

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 04.09.2023 15:19:24  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5042601e371c11eabb75e9420f44b11da56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 18 » 01

2022 г.



## СЕРВИСНЫЕ РОБОТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторных работ для  
студентов направления 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Курск 2022

УДК 621.(076.1)

Составители: Мальчиков А.В., Яцун С.Ф.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.Н. Политов*

Сервисные роботы специального назначения: методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Сервисные роботы специального назначения», / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Мальчиков А.В., Яцун С.Ф.; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2022. 38с.

Рассматриваются конструкции и схемы управления сервисных мобильных роботов специального назначения, и содержатся сведения по вопросам функционирования робота. Приводятся примеры выполнения лабораторных работ, краткие теоретические положения.

Предназначены для студентов направлений направления подготовки «Мехатроника и робототехника» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *18.01.22* Формат 60x84 1/16

Усл.печ.л. *1,8* Уч.-изд.л. *1,5* Тираж 20 экз. Заказ .Бесплатно. *134*

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗМЕЕПОДОБНОГО ШЕСТИЗВЕННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА .....	4
Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОГО КОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА .....	18
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНОГО СЕРВИСНОГО РОБОТА ДЛЯ ДОСТАВКИ СПЕЦГРУЗОВ .....	33
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	38

# Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗМЕЕПОДОБНОГО ШЕСТИЗВЕННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

## 1.1 Цель и задачи работы

Целью работы является изучение конструкции сервисного змееподобного шестизвеного мобильного робота с перистальтическим принципом движения, его системы управления и проведение эксперимента.

Оборудование: модель змееподобного шестизвеного мобильного робота, отрезок трубы, стойки, блок управления моделью, источник питания 220/12 В, рулетка, секундомер.

## 1.2. Краткие теоретические сведения

Использование робототехнических устройств позволяет повысить эффективность выполнения многих задач. Роботы сегодня нашли применение, как в промышленности, военной индустрии, так и в сфере обслуживания. Робототехнические комплексы, способные перемещаться внутри замкнутого пространства трубопроводов, разломов, технологических полостей, могут выполнять ряд специфических задач: диагностика состояния трубопровода, нахождение дефектов внутренней поверхности, поисковые работы и т.д., и задачи, основанные на взаимодействии с окружающей средой: очистка внутренней поверхности, устранение повреждений, и т.п.

Для проведения анализа существующих конструкций роботов и принципов движения рассмотрим различные классификации внутритрубных мобильных роботов (рис. 1.1).

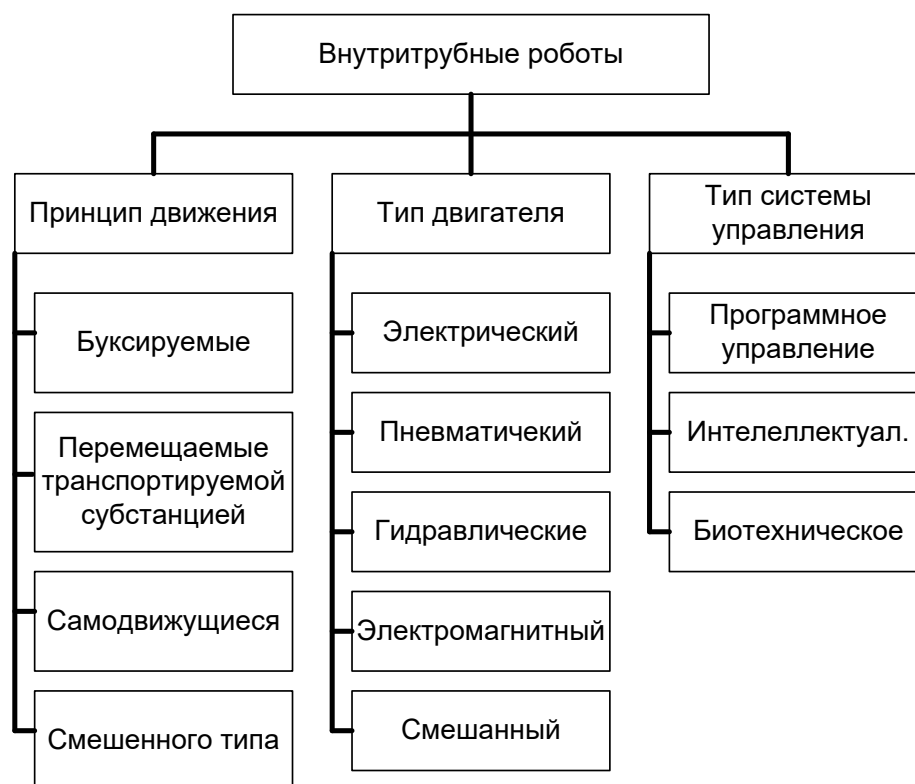


Рис. 1.1 Классификация роботов для перемещения внутри труб

Согласно выбранному принципу движения роботов можно разделить на: роботов, движение которых осуществляется посредством троса (нити) или цепи; самодвижущихся роботов; роботов, передвигающихся вместе с транспортируемым веществом; роботов комбинированного типа. Самодвижущиеся роботы классифицируются на пошаговые (step by step) системы и системы непрерывного действия.

Идея любого мобильного робота, в том числе и робота для перемещения в трубе, в первую очередь определяется типом и конструкцией движителя. Выбор типа движителя и его размеров является очень сложной задачей, зависимой от множества факторов. Также сложен выбор самого принципа движения и взаимодействия с окружающей средой. Как правило, выбор способа перемещения робота и тип его движителей определяется исходя из условий функционирования робота, определяемых типом среды эксплуатации и характером рабочего процесса.

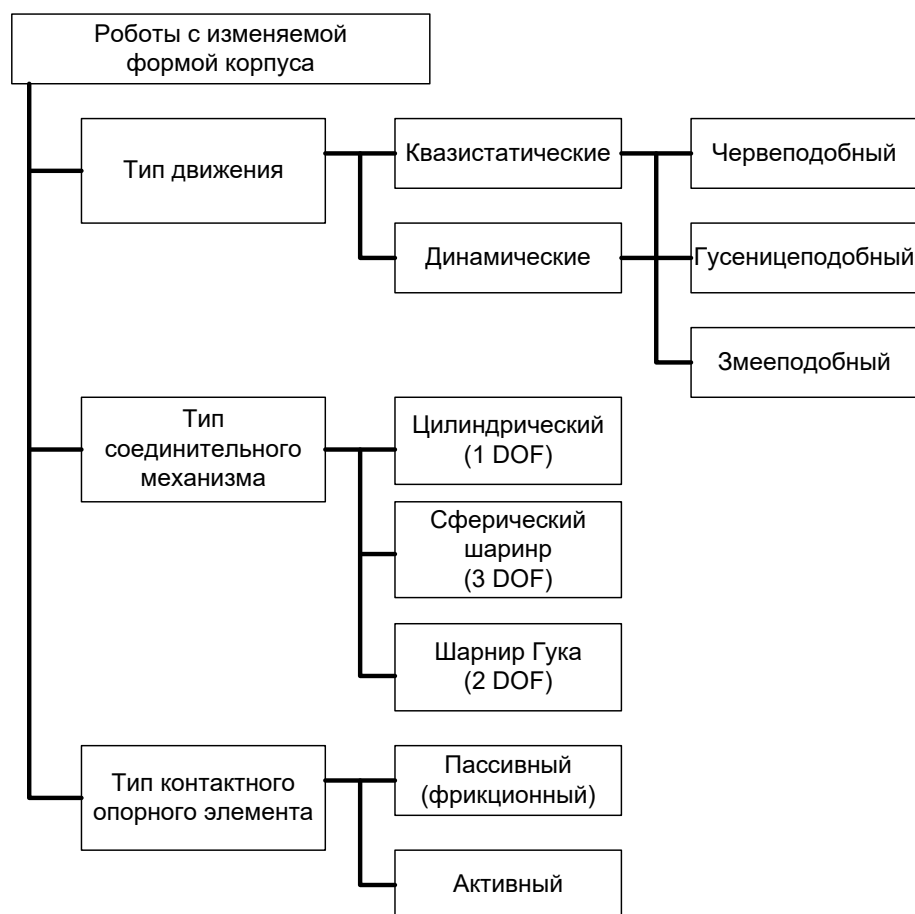


Рис. 1.2 Обобщенная классификация внутритрубных роботов

### 1.3. Описание исследуемого робота

Адаптивный мобильный многозвенный робот выполнен из шести сочлененных звеньев-корпусов 1 – 6 (рис. 1.3). Между звеньями установлены шарниры 7 – 11 с электроприводами 12 – 16, обеспечивающими угловое смещение звеньев-корпусов 1 – 6 относительно друг друга. В шарнирах 7 – 11 и на концах звеньев 1 и 6 расположены опорные элементы 17 – 23 с встроенными контактными датчиками.

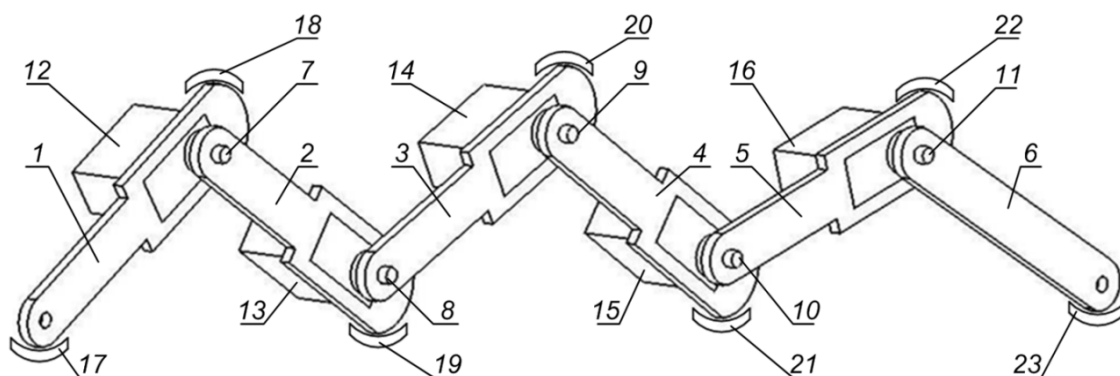


Рис. 1.3 Схема конструкции многозвенного робота

Контакт опорных элементов 17 – 19 достигается путем поворота звеньев-корпусов в шарнирах 7 – 11 под действием электроприводов 12 – 16. При этом момент касания опорных элементов фиксируется встроенными контактными датчиками и передается на систему управления роботом. Далее электроприводы 12 – 16 перемещают звенья-корпусы на необходимый угол для обеспечения заданного исходного положения транспортного средства.

Исходным положением для робота является положение, при котором пара звеньев-корпусов, например 1, 2 при движении устройства слева направо, находятся в контакте со стенками трубы, а звенья-корпуса 3 – 6 расположены под углом 0 град относительно друг друга.

После подачи питания устройство принимает исходное положение. В случае если это положение достичь не удастся, выводится сообщение об ошибке.

Рассмотрим алгоритм прямолинейного движения робота (рис. 1.4).

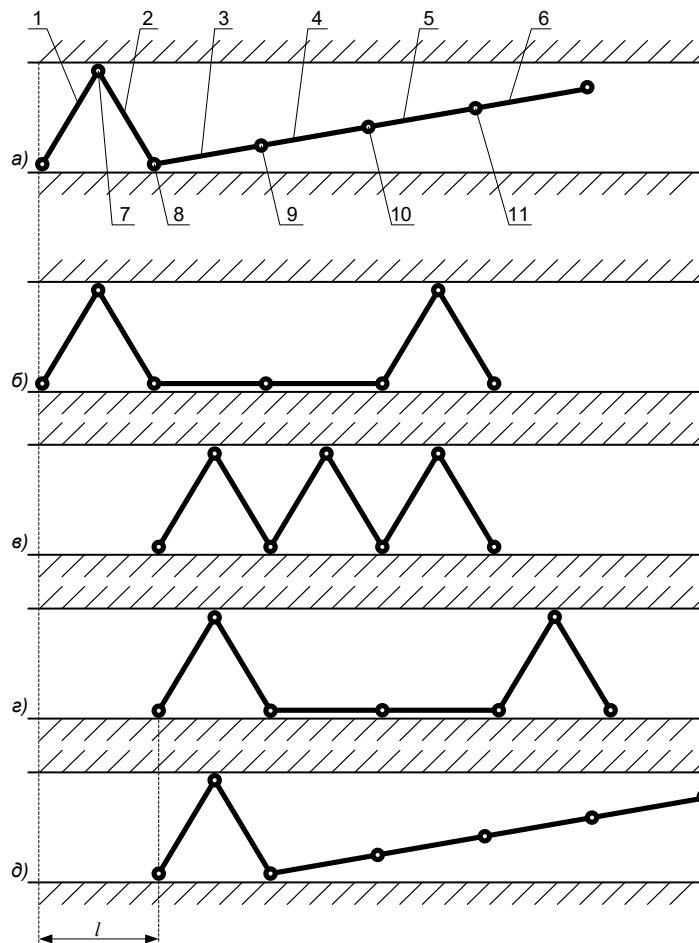


Рис. 1.4 Прямолинейное движение робота

Движение начинается из исходного положения устройства (рис. 1.4, а). Под действием крутящего момента в шарнире 7, происходит расклинивание звеньев 1 и 2 между стенок трубы, фиксируя положение транспортного средства за счет сил трения. Затем остальные электроприводы приводят в движение звенья 3 – 6 таким образом, чтобы угол между звеньями 3 и 4 составлял  $0^\circ$ , а опорные элементы звеньев-корпусов 4 и 5 касались поверхности трубы (рис. 1.4, б). Далее, аналогичным образом происходит расклинивание звеньев 5 и 6 под действием крутящего момента в шарнире 11 и транспортное средство фиксирует свое положение за счет сил трения. Далее, удерживаясь за счет расклинивания звеньев-корпусов 5 и 6, происходит перемещение звеньев 1 – 4 с целью перемещения центра масс транспортного средства по направлению движения устройства (рис. 1.4, в). Затем происходит фиксация робота за счет расклинивания звеньев 1 и 2, и перемещение центра масс по направлению движения (рис. 1.4, г). Далее, в зависимости от выполняемой задачи, цикл движения повторяется или робот переходит в исходное состояние (рис. 1.4, д).

За счет поочередной фиксации передней и задней части транспортного средства осуществляется перемещение вдоль трубы на величину "l" за каждый цикл, где l – шаг.

Выделим отдельные этапы алгоритма перемещения робота и исследуем режимы работы двигателей на каждом из них (рис. 1.5).

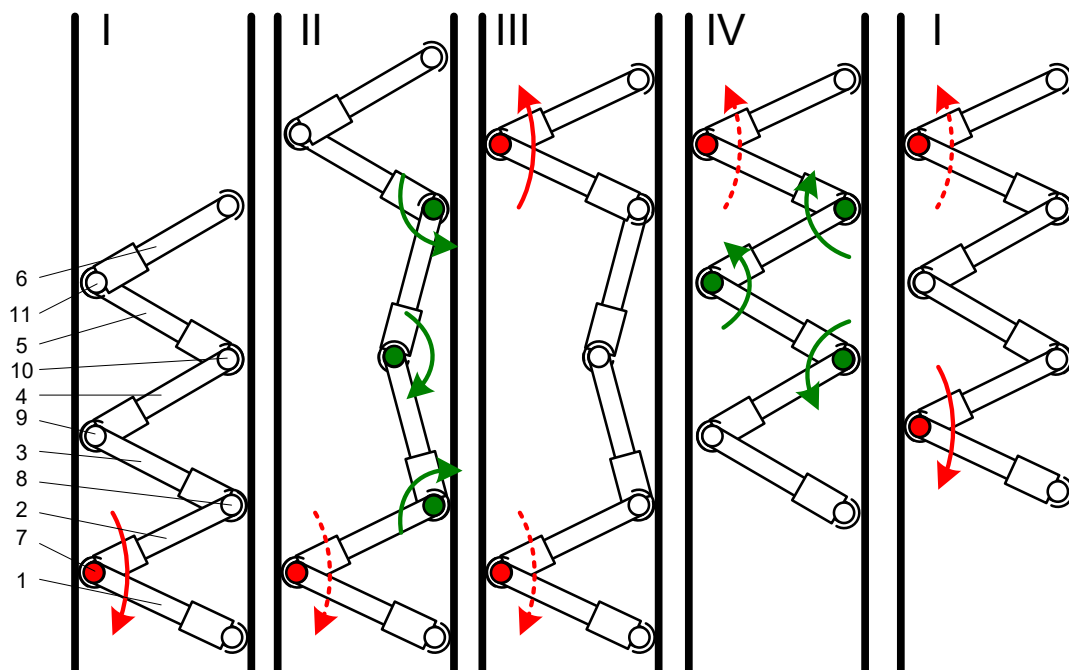


Рис. 1.5 Фазы движения внутритрубного робота



Выделим 4 отдельные фазы движения робота:

- I фаза: режим динамической фиксации для пары звеньев 5-6 и поджатие пары звеньев 1-2 к стенкам трубы;
- II фаза: режим динамической фиксации для пары звеньев 1-2 и перемещение средней пары звеньев;
- III фаза: поджатие пары звеньев 5-6 при динамической фиксации пары звеньев 1-2;
- IV фаза: режим динамической фиксации пары звеньев 5-6 и перемещение средней пары звеньев.

В виду сложности математического описания многозвенной системы, разрывного характера системы уравнения, описывающего взаимодействие с поверхностью трубы, принято решение выделить два отдельных этапа движения устройства: режим динамической фиксации внутри трубопровода за счет расклинивания звеньев; режим перемещения звеньев внутри ограниченного просмотра трубы при условии фиксации двух звеньев. Поджатие звеньев к поверхности трубы рассматривается в третьей главе настоящей работы, в рамках моделирования процесса взаимодействия робота с поверхностью трубопровода.

#### **1.4. Математическая модель исследуемого робота в режиме удержания**

Рассмотрим расчетную схему адаптивного робота в режиме силового удержания за счет расклинивания звеньев между стенок трубы (рис. 1.6).

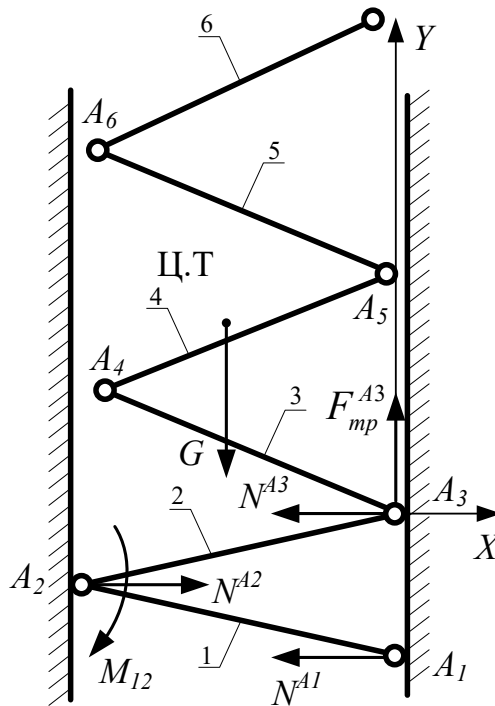


Рис. 1.6 Расчетная схема змееподобного робота

На данной схеме приняты следующие обозначения:  $F_{\text{от}}^{A3}$  – приведенная сила трения, позволяющая роботу сохранять свое положение под действием силы тяжести. С целью приведения системы к статически определимой, опоры в точках  $A_2$  и  $A_1$  считаем абсолютно гладкими, а в точке  $A_3$  будем рассматривать результирующую силу трения, определяемую как произведение суммы нормальных реакций в точках контакта на коэффициент силы трения:  $F_{\text{от}}^{A3} = k(N^{A1} + N^{A2} + N^{A3})$ , где  $N^{A1}$ ,  $N^{A2}$ ,  $N^{A3}$  – силы нормальной реакции,  $k$  – коэффициент сухого трения;  $G$  – сила тяжести робота, в рассматриваемом случае, направлена вертикально вниз и приложена в центре тяжести системы.

Разобьем систему на 2 части, и рассмотрим условия равновесия для каждого из звеньев, участвующих в процессе фиксации робота в трубе. Для второго звена  $A_2A_3$  получаем следующую расчетную схему.

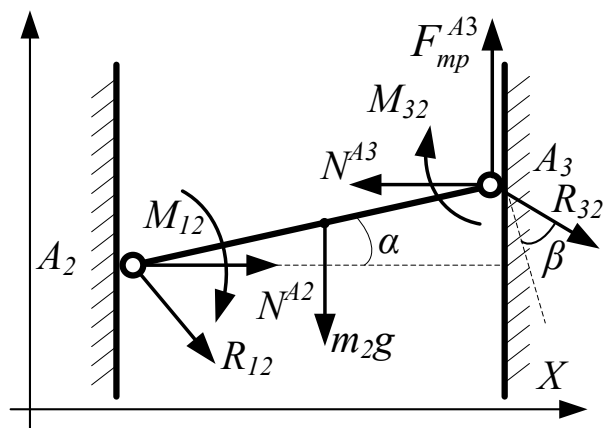


Рис. 1.7 Силы, действующие на второе звено  $A_2A_3$

На данной схеме приняты следующие обозначения:  $F_{\text{от}}^{A_3}$ , - приведенная сила трения, позволяющая роботу сохранять свое положение под действием силы тяжести;  $N^{A_2}$ ,  $N^{A_3}$  - силы нормальной реакции в точках контакта с трубой;  $m_2g$  - сила тяжести, действующая на звено  $A_2A_3$ ;  $M_{12}$ ,  $M_{32}$  - крутящий момент между звеньями, соответственно 1-2, и 3-2;  $R_{12}$ ,  $R_{32}$  - реакции в шарнирах, имеющие две составляющие  $R_x$  и  $R_y$ ; Сила  $R_{32}$  действует на фиксирующий модуль под углом  $\beta$  - угол между силой и нормалью ко 2 звену;  $\alpha$  - угол между звеном робота и перпендикуляром к поверхности трубы.

Покажем расчетную схему для второго звена.

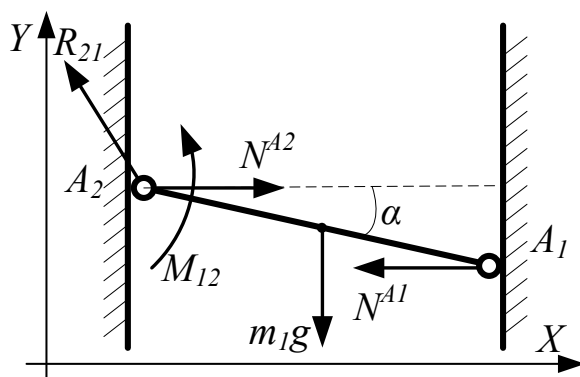


Рис. 2.8 Силы, действующие на первое звено АВ

На данной схеме приняты следующие обозначения:  $N^{A_2}$ ,  $N^{A_1}$  - силы нормальной реакции в точках контакта с трубой;  $m_1g$  - сила тяжести, действующая на звено  $A_2A_1$ ;  $M_{21}$ , - крутящий момент между звеньями, 2 и 1;  $R_{21}$ , - реакция в шарнире  $A_2$ , имеющая две

составляющие  $R_x$  и  $R_y$ ;  $\alpha$  – угол между звеном робота и перпендикуляром к поверхности трубы.

Удержание робота осуществляется за счет сил сухого трения в точках контакта корпуса робота с поверхностью трубы. Представим силу трения как:

$$F_{mp}^{A3} = \begin{cases} -k \left( \sum_{i=1}^3 N^{Ai} \right) \text{sign}(\dot{y}), & \text{если } \dot{y} \neq 0; \\ -F_{\text{равн}}, & \text{если } \dot{y} = 0 \text{ и } |F_{\text{равн}}| \leq k \left( \sum_{i=1}^3 N^{Ai} \right); \\ -k \left( \sum_{i=1}^3 N^{Ai} \right) \text{sign}(F_{\text{равн}}), & \\ \text{если } \dot{y} = 0 \text{ и } |F_{\text{равн}}| > k \left( \sum_{i=1}^3 N^{Ai} \right), & \end{cases}$$

где  $F_{\text{равн}}$  – равнодействующая всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к фиксирующему модулю.

Далее, используя расчетные схемы отдельных звеньев, и считая длины звеньев одинаковыми и равными  $l$  (при этом  $l > d$ ), запишем уравнения статического равновесия для каждого звена отдельно.

Для звена  $A_2A_3$ , получаем:

$$\begin{cases} N^{A2} - N^{A3} + R_{12}^x + R_{32} \cdot \cos(\beta - \alpha) = 0 \\ F_{mp}^{A3} - m_1 g - R_{12}^y - R_{32} \cdot \sin(\beta - \alpha) = 0 \\ M_{12} + M_{32} + m_2 g \cdot \frac{l}{2} \cos(\alpha) - F_{mp}^{A3} l \cos(\alpha) - N^{A3} l \cdot \sin(\alpha) + R_{32} \cos(\beta) \cdot l = 0 \end{cases}$$

Выразив через диаметр трубы получим:

$$\begin{cases} N^{A2} - N^{A3} + R_{12}^x + R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \cos(\beta)}{l} + \sqrt{1 - \left( \frac{d}{l} \right)^2} \sin(\beta) \right) = 0 \\ F_{mp}^{A3} - m_1 g - R_{12}^y - R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \sin(\beta)}{l} - \sqrt{1 - \left( \frac{d}{l} \right)^2} \cos(\beta) \right) = 0 \\ M_{12} + M_{32} + m_2 g \frac{d}{2} - F_{mp}^{A3} d - N^{A3} l \sqrt{1 - \left( \frac{d}{l} \right)^2} + R_{32} \cos(\beta) \cdot l = 0 \end{cases}$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы.

Для звена  $A_2A_1$ , аналогичным образом получаем:

$$\begin{cases} N^{A2} - N^{A1} - R_{21}^x = 0 \\ R_{21}^y + m_2 g = 0 \\ -M_{21} + m_1 g \frac{d}{2} + N^{A1} l \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2} = 0 \end{cases}$$

Момент электропривода определяем как  $\dot{I}_{12} = \frac{C_i I_{\dot{y}}}{i_{\delta\ddot{a}\ddot{a}}}$ .

Обратим внимание, что для настройки системы управления необходимо рассмотреть случай, при котором силы трения, возникающей за счет поджатия звеньев к поверхности трубы, недостаточно для удержания робота в положении равновесия под действием внешних сил. Движение фиксирующего модуля под действием сил тяжести вдоль оси ОУ описывается уравнением:

$$\left( \sum_{i=1}^6 m_i \right) \ddot{y} = F_{mp}^{A3} - G - \mu \dot{y}$$

Здесь  $G$  – сила тяжести,  $\mu$  – коэффициент вязкого сопротивления,  $F_{\delta\delta}^{A3}$  – результирующая сила сухого трения.

Представим систему уравнений описывающих процесс силового удержания устройства внутри трубопровода:

$$\left\{ \begin{array}{l}
N^{A2} - N^{A3} + R_{12}^x + R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \cos(\beta)}{l} + \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2} \sin(\beta) \right) = 0 \\
F_{mp}^{A3} - m_1 g - R_{12}^y - R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \sin(\beta)}{l} - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2} \cos(\beta) \right) = 0 \\
M_{12} + M_{32} + m_2 g \frac{d}{2} - F_{mp}^{A3} d - N^{A3} l \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2} + R_{32} \cos(\beta) \cdot l = 0 \\
N^{A2} - N^{A1} - R_{21}^x = 0 \\
R_{21}^y + m_2 g = 0 \\
-M_{12} + m_1 g \frac{d}{2} + N^{A1} l \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2} = 0 \\
\left( \sum_{i=1}^6 m_i \right) \ddot{y} = F_{mp}^{A3} - G - \mu \dot{y} \\
L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\text{я}} I_{\text{я}} = U_{21}
\end{array} \right.$$

Обратим внимание, что система для уравнений, описывающих положение равновесия фиксирующего модуля, может иметь аналитическое решение. Для получения аналитического решения, представим системы уравнений в матричной форме, как  $A \cdot X = B$ .

$$\begin{bmatrix}
0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\
0 & 0 & l\sqrt{1-\left(\frac{d}{l}\right)^2} & 0 & 0 & -d \\
-1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
l\sqrt{1-\left(\frac{d}{l}\right)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N^{A1} \\ N^{A2} \\ N^{A3} \\ R_{21}^x \\ R_{21}^y \\ F_{mp}^{A3} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}
-R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \cos(\beta)}{l} + \sqrt{1-\left(\frac{d}{l}\right)^2} \sin(\beta) \right) \\
R_{32} \cdot \left( \frac{d \cdot \sin(\beta)}{l} - \sqrt{1-\left(\frac{d}{l}\right)^2} \cos(\beta) \right) \\
-M_{12} - M_{32} - m_2 g \frac{d}{2} - R_{32} \cos(\beta) \cdot l \\
0 \\
-m_2 g \\
M_{21} - m_1 g \frac{d}{2}
\end{bmatrix}$$

При этом аналитическое решение можно представить как  $X = A^{-1}B$ . Воспользовавшись пакетом математического моделирования Mathcad, получим матрицу-столбец аналитического решения.

Для удобства написания покажем каждый элемент матрицы решений отдельно.

$$N^{A1} = \frac{2M_{12} - dm_1g}{2\sqrt{l^2 - d^2}}$$

$$N^{A2} = -\frac{R_{32} \left( d \cos(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \sin(\beta) \right)}{2l}$$

$$\frac{1,5m_2gd + \frac{R_{32}}{l} \left( d \sin(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \cos(\beta) \right) + M_{32} + R_{32}l \cos(\beta) - 0,5m_1gd}{2\sqrt{l^2 - d^2}}$$

$$N^{A3} = \frac{0,5m_2gd - R_{32}d \left( \frac{d \sin(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \cos(\beta)}{l} \right) + M_{12} + M_{32} + R_{32}l \cos(\beta) -}{\sqrt{l^2 - d^2}}$$

$$R_{12}^x = -\frac{R_{32}}{2} \left( \frac{d \cos(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \sin(\beta)}{l} \right) +$$

$$0,5m_2gd + R_{32} \left( \frac{d \sin(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \cos(\beta)}{l} \right) + M_{32} + R_{32}l \cos(\beta) + 1,5m_1,$$

$$+ \frac{\phantom{0,5m_2gd + R_{32} \left( \frac{d \sin(\beta) + \sqrt{l^2 - d^2} \cos(\beta)}{l} \right) + M_{32} + R_{32}l \cos(\beta) + 1,5m_1}}{2\sqrt{l^2 - d^2}}$$

$$R_{12}^y = -m_1g$$

$$F_{mp}^{A3} = m_2g - R_{32} \left( \frac{d \sin(\beta)}{l} + \sqrt{1 - \frac{d^2}{l^2}} \cos(\beta) \right) - m_1g$$

Анализ полученных уравнений позволяет определить как конструктивные параметры устройства, так и параметры системы управления оптимальные для выбранных условий функционирования: диаметра трубопровода, тип поверхности и т.д.

### 1.5. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;
2. Внимательно изучить конструкцию змееподобного шестизвенного мобильного робота;
3. Изучить схему управления двигателями робота;
4. Расположить трубу на опорной стойке;
5. Ввести робота в трубу, подсоединить необходимые контакты и провода блока управления;
6. После проверки преподавателем правильности всех соединений и расположения робота в трубе, подключить источник питания;
7. Провести необходимые эксперименты. С помощью рулетки замерить расстояние, которое должен пройти робот, далее включить робота и с помощью секундомера определить время прохождения данного расстояния роботом в трубе; рассчитать среднюю скорость движения робота
8. Изменить и определить угол наклона трубы, путём изменения высоты одной опоры стойки;



9. Повторить п. 7 для разных углов наклона;
10. После проведения всех необходимых экспериментов, выключить работа, отсоединить питание и провода блока управления и вытащить работа из трубы;
11. Составить отчёт по лабораторной работе.

### **1.6. Составления отчёта о выполнении**

Отчёт составляется после выполнения студентом лабораторной работы и должен включать:

1. Стандартный титульный лист;
2. Цель лабораторной работы
3. Оборудование, использовавшиеся при выполнении лабораторной работы;
4. Краткое описание изученного устройства;
5. Схематическое изображение устройства работа;
6. Упрощённое изображение системы управления роботом
7. Построение графиков зависимости средней скорости работа от угла наклона трубы.
8. Заключение по лабораторной работе.

После подготовки отчёта и проверки его преподавателем, студент может быть допущен к его защите. Студенты, не предоставившие отчёт или выполнившие его неверно, не могут быть допущены к защите.

## **Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОГО КОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

### **2.1 Цель и задачи работы**

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципом работы разведывательного колесного мобильного робота, изучение математической модели движения устройства, схемы системы управления устройства.

Оборудование: модель разведывательного колесного мобильного робота.

### **2. 2. Краткие теоретические сведения**

Основой любой мобильной электромеханической системы является шасси. Под шасси понимается совокупность механизмов, осуществляющих передачу крутящего момента от приводов устройства к активным элементам движителя – ведущим колесам или звездочкам, шкивам, выходным звеньям механизмов изменения геометрии шасси или механизмов шагания и т. д.

В конструкциях наземных мобильных роботов, также как и в транспортных средствах общего назначения, нашли применение колесный и гусеничный движители. Часто для обеспечения повышенной проходимости устройства дополнительно оснащаются различными активными или пассивными механизмами адаптации. Это позволяет существенно повысить показатели профильной проходимости машины и наделить ее рядом дополнительных функций.

В общем случае можно выделить три больших класса: колесные наземные мобильные роботы, шагающие наземные мобильные роботы и гибридные наземные мобильные роботы.

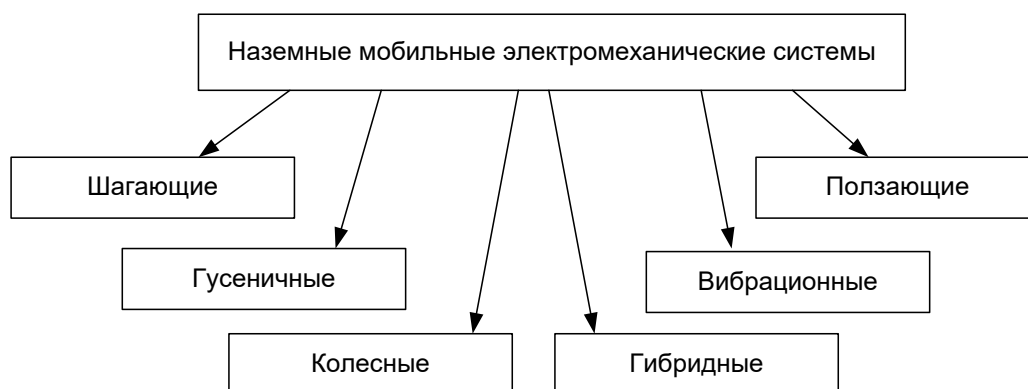


Рис. 2.1 Обобщенная классификация наземных мобильных систем

Отдельно можно выделить группу миниатюрных роботов, которые используют, как правило, либо упрощенные схемы традиционных движителей, либо оригинальные способы перемещения, сочетающие свойства описанных выше типов.

Среди множества разнообразных типов мобильных электромеханических систем в настоящее время наибольший практический интерес вызывают колесные и гусеничные транспортные системы. Предложено большое количество принципов классификации колесных наземных мобильных роботов. Если воспользоваться классификацией по способу управления работой колес, то можно выделить следующие три группы колесных роботов: автомобильная группа (поворот осуществляется только за счет передних колес); группа с произвольным независимым управлением поворотом каждого колеса влево или вправо; группа роботов, способных перемещаться во всевозможных направлениях.

Далее покажем классификацию колесных и гусеничных электромеханических систем в виде схемы (рис. 2.2) .

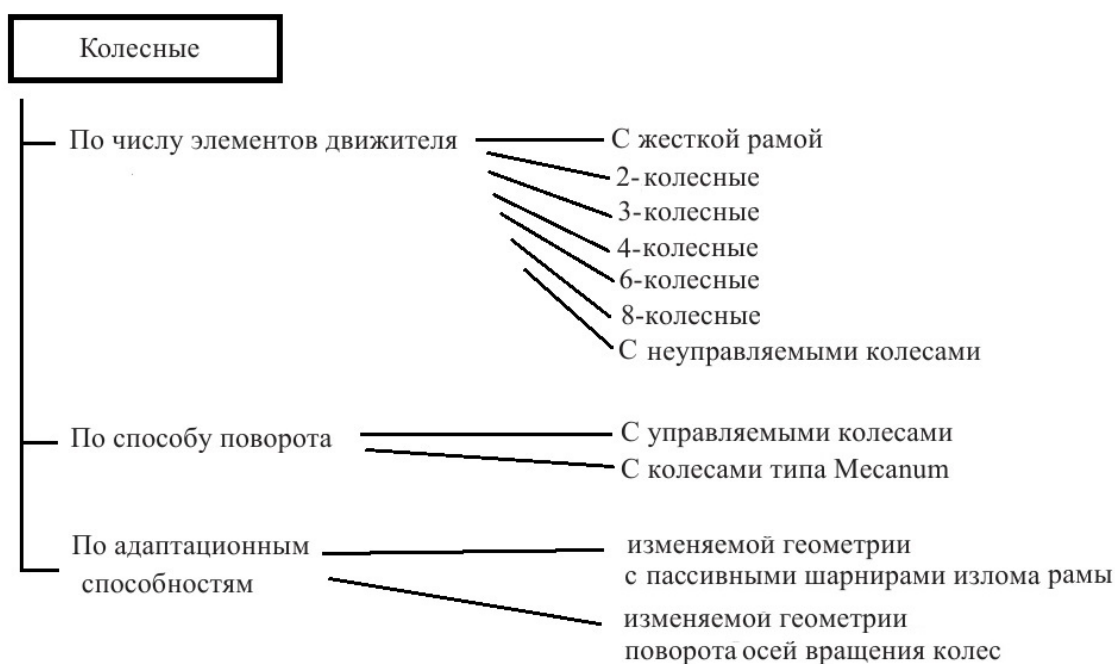


Рис 2.2 Классификация колесных роботов

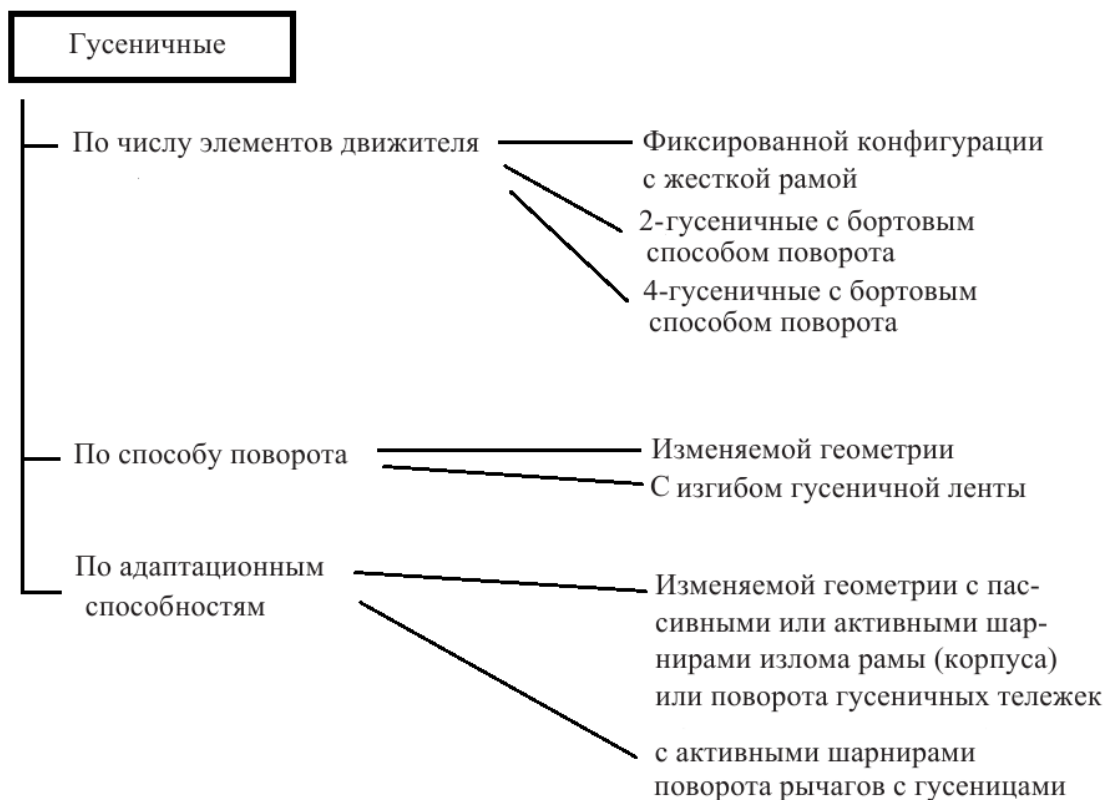
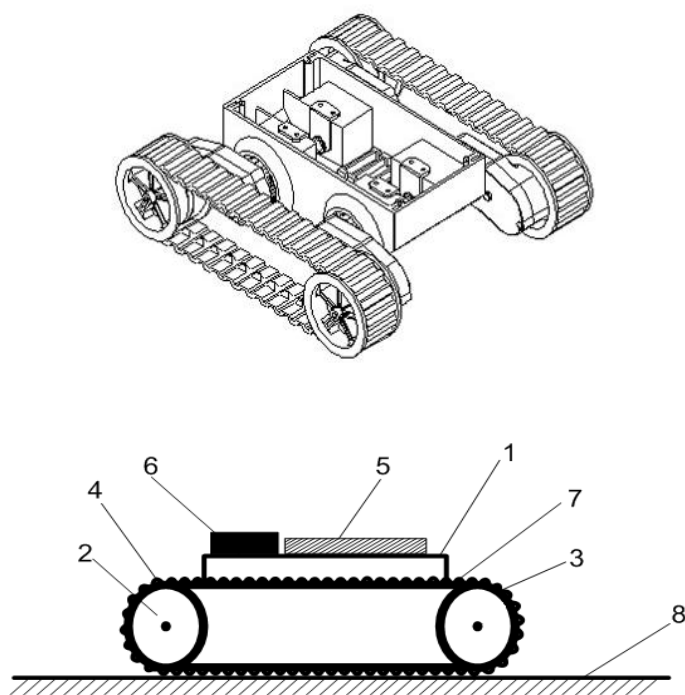


Рис 2.3 Классификация гусеничных роботов

### 2.3. Описание принципов работы мобильного робота

Рассмотрим конструкцию и принцип движения колёсной платформы с попарно кинематически связанными колесами, схема которого приведена на рис. 2.4.



а) трехмерная твердотельная модель платформы с попарно кинематически связанными колесами, б) схема расположения основных элементов конструкции

Рис. 2.4 Схема мобильной электромеханической платформы

Мобильная электромеханическая платформа с гибкой связью между колёсами состоит из корпуса 1, внутри которого расположены: два мотор-редуктора 2, ведущие колеса 3, ведомые колеса 4, система автоматического управления 5, источник питания 6, и гибкая нерастяжимая лента 7. Ведущие и ведомые колеса, соединенные посредством ременной передачи, закреплены с двух сторон корпуса. Ведущие колеса жестко соединены с выходным валом мотор-редуктора.

Устройство работает следующим образом: система автоматического управления 5, генерирует управляющий сигнал, который усиливается посредством драйверной схемы (на рис. не показана) и поступает на мотор-редуктор 2. Крутящий момент, создаваемый приводом, приводит в движение ведущее колесо 3. Под действием крутящего момента, приводится в движение лента 7 и ведомое колесо 4. За счет сил трения между колесами и контактной поверхностью 8 система приводится в движение. Поворот электромеханической платформы в горизонтальной

плоскости осуществляется путем придания разных скоростей вращения колесам платформы.

Кинематический анализ движения мобильной платформы с попарной кинематической связью между колесами.

Положение платформы однозначно определяется координатами центра масс корпуса  $C$  и углом поворота корпуса  $\varphi$ . При кинематическом анализе движения колёсной платформы решается задача определения положения, скорости центра масс платформы и скорости точек  $C_i$ , и  $K_i$  (рис.2.5).

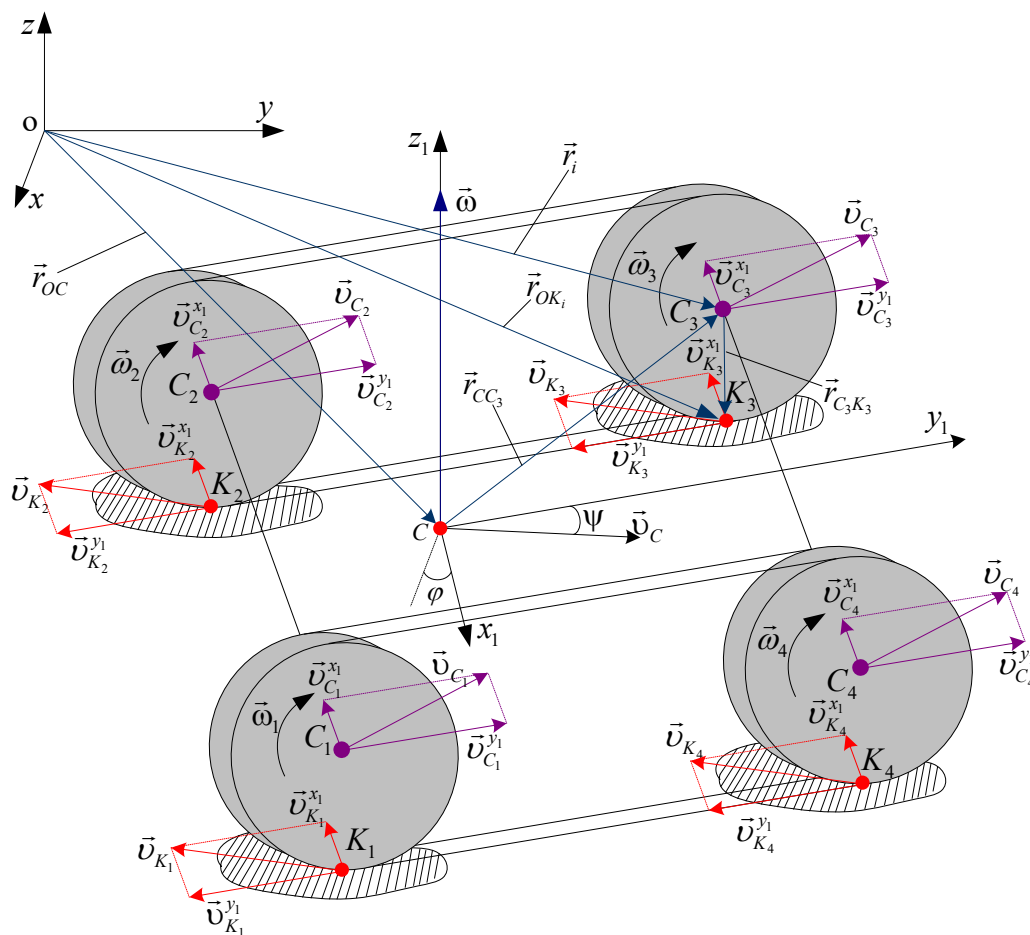


Рис. 2.5 Кинематическая схема мобильной электромеханической системы

На схеме приняты следующие обозначения:  $xOyz$  – неподвижная система координат,  $^C x_1 y_1 z_1$  – подвижная система координат,  $M_1, M_2$  – крутящие моменты на ведущих колесах 1 и 2,  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – точки крепления центра колес;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – точки контакта колес с поверхностью;  $\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3, \vec{N}_4$  – силы нормальных реакций, действующих в точках контакта колес мобильной

электромеханической системы с поверхностью,  $\vec{F}_{TP_1}^{x_1}, \vec{F}_{TP_2}^{x_1}, \vec{F}_{TP_3}^{x_1}, \vec{F}_{TP_4}^{x_1}, \vec{F}_{TP_1}^{y_1}, \vec{F}_{TP_2}^{y_1}, \vec{F}_{TP_3}^{y_1}, \vec{F}_{TP_4}^{y_1}$  – проекции сил трения, соответственно на ось  $OX_1$  и ось  $OY_1$ ;  $\vec{v}_{C_1}, \vec{v}_{C_2}, \vec{v}_{C_3}, \vec{v}_{C_4}$  – скорости точек крепления центра колес;  $\vec{v}_{C_1}^{x_1}, \vec{v}_{C_2}^{x_1}, \vec{v}_{C_3}^{x_1}, \vec{v}_{C_4}^{x_1}, \vec{v}_{C_1}^{y_1}, \vec{v}_{C_2}^{y_1}, \vec{v}_{C_3}^{y_1}, \vec{v}_{C_4}^{y_1}$  – проекции скоростей точек крепления центра колес на ось на ось  $OX_1$  и ось  $OY_1$ ;  $\vec{v}_{K_1}, \vec{v}_{K_2}, \vec{v}_{K_3}, \vec{v}_{K_4}$  – скорости точек контакта колес с поверхностью;  $\vec{v}_{C_1}^{x_1}, \vec{v}_{C_2}^{x_1}, \vec{v}_{C_3}^{x_1}, \vec{v}_{C_4}^{x_1}, \vec{v}_{C_1}^{y_1}, \vec{v}_{C_2}^{y_1}, \vec{v}_{C_3}^{y_1}, \vec{v}_{C_4}^{y_1}$  – проекции скоростей точек контакта колес с поверхностью на ось  $OX_1$  и  $OY_1$ ;  $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2, \vec{\omega}_3, \vec{\omega}_4$  – угловые скорости вращения колес,  $mg$  – сила тяжести, действующая на платформу,  $l_1$  – расстояние от центра масс до 1-го и 4-го колеса,  $l_2$  – расстояние от центра масс до 2-го и 3-го колеса,  $\varphi$  – угол поворота корпуса электромеханической платформы вокруг  $CZ_1$ .  $\alpha_1, \alpha_2$  – угол между линией  $CC_1$  и осью  $CY_1$  ( $\alpha_1$  для  $i=1,4$ ;  $\alpha_2$  для  $i=2,3$  соответственно).

Для упрощения рассмотрим движение системы в плоскости  $XOY$  (рис.2.6):

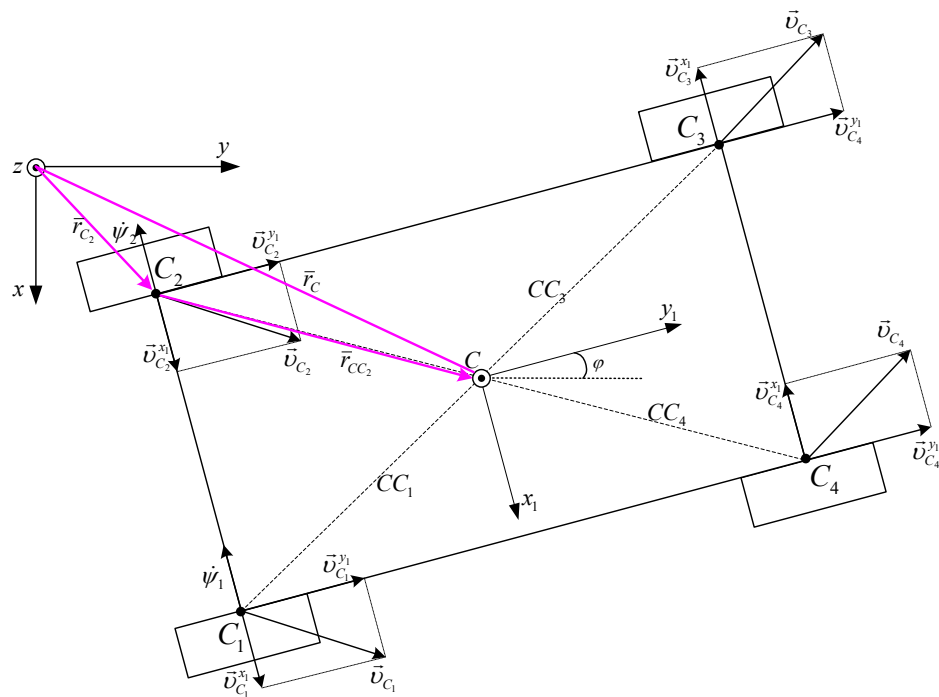


Рис. 2.6 Кинематическая схема электромеханической платформы в проекции на плоскость  $XOY$

Определим положение точки  $C_i$  – центра  $i$ -го колеса электромеханической платформы.

$$\vec{r}_{OA_i}^{(0)} = \vec{r}_{OC}^{(0)} + \vec{r}_{CC_i}^{(0)};$$

$\vec{r}_{OC}^{(0)}$ ,  $\vec{r}_{CC_i}^{(0)}$  – радиус-векторы, в абсолютной системе координат  $OXYZ$  (далее – система координат (0)), определяемые как:

$$\vec{r}_{OC}^{(0)} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ a_5 + r \end{bmatrix};$$

$$\vec{r}_{CC_i}^{(0)} = T_{10} \cdot \vec{r}_{CC_i}^{(1)};$$

где  $\vec{r}_{CC_i}^{(1)}$  – радиус-вектор в локальной системе координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  (далее – система координат (1)),  $T_{10}$  – матрица поворота. Запишем  $T_{10}$ :

$$T_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Запишем радиус-векторы  $\vec{r}_{CC_i}^{(1)}$  для точек  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  (центров масс колес):

$$\vec{r}_{CC_1}^{(1)} = |a_4 \quad -a_1 \quad -a_5|^T;$$

$$\vec{r}_{CC_2}^{(1)} = |-a_3 \quad -a_1 \quad -a_5|^T;$$

$$\vec{r}_{CC_3}^{(1)} = |-a_3 \quad a_2 \quad -a_5|^T;$$

$$\vec{r}_{CC_4}^{(1)} = |a_4 \quad a_2 \quad -a_5|^T;$$

Определим радиус-вектор точек  $C_i$ :

$$\vec{r}_{OC_i}^{(0)} = \vec{r}_{OC}^{(0)} + \vec{r}_{CC_i}^{(0)};$$

Выполнив преобразования получим:

$$\vec{r}_{OC_1}^{(0)} = \begin{bmatrix} x + a_4 \cdot \cos \varphi + a_1 \cdot \sin \varphi \\ y - a_1 \cdot \cos \varphi + a_4 \cdot \sin \varphi \\ r \end{bmatrix};$$

$$\vec{r}_{OC_2}^{(0)} = \begin{bmatrix} x - a_3 \cdot \cos \varphi + a_1 \cdot \sin \varphi \\ y - a_1 \cdot \cos \varphi - a_3 \cdot \sin \varphi \\ r \end{bmatrix};$$

$$\vec{r}_{OC_3}^{(0)} = \begin{bmatrix} x - a_3 \cdot \cos \varphi - a_2 \cdot \sin \varphi \\ y + a_2 \cdot \cos \varphi - a_3 \cdot \sin \varphi \\ r \end{bmatrix};$$

$$\vec{r}_{OC_4}^{(0)} = \begin{bmatrix} x + a_4 \cdot \cos \varphi - a_2 \cdot \sin \varphi \\ y + a_2 \cdot \cos \varphi + a_4 \cdot \sin \varphi \\ r \end{bmatrix};$$

Найдем скорость точек  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  продифференцировав приведенные выражения:



$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}}_{OC_1}^{(0)} &= \begin{pmatrix} \dot{x} + a_1\dot{\varphi}\cos(\varphi) - a_4\dot{\varphi}\sin(\varphi) \\ \dot{y} + a_4\dot{\varphi}\cos(\varphi) + a_1\dot{\varphi}\sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \\ \bar{\mathbf{v}}_{OC_2}^{(0)} &= \begin{pmatrix} \dot{x} + a_1\dot{\varphi}\cos(\varphi) + a_3\dot{\varphi}\sin(\varphi) \\ \dot{y} + a_1\dot{\varphi}\sin(\varphi) - a_3\dot{\varphi}\cos(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \\ \bar{\mathbf{v}}_{OC_3}^{(0)} &= \begin{pmatrix} \dot{x} + a_3\dot{\varphi}\sin(\varphi) - a_2\dot{\varphi}\cos(\varphi) \\ \dot{y} - a_2\dot{\varphi}\sin(\varphi) - a_3\dot{\varphi}\cos(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \\ \bar{\mathbf{v}}_{OC_4}^{(0)} &= \begin{pmatrix} \dot{x} - a_4\dot{\varphi}\sin(\varphi) - a_2\dot{\varphi}\cos(\varphi) \\ \dot{y} + a_4\dot{\varphi}\cos(\varphi) - a_2\dot{\varphi}\sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix};\end{aligned}$$

Взяв вторую производную от полученных радиус-векторов получим выражения, связывающие ускорения точек  $C_i$  и обобщенные координаты  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{\varphi}$ ,  $\dot{\varphi}$ ,  $\dot{\varphi}$ :

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{a}}_{OC_1}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} + a_1\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi - a_4\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi - a_4\dot{\varphi}^2\cos\varphi - a_1\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ \ddot{y} + a_4\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi + a_1\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi + a_1\dot{\varphi}^2\cos\varphi - a_4\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \\ \bar{\mathbf{a}}_{OC_2}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} + a_1\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi + a_3\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi + a_3\dot{\varphi}^2\cos\varphi - a_1\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ \ddot{y} - a_3\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi + a_1\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi + a_1\dot{\varphi}^2\cos\varphi + a_3\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \\ \bar{\mathbf{a}}_{OC_3}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} - a_2\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi + a_3\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi + a_3\dot{\varphi}^2\cos\varphi + a_2\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ \ddot{y} - a_3\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi - a_2\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi - a_2\dot{\varphi}^2\cos\varphi + a_3\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \\ \bar{\mathbf{a}}_{OC_4}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} - a_2\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi - a_4\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi - a_4\dot{\varphi}^2\cos\varphi + a_2\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ \ddot{y} + a_4\ddot{\varphi}\cdot\cos\varphi - a_2\ddot{\varphi}\cdot\sin\varphi - a_2\dot{\varphi}^2\cos\varphi - a_4\dot{\varphi}^2\sin\varphi \\ 0 \end{vmatrix};\end{aligned}$$

В частном случае, когда  $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$  можем записать выражения для  $\bar{\mathbf{a}}_{OC_i}^{(0)}$  следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{a}}_{OC_1}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} + a\ddot{\varphi}\cdot(\cos\varphi - \sin\varphi) - a\dot{\varphi}^2(\cos\varphi + \sin\varphi) \\ \ddot{y} + a\ddot{\varphi}\cdot(\cos\varphi + \sin\varphi) + a\dot{\varphi}^2(\cos\varphi - \sin\varphi) \\ 0 \end{vmatrix}; \\ \bar{\mathbf{a}}_{OC_2}^{(0)} &= \begin{vmatrix} \ddot{x} + a\ddot{\varphi}\cdot(\cos\varphi + \sin\varphi) + a\dot{\varphi}^2(\cos\varphi - \sin\varphi) \\ \ddot{y} - a\ddot{\varphi}\cdot(\cos\varphi - \sin\varphi) + a\dot{\varphi}^2(\cos\varphi + \sin\varphi) \\ 0 \end{vmatrix};\end{aligned}$$

$$\vec{a}_{OC_3}^{(0)} = \begin{pmatrix} \ddot{x} - a\ddot{\varphi} \cdot (\cos \varphi - \sin \varphi) + a\dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ \ddot{y} - a\ddot{\varphi} \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi) - a\dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\vec{a}_{OC_4}^{(0)} = \begin{pmatrix} \ddot{x} - a\ddot{\varphi} \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi) - a\dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ \ddot{y} + a\ddot{\varphi} \cdot (\cos \varphi - \sin \varphi) - a\dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Угловая скорость корпуса электромеханической платформы  $\vec{\omega}$  определяется следующим образом:

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix};$$

Можем записать для точек контакта с поверхностью К<sub>i</sub>:

$$\vec{r}_{K_i}^{(0)} = \vec{r}_{OC_i}^{(0)} + \vec{r}_{C_i K_i};$$

Положение точек центров колес электромеханической платформы задается следующими проекциями:

$$\begin{cases} x_{C_1} = x_C + l_1 \cos(\varphi + \alpha_1) \\ y_{C_1} = y_C + l_1 \sin(\varphi + \alpha_1) \end{cases};$$

$$\begin{cases} x_{C_2} = x_C + l_1 \cos(\varphi - \alpha_1) \\ y_{C_2} = y_C + l_1 \sin(\varphi - \alpha_1) \end{cases};$$

$$\begin{cases} x_{C_3} = x_C - l_2 \cos(\varphi + \alpha_2) \\ y_{C_3} = y_C - l_2 \sin(\varphi + \alpha_2) \end{cases};$$

$$\begin{cases} x_{C_4} = x_C - l_2 \cos(\varphi - \alpha_2) \\ y_{C_4} = y_C - l_2 \sin(\varphi - \alpha_2) \end{cases};$$

где,  $x_{C_i}, y_{C_i}$  – координаты центра  $i$ -того колеса ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),  $x_C, y_C$  – координаты центра масс колесного электромеханической платформы,  $l_1, l_2, \alpha_1, \alpha_2$  – геометрические размеры электромеханической платформы согласно рис. 2.7

В рамках данного исследования рассмотрим движение электромеханической платформы по окружности и спиралевидной траектории. Для получения численного результата, при моделировании движения использовался пакет MathCad.

Принятые обозначения для параметров конструкции покажем на схеме электромеханической платформы (рис. 2.7).

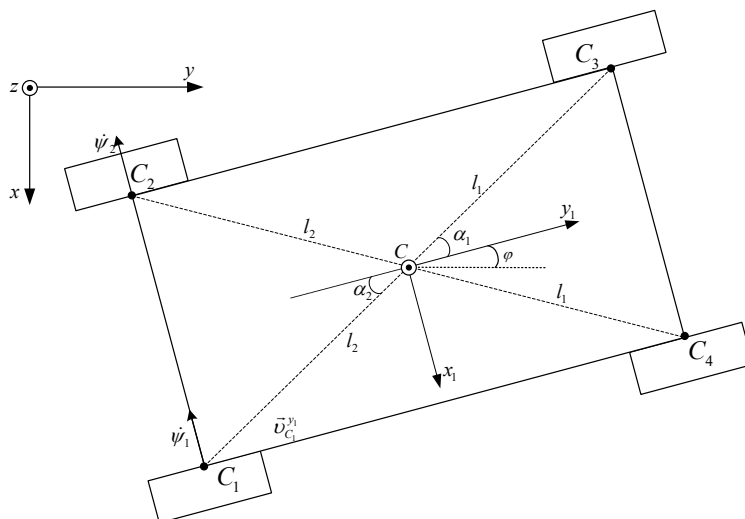


Рис 2.7. Схема мобильной платформы с геометрическими размерами

Пусть центр масс корпуса электромеханической платформы движется по окружности, координаты которого задаются уравнениями:

$$\begin{cases} x_C = R \cos(\omega t) \\ y_C = R \sin(\omega t) \end{cases}$$

где  $R$  – радиус кривизны окружности, по которому движется центр масс электромеханической платформы,  $\omega$  – угловая скорость корпуса электромеханической платформы. Будем считать, что когда  $\omega = \dot{\varphi}$ , подвижная ось  $CY_1$  всегда направлена по касательной к траектории и угол  $\varphi$  изменяется по заданному закону, то есть  $\varphi = \omega t + \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  – начальный угол, определяющий положение корпуса электромеханической платформы на траектории.

Исходные данные для моделирования представим в виде таблицы 2.1.

Табл. 2.1 Параметры математической модели мобильной платформы с попарной кинематической связью между колесами

Радиус кривизны траектории	$R = 1 \text{ м}$
Время моделирования	$10 \text{ с}$
Постоянная интегрирования	$0,0001 \text{ с}$
Расстояние от центра масс до точки крепления колеса	$l=0,06 \text{ м}$
Радиус колес движителя	$r=0,03 \text{ м}$
Угол, определяющий геометрию электромеханической платформы.	$\alpha= 45^\circ$
Постоянная угловая скорость	$\omega= 450 \text{ с}^{-1}$

На рисунке 2.8 покажем траекторию движения мобильной электромеханической системы при моделировании.

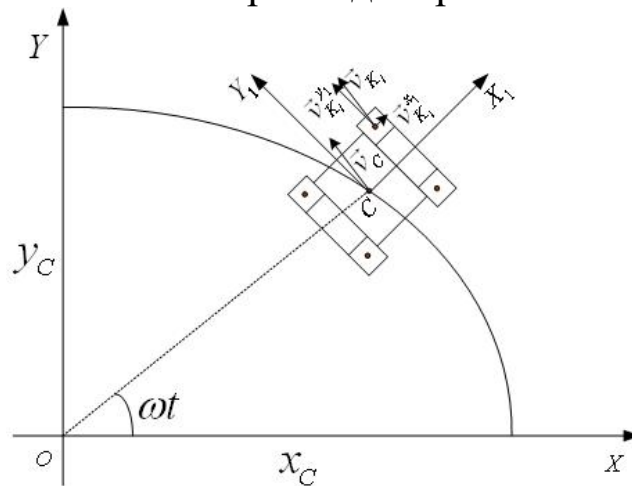


Рис. 2.8 Схема движения мобильной платформы по траектории

Выполним численное моделирование движения мобильной платформы и определим траекторию. Результаты моделирования представлены на рис.2.9-2.10.

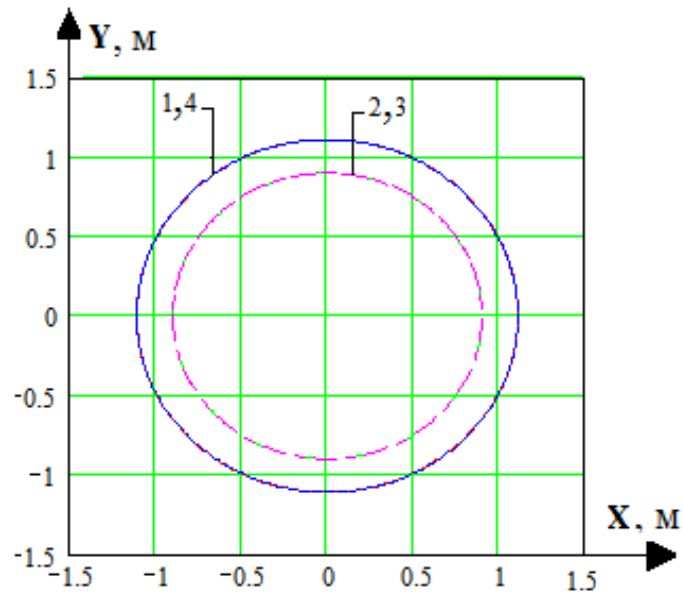
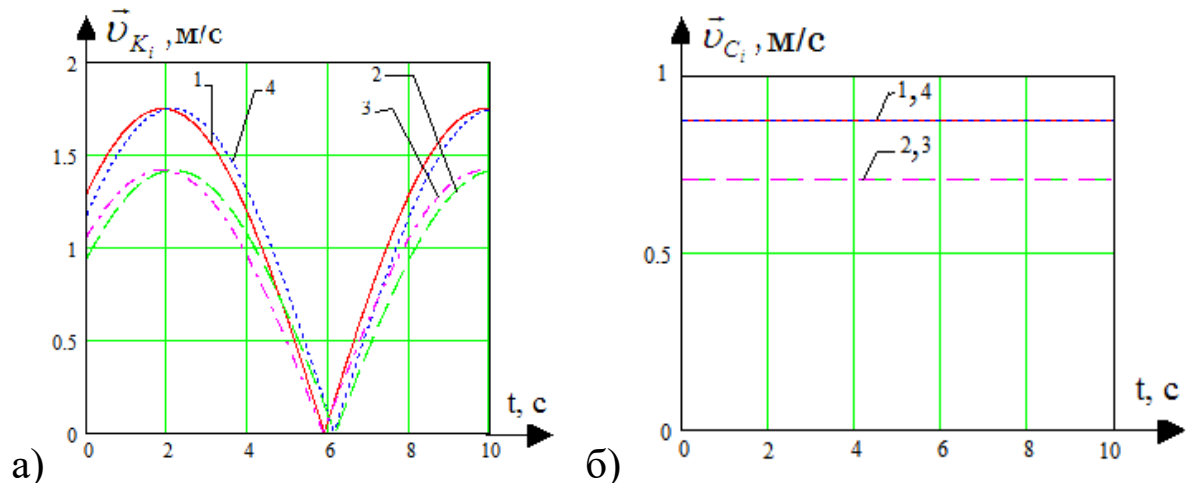


Рис. 2.9 Траектория движения устройства при движении по окружности:



а – зависимость скорости точек контакта устройства с поверхностью от времени; б – зависимость скорости точек центров колес от времени

Рис. 2.10 Временные диаграммы параметров движения устройства по окружности

На данных рисунках: 2, 3 – скорости внешней пары колес; 1, 4 – скорости внутренней пары колес.

Отметим, что при движении по криволинейной траектории в точке контакта колес с поверхностью возникает продольное проскальзывание. Для оценки величины проскальзывания осуществим моделирование движения колесной мобильной платформы по спиралевидной траектории, при котором радиус кривизны будет изменяться во времени, т.е.  $R = R(t)$ .

В данном случае, координаты центра масс будут задаваться уравнениями:

$$\begin{cases} x_C = R(t) \cos(\omega t) \\ y_C = R(t) \sin(\omega t) \end{cases}$$

Выполним численный расчет движения электромеханической платформы в MathCAD и получим графику траектории движения электромеханической платформы. Также, построим графики зависимости скоростей точек контакта с поверхностью от времени. Результаты моделирования представлены на рис.2.11-2.12.

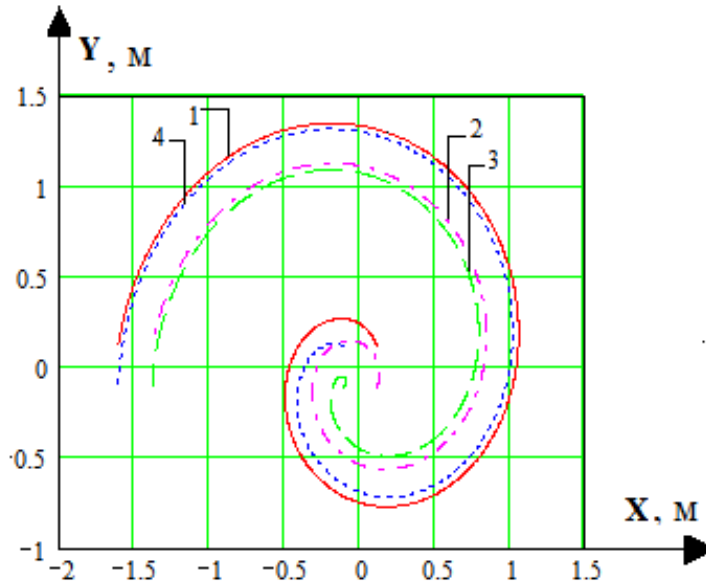


Рис. 2.11 Траектория движения колес мобильной платформы при спиральном движении

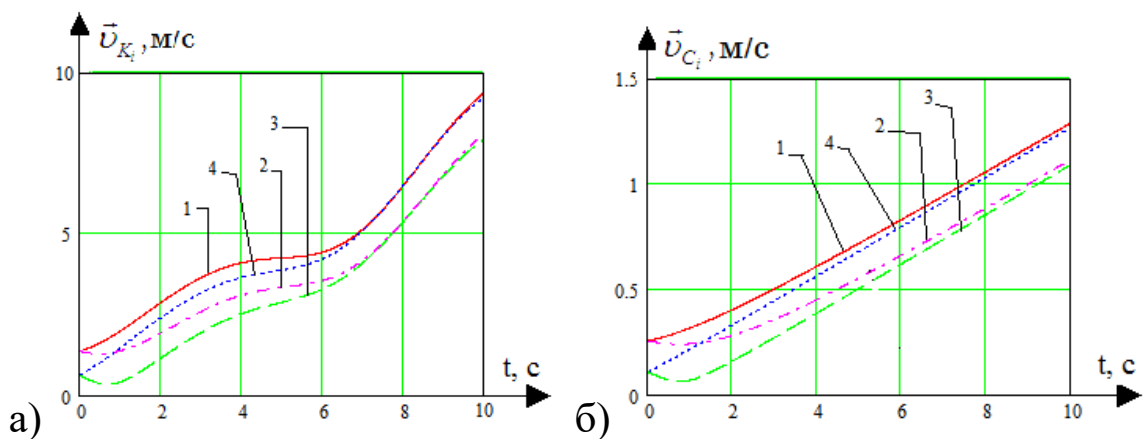


Рис. 2.12. Временные диаграммы параметров спирального движения мобильной электромеханической системы: а – зависимость скорости точек контакта с поверхностью от времени; б – зависимость скорости точек центров колес от времени

На приведенных рисунках, также: 2, 3 – скорости внешней пары колес; 1, 4 – скорости внутренней пары колес.

Определим величину продольного скольжения колес устройства. Для этого вычислим нормальную составляющую скорости каждого колеса, воспользовавшись формулой:

$$v_{K_i}^{x_1}(t) = v_{C_i}(t) \cdot \cos(\alpha);$$

Произведя необходимые вычисления, получим графики проскальзывания каждого из колес (рис.2.13).

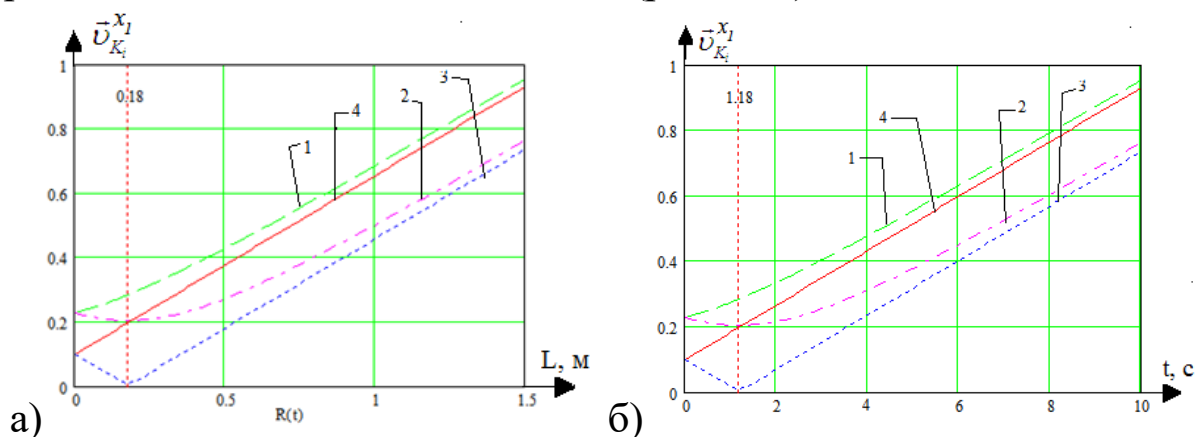


Рис. 2.13. Зависимость проскальзывания от радиуса кривизны (1, 4 – скорости внутренней пары колес; 2, 3 – скорости внешней пары колес)

Как видно из графика величина продольного проскальзывания нелинейно зависит от радиуса кривизны криволинейной траектории. Характерной является точка, обозначенная на рис 8, где  $R=0,18$  м, а  $t=1,18$  с. В данном случае скорость второго колеса мобильной платформы, являющегося ведомым во внешней колесной паре, становится равной нулю. В этот момент времени мобильная система начинает вращаться относительно этого колеса. После этого момента, когда  $R > 0,18$  м, скорость всех колес имеет вид возрастающей прямой, так как радиус кривизны линейно изменяется во времени.

## 2.4. Ход лабораторной работы

1. Ознакомиться с техникой безопасности и правилами поведения в лаборатории;
2. Внимательно изучить разведывательного колесного мобильного робота;
3. Определить основные элементы устройства;
4. Изучить особенности построения математической модели робота;

5. После проверки преподавателем подключить источник питания;
6. Изменяя напряжение питания измерить скорость движения робота;
7. После проведения всех необходимых экспериментов, выключить прибор, отсоединить питание и провода блока управления, построить графики;
8. Составить отчёт по лабораторной работе.

### **2.5. Составление отчета о выполнении**

Отчёт составляется после выполнения студентом лабораторной работы и должен включать:

1. Стандартный титульный лист;
2. Цель лабораторной работы
3. Краткое описание изученного устройства;
4. Схема системы управления и принципа работы;
5. Математическая модель робота и результаты экспериментов;
6. Заключение по лабораторной работе.

После подготовки отчёта и проверки его преподавателем, студент может быть допущен к его защите. Студенты, не предоставившие отчёт или выполнившие его неверно, не могут быть допущены к защите.



## **Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНОГО СЕРВИСНОГО РОБОТА ДЛЯ ДОСТАВКИ СПЕЦГРУЗОВ**

### **3.1. Цель и задачи работы**

Цель работы: изучить конструкцию и принцип действия мультироторного сервисного робота для доставки спецгрузов, изучить основные элементы конструкции

Оборудование: прототип мультироторного сервисного робота для доставки спецгрузов.

### **3.2. Краткие теоретические сведения**

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) - это летательный пилотируемый аппарат. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для решения самых разных задач в интересах военных и гражданских пользователей — для оперативного проведения аэрофотосъемки, радиовещания, поисково-спасательных работ, разведки и наблюдения, поддержания правопорядка и т. д. БПЛА отличаются большим разнообразием, их конструкция и размеры зависят от задач, для которых они предназначаются.

Актуальность данной темы заключается в том, что в настоящее время использование комплексов БПЛА открывает возможность оперативного и недорогого способа обслуживания труднодоступных участков местности, периодического наблюдения заданных районов, цифрового фотографирования для использования в геодезических работах и в случаях чрезвычайных ситуаций. Полученная бортовыми средствами мониторинга информация должна в режиме реального времени передаваться на пункт управления для обработки и принятия адекватных решений. В настоящее время наибольшее распространение получили тактические комплексы микро и мини-БПЛА. В связи с большей взлетной массой мини-БПЛА их полезная нагрузка по своему функциональному составу наиболее полно представляет состав бортового оборудования, отвечающего современным требованиям к многофункциональному разведывательному БПЛА.

Процесс проектирования и производства БПЛА типа конвертоплан имеет ряд особенностей. Конструкция должна быть изготовлена из материалов, способных обеспечить минимальную

массу, но, в то же время отвечать прочностным требованиям для сохранения необходимой функциональности.

БПЛА можно различать по количеству винтов (рис. 1):

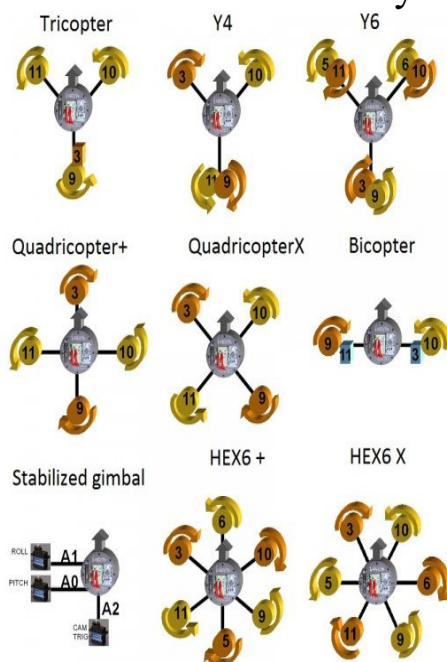


Рис. 3.1. Классификация мультикоптеров по количеству винтов

Одной из перспективных конструкций беспилотных летательных роботов являются аппараты с изменяемым вектором тяги, называемые конвертопланами, которые на взлёте и при посадке работают как подъёмные, а в горизонтальном полёте – как тянущие. По конструктивному исполнению различают конвертопланы: с поворотным винтом (тилтроторы), с поворотным крылом (тилтвинг) и с винтами в кольцевых каналах.

### 3.3. Описание мобильного робота

Общим для всех аппаратов класса конвертоплана является конструкция и принцип полета. Центральная плата конвертоплана служит для размещения оборудования, нагрузки и батареи. Радиально от центра на балках устанавливаются электродвигатели с несущими винтами, образуя Т-образную компоновку всего аппарата. Такая компоновка предполагает наличие передней и задней частей, относительно которых сориентировано направление движения.

В полете конвертоплан поддерживает горизонтальное положение относительно поверхности земли, может зависать, перемещаться в стороны, вверх и вниз. При наличии

дополнительного оборудования есть возможность осуществлять полуавтономные и автономные полеты. Для компенсации возникающего момента, т.е. исключения вращения корпуса, у конвертоплана, передний винт вращается по часовой стрелке, а левый и правый - против часовой стрелки, а также утановлены коаксиальные электродвигатели. Для начала движения трикоптер выводится из состояния баланса (висения) путем увеличения скорости вращения (тяги) части винтов. В результате трикоптер наклоняется и устремляется в нужном направлении. Для поворота трикоптера вокруг своей оси по часовой стрелке, передний винт ускоряет вращение, а левый и правый - замедляют. Аналогично – при повороте против часовой стрелки. Основные режимы полета обеспечивает контроллер, используя данные от нескольких датчиков, и стабилизирует аппарат в воздухе в горизонтальном положении путем подачи управляющих сигналов двигателям. Контроллер работает по специальной программе, вычисляет скорость для каждого винта, компенсирует внешние воздействия ветра. Управление аппаратами осуществляется разнообразными способами – от традиционного управления по радиоканалу (посредством передатчика и радиоприемника) до революционных методов, например, по Wi-Fi через iPhone с использованием датчика положения. Дополнительно аппарат может комплектоваться платой навигации, GPS-приемником, и др. оборудованием.

Рассмотрим движение конвертоплана в неподвижной декартовой системе координат  $OXYZ$ , тогда  $CX_1Y_1Z_1$ ,  $A_i x_i y_i z_i$  ( $i=1-3$ ) – подвижные системы координат, проходящие через центр масс корпуса аппарата  $C$  и центра масс  $i$ -го ротора  $A_i$  соответственно (рис. 26). Ориентацию в пространстве задают самолетные углы рысканья  $\psi$ , тангажа  $\theta$  и крена  $\varphi$ .

Аппарат состоит из трех пар управляемых винтов 1-3, на основе бесколлекторных электроприводов с изменяемыми векторами тяги и фюзеляжа 4 на котором также закреплены блок питания, плата управления и приёмник сигнала, электрически связанные с приводами вращения винтов. Отклонение векторов тяги поворотных приводов 1, 2 осуществляется в плоскости  $A_i X'_1 Z'_1$  ( $CX_1 Z_1$ ) на угол  $\beta$ , который может меняться от 0 до 900, а привода 3 – в плоскости  $A_3 Y''_1 Z''_1$  ( $CY_1 Z_1$ ) на угол  $\pm 450$ . Наличие горизонтальной

составляющей силы тяги хвостового привода позволит обеспечить поворот конвертоплана вокруг вертикальной оси  $CZ_1$  на угол рысканья  $\psi$ . Компенсация крутящего момента происходит за счет оппозитно установленных винтов, вращающихся в противоположные стороны.

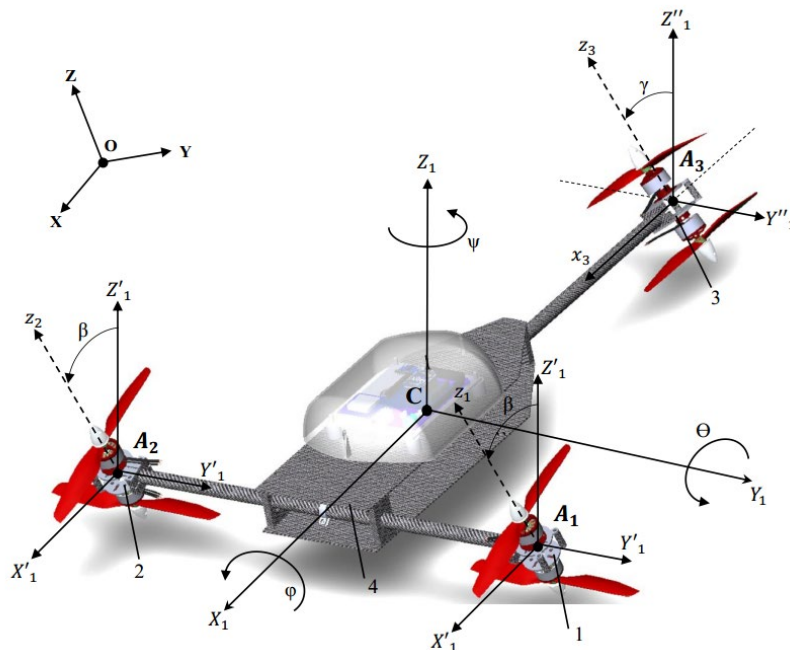


Рис. 3.2. Общий вид силового каркаса конвертоплана-трикоптера

На рис.3.3 представлена общая модель конвертоплана, выполненная из углеродного волокна. Как было отмечено раньше, в основу конструкции конвертоплана входит трикоптер с тремя коаксиальными электродвигателями. Конструкция состоит из фюзеляжа 1, устройств вращения лопастей 2 (рычажный) и 3 (поворотный) и стреловидного крыла (4).

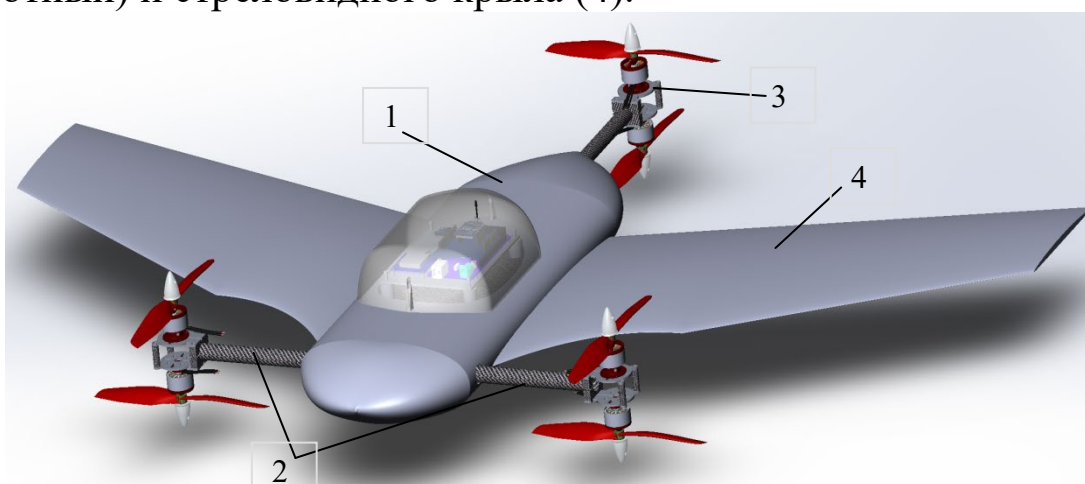


Рис. 3.3 Общий вид БПЛА типа конвертоплана

Внутри фюзеляжа конвертоплана расположена центральная плата, на которой закреплены электронные компоненты, а также устройства вращения лопастей, которые позволяют изменить положение передних электродвигателей до 90°, а заднего, до 45°. Главным отличием между устройствами 2 и 3 является принцип изменения вектора тяги, устройство 2 меняет положение обоих передних винтов при помощи рычажного механизма, а устройство 3 меняет положение заднего винта при помощи сервопривода.

### **3.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Ознакомится с устройством лабораторной установки. Идентифицировать в прототипе сервисного робота и системе управления основные элементы их конструкции в соответствии со схемами, приведенными выше.

2. Изучить математические модели приведенные в методических указаниях.

3. Оформить отчет. Отчет должен содержать описание лабораторной установки, краткие теоретические сведения, выводы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мальчиков А. В., Яцун С. Ф., Рублев С. Б. Исследование движения плоского шестизвенного внутритрубного мобильного робота //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №. 4-5.
2. Мальчиков А. В. Динамика управляемого движения шестизвенного мобильного внутритрубного робота: дис.. канд. техн. наук. Юго-Западный гос. ун-т, Курск, 2013 : дис. – Юго-Западный государственный университет, 2013.
3. Яцун С. Ф., Мальчиков А. В., Жакин А. И. Динамические опорные элементы ползающих роботов для движения по наклонным поверхностям //Известия Юго-западного государственного университета. – 2012. – №. 2-1. – С. 89-95.
4. Яцун, С.Ф. Математическое моделирование мобильного гусеничного робота [Электронный ресурс] / С.Ф. Яцун, Чжо Пью Вей, Мальчиков А.В., Тарасова Е.С. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6. – Режим доступа: [www.science-education.ru/113-11005](http://www.science-education.ru/113-11005)
5. Яцун С.Ф., Чжо Пью Вей, Савин С.И // Исследование динамических режимов гусеничного мобильного робота при взаимодействии с неподвижным препятствием/ Известия Юго-Западного государственного университета. Курск. 2014. № 1 (34). с. 10-17
6. Гриценко П.А, Бушуев А.Б., Литвинов Ю.В., Шмигельский Г.М. Управление полётом квадрокоптера по произвольно задаваемой траектории // Materialy IX mezinarodni vedecko-prakticka konference «Moderni vymozenosti vedy-2013»/-Dil 77/ Technicke vedy: Praha. Publishing House “Education and Science” с.73-75.
7. Емельянова О. В., Попов Н. И., Яцун С. Ф. Моделирование движения квадрокоптера в пространстве. Авиакосмические технологии (АКТ-2013). Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых учёных, аспирантов и студентов.- Воронеж: ООО Фирма «Элист»; 2013. с.131-138.