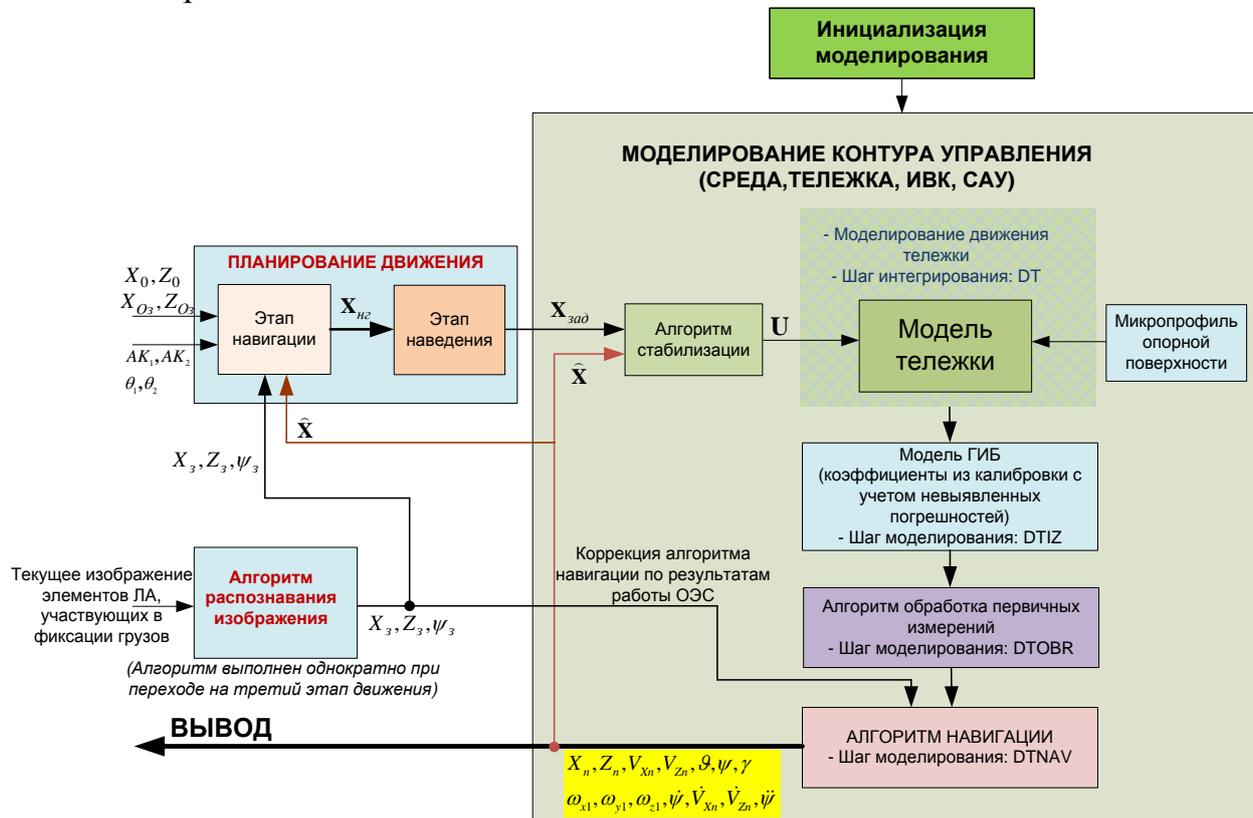


Рис. 11. Комплекс моделирования

При моделировании движения ПРУ приняты следующие данные:

- параметры двигателей:  $T_{y.m} = 0.05$  с,  $k_{y.m} = 10$ ,  $L_y = 23$  мГн,  $R_y = 1.91$  Ом,  $P_{ном.} = 11.3$  кВт,  $U_{ном.} = 420$  В,  $\omega_{ном.} = 1280$  обр./мин.,  $КПД = 79\%$ ,  $J_d = 0.09$  кг.м<sup>2</sup>,  $J_p = 0.01$  кг.м<sup>2</sup>,  $m_d = 115$  кг,  $M_{c.d} = 0.05886$  Н.м,  $k_{вт.д} = 0.03$ ,  $i = 30$ ,  $\mu = 92\%$ ;
- параметры тележки ПРУ:  $M = 1845$  кг,  $L_1 = 0.5$  м,  $L_2 = 0.8$  м,  $I_x = 1000$  кг.м<sup>2</sup>,  $I_y = 1500$  кг.м<sup>2</sup>,  $I_z = 1200$  кг.м<sup>2</sup>,  $k = 25000$  Н/м,  $b = 3500$  Н.с/м;
- параметры колес:  $m = 25$  кг,  $r = 0.25$  м,  $I_w = 3$  кг.м<sup>2</sup>,  $M_{c.н} = 0.05886$  Н.м,  $k_{вт.н} = 0.05$ ;
- параметр препятствия:  $r_{np} = 3$  м;
- параметры микропрофиля неровной поверхности:  $\sigma_r = 1$  см,  $\varepsilon = 0.14$ ;
- географические координаты точки начала движения:  $\lambda = 0.872$ ,  $\varphi = 0.51$ ;
- координаты точки начала движения и точки загрузки ЛА в ЗСК:  
 $X_o = 0$  м,  $Z_o = 0$  м,  $X_{O_3} = 100$  м,  $Z_{O_3} = 30$  м;
- СК  $O_3 X_3 Y_3 Z_3$  отличается от СК  $O X_g Y_g Z_g$  углом  $\psi_3 = 30$  град;

- шаг интегрирования уравнения движения тележки:  $DT = 1\text{мс}$ ;
- шаг измерения ДЛУ и ДУС:  $DTIZ = 3\text{мс}$ , т.е. частота опроса датчиков

$$f_{\text{изм}} = 1 / DTIZ \approx 333\text{Гц};$$

- шаг обработки первичных измерений  $DTOBR = 3DTIZ = 9\text{мс}$ , т.е.

$$f_{\text{обр}} = f_{\text{изм}} / N_i = f_{\text{изм}} / 3 \approx 111\text{Гц}.$$

На рис. 12 показан результат адаптивного управления вращением ПРУ на месте в течение 4с. После завершения данного процесса ПРУ вернулось в исходное состояние с нулевой угловой скоростью и нулевым углом курса.

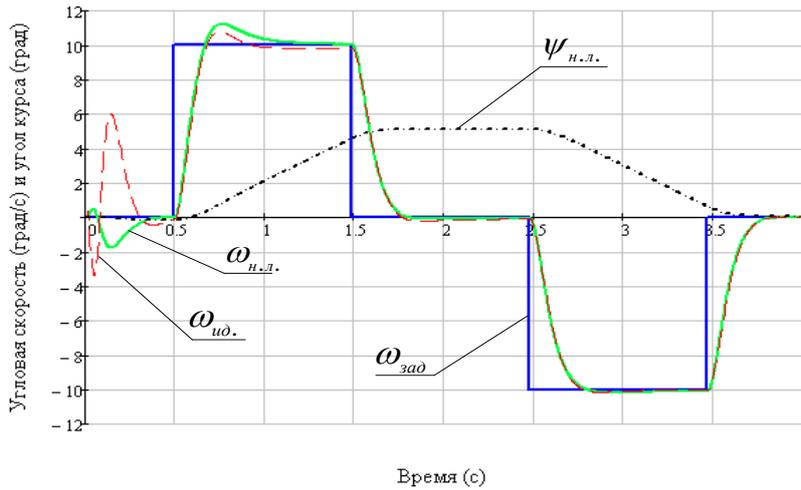


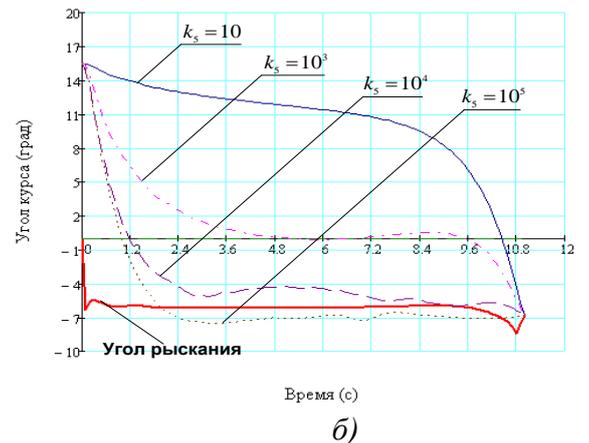
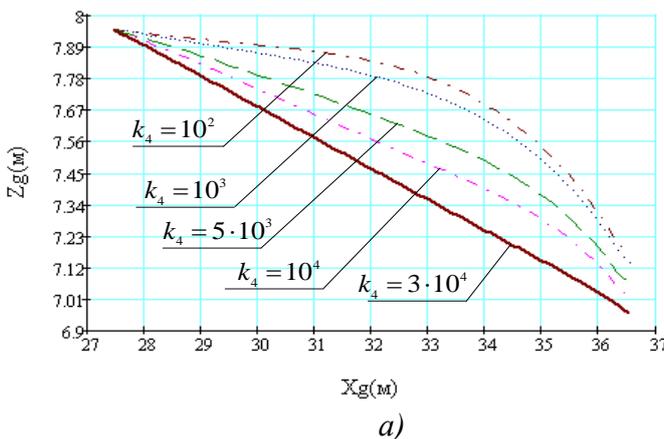
Рис. 12. Результат адаптивного управления вращением на месте:  $\omega_{\text{зад}}$  - заданная угловая скорость ПРУ (град/с);  $\omega_{\text{н.л.}}$  - действительная угловая скорость ПРУ (град/с);  $\omega_{\text{ид.}}$  - угловая скорость, полученная по идентифицируемой линейной модели (град/с);  $\psi_{\text{н.л.}}$  - угол курса (град)

Результат идентификации момента инерции тележки ПРУ показан ниже в таблице 1. Видно, что ошибка идентификации очень мала ( $<0.05\%$ ).

Табл. 1. Результат идентификации момента инерции тележки ПРУ

Истинное значение $I_y$ (кг.м <sup>2</sup> )	Результат идентификации (кг.м <sup>2</sup> )
1500	1500.09
1550	1550.101
1600	1600.106
1650	1650.109
1700	1700.114
1800	1800.123
2000	2000.142

При нахождении оптимальной траектории обхода препятствия были приняты следующие параметры:  $\theta_1 = 18.7$  град,  $\theta_2 = 16.16$ град,  $AK_1 = 9.64\text{м}$ ,  $AK_2 = 9.44\text{м}$ . Соответственно в БЦВМ получены:  $X_B = 36.6\text{м}$ ,  $Z_B = 6.9\text{м}$ ,  $\Psi_{pB} = -6.7^\circ$ ,  $V_{XB} = 0.99\text{м/с}$ ,  $V_{ZB} = -0.09\text{м/с}$ .



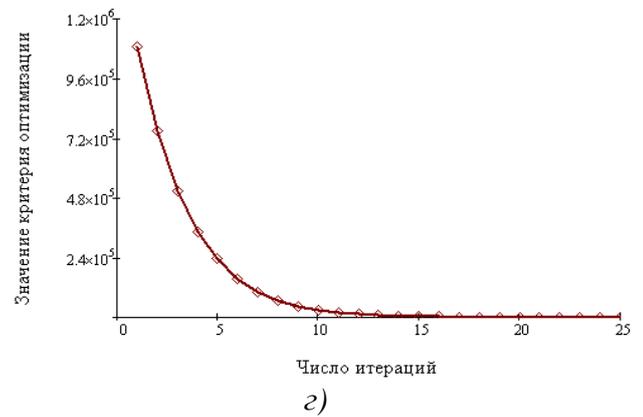
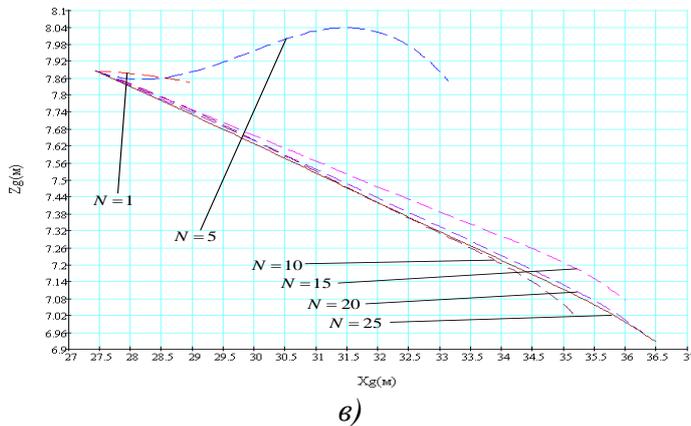


Рис. 13. Оптимальное управление обходом препятствия: а) зависимость полученной траектории от коэффициента  $k_4$ ; б) зависимость изменения угла курса от коэффициента  $k_5$ ; в) зависимость полученной траектории от числа итераций; г) изменение значения критерий оптимизации по числу итераций

На рис. 13 а,б показаны влияния коэффициентов критерия  $k_4$  и  $k_5$ , учитывающих в критерии возможность одновременного совершения двух движений ПРУ – поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг вертикальной оси, что является особенностью маневренности тележки с омни-колесами, а на рис. 13,в,г – влияние числа итераций, на решение задачи оптимального обхода препятствия. При этом остальные коэффициенты критерия равны  $k_1 = 13000$ ,  $k_2 = 2020$ ,  $k_3 = 10$ .

Приемлемое решение (по терминальной точке) получено при  $k_4 \approx 30000, k_5 \approx 10000$  после 20 итераций:  $X_g(t_f) = 36.54\text{м}$ ,  $Z_g(t_f) = 7.09\text{м}$ ,  $\psi(t_f) = -6.71^\circ, V_{X_g}(t_f) = 0.99\text{м/с}$ ,  $V_{Z_g}(t_f) = -0.11\text{м/с}$ .

**Результаты моделирования алгоритма коррекции положения ПРУ по анализу изображения** показали, что для обеспечения возможности уточнения координат ПРУ по анализу изображения, смещение ПРУ в конце второго этапа (автономного по БИНС) от точки загрузки ЛА должно быть не больше 0.8м по каждой оси Земной СК:  $\Delta R_{X_{\max}} = \Delta R_{Z_{\max}} = 0.8\text{м}$ . Тогда погрешность определения положения ПРУ относительно точки загрузки ЛА с помощью ОЭС не будет больше 0.1м.

Поскольку расстояние от склада до точки загрузки ЛА принято 104м, а максимальная скорость движения тележки равна 1м/с, вполне возможно считать, что время движения тележки, с учетом затрат для обхода препятствия, не больше 150с. То есть, датчики ГИБ должны обеспечить, чтобы в течение 150с погрешность навигации была не больше 0.8м по той или иной оси Земной СК.

На рис. 14 показаны результаты моделирования работы БИНС за 150с, причем характеристики датчиков ГИБ ИВК показаны в таблице 2:

Параметры	Датчик линейных ускорений			Датчик угловых скоростей		
	Смещение нуля, $10^{-3}\text{g}$	Масштабный коэффициент, %	Неортогональность датчиков, рад	Смещение нуля, град/ч	Масштабный коэффициент, %	Неортогональность датчиков, рад
Оси						
$Ox_1$	1	0.1	0.0005	1	0.1	0.0005
$Oy_1$	1	0.1	0.0005	1	0.1	0.0005
$Oz_1$	1	0.1	0.0005	1	0.1	0.0005

Табл. 2. Характеристики датчиков ГИБ ИВК

Шумы измерения линейных ускорений  $\delta a_{rand}$  - белые шумы с СКО  $\sigma_{\delta a} = 0.0003 \text{ м/с}^2$  ( $\sim 30 \text{ мкг}$ ), а шумы измерения угловых скоростей  $\delta \omega_{rand}$  -  $\sigma_{\delta \omega} = 0,003 \text{ град/ч}$ . При этом в «интервальном» алгоритме навигации было принято  $N_I = 4$ .

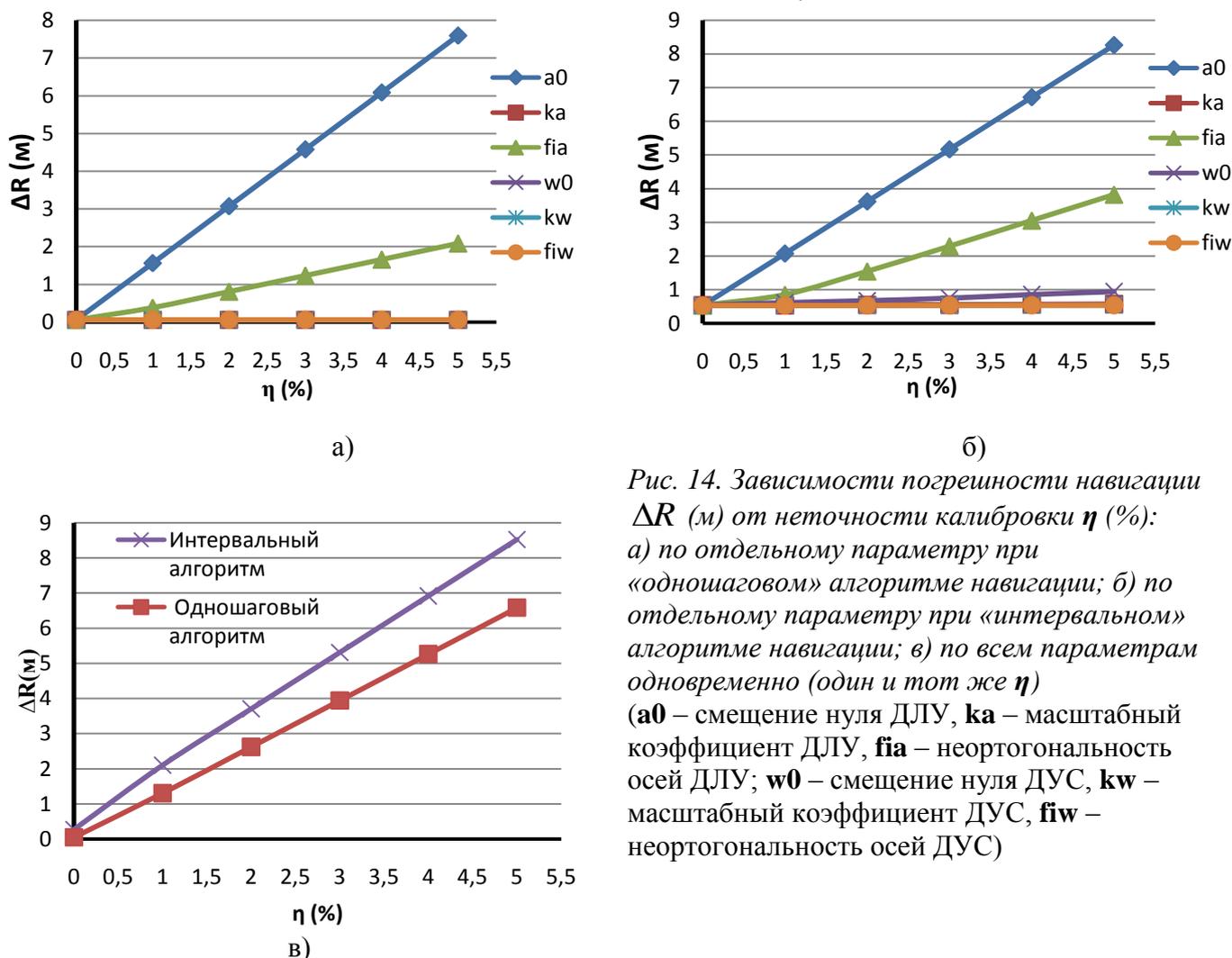


Рис. 14. Зависимости погрешности навигации  $\Delta R$  (м) от неточности калибровки  $\eta$  (%): а) по отдельному параметру при «одношаговом» алгоритме навигации; б) по отдельному параметру при «интервальном» алгоритме навигации; в) по всем параметрам одновременно (один и тот же  $\eta$ ) ( $a_0$  – смещение нуля ДЛУ,  $ka$  – масштабный коэффициент ДЛУ,  $fia$  – неортогональность осей ДЛУ;  $w_0$  – смещение нуля ДУС,  $kw$  – масштабный коэффициент ДУС,  $fiw$  – неортогональность осей ДУС)

Из рис. 14 видно, что наиболее сильное влияние на точность работы БИНС оказывает неточность калибровки по смещению нуля и неортогональности ДЛУ. Как показано на рис. 14, в), погрешность «интервального» алгоритма навигации даже при неточности калибровке, равной 0.5%, больше допустимой, требуемой для срабатывания алгоритма обработки изображения. Следовательно, необходим ГИБ, смещение нуля и неортогональности осей ДЛУ которого меньше тех, указанных в таблице 2 (т.к. они наиболее сильно влияют на точность БИНС).

Из рис. 15 получено, что для обеспечения погрешности навигации не больше 0.8м по каждой оси ЗСК необходимо использовать ГИБ, смещение нуля и неортогональность осей ДЛУ которого не больше 0.05 мг и 0.0003 рад, соответственно (остальные параметры ДЛУ и ДУС такие же, как в таблице 2). В случае отсутствия датчиков такой точности необходимо производить коррекцию по ОЭС в промежуточных точках маршрута.

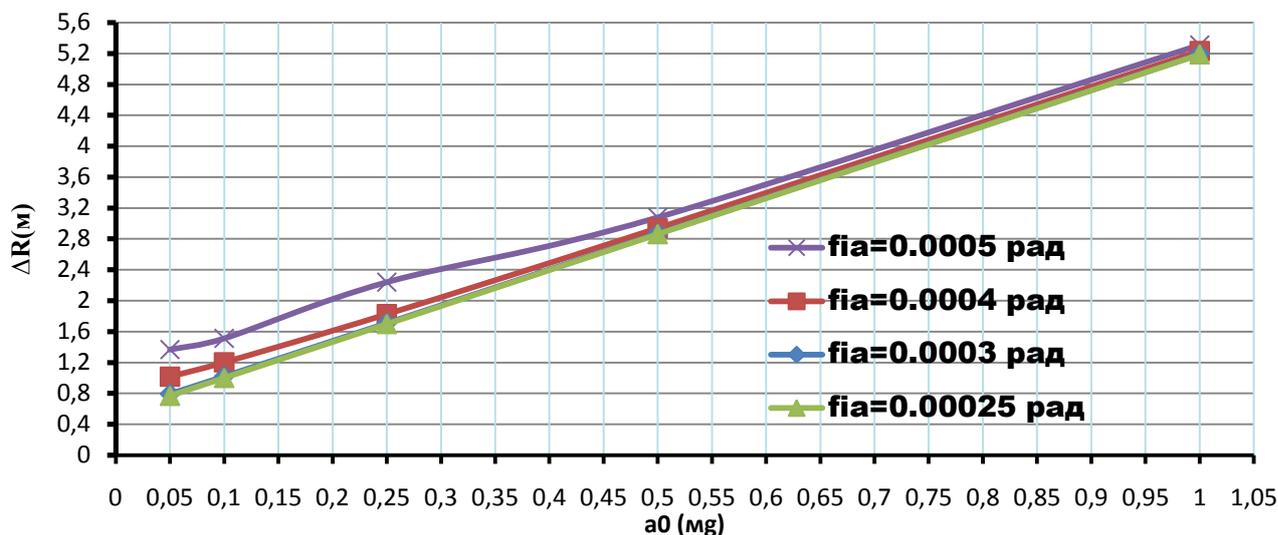


Рис.15. Зависимости погрешности «интервального» алгоритма БИНС от паспортных значений смещения нуля и неортогональности ДЛУ ГИБ (при погрешности калибровки датчиков 3% по всем параметрам).

На рис. 16 показаны результаты моделирования «интервального» алгоритма навигации с различными числами  $N_i$ . Как видно, чем меньше  $N_i$ , тем точнее алгоритм навигации. Платой за это является увеличение объема вычислений.

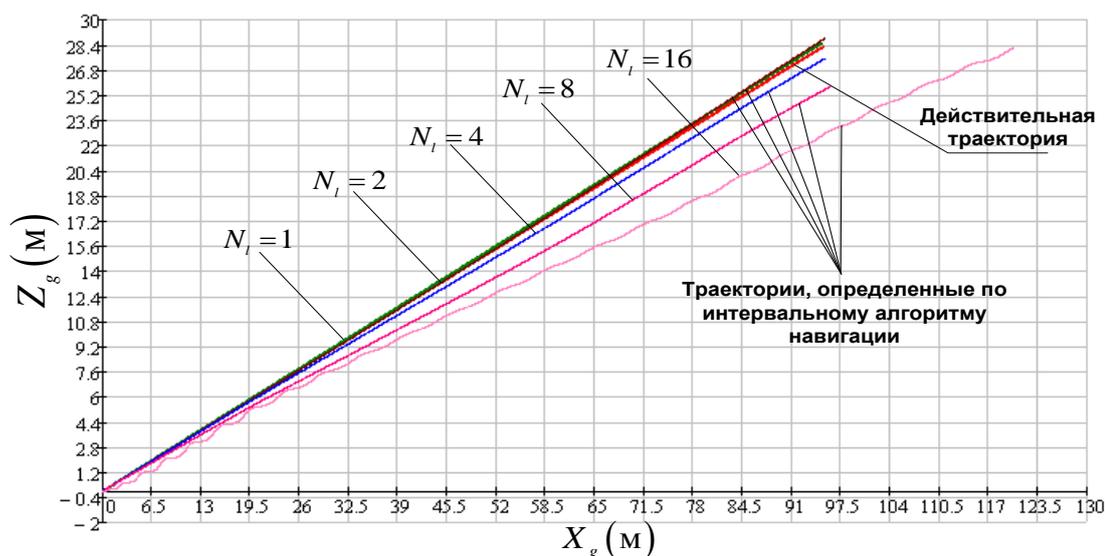


Рис. 16. Влияние числа  $N_i$  циклов -  $l$  в одном цикле -  $k$  на погрешность навигации

Алгоритм стабилизации, отличающийся значениями коэффициентов ПИД регулятора, так же оказывает влияние на точность «интервального» алгоритма навигации, как показано на рис. 17. На этом рисунке показаны результаты моделирования в четырех случаях, соответственно четырем алгоритмам стабилизации (четырем наборам коэффициентов ПИД регулятора). Алгоритмы 1,2,3 вызывают высокочастотное возмущенное движение ПРУ относительно требуемого (рис. 17, а, б, в), что приводит к появлению погрешности навигации, обусловленной медленным (по сравнению с частотой возмущенного движения) обновлением параметров навигации в бортовом алгоритме. С уменьшением возмущенного движения ПРУ погрешность навигации убывает, как видно из кривых 1,2,3,4 рис. 17, г).

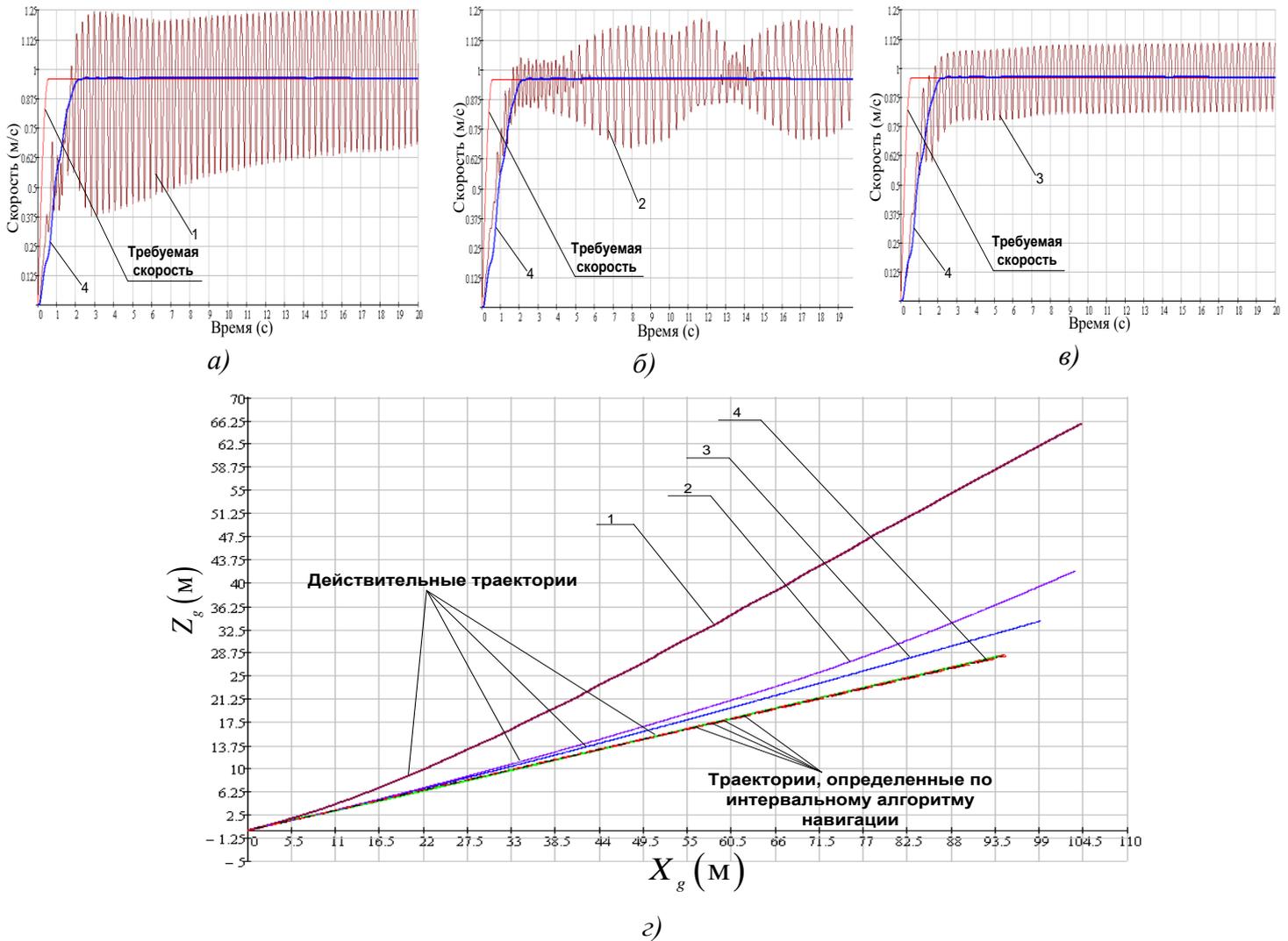
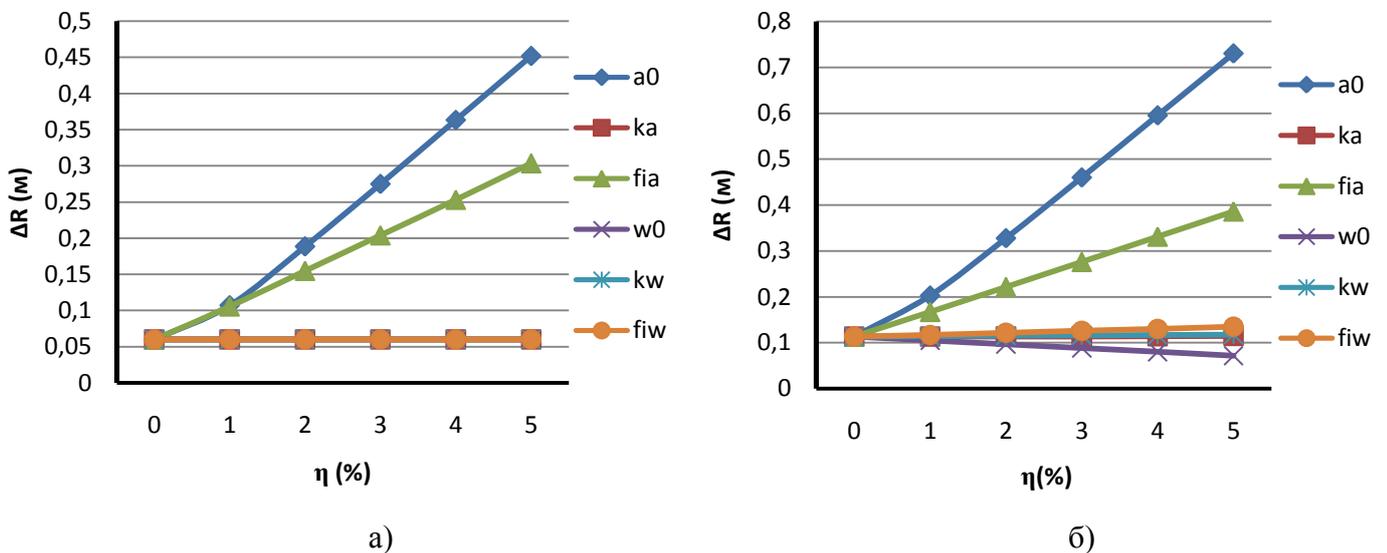


Рис. 17. Влияние алгоритма управления на точность навигации: а), б), в) скорости движения ПРУ при разных алгоритмах; г) действительные траектории (1, 2, 3, 4) движения и траектории, определенные по навигации (числа 1, 2, 3, 4 соответствуют алгоритмам 1, 2, 3, 4)

**Результаты моделирования работы БИНС с использованием выбранных датчиков с числом кратности  $l$  – циклов в  $k$  – цикле равным  $N_l = 2$  и алгоритмом стабилизации 4 ( $k_{v_x} = 0.02; k_{v_x} = 4; k_x = 15; k_{v_z} = 0.7; k_{v_z} = 9; k_z = 47; k_{\omega} = 0.045; k_{\omega} = 4; k_{\psi} = 3$ ), показаны на рис. 18.**



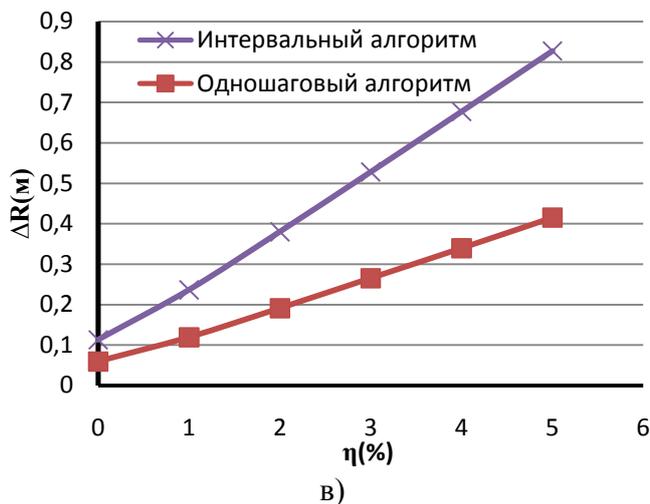
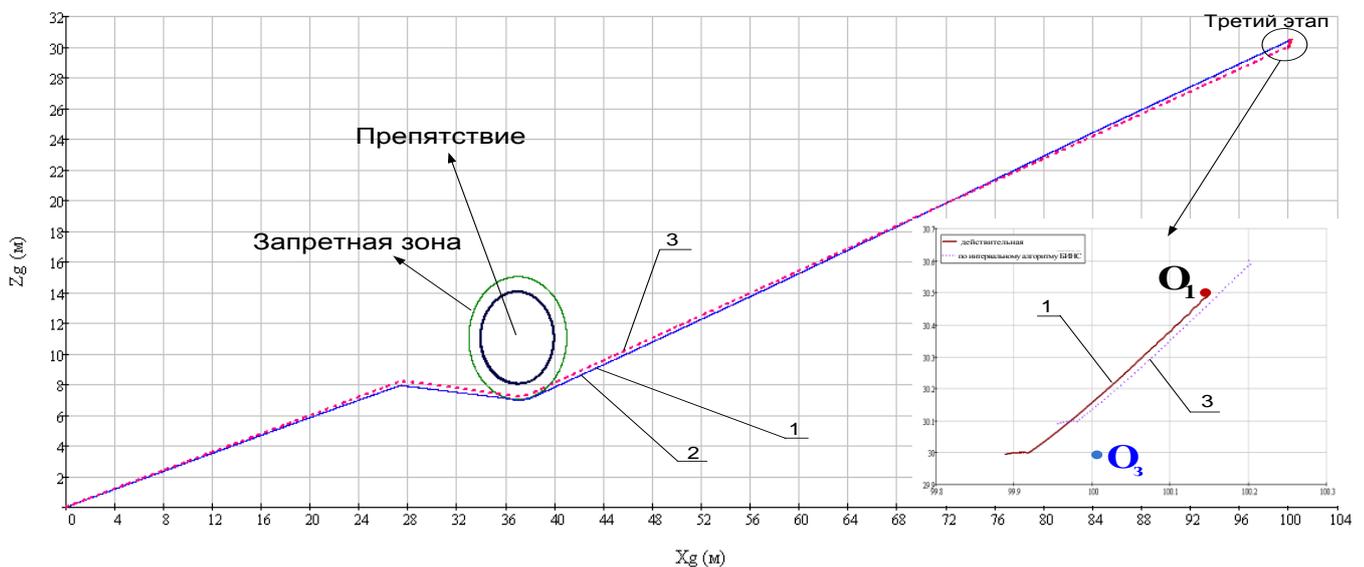


Рис. 18. Зависимости погрешности навигации  $\Delta R$  (м) от неточности калибровки  $\eta$  (%): а) по отдельному параметру при «одношаговом» алгоритме навигации; б) по отдельному параметру при «интервальном» алгоритме навигации; в) по всем параметрам одновременно (один и тот же  $\eta$ ) ( $\mathbf{a0}$  – смещение нуля ДЛУ,  $\mathbf{ka}$  – масштабный коэффициент ДЛУ,  $\mathbf{fia}$  – неортогональность осей ДЛУ;  $\mathbf{w0}$  – смещение нуля ДУС,  $\mathbf{kw}$  – масштабный коэффициент ДУС,  $\mathbf{fiw}$  – неортогональность осей ДУС)

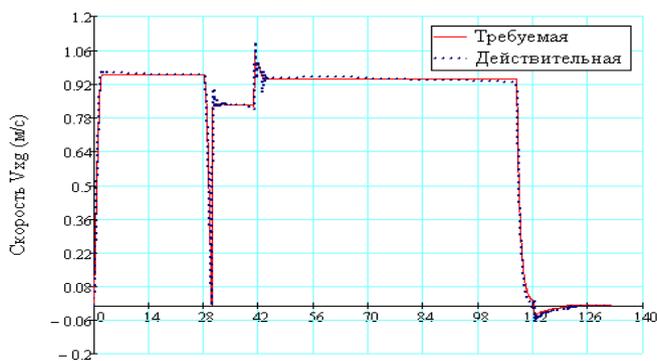
Оттуда следует, что для обеспечения требуемой точности навигации необходима калибровка выбранных датчиков ГИБ с остаточной погрешностью меньше 5%.

Результаты моделирования итогового движения ПРУ показаны на рис. 19. При этом неточность калибровки использованных датчиков ГИБ  $\eta = 3\%$ , а число  $l$  – циклов в одном  $k$  – цикле  $N_l = 2$ , т.е.  $f_{нав} = f_{обр} / 2 \approx 27.8\text{Гц}$ .

Погрешность навигации («интервального» алгоритма) на втором этапе равны  $\Delta X_{нав} = 0.143\text{м}$ ,  $\Delta Z_{нав} = 0.501\text{м}$ . Смещение конечного положения ПРУ относительно точки загрузки ЛА в итоге (после завершения третьего этапа) равно  $\Delta R_{\Sigma} \approx 0.1\text{м}$ .

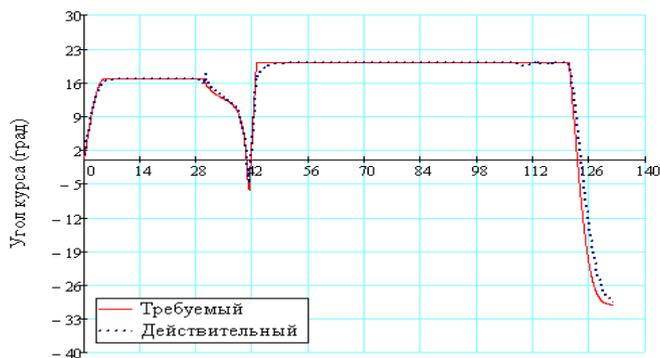


а) 1 – действительная траектория; 2 – траектория, определенная по «одношаговому» алгоритму БИНС; 3 – траектория, определенная по «интервальному» алгоритму БИНС



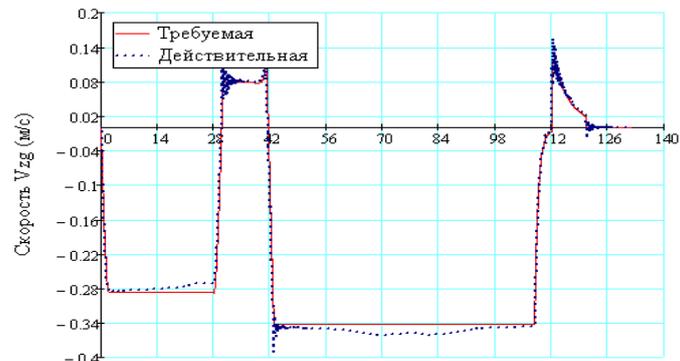
Время (с)

б)



Время (с)

г)



Время (с)

в)

Рис. 19. Результат моделирования движение ПРУ от склада до точки загрузки ЛА:  
 а) траектория движения;  
 б) линейная скорость по оси  $OX_g$  (требуемая и действительная);  
 в) линейная скорость по оси  $OZ_g$  (требуемая и действительная);  
 г) угол курса ПРУ (требуемый и действительный)

**В заключении** перечислены основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Построены математические модели системы «Опорная поверхность – ПРУ – ИВК - САУ», позволяющие исследовать поведение сверхманевренного ПРУ на базе тележки с тремя омни-колесами по неровной опорной поверхности при наличии на рассчитанной траектории препятствия. В отличие от разработанных ранее моделей мобильных роботов на базе тележки с омни-колесами, в данной работе предложена наиболее полная математическая модель тележки ПРУ с учетом пространственного движения подпружиненной платформы тележки ПРУ, соединенной с колесами амортизаторами. Произведен учет неровности опорной поверхности, использована более сложная модель электродвигателей и несферическая модель Земли, что позволило описать и моделировать более «реальное» движение ПРУ;

2. Разработаны и реализованы алгоритмы идентификации параметров тележки ПРУ с высокой точностью (меньше 0.1%) перед началом движения с использованием адаптивного управления вращением ПРУ на месте, что позволяет удерживать состояние ПРУ в заданных допусках;

3. Разработан и реализован алгоритм решения задачи оптимального обхода препятствий на основе градиентного метода первого порядка, где предложены дополнительные алгоритмы, позволяющие подбирать переменные весовые коэффициенты, определяющие величину приращения управления по направлению

антиградиента и обеспечивающие сходимость значения параметров состояния к заданным на правом конце интервала управления;

4. Реализованы алгоритмы и получено ПО обработки изображения, позволяющее обеспечить необходимую точность для решения задачи коррекции положения ПРУ относительно базовых точек под крылом ЛА ( $<0.1\text{м}$ );

5. Обоснованы требования к точностным характеристикам подсистем контура управления ПРУ (к ИВК на базе БИНС и ОЭС);

6. Реализованы алгоритмы навигации на основе бесплатформенной инерциальной навигационной системе. Проведено моделирование, позволяющее оценить роль каждого параметра датчиков и точности калибровки по тому или иному параметру на точность навигации ПРУ. Оценки чувствительности компонент вектора ошибок навигации по погрешности калибровки позволяют формировать требования к рациональному распределению требований по величине параметров датчиков и точности калибровки для обеспечения заданной точности выдерживания терминальных компонент вектора состояния ПРУ ( $<0.8\text{м}$ );

7. Приведенные результаты моделирования указывают, что величины смещения нуля и неортогональности осей ДЛУ инерциального блока больше всего влияют на точность БИНС;

8. Разработанное программное обеспечение для комплексного моделирования системы «Опорная поверхность – ПРУ – ИВК – САУ» позволяет проводить системный анализ влияния всех элементов контура управления на точность движения ПРУ за счет минимальных упрощений элементов контура.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемых журналах и изданиях*

1. Нгуен Н.М. Разработка математической модели погрузочно-разгрузочного устройства с всенаправленными колесами. // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 58, 2012. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33459> — 27.09.2012.
2. Нгуен Н.М., Костюков В.М. Компьютерное исследование точности движения тяжелого беспилотного самолета с измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) на основе бароинерциальной системы» - часть 1. // Вестник МАИ. Том 19, № 1, 2012, с. 102-114.
3. Нгуен Н.М., Костюков В.М. Компьютерное исследование точности движения тяжелого беспилотного самолета с измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) на основе бароинерциальной системы» - часть 2. // Вестник МАИ. Том 19, № 2, 2012, с. 146-155.
4. Нгуен Н.М., Костюков В.М. Разработка математического имитатора алгоритмов управления пространственным движением самолета. // Вестник МАИ. Том 17, № 1, 2010, с. 101-113.