МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Выпуск 19

№ 24(127) Межвузовский сборник научных статей 2013
Издается с января 2004 г.

Волгоград
2013

УДК 881.3

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»
академик РАН *И. А. Новаков*

Редакционная коллегия серии:

засл. деят. науки РФ д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *В. А. Камаев* (научный редактор)
д-р техн. наук, профессор БрГТУ *В. И. Аверченков*
д-р техн. наук, профессор ПензГУ *А. М. Бершадский*
д-р хим. наук, профессор ВолгГТУ *Л. Н. Бутенко*
д-р техн. наук, профессор МГТУ СТАНКИН *Г. Д. Волкова*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. С. Горобцов*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. М. Дворянкин*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. В. Заболеева-Зотова*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Г. Кравец*
д-р техн. наук, профессор ТагГРТУ *В. М. Курейчик*
д-р техн. наук, профессор АИСИ *И. Ю. Петрова*
д-р техн. наук, профессор АстрГТУ *О. М. Проталинский*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Н. Шилин*
д-р техн. наук, профессор *Юрген Баст* (Технический ун-т Горной Академии, г. Фрайберг, Германия)
д-р философии *Ле Квет Тан* (Университет г. Канто, Вьетнам)
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *С. А. Фоменков* (ответственный секретарь)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 24(127) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2013. – 92 с. (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 19).
ISBN 978–5–9948–1350–8

Содержит работы ученых высших учебных заведений России по следующей тематике: математическое моделирование и численные методы, системный анализ и обработка информации, управление в социальных и экономических системах, автоматизированное проектирование, построение сетей и защита информации.

Ил. 83. Табл. 6. Библиогр.: 136 назв.

ISBN 978–5–9948–1350–8

© Волгоградский государственный
технический университет, 2013

Научное издание

И З В Е С Т И Я
Волгоградского государственного технического университета
№ 24 (127), 2013 г.

Серия «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
Выпуск 19

Межвузовский сборник научных статей

Редактор *Л. Н. Рыжих*. Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2013 г. (научные издания). Поз. № 84н.
Подписано в печать 27.12.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,70. Уч.-изд. л. 10,63. Тираж 80 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

СОДЕРЖАНИЕ

Черноусько Ф. Л.
Вступительное слово к статьям по материалам докладов на секции «Мобильные робототехнические и специальные транспортные системы» конференции «Прогресс транспортных средств и систем (Волгоград, 2013)»..... 5

Александров В. А., Кирик К. А., Кобрин А. И.
Разрешение конфликтных ситуаций в коллективе автономных аппаратов..... 6

Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., Фоменко С. С.
Реконфигурируемый транспортный комплекс со сдвоенными шагающими движителями..... 10

Гаврилов А. Е., Голубев Д. В., Даншин А. С.
Роботизированная транспортная платформа с шагающим ортогональным движителем..... 15

Гончаров А. А., Журилов С. Ю.
Способы снижения потерь энергии в приводах сельскохозяйственных машин с цикловыми исполнительными механизмами..... 22

Дьяков А. С., Олейников А. С.
Двухобъемная система пневматического подрессоривания с микропроцессорным управлением..... 26

Жога В. В., Скакунов В. Н., Еременко А. В., Кравчук А. А.
Аппаратная реализация бортовой системы управления шагающим роботом с ортогональными движителями..... 29

Калинин Я. В., Устинов С. А., Шкутан Д. В.
Задачи поиска энергетически эффективных алгоритмов движения шагающих машин..... 36

Камаев В. А., Крыжановский А. И., Никляев И. Ю., Пыхтин П. С.
Расчет траектории движения мобильного робота с гусеничным движителем для применения в алгоритме RRT..... 38

Князьков М. М., Семенов Е. А.
Диагностический робототехнический комплекс вертикального перемещения..... 43

Кореновский В. В., Морозов Н. Г., Сильвестров Э. Е.
Методы синтеза многозвенных механизмов движителей и рулевых устройств шагающих транспортных средств..... 47

Леонард А. В., Павловский В. Е.
Разработка системы управления для поворотно-циклового шагающего движителя..... 52

Мохов А. Д., Громов Е. Г, Серов В. А., Мироненко К. Б.
Программа синтеза управления движениями шагающего ортогонального движителя..... 57

Павловский В. Е., Шамин А. Ю.
Динамическая модель и оптимальное управление движением робота-буера..... 61

Панченко А. В.
Кинематический алгоритм управления многоногим шагающим аппаратом с многозвенным корпусом..... 71

Рогудеев А. Б., Сомов В. В., Константинов В. М., Пивоваров А. О., Малолетов А. В.
Выделение и подсчет избыточных связей при построении моделей в Autodesk Inventor..... 74
Смелягин А. И., Юхневич И. В.
Подвижность транспортных средств..... 79
Чернышев В. В., Шурыгин В. А.
Моделирование динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с грунтом с низкой несущей способностью..... 82
Яцун С. Ф., Волкова Л. Ю., Ворочаев А. В.
Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата..... 86

Дорогие коллеги!

Этот выпуск журнала «Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах"» посвящен проблемам динамики и управления движением мобильных робототехнических систем. Такие системы используются сегодня практически во всех сферах деятельности человека: в промышленности, при проведении научных исследований в средах, труднодоступных человеку, в экстремальных ситуациях при ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в военном деле, в медицине, в быту. Совершенствование мобильных роботов требует глубоких научных исследований в области механики и автоматического управления и новаторских инженерных решений.

Проблемам мобильной робототехники была посвящена специальная секция «Мобильные робототехнические и специальные транспортные системы» на Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем-2013», проходившей в Волгограде в сентябре 2013 года. Тематика докладов, представленных на этой секции, охватывала очень широкий круг научных и инженерных проблем, от задач, касающихся общих принципов движения и управления мобильными роботами, до методик проектирования робототехнических систем и их испытаний. В значительной части докладов обсуждались проблемы, возникшие при отработке различных узлов и систем в реальных машинах.

Секция объединила ученых и инженеров, работающих в академических институтах, вузах, на предприятиях транспортного машиностроения и показала, что мобильная робототехника востребована и развивается во многих научных центрах нашей страны. Мероприятия, подобные прошедшей конференции, усиливают взаимосвязь между коллективами исследователей и разработчиков мобильных роботов, способствуют выходу отечественной робототехники на передовой мировой уровень, привлекают молодежь к научной и инженерной деятельности, дают возможность молодым ученым, аспирантам и студентам заявить о себе.

Материалы докладов, представленных на секции «Мобильные робототехнические и специальные транспортные системы», составляют содержание статей этого выпуска журнала.

Я приветствую всех авторов и читателей, желаю им успехов в важном и интересном деле развития мобильной робототехники.

Академик *Ф. Л. Черноусько*
Председатель Научного совета по робототехнике и мехатронике
Российской академии наук,
Директор Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук

УДК 681.5

В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин

РАЗРЕШЕНИЕ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В КОЛЛЕКТИВЕ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
duprein@gmail.com

В статье представлен алгоритм коллективного поведения автономных аппаратов при их функционировании в группе на ограниченной территории. Рассматривается задача покрытия территории группой автономных аппаратов и предлагается алгоритм разрешения конфликтных ситуаций, основанный на предварительном разделении территории на операционные подпространства.

Ключевые слова: коллективное управление, автономные аппараты, разрешение конфликтов.

V. A. Alexandrov, K. A. Kirik, A. I. Kobrin

CONFLICT RESOLUTION IN THE GROUP OF AUTONOMOUS APPARATUS

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

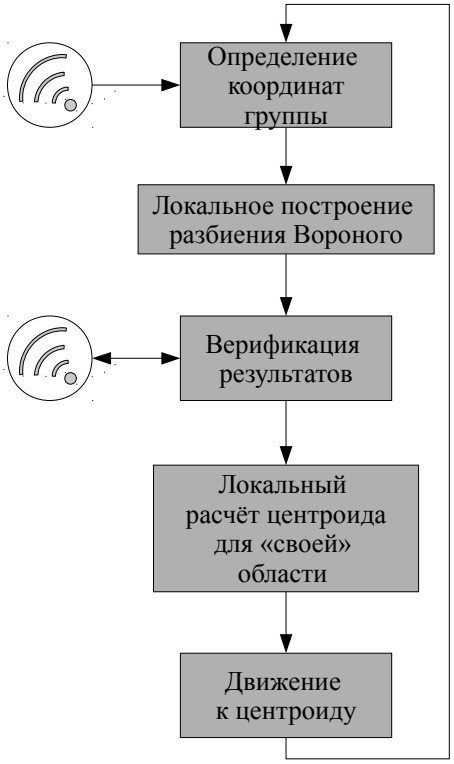
This article describes the algorithm of conflict resolution through collective actions applied to the group of autonomous apparatus. The area coverage task has been considered and the collaboration algorithm based on an area tessellation has been proposed.

Keywords: collective behavior, autonomous apparatus, conflict resolution.

Применение методов группового или коллективного управления встречается практически во всех областях науки и техники. Так, например, актуальными являются задачи обеспечения взаимодействия внутри группы автоматически управляемых автономных аппаратов при обследовании территорий (особенно на крайнем Севере [1]), разминировании [2], обеспечении совместных операций на роботизированных складах [3].

Время и вычислительные ресурсы автономных аппаратов при их функционировании в группе на общей единой территории по необходимости тратятся не только на выполнение алгоритмов, приводящих к решению поставленной задачи, но и на координацию действий при возникновении конфликтных ситуаций (например, столкновения и следование к одной цели), и на кооперативное взаимодействие с целью оптимизации процесса решения задачи (например, распределение целей и достижения равновероятного направления обхода препятствий).

При уменьшении соотношения характерных размеров территории и автономных аппаратов накладные расходы на решение координационных задач увеличиваются в связи с возрастанием количества взаимодействий. В работе рассматривается метод координации действий в задаче покрытия территории группой автономных аппаратов, основанный на предварительном разделении территории на операционные подпространства для каждого аппарата на основе итерационного алгоритма кластеризации Ллойда [4] для получения разбиения Вороного построенного на центроидах. Связь между автономными аппаратами-агентами в группе организована в соответствии с архитектурой ограниченной распределенной доски объявлений [5]. Структурная схема алгоритма представлена на рисунке, где символом связи в круге выделена коммуникационная процедура обмена данными между всеми автономными аппаратами, входящими в группу.



Структурная схема многоагентного алгоритма выделения операционных подпространств

Рассмотрим группу автономных аппаратов ***G***, функционирующую в плоскостной среде $\boldsymbol{E} \in \boldsymbol{E}\left[\Re^2\right]$. Количество аппаратов равно *N*. Область функционирования на опорной плоскости $Q \in \Re^2$ удовлетворяет условию полной достижимости всех ее точек $O[x,y] \in Q$, а граница пространства ∂Q является границей рабочей среды.

Работа алгоритма начинается с определения координат группы автономных аппаратов. При этом информационное поле доски объявлений, отвечающее координатам каждого автономного аппарата, заполняется им самим. Обозначим через $\mathbf{C}_g$ массив координат всех аппаратов в группе:

$$\mathbf{C}_g(t) = \begin{bmatrix} (x_1(t), y_1(t)) \\ (x_2(t), y_2(t)) \\ \vdots \\ (x_6(t), y_6(t)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Дискретность системы управления, с учетом непрерывности и неизменности управляющих параметров и измерений на промежутке времени Δt, позволяет представить этот массив в виде:

$$\mathbf{C}_g[i] = \begin{bmatrix} (x_1[i], y_1[i]) \\ (x_2[i], y_2[i]) \\ \vdots \\ (x_6[i], y_6[i]) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $i = 0...N$, $t = \Delta t \cdot i$. После формирования базы данных для всех точек этого массива, каждым автономным аппаратом производится триангуляция Делоне, которой затем однозначно сопоставляется разбиение Вороного [6]. После построения разбиения Вороного, производится анализ полученных данных на предмет наличия вершин на бесконечности и производится обрезание границ разбиения [7] в соответствии с границей рабочей области заданной вершинами многоугольника:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (B_x[0], B_y[0]) \\ (B_x[1], B_y[1]) \\ \vdots \\ (B_x[M], B_y[M]) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где *M* – количество вершин многоугольника рабочей области. Затем происходит верификация результатов в группе, полученных аппаратами локально. Она сводится к подтверждению информации публикуемой на доске объявлений о текущих вершинах разбиения. Далее, каждый автономный аппарат локально рассчитывает площадь и центроид области разбиения, построенной относительно его текущего месторасположения:

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \\ P_x[j] &= \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_x[j,i] + g_x[j,i+1])\cdot(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \\ P_y[j] &= \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_y[j,i] + g_y[j,i+1])\cdot(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{G}[j] = [g_x[j,i], g_y[j,i]], i = 0...G_N[j]$ – массив координат границы области разбиения V_j для месторасположения *j*-го автономного аппарата, а A_j, $P[j]_x$, $P[j]_y$ – площадь этой области и координаты ее центроида P_j.

Координаты центроида, полученного на текущем шаге, становятся целевой точкой для по-

зиционирования автономного аппарата. Таким образом, в результате работы алгоритма, рабочая область функционирования группы аппаратов делится на операционные подпространства с оптимальные с точки зрения объемов покрытия.

Исходя из определения разбиения Вороного, можно отметить, что с самого первого шага алгоритма автономные аппараты разделены виртуальными границами разбиения, а рассчитанные значения центроидов лежат внутри областей разбиения, что гарантирует отсутствие коллизий в процессе работы алгоритма.

Для примера рассмотрим применение рассмотренного алгоритма выделения операционных подпространств в задаче покрытия территории. Введем понятие объема работы по покрытию для автономного аппарата находящегося в точке P_j области разбиения V_j:

$$W = \int_{Y \in V_j} \left| Y - P_j \right|^2 dY , \qquad (5)$$

где $\left| Y - P_j \right|$ – метрика расстояния. Тогда функционал

$$F = \sum_{i=0}^{N} \int_{Y \in V_j} \left| Y - P_j \right|^2 dY , \qquad (6)$$

будет отражать общие затраты на покрытие территории Q при разбиении V_j.

Утверждение 1. Применение алгоритма разбиения территории приводит к ее разделению на участки таким образом, что общие затраты на последующее ее покрытие будут минимальны, а в конце разбиения автономные аппараты будут находиться в центроиде ассоциированных с ними участков соответственно.

Доказательство. В соответствии с Предположением 3.1 стр. 650 (Proposition 3.1, p. 650) [8] разбиение Вороного построенное на центроидах приводит к минимуму функционал следующего вида:

$$F((z_i, V_i), i = 1,...,k) = \sum_{i=0}^{N} \int_{y \in V_j} \rho(y) \left| Y - P_j \right|^2 dy , \qquad (7)$$

где $\rho(y)$ – некоторая функция плотности заданная на пространстве разбиения, а z_i – центроид для которого построена область V_i разбиения Вороного V.

Принимая плотность $\rho(y) \equiv 1$ получаем утверждение о минимизации функционала затрат, а так как в процессе работы алгоритма автономные аппараты перемещаются на каждом шаге по направлению к центроиду, то по окончании работы алгоритма они находятся в нем. Это означает справедливость утверждения 1.

Рассматривая покрытие территории, необходимо отметить, что алгоритм выполняется в две фазы: в первой фазе производится разбиение на операционные подпространства, а во второй – индивидуальное покрытие территории, например, жадным алгоритмом. Известно, что для NP-полных задач, к которым можно отнести задачу покрытия территории, жадный алгоритм не дает оптимального варианта решения, но близок к нему. При этом во второй фазе возможно использовать любой алгоритм решения задачи покрытия территории одним аппаратом, так как координация действий была полностью произведена в первой фазе. Далее приведен алгоритм покрытия территории, с использованием предварительного разбиения, записанный псевдокодом:

Алгоритм 1. Покрытие территории, основанное на разбиении Вороного

Цель: Покрытие территории по сетке группой автономных аппаратов

Входные данные: Сетка покрытия Tlist[M], начальные положения объектов, вершины многоугольника границы

Фаза 1:
do
for *i=0* → *N*, для объектов
1: загрузить сетку разбиения *T[M]*;
2: загрузить вершины границы *B*;
3: считать область общей памяти **blackboard** → координаты R_j, $j \neq i$;
4: построить разбиение **VoronoiDivide()**:

$$V_i = [P[x, y], \|P - R_i\| \leq \|P - R_j\|, i \neq j]$$

5: отсекание полигоном границы polygon_clip(): $V = V^{\infty} \cap B$
6: результат → **blackboard**
7: расчет центроида $P[i]_x$, $P[i]_y$ по формулам (4);
8: **goto**($P[i]_x$, $P[i]_y$)

end for
while ($R_i[x,y] \neq P[i][x,y]$)

Фаза 2:
do
for $i=0 \rightarrow N$, для объектов
1: поиск $\overline{T}_i, \left\| R_i - \overline{T}_{ij} \right\|_{j=0...M} \rightarrow \min$
2: goto($\overline{T}_i[x], \overline{T}_i[y]$)
3: $T[M] = T[M] \setminus \overline{T}_i$
end for
while ($T[M] \notin \varnothing$)

Утверждение 2. Применение алгоритма 1 приводит к решению задачи покрытия территории.

Доказательство. Действительно, так как в соответствии с определением разбиения Вороного оно образует покрытие в пространстве $\Re^2$, то соответственно все точки принадлежат хотя бы одной из областей разбиения. А это в свою очередь означает, что во время второй фазы алгоритма они будут целевыми точками для применяемого индивидуального алгоритма покрытия. Используемый жадный алгоритм за конечное время приводит к решению получаемых индивидуальных подзадач, что в свою очередь означает и решение первоначальной основной задачи покрытия.

Также важное место в рассматриваемой задаче занимает избегание столкновений как с препятствиями, располагающимися в рабочей среде, так и с другими членами группы аппаратов. Для решения задачи объезда препятствий используется следующий алгоритм: сначала с помощью алгоритма поиска пути осуществляется поиск оптимального пути, причем функция качества является взвешенной суммой расстояния до целевой точки и расстояние до ближайшего препятствия относительно каждой точки пути. Вес второго критерия определяется в первую очередь геометрическими размерами аппаратов исходя из желаемой минимальной дистанции объезда препятствий. Далее полученная траектория сглаживается. В отличие от [9], используется критерий оптимизации не вводящий ограничения на максимальную кривизну траектории, что упрощает прохождение узких мест. Оптимизация производится по трем критериям: минимизация расстояния между точками траектории, минимизация расстояния между точками исходной и сглаженной траектории, минимизация расстояния от каждой точки траектории до ближайшего препятствия. Первый критерий служит для сглаживания траектории, второй критерий сдерживает вырождение траектории в прямую, а третий – отталкивает новую траекторию от препятствий. После получения сглаженной траектории, по точкам строится сплайн, который может быть использован для построения управления двигателями автономных аппаратов.

В отличие от [10] в приведенном алгоритме покрытия территории используется итерационное обновление координат центроидов, что сокращает путь до требуемой конфигурации автономных аппаратов в рабочей области, однако предъявляет повышенные требования к системе распределенной коммуникации. Кроме того, введена многоагентная система обмена информацией с применением распределенной ограниченной доски объявлений, а также реализован алгоритм построения разбиения Вороного для произвольных границ рабочей области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бурдун И.Е., Бубин А.Р.*, Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое освоение шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. – Новосибирск, 2010. – с. 141-149.

2. *Andres S.* Mack, MineSweeper: Not Just a Game Anymore // Journal of Mine Action. – CISR, James Madison University, Virginia, USA, 2007.

3. *Smith N.,* Picky Robots Grease the Wheels of e-Commerce // Business News Daily. – TechMedia Network, UT, USA, June 2, 2011.

4. Qiang D., Emelianenko M., Ju L., Convergence of the Lloyd algorithm for computing centroidal Voronoi tessellations // SIAM Journal on Numerical Analysis. – Philadelphia, USA, Vol. 44, 2006, pp. 102–119.

5. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: фи-лософия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.

6. *Burkardt J., Gunzburger M., Peterson J., Brannon R.,* User Manual and Supporting In-formation for Library of Codes for Centroidal Voronoi Point Placement and Associated Zeroth, First and Second Moment Determination // Technical Report: SAND2002-0099. – NM, USA, Sandia National Laboratories, February, 2002.

7. General Polygon Clipper library, http://www.cs.man.ac.uk/~toby/alan/software/index.html

8. *Qiang Du,* Vance Faber, Max Gunzburger, Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms // Society for Industrial and Applied Mathematics. – Philadelphia, USA, 1999, Vol. 41, No. 4, pp. 637–676.

9. *Dolgov D., Thrun S.* Montemerlo M., Diebel J., Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving // Proceedings of the First International Symposium on Search Techniques in Artificial Intelligence and Robotics (STAIR-08). – AAAI Chicago, USA, June, 2008.

10. *Breitenmoser A., Schwager M.*, Metzger J.-C., Siegwart R., Rus D., Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots // ICRA 2010. – Anchorage, AK, USA, 2010, pp. 4982 — 4989.

УДК 629.369

Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, С. С. Фоменко

РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС СО СДВОЕННЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Реконфигурируемый мобильный робот представляет собой несколько однотипных модулей. Применение модульной реконфигурируемой структуры позволяет разработать однотипный подход для различных транспортных операций.

Ключевые слова: шагающая машина, модуль, управление движением, ортогональный механизм шагания.

E. S. Briskin, N. G. Sharonov, S. S. Fomenko

RECONFIGURABLE TRANSPORT COMPLEX WITH DUAL WALKING MOVERS

Volgograd State Technical University

Reconfigurable mobile robot is a multiple similar modules. The application of modular reconfigured structure allows of develop a consistent approach for different transport operations.

Keywords: walking machine, module, motion control, orthogonal mechanism of walking.

Модульный подход [1] позволяет «собирать» роботы произвольной конфигурации. Известны исследования модульных робототехнических систем с колесными движителями (сочлененные колесные тележки) [2, 3], змееподобные ползающие роботы [4], шагающие модули [5–7]. Применение условия реконфигурируемости робота позволяет получать транспортные системы [1-8], которые обладают уникальными, по сравнению с обычными транспортными средствами, особенностями.

В работе рассматриваются транспортные комплексы с изменяемым в зависимости от решаемой задачи числом шагающих движителей и, соответственно, грузоподъемностью и маневренностью. Под идеальной маневренностью понимается способность корпуса машины совершать любое движение в плоскости опорной поверхности [9].

Реконфигурируемый робот рассматривается как «транспортный комплекс», состоящий из объекта транспортировки и транспортных модулей [10]. Объектом транспортировки является груз или платформа с грузом – «корпус» робота. Транспортный модуль представляет собой машину, имеющую индивидуальный привод, рабочим органом которой является движитель. Например, имеющая модульную структуру шагающая машина «Ортоног» (рис. 1) состоит из рамы и четырех сдвоенных ортогонально-поворотных движителей [11]. В то же время, реконфигурируемый робот может иметь и более сложную иерархическую структуру. В этом случае модуль может быть выполнен либо в виде самостоятельного транспортного средства (многоопорный, прототип - шагающая машина «Восьминог» [12]) (рис. 2), либо в виде шагающего движителя (одноопорный, прототип – шагающая опора дождевальной установки «Кубань» [13]) (рис. 3), предназначенного для работы только в составе комплекса.

В качестве движителей перечисленных выше машин применены сдвоенные механизмы шагания:

- движитель с механизмом шагания Чебышева – Умнова [14] (рис. 4),

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-01-97057-а, № 13-08-31375-мол_а.

- движитель на основе циклового механизма с криволинейной направляющей [15] (рис. 5),
- сдвоенный ортогонально-поворотный движитель [11] (рис. 6).

Рис. 1. Робот «Ортоног» с шагающими ортогонально-поворотными движителями

Рис. 2. Робот «Восьминог» с цикловыми сдвоенными механизмами шагания и механизмом поворота

Рис. 3. Дождевальная установка «Кубань» с шагающими движителями

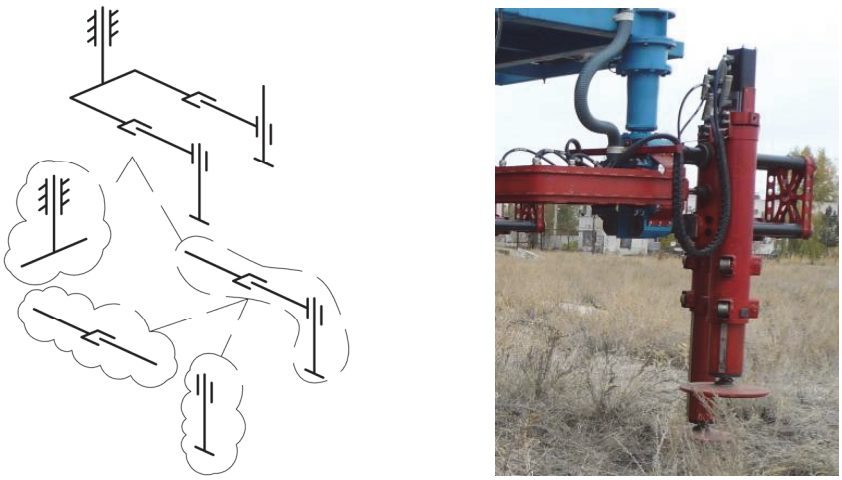


Рис. 4. Сдвоенный ортогонально-поворотный движитель

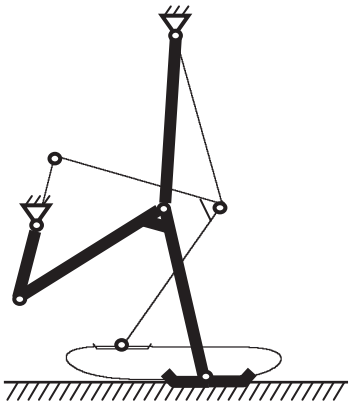


Рис. 5. Сдвоенный движитель с кинематически связанными цикловыми механизмами шагания Чебышева – Умнова

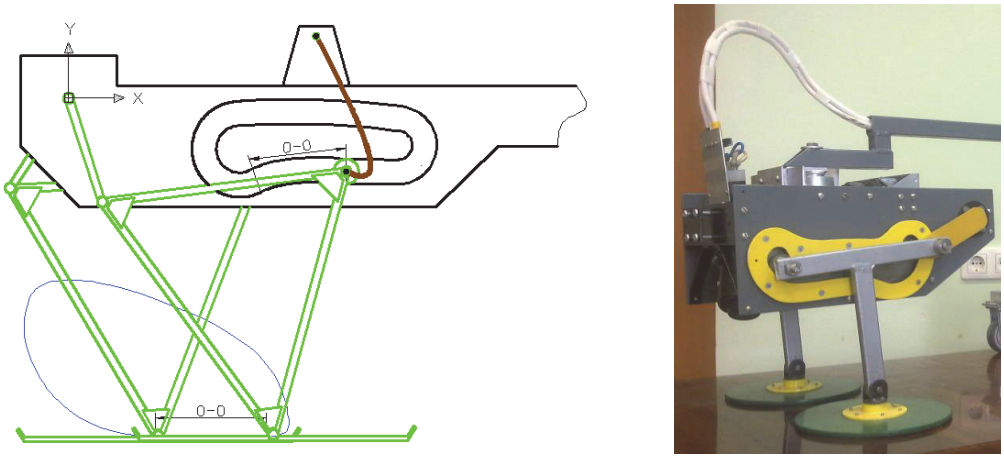


Рис. 6. Сдвоенный движитель на основе циклового механизма с криволинейной направляющей

Особенность работы сдвоенного движителя заключается в том, что когда один из механизмов шагания находится в фазе переноса, второй механизм обеспечивает опору на грунт. При наличии достаточного количества движителей, это гарантирует статическую устойчивость машины [16].

На примере шагающей машины модульной структуры «Ортоног» реализован метод организации программного движения объекта транспортировки (корпуса) для системы с избыточным количеством приводов. Предложенный метод применим к модульному роботу с N движителями и позволяет разработать однотипный подход для различных режимов движения. Сдвоенный ортогонально-поворотный движитель (рис. 6) машины «Ортоног» состоит из двух плоских ортогональных механизмов шагания, имеющих по два привода: привод курсового (горизонтального) движения и привод адаптации (вертикального движения). Направляющие приводов курсового движения обоих механизмов соединены друг с другом и посредством общего привода поворота имеют возможность поворачиваться относительно корпуса машины, меняя ориентацию плоскостей шагания ортогональных механизмов. Использование общего привода поворота с одной стороны обеспечивает достаточное количество управляемых степеней свободы для реализации любых геометрически возможных движений корпуса машины, а с другой стороны – приводит к упрощению кинематической схемы машины, требуя пять приводов для двух механизмов шагания, вместо трех приводов на каждый механизм шагания в случае их независимого использования.

Следует отметить, что геометрически возможным движением корпуса машины в плоскости движения является произвольное перемещение любой точки корпуса при произвольной его ориентации. Направление скорости центра машины и угол поворота корпуса независимы друг от друга. Такими возможностями не обладают традиционные транспортные средства, хотя использование поворотных колес [3] позволяет реализовать те же возможности, но с проскальзыванием при движении по реальному грунту.

Отличительной особенностью метода математического моделирования является то, что конструкция сдвоенного ортогонально-поворотного движителя позволяет разделить задачи определения программных законов управления приводами курсового движения и адаптации. Это, в свою очередь, позволяет упростить построение и изучение математических моделей, сведя их к рассмотрению плоскопараллельных движений твердых тел, рассматривая отдельно задачу переступания (управления приводами адаптации) и вопросы перемещения по опорной поверхности (управления поворотными и курсовыми приводами). Применение такого подхода позволяет свести к одной расчетной схеме модели различных сдвоенных движителей (рис. 4–6).

Процесс шагания в случае сдвоенного ортогонально-поворотного движителя реализуется попеременным подъемом и опусканием стоп двух механизмов шагания, образующих один движитель. В пределах одного движителя возможны фазы движения, при которых только один механизм будет находиться в опоре, оба механизма будут в опоре или оба механизма будут в переносе. В большинстве случаев реализуется режим, при котором только один механизм шагания, из двух входящих в движитель, в каждый момент времени контактирует

с грунтом. Следуя терминологии, предложенной в [16], здесь реализуется полноопорная походка. Фаза переноса состоит из зоны «свободного» хода и двух зон адаптации: непосредственно перед наступанием на грунт и непосредственно после поднятия стопы с грунта.

Например, при описании движения нескольких модулей, жестко связанных между собой одним корпусом (как у машины «Ортоног»), по достаточно ровной поверхности шагающая машина рассматривается как система твердых тел, совершающая плоское движение (рис. 7), и включающая в себя: корпус машины, П-образную несущую конструкцию движителя, поворачивающегося вокруг вертикальной оси на необходимый угол за счет работы привода поворота, и перемещающуюся вдоль одной из направляющих движителя опорную стойку, взаимодействующую с грунтом. При этом, предполагается, что привод курсового движения переносимого механизма работает согласованно с движением опорного механизма.

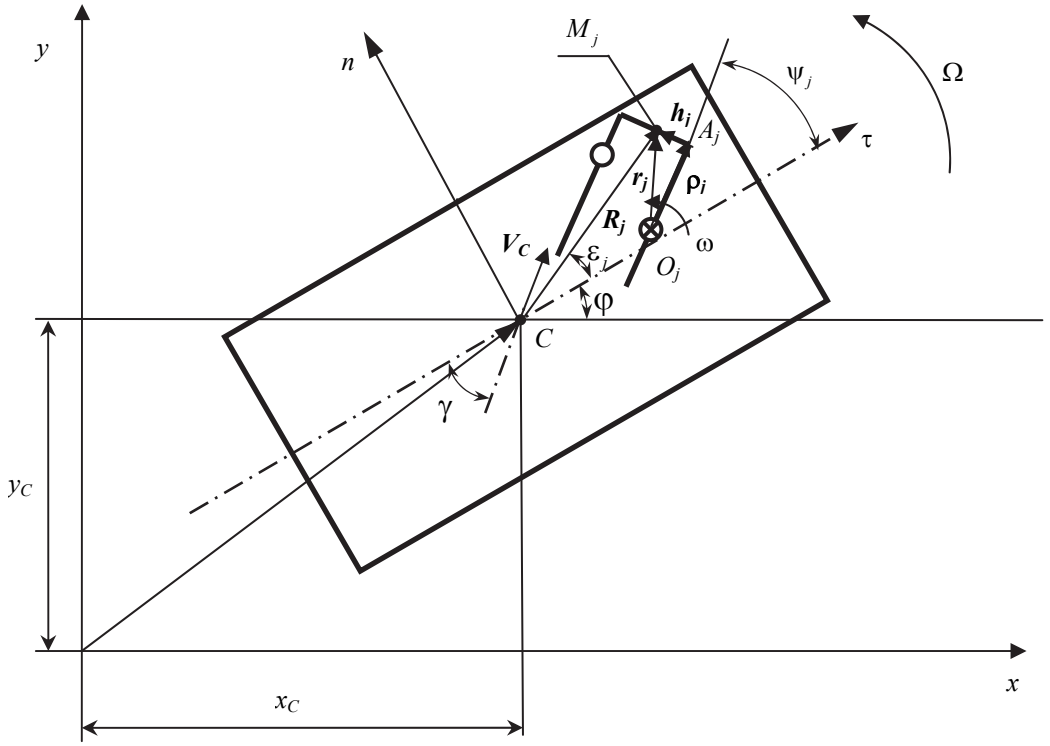


Рис. 7. Расчетная схема кинематики плоскопараллельного движения машины

В качестве независимых обобщенных координат, характеризующих положение движителя, выбираются угол поворота движителя относительно корпуса и перемещение штока привода курсового движения механизма шагания, находящегося в опоре.

Обобщенные координаты рассматриваемой системы могут быть записаны в виде компонент (2*N*+3)-мерного вектора. Количество (2*N*+3) степеней подвижности рассматриваемой механической системы на три меньше числа 2*N* уравнений кинематики движения. Следовательно, необходимо ввести еще три уравнения, описывающих управляющие воздействия на машину. Эти уравнения удобно представить в матричной форме

$$A \times V = U,$$

где *A* — матрица управления размерности 3x(2*N*+3), а *U* — матрица-столбец управляющих воздействий размерности 3, компоненты которого могут быть произвольными функциями времени *t* и обобщенных координат *q*.

В результате получается система 2*N*+3 алгебраических уравнений линейных относительно 2*N*+3 скоростей, которая может быть разрешена одним из известных методов. Последующее решение полученной системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно обобщенных координат осуществляется методами численного интегрирования.

Матричное соотношение соответствует трем линейным относительно компонентов вектора *V* алгебраическим уравнениям. Программные движения, задаваемые такими уравнениями, могут устанавливать законы движения корпуса или отдельных приводов, обеспечивая требуе-

мое движение корпуса, движителей и стоп. Математическая модель позволяет, например, задавать законы движения корпуса и рассчитывать законы управления приводами движителей. Или задавать движение некоторых из приводов и рассчитывать законы движения других приводов и корпуса. Выше сказанное относится только к системе жестко связанных модулей.

В отличие от традиционных наземных транспортных средств, где управление с точки зрения водителя сводится к управлению всего двумя основными параметрами — величиной курсовой скорости и угловой скоростью корпуса машины, в рассматриваемых шагающих машинах требуется управление тремя параметрами: наиболее удобными из возможного набора параметров являются величина и направление скорости некоторого полюса машины, и угловой скорости поворота корпуса.

Разработанный метод позволяет определять законы изменения всех остальных компонент вектора скоростей и уравнения программных движений корпуса машины и приводов.

При этом одной из проблем применения мобильных роботов реконфигурируемой структуры является необходимость не только оценивать положение относительно локальных ориентиров [17], но и проводить постоянную идентификацию состояния робота.

На основе предложенного метода математического моделирования разработана программа [18] имитационного моделирования процесса программного и супервизорного управления движением реконфигурируемого модульного мобильного робота, предназначенная для использования в верхнем уровне системы управления [19]. Программа допускает указание необходимого количества движителей машины, всех конструктивных параметров, элементов матрицы управления A, управляющих воздействий U. В режиме супервизорного управления осуществляется непосредственное изменение значений управляющих воздействий U. Реализована 2D-анимацию с возможностью сохранения промежуточных положений для последующего их изучения, предусмотрен вывод результатов расчетов в виде графиков и табличных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Юревич Е.И.* Управление роботами и робототехническими системами. СПб.: Изд. СПбГПУ, 2001.

2. *Павловский В. Е., Петровская Н. В.* Синтез и исследование алгоритмов управления движением робопоезда в стесненных условиях сложных сред.

3. *Мартыненко Ю.Г., Митрофанов И.Е., Письменная Е.В., Формальский А.М.* О супервизорном управлении мобильной платформой на четырех поворотных колесах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 2. С. 147-157.

4. *Черноусько Ф.Л.* Движение многозвенника по горизонтальной плоскости//ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 1. С. 8-18.

5. *Ion I, A. Marin, A. Curaj, L.* Vladareanu - Desing and Motion Synthesis of Modular Walking Robot MERO, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol.2, no.4, 2008, pg. 25-30.

6. *Брискин, Е.С.* Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г. // Искусственный интеллект. - 2007. - №4. - С. 408-415.

7. *Шаронов, Н.Г.* Синтез алгоритма управления приводом цикловых движителей шагающей машины в особых условиях / Шаронов Н.Г., Калинин Я.В. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 11. - С. 40-43.

8. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

9. Comparative analysis of wheeled and walking machines / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER`2013) : тр. 7-го междунар. симпозиума, Санкт-Петербург, 2-3 окт. 2013 г. / РФФИ, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. - СПб., 2013. - С. 99-107. - Англ.

10. *Калинин, Я.В.* Энергетически эффективные режимы управления приводами при согласованном групповом движении транспортных модулей / Калинин Я.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 12 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 11. - С. 16-19.

11. *Шурыгин, В.А*. Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / Шурыгин В.А., Серов В.А., Шаронов Н.Г. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 41-44.

12. Концепция проектирования шагающих машин / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Фролова Н.Е. // Наука - производству. - 2005. - №1. - С. 33-38.

13. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В. // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - № 9. - С. 27-31.

14. Пат. 2063353 РФ, МПК 6 В 62 D 57/032 Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.; ВолгГТУ. - 1996.

15. *Леонард, А.В*. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 81-85.

16. *Малолетов А.В., Брискин Е.С., Колесов А.М.* О походках реконфигурируемой модульной шагающей маши-

ны с ортогонально-поворотными движителями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 50-55.

17. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми движителями / Брискин Е.С., Жога В.В., Малолетов А.В., Покровский Д.Н., Шаронов Н.Г., Шурыгин В.А. // Искусственный интеллект. - 2007. - №3. - С. 357-366.

18. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614123 от 24 апреля 2013 г. РФ, МПК (нет). Автоматизированная система определения параметров программного и супервизорного управления шагающей машиной со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Леонард А.В.; ВолгГТУ. - 2013.

19. Отработка методов нечеткого управления шагающим роботом «Ортоног» в полевых условиях / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Исследования наукограда. - 2013. - № 2. - С. 43-48.

УДК 62-523.8

А. Е. Гаврилов, Д. В. Голубев, А. С. Даншин

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ПЛАТФОРМА С ШАГАЮЩИМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

В работе рассматривается конструкция роботизированной транспортной платформы, в которой для перемещения используется шагающий ортогональный движитель. Ортогональный движитель в сравнении с другими шагающими движителями имеет ряд преимуществ. Рассматриваются алгоритмы перемещения платформы по местности содержащей препятствия, размеры которых не превышают пределов адаптации робота.

Ключевые слова: ортогональный движитель, мобильный робот, транспортная платформа, закон движения.

A. E. Gavrilov, D. V. Golubev, A. S. Danshin

ROBOTIC TRANSPORT PLATFORM WITH ORTHOGONAL WALKING MOVER

Volgograd State Technical University

Abstract. In this paper the design of robotic transport platform, which is used to move the walking orthogonal mover. Orthogonal mover in comparison with other walking movers has several advantages. The algorithms for moving the platform on terrain containing obstacles whose dimensions do not exceed the limits of adaptation of the robot.

Keywords: ortogonal mover, mobile robot, transport platform, movement law.

Мобильные робототехнические системы применяются для осуществления безопасности работ в зонах опасных для жизни людей [1] и увеличения производительности различных технологических операций по сравнению с производительностью человеческого труда. При проектировании мобильных робототехнических систем невозможно не учитывать специфику условий окружающей среды, в которой в дальнейшем предстоит использовать РТС. Анализируя весь комплекс поставленных практикой задач, представляется возможным разработка базовой конструкции транспортной платформы небольших габаритов и массы, с применением блочно-модульного принципа конструирования [11, 12, 13]. Это позволяет оперативно производить смену технологического оборудования, узлов и механизмов ходовой части и силовой установки для скорейшей адаптации робота к условиям эксплуатации при динамичном изменении внешней среды функционирования и изменении поставленных задач.

Основной проблемой автоматизации при создании мобильных роботов является проблема адаптации робота к особенностям среды функционирования [10]. Мобильные роботы работают в условиях минимальной информации об окружающей среде. Причем эта информация недетерминирована как статически (наличие и расположение препятствий, форма и состояние опорной поверхности), так и динамически (скорость перемещения движущихся препятствий), что затрудняет способность робота выполнять поставленные ему задачи без непосредственного участия человека [2].

Разработкой мобильных роботов, использующих различные способы перемещения, занимаются во многих странах мира. Основными разработчиками и производителями мобильных роботов предназначенных для автономного функционирования являются научные центры США, Испании, Японии, Великобритании, Франции, Италии, Китая, Южной Кореи, Германии и др. Развитие робототехники в развитых зарубежных странах, позволило совершить скачок в развитии производственных техноло-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ проект №12-08-00301-а, №12-01-31398мол_а.

гий. Дальнейшее развитие систем управления движением, систем навигации, систем очувствления роботов и роботизированных изделий позволит совершать дополнительный объем производственных операций без потери качества выполняемых работ. В мире насчитывается большое количество производств где объем производственных операций совершаемый роботами превышает объем работ совершаемых человеком.

Существует необходимость в создании роботизированных платформ для установки различного технологического оборудования для автономного функционирования в условиях опасных для жизни и здоровья человека. Большинство известных мобильных роботов легкого класса имеют гусеничный или колесный движители. Однако существует множество задач, которые с помощью роботов использующих гусеничные и колесные движители решить невозможно.

Разработка перспективных образцов мобильных роботов для применения в условиях чрезвычайных ситуаций наряду с решением ряда приоритетных задач связана, в том числе с созданием нетрадиционных типов движителей и уменьшением их массогабаритных показателей, что обусловлено необходимостью повышения показателей грунтовой и профильной проходимости, для расширения спектра решаемых задач [3].

Применение шагающих движителей в конструкции мобильных роботов позволяет повысить грунтовую и профильную проходимость робота, комфортабельно перемещаться по неровной поверхности, внутри помещений, в узких коридорах, проходить в дверные проемы, двигаться по лестничным маршам, совершать маневрирование в ограниченном пространстве [4].

Мобильные роботы с шагающими движителями могут быть использованы в качестве транспортно-технологических машин. Благодаря высокой маневренности, высокой профильной и опорной проходимости [5], такие роботы могут быть использованы для мониторинга окружающей среды; обнаружения и ликвидации аварий природных и техногенных катастроф; проведения работ по гуманитарному разминированию; проведения работ по осушению заболоченных мест в условиях городской среды, их биологической очистке; выполнения работ в сельском хозяйстве, выполнения различных задач в условиях военных действий, при проведении контртеррористических операций и др. Установка манипулятора на корпусе платформы позволит проводить отбор проб в местах радиоактивного и химического загрязнения, проводить специальные операции.

Конкретное исполнение шагающего движителя и применение различных схем управления движением шагающей машины в большей степени зависят от назначения и ее среды функционирования. Область применения шагающих машин с ортогональным движителем определяется их положительными качествами в сравнении с другими типами шагающих движителей [8,9]. В отличие от большинства кинематических схем шагающих движителей, ортогональный движитель в энергетическом отношении имеет преимущество [6,7], поскольку при перемещении робота использующего такой движитель, как по ровной поверхности, так и при движении по поверхности сложного профиля в режиме адаптации, не затрачивает работу на поддержание собственного веса [6]. Также ортогональный шагающий движитель имеет возможность адаптации к заранее неизвестной опорной поверхности, регулируемую грунтовую и повышенную профильную проходимость.

С целью создания мобильной платформы для размещения технологического оборудования различного назначения спроектирована и изготовлена роботизированная платформа с ортогональным шагающим движителем (рис. 2). Кинематическая схема платформы представлена на рис. 1.

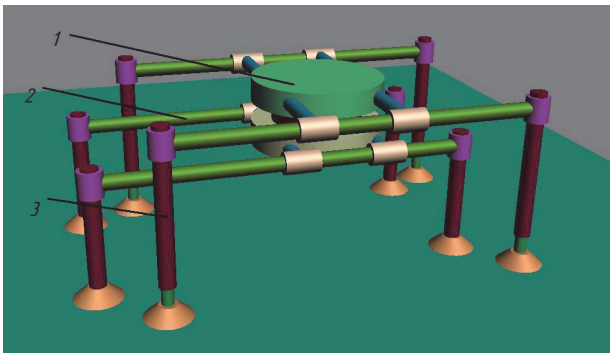


Рис. 1. Кинематическая схема мобильной шагающей платформы:
1 – поворотный корпус, 2 – модуль горизонтального перемещения, 3 – модуль вертикального перемещения (модуль адаптации)

Робот состоит из верхнего корпуса 1, связанного механизмом поворота с нижним корпусом 2. На каждом корпусе смонтированы две пары выдвижных опорных стоек 3, имеющие привод горизонтального перемещения и инди-

видуальный привод адаптации на каждую стойку. Питание осуществляется от аккумуляторных батарей с напряжением 12В.

Робот снабжен сенсорной системой: имеются рефлексные датчики для определения момента касания опорными стойками опорной поверхности; многооборотные потенциометрические датчики, позволяющие определить относительное смещение направляющих путем пересчета сопротивления в угол поворота винта, а угла поворота, в свою очередь, в линейную координату центра масс рамы относительно корпуса; инфракрасные дальномеры для определения расстояния до опорной поверхности; датчики герметичного контакта для защиты двигателя и рам от разрушения в процессе эксплуатации; двухосевой инклинометр для измерения крена и работы системы горизонтирования [15].

Существует множество возможных программных законов движения робота. Робот может двигаться в старт-стопном режиме, при котором операции движения рам и выдвижения, поднятия опорных стоек производятся последовательно. Кинематическая схема позволяет реализовывать алгоритм, при которой корпус робота перемещается непрерывно, а безударная адаптация робота к неровностям опорной поверхности обеспечивается программными законами относительного перемещения его частей [5].

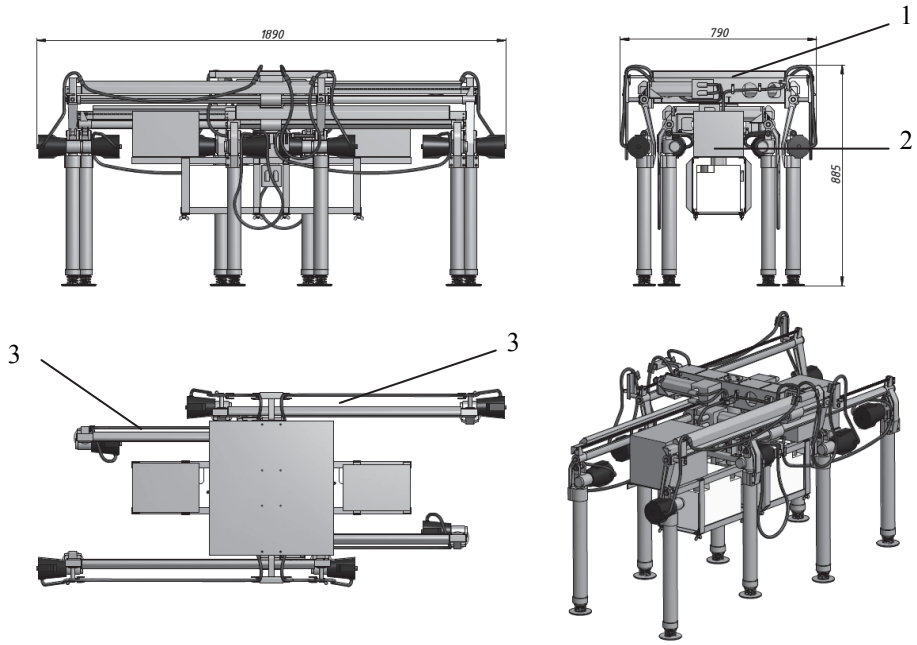


Рис. 2. Роботизированная шагающая платформа с ортогональным движителем:
1- верхний корпус; 2- нижний корпус; 3- пары выдвижных опорных стоек

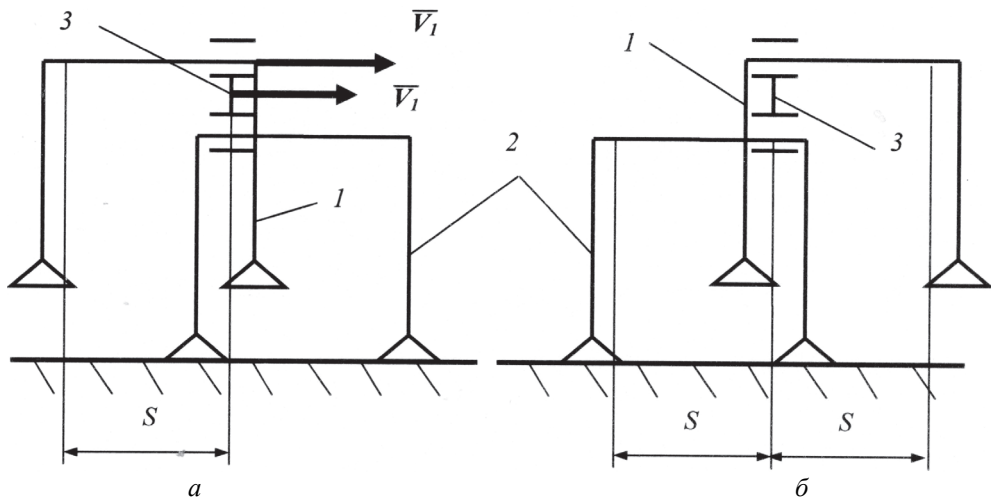


Рис. 3. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 1:
а – начальное положение первой фазы; *б* – конечное положение первой фазы

Рассмотрим некоторые из возможных симметричных походок платформы. К симметричным походкам относятся походки при реализации которых, опорные стойки правого и левого бортов перемещаются по одинаковым законам. Прямолинейное перемещение платформы по местности, не содержащей препятствий соизмеримых с линейными размерами робота, происходит следующим образом. В начальном положении робот находится в состоянии покоя и опирается на четыре опорные стойки рамы 2 (рис. 3, *а*). Опорные стойки рамы 1 подняты на величину равную максимальной высоте препятствия на маршруте движения.

Фаза 1. С помощью приводов горизонтального перемещения корпус 3 перемещается на расстояние *S*, а неопорная рама 1 проходит расстояние *S* относительно корпуса. Окончанию этой фазы соответствует состояние робота (рис. 3, *б*).

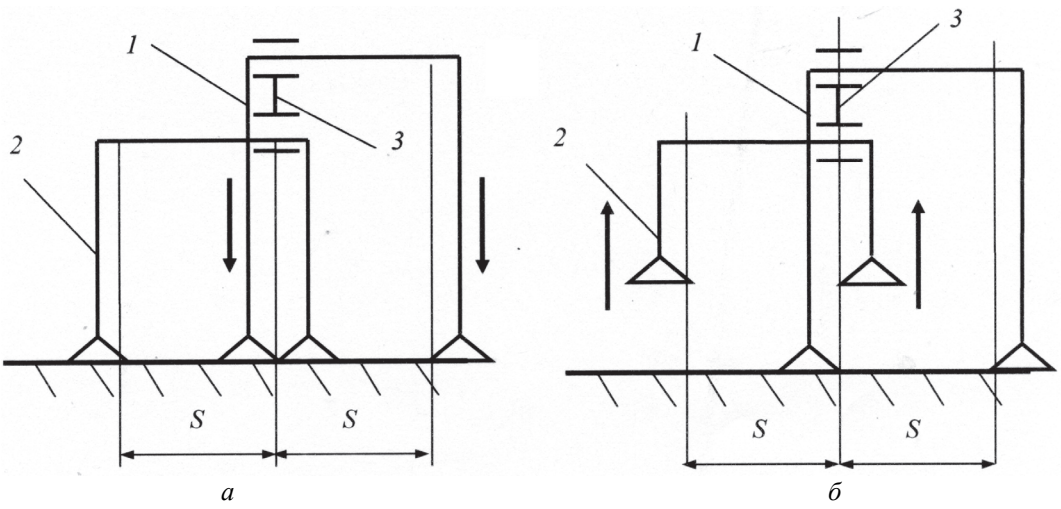


Рис. 4. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 2:
а – начальное положение второй фазы; *б* – конечное положение второй фазы

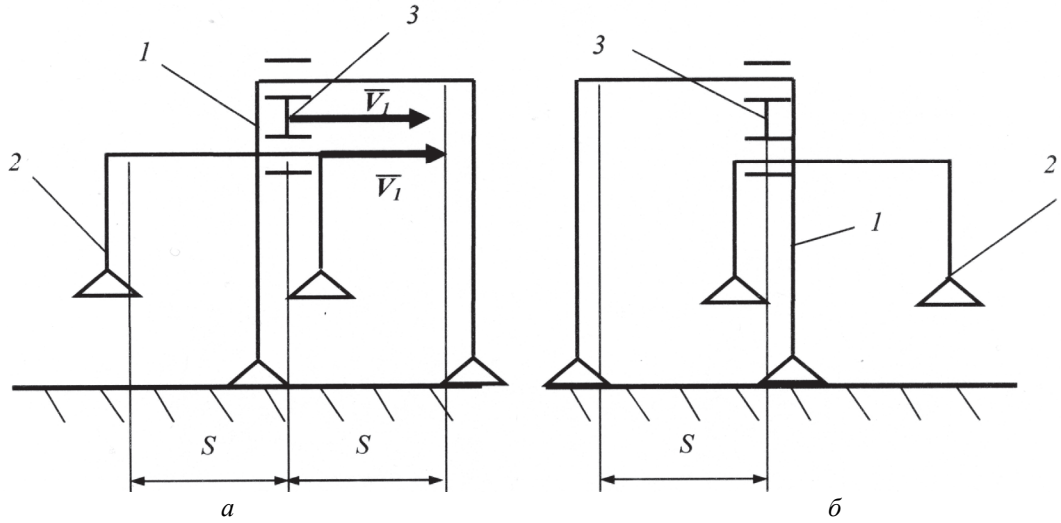


Рис. 5. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 3:
а – начальное положение третьей фазы; *б* – конечное положение третьей фазы

Фаза 2. Стойки неопорной рамы 1 опускаются до касания с опорной поверхностью (рис. 4, *а*), а стойки рамы 2 поднимаются. При этом система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение рам робота (рис. 4, *б*).

Фаза 3. С помощью приводов горизонтального перемещения корпус 3 перемещается на расстояние *S* (рис. 5, *а*) относительно рамы 1, а рама 2 перемещается на расстояние *S* относительно корпуса (рис. 5, *б*).

Фаза 4. Стойки неопорной рамы 2 опуска-

ются до касания с опорной поверхностью (рис. 6, *а)*, а стойки рамы 1 поднимаются до среднего положения, при этом система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение робота. Это состояние (рис. 6, *б*) соответствует начальному положению робота (рис. 3, *а*).

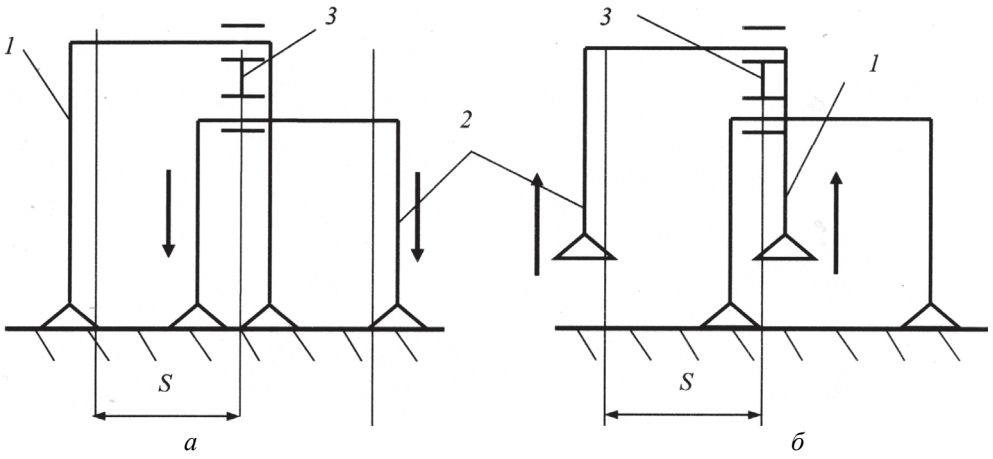


Рис. 6. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 4:
а – начальное положение четвертой фазы; *б* – конечное положение четвертой фазы

Возможны и другие варианты походок [5] с перемещением корпуса на такое же расстояние S за цикл, с поочередным перемещением корпуса и рам робота, которые могут быть востребованы в зависимости от параметров неровностей опорной поверхности и характера решаемых задач.

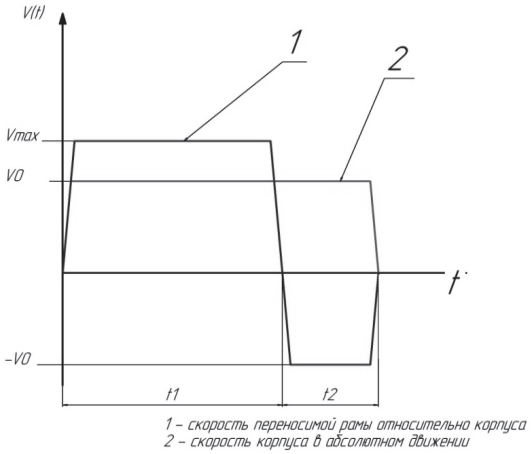


Рис. 7. График скоростей движущихся частей робота при реализации алгоритма перемещения корпуса робота с постоянной скоростью:
1 - скорость переносимой рамы относительно корпуса, 2 – скорость корпуса в абсолютном движении, t_1 – фаза 1 при которой переносимая рама движется с опережением корпуса, t_2 – фаза 2 при которой происходит безударная смена опорных ног, при этом скорость корпуса V_0 остается постоянной

Реализация описанных движений робота может происходить с различными значениями длины шага S, причем она может иметь различные значения для верхней и нижней рамы, что даёт возможность изменять следовую дорожку, меняя длину шага в диапазоне от 0 до S.

Вид графика изменения скорости движущихся частей робота при реализации алгоритма движения с заданной скоростью корпуса представлен на рис. 7.

Скорости перемещения движущихся частей робота обеспечиваются приводами горизонтального перемещения [14].

Перед началом движения по алгоритму обеспечивающему заданную скорость V_2 корпуса, система управления обеспечивает относительное положение элементов его конструкции, при котором корпус 3 робота отстоит от своего крайнего положения относительно опорной рамы в сторону обратному направлению движения на величину Δ и движется с заданной скоростью V_2. Рама 1, не имеющая в данный момент контакта с опорной поверхностью, находится в своем крайнем положении, в направлении обратном направлению движения (рис. 8, *а*).

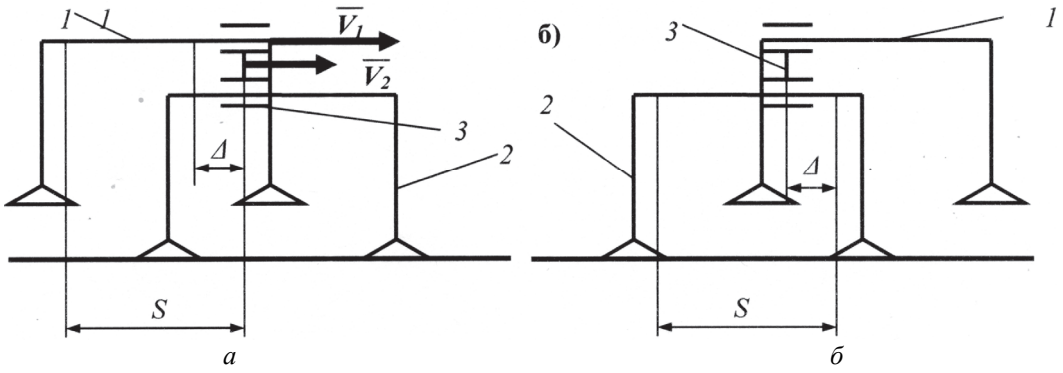


Рис. 8. Фаза 1 – режим непрерывного перемещения корпуса

Фаза 1. Из начального положения (рис. 8, *а*) неопорная рама 1 движется относительно корпуса со скоростью V_1. За время, за которое рама 1 пройдет путь от одного своего крайнего положения до другого, т. е переместится на расстояние S относительно корпуса, корпус 3 в абсолютном движении перемещается на расстояние $[S - 2\Delta]$, как показано на рис. 8, *б*.

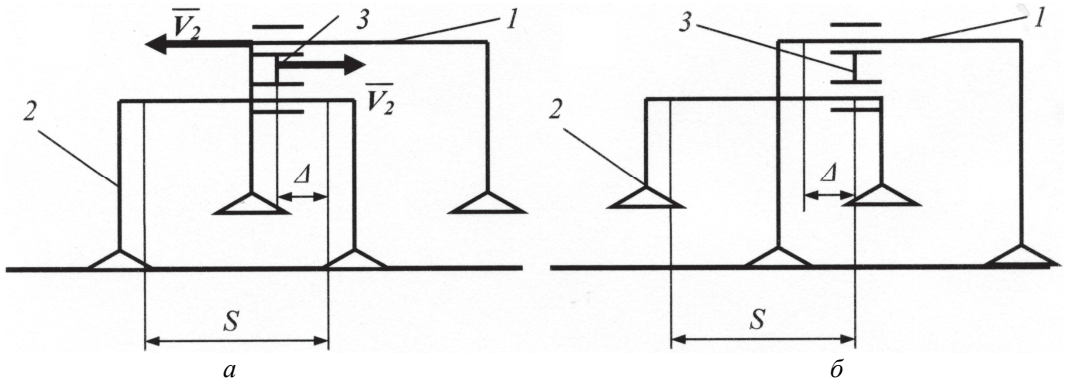


Рис. 9. Фаза 2 – режим непрерывного перемещения корпуса

Фаза 2. Во второй фазе движения (рис. 9), для смены опорных стоек, необходимо обеспечить абсолютную скорость свободной рамы равной нулю. С этой целью в момент t_1 (рис. 9, *а*) достижения свободной рамой своего крайнего положения, включается реверс двигателя продольного перемещения рамы 1, и перемещение осуществляется в обратную сторону с относительной скоростью V_2, равной скорости корпуса. Таким образом абсолютная скорость рамы 1 равна нулю.

Во время прохождения корпусом расстояния Δ, стойки неопорной рамы 1 за время $(t_2\text{-}t_1)$ опускаются до касания с опорной поверхностью, при этом обеспечивается горизонтальное положение робота, а стойки рамы 2 за время $(T\text{-}t_3)$ поднимаются до среднего положения. В интервале времени $(t_3\text{-}t_2)$ стойки обеих рам находятся в опоре т.к. конструкция робота допускает перемещение корпуса по направляющим рам, даже если все опорные стойки обеих рам находятся в контакте с опорной поверхностью.

Фаза 3. В течении этой фазы (рис. 10) неопорная рама 2 движется со скоростью V_1 и проходит путь от одного своего крайнего положения до другого, т.е перемещается на расстояние *S* относительно корпуса 3, сам корпус 3, в относительном движении проходит расстояние $[S - 2\Delta]$. Корпус 3 в этой фазе движения относительно рамы 2 движется со скоростью V_2.

Фаза 4. В четвертой фазе движения (рис. 11), также как и во второй фазе, для смены опорных стоек, обеспечивается равенство нулю абсолютной скорости свободной рамы. Для обеспечения этого условия, достаточно постоянного равенства по модулю скоростей корпуса и свободной рамы, и противоположности их по знаку в одной системе координат (аналогично фазе 2). Стойки неопорной рамы 2 опускаются до касания с опорной поверхностью, а стойки рамы 1 поднимаются до среднего положения, что соответствует начальному относительному положению частей робота. Система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение рам робота.

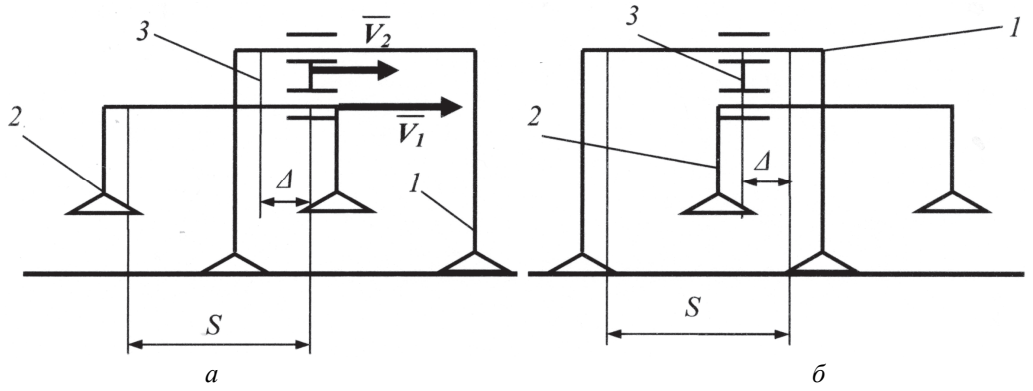


Рис. 10. Фаза 3 – режим непрерывного перемещения корпуса

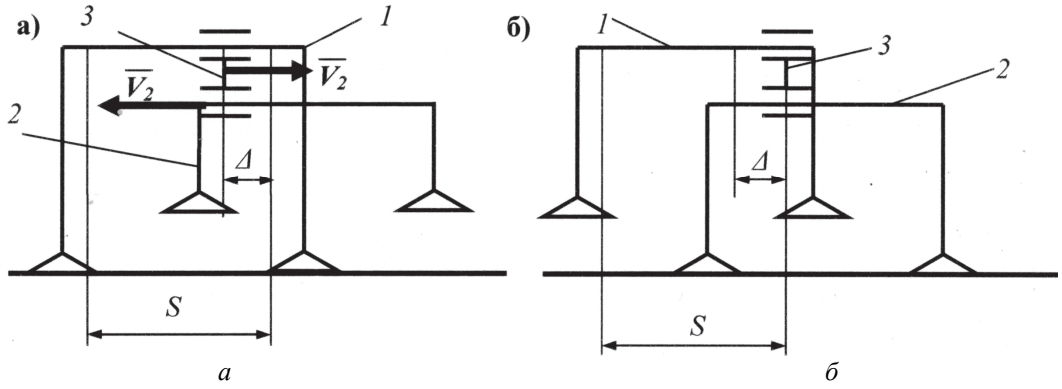


Рис. 11. Фаза 4 – режим непрерывного перемещения корпуса

Положение робота (рис. 11, *б*) идентично начальному положению (рис. 8, *а*). На этом цикл перемещения заканчивается и при дальнейшем перемещении фазы движения повторяются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вечканов В.В., Стекольников А.В.* Проекты разработки ГосИФТП в области создания автономных мобильных роботов малого класса для чрезвычайных ситуаций // Экстремальная робототехника: материалы XI науч.- техн. конф. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 35-45.

2. Сравнительные меры для оценки автономности мобильных роботов / И.Л. Ермолов // Симпозиум по робототехнике и мехатронике-М.: ИПМ РАН, 2008.-с. 86-95.

3. *Батанов А.Ф.* Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. Условия применения и общие технические требования А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин// Симпозиум по робототехнике и мехатронике–М.: ИПМ РАН, 2008.–с. 37-66.

4. Построение программных движений восьминогого робота с ортогональным движителем / В.В. Жога, Е.С. Брискин, А.Е. Гаврилов, В.Е. Павловский // Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. двенадцатой всерос. науч.-практ. конф. (1-3 апр. 2009 г.). В 6 т. Т. 5. Экстремальная робототехника / Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук, НПО спец. материалов. - СПб., 2009. - С. 199-202.

5. *Жога, В.В.* Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В.В. Жога, А.Е. Гаврилов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 22-28.

6. *Гаврилов, А. Е.,* Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, П.В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. - №5.-С. 164-173.

7. *Гаврилов, Ан.Е.* Synthesis of optimal program law for movement of a robot with orthogonal walking drives / Гаврилов Ан.Е., Жога В.В., Федченков П.В. // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2011. - Vol. 50, № 5. - С. 847-857. - Англ.

8. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

9. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

10. Мобильный робототехнический комплекс для гуманитарного разминирования / Брискин Е.С., Жога В.В., Покровский Д.Н., Шурыгин В.А. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2007. - №3. - С. 28-37.

11. *Брискин, Е.С.* Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г. // Искусственный интеллект. - 2007. - №4. - С. 408-415.

12. *Шаронов, Н.Г.* Синтез алгоритма управления приводом цикловых движителей шагающей машины в особых условиях / Шаронов Н.Г., Калинин Я.В. // Изв. ВолгГТУ. Серия

"Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 11. - С. 40-43.

13. *Шурыгин, В.А.* Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / Шурыгин В.А., Серов В.А., Шаронов Н.Г. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 41-44.

14. Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями / Жога В.В., Скакунов В.Н., Филимонов А.В., Голубев Д.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 14-21.

15. Аппаратная реализация бортовой системы управления шагающего робота с ортогональными движителями / Аниськов Р.В., Жога В.В., Еременко А.В., Скакунов В.Н. // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 320.

УДК 631.3-82

А. А. Гончаров, С. Ю. Журилов

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ЦИКЛОВЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ*

Волгоградский государственный технический университет

dvr@vstu.ru

Рассматриваются сельскохозяйственные машины с цикловыми исполнительными механизмами. Синтезируется программное движение привода исполнительных механизмов, обеспечивающее минимум потерь энергии при работе.

Ключевые слова: потери энергии, привод, цикловой механизм, уравнение Эйлера, множитель Лагранжа.

A. A. Goncharov, S. Y. Zhurilov

WAYS TO REDUCE POWER WASTE IN THE DRIVES OF AGRICULTURAL MACHINERY WITH A CYCLE EXECUTING MECHANISM

Volgograd State Technical University

Agricultural machines with cyclic executive mechanisms are considered. Program movement of the drive of the executive mechanisms, providing a minimum of losses of energy during the work is synthesized.

Keywords: energy losses, drive, cyclic mechanism, Euler's equation, Lagrange's multiplier.

Низкая энергетическая эффективность приводов исполнительных механизмов сельскохозяйственных машин является сдерживающим фактором их развития и вызывает огромные непроизводительные потери энергии в масштабах агропромышленного комплекса в целом.

В целом, такими недостатками обладает и созданный в ЗАО "НПО "Европа-Биофарм" опытный образец прицепного устройства для механизированной уборки тыквы с сохранением исходных свойств сырья ЕРКШ.271314.001, разрабатываемый в рамках государственного контракта ГК № 16.522.11.2005 (2012-2.2-522-010-002). Прицепное устройство (рис. 1) служит для механизированной уборки тыквы из предварительно образованных валкообразователем валков агротехнически обоснованной ширины и состоит из трех основных частей: подборочного устройства, транспортировочного узла и выгрузного лотка, находящихся на раме с колесной парой и приводимые гидромоторами МГП-160, питающихся от гидросистемы трактора, агрегатируемого с прицепным устройством. Низкая энергетическая эффективность прицепного устройства обусловлена применением в опытном образце прицепного устройства цепных передач с неуравновешенными ковшами в ковшовом транспортере транспортировочного узла и принципиальной динамической неуравновешенности приводимого от ленточного транспортера главного исполнительного механизма - подборочного устройства, представляющего собой кривошипно-коромысловый механизм.

Мощность двигателя в приводе исполнительных механизмов с неуравновешенными звеньями, пропорциональна кубу скорости для шагающих машин [1, 2] и может быть распространена в рамках исследования по аналогии в силу единых закономерностей структуры потерь энергии на более общие классы цикловых механизмов [3, 4], что значительно ограничивает увеличение скорости работы и производи-

* Работа выполнена в рамках ГК № 16.522.11.2005 (2012-2.2-522-010-002), РФФИ 13-01-97057-р_пов_а

тельности и вызывает значительный потери энергии при работе.

Рис. 1. Общий вид прицепного устройства для механизированной уборки тыквы

Существуют конструктивные способы уменьшения энергозатрат, связанных с периодическим разгоном-торможением неуравновешенных исполнительных механизмов, в том числе за счет изменения структуры механизмов [2] или введения каких-либо рекуператоров [4]. Однако, эти меры приводят к существенному усложнению конструкции машины, увеличению ее массы и снижению КПД приводов. Также эффективность работы рекуператора зависит от скорости движения механизма или машины в целом, что затрудняет его использование при переменных режимах движения.

Для с цикловых механизмов любого рода, в том числе и механизма подборочного устройства опытного образца прицепного устройства правомерна задача определения такого закона изменения относительной горизонтальной скорости конечной точки механизма, при котором мощность, приводного двигателя во время работы, будет минимальна.

Примером машины, для которой может быть поставлена такая задача, является созданное прицепное устройство (ПУ) массой 1,3 т. Для существующего привода плодозахватного механизма данной машины при средней скорости движения ленточного транспортера $V_{ср}$=0,068 м/с максимальное значение реактивной мощности привода, требуемое на поддержание равномерного движения механизма без учета энергозатрат на работу по преодолению сил тяжести и сил сопротивления составляет менее 2,35 Вт, а при скорости 11,5 м/с, характеризующей предельно возможную производительность, требуемая мощность будет превышать 15,9 кВт. При скорости, соответствующей заданной производительности 8 т/ч, мощность привода составляет около 2,8 кВт.

В рамках постановки модельной задачи оценки энергозатрат, по методике предложенной Е.С. Брискиным и Я.В. Калининым [2] механизм представляется системой трех твердых тел (рис. 2): механизма 1, состоящего из кривошипа и шатуна, совершающего рабочий ход и присоединенного к нему противофазно механизма 2, находящегося в переносе, соединенных друг с другом безынерционными обратимыми механизмами (например, клиновыми механизмами свободного хода, работающими синхронно по требуемому закону) 3, выполняющими попеременную раздачу крутящего момента на механизмы и приводимых в движение одним гидромотором МГП-160, что соответствует кинематической схеме ПУ и не может быть распространена на общий случай движителей с большим числом степеней подвижности и/(или) с индивидуальными приводами исполнительных механизмов. Рекуперация энергии происходит следующим образом: в той фазе цикла, когда требуется ускоренное движение переносимого механизма, второй механизм, выполняющий рабочий ход движется замедленно. За счет инерции, момент на ведущем валу второго механизма становится отрицательным, и, при постоянстве момента развиваемого двигателем, момент на ведущем валу первого механизма возрастает. Таким образом, перераспределение кинетической энергии попеременно осуществляется от замедляющегося

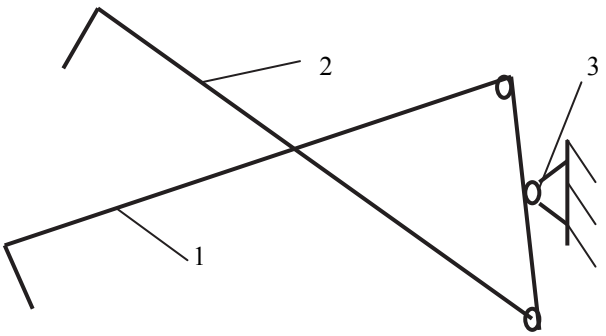


Рис. 2. Кинематическая схема привода плодозахватного механизма:
1 - исполнительный механизм, совершающий рабочий ход; 2 – исполнительный механизм, находящийся в переносе; 3 – безынерционный обратимый раздаточный механизм

механизма к ускоренно движущемуся. Следовательно, при соответствующем выборе параметров механизма и управления им через распределительное устройство можно добиться того, чтобы мощность, развиваемая гидромотором привода оставалась постоянной и была минимальной.

При этом движение механизмов относительно корпуса ПУ должно задаваться таким образом, чтобы в каждый момент времени один механизм совершал рабочий ход, а второй находился в переносе – этим обеспечивается заданная производительность и устойчивость технологического цикла работы ПУ.

Уравнения движения рассматриваемой механической системы, имеющей один общий привод для обоих исполнительных механизмов, как находящегося в рабочей фазе, так и переносимого, включают в себя дифференциальные уравнения движения тел в виде уравнений Лагранжа I рода, уравнения связей, устанавливающие зависимость между перемещением ведущего звена (кривошипа) переносимого исполнительного механизма и механизма, совершающего рабочий ход, и уравнение двигателя (гидромотора) при постоянстве скорости выходного звена при действии постоянной силы сопротивления движению Q (обусловленной сопротивлением движению плодов тыквы вверх по граблине):

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 = \lambda_1 - Q, \\ m\ddot{x}_2 = \lambda_2, \\ x_1 - \Pi_1(\varphi) = 0, \\ x_2 - \Pi_2(\varphi) = 0, \\ L - \lambda_1 \dfrac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi} - \lambda_2 \dfrac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi} = 0; \end{cases} \qquad (1)$$

где M, m – приведенная масса звеньев исполнительного механизма, совершающего рабочий ход и приведенная масса звеньев исполнительного механизма, находящихся в фазе переноса, приведенные к опорной точке (оси крепления кривошипа); x_1, x_2 – горизонтальные координаты конечной точки исполнительного механизма массы M, совершающего рабочий ход и конечной точки переносимого исполнительного механизма массы m, находящегося в фазе переноса; λ_1, λ_2 – неопределенные множители Лагранжа; φ – обобщенная координата приводного двигателя (угол поворота выходного вала), при этом $\dot{\varphi} = \omega = const$; $\Pi_1(\varphi), \Pi_2(\varphi)$ – передаточные функции (функции Вульфсона), определяющие голономные стационарные связи между двигателем и рассматриваемыми телами; L – генерируемая двигателем обобщенная сила (в рассматриваемом случае момент).

Полагая, что необратимые потери мощности W пропорциональны квадрату генерируемой обобщенной силы L, что, например, характерно для двигателей постоянного тока и, с некоторыми оговорками, гидромоторов (в частности примененных гидромоторов МГП-160), а также может распространяться и на другие типы двигателей

$$W = \alpha L^2, \qquad (2)$$

где α – постоянный коэффициент пропорциональности. С учетом того, что

$$\frac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_1, \frac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_2, \qquad (3)$$

после преобразований уравнений (1) имеет место следующее уравнение баланса мощности

$$L\dot{\varphi} = \dot{T} + Q\dot{x}_1. \qquad (4)$$

Для того чтобы минимизировать потери энергии, необходимо обеспечить минимум функционала [2, 4]

$$A = \alpha \int_0^{\tau/2} L^2 dt = \frac{\alpha}{\dot{\varphi}^2} \int_0^{\tau/2} \left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right)^2 dt, \qquad (5)$$

при учете дополнительных, изопериметрических по смыслу, условий

$$\int_0^{\tau/2} \dot{x}_1 dt = S, \int_0^{\tau/2} \dot{x}_2 dt = S, \qquad (6)$$

где S – длина шага механизма шагания, τ – период движения.

Данные условия накладывают требование равенства перемещения за период каждого из механизмов и равенства этих перемещений рабочему ходу механизма.

С учетом (6) функционал (5) можно рассматривать как

$$J = \int_0^{\tau/2} \left[\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right)^2 + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_2 \dot{x}_2 \right] dt, \qquad (7)$$

где μ_1, μ_2 – неопределенные множители Лагранжа.

Тогда уравнения Эйлера-Лагранжа имеют вид:

$$\begin{cases} 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right) m_2 \dot{x}_2 = \mu_2, \\ 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right) m_1 \dot{x}_1 - 2Q\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right) = \mu_1. \end{cases} \qquad (8)$$

При выполнении граничных условий

$$\dot{x}_2(0) = \dot{x}_2\left(\tau/2\right) = \dot{x}_{10}, \dot{x}_1(0) = \dot{x}_1\left(\tau/2\right) = 0, \quad (9)$$

где $\dot{x}_{10}$ – скорость конечных точек исполнительных механизмов в момент смены фаз (переносимый исполнительный механизм начинает совершать рабочий ход и наоборот).

При наложении граничных условий (9) следует $\mu_2 = 0$ и $\mu_1 = -4Q^2\frac{S}{\tau}$.

Поэтому,

$$\ddot{T} + Q\ddot{x}_1 = 0, \quad (10)$$

и остается одно содержательное уравнение

$$\dot{T} + Q\dot{x}_1 = 2Q\frac{S}{\tau} = Q\dot{x}_{1cp}, \quad (11)$$

которое, при $Q = 0$ сводится к известному, например, для шагающих машин результату $\dot{T} = 0$, [5] где $\dot{x}_{1cp}$ – средняя скорость движения конечной точки исполнительного механизма, совершающего рабочий ход. Эта средняя скорость характеризует производительность плодозахватного механизма.

С целью обеспечения минимума ускорения конечной точки исполнительного механизма, взаимодействующего с плодами тыквы, целесообразно принять равноускоренный закон его движения, что обеспечит меньший травматизм плодов

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} \dot{x}_{10} - at, 0 < t < \dfrac{\tau}{4}, \\ \dot{x}_{10} - a\dfrac{\tau}{4} + a\left(t - \dfrac{\tau}{4}\right), \dfrac{\tau}{4} < t < \dfrac{\tau}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Окончательно определяется требуемый закон переноса механизма шагания в относительном движении $x_{2r} = x_2 - x_1 = \Pi_2(\varphi) - \Pi_1(\varphi)$, построенный по уравнению (11) при различных значениях постоянной силы сопротивления. Такой закон будет обеспечивать оптимальную работы привода в целом за счет перераспределения скоростей переносимого исполнительного механизма и исполнительного механизма, совершающего рабочий ход в определенной пропорции, задаваемой законом (11) и ограничением (12). При этом будет выполняться постоянство мгновенной мощности сил инерции и сил сопротивления движению, описываемое уравнением (11) за счет перераспределения кинетической энергии между переносимым и совершающим рабочий ход исполнительными механизмами как физическими маятниками некоей колебательной системы, совершающей вынужденные механические колебания при наличии постоянной силы сопротивления. Уравнением баланса мощности такой колебательной системы служит уравнение (4), при постоянстве и минимальности генерируемого приводным двигателем момента L, достижение чего и являлось задачей исследования по использованной методике.

Полученные результаты задают кинематическую характеристику привода исполнительного механизма, который будет обеспечивать минимум энергозатрат при движении. Наложение массово-геометрических ограничений на исполнительные механизмы задает техническое задание на проектирование его привода, включающего в себя помимо гидромотора и двух исполнительных механизмов главное управляющее звено – раздаточное устройство на основе клинового механизма свободного хода, которое обеспечивает работу привода в соответствии с уравнением (11) при наложении на движение исполнительного механизма, совершающего рабочий ход, условия (12), как наиболее рационального.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е.С. Брискин, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

2. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

3. *Брискин, Е.С.* Энергетическая эффективность цикловых механизмов робототехнических систем / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, В.В. Чернышев // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (часть 2). – С. 69–71.

4. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

5. *Калинин, Я.В.* Оценка энергетической эффективности шагающей машин с цикловыми движителями / Я.В. Калинин // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 12. – С. 40–44.

УДК 62-529

А. С. Дьяков, А. С. Олейников

ДВУХОБЪЕМНАЯ СИСТЕМА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПОДРЕССОРИВАНИЯ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

В статье рассмотрены принципы построения системы управления демпфированием в рессоре с использованием микропроцессора. В работе приводится описание системы, а также метода управления демпфированием, позволяющего использовать различные алгоритмы. На основе разработанной системы управления были проведены эксперименты, показавшие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: система управления, демпфирование, пневматическая рессора, микропроцессор.

A. S. Dyakov, A. S. Oleynikov

TWO-VOLUME SYSTEM OF AIR CUSHIONING WITH MICROPROCESSOR'S CONTROL

Volgograd State Technical University

In article construction's principles of control systems for damping in the air spring using microprocessor are shown. Within the limits of article the description of control system and management method for damping in the air spring are given. On the basis of the developed control system experiments, showed the effectiveness, were conducted.

Keywords: control system, damping, air spring, microprocessor.

Конструкции современных средств виброзащиты включают в себя элементы активного управления параметрами виброзащитного устройства. На базе существующей микропроцессорной техники возможно создание компактных исполнительных устройств активной системы виброзащиты, в которых будут реализованы достаточно сложные алгоритмы управления [1, 3].

В настоящей работе представлена реализация интеллектуального устройства управления жесткостью пневматической подвески автотранспортного средства. Разработка является развитием работы по устройству, описанному в статье [2].

Основными отличиями от описанного ранее устройства являются доработанная структура с используемым более мощным микроконтроллером, два однопроходных клапана вместо одного, а также увеличенный до 20 л. дополнительный объем для пневморессоры – удлиненный полый металлический цилиндр, с которым клапаны соединяют и разъединяют рабочую полость пневморессоры.

Микроконтроллер обеспечивает выборку данных с датчика давления с частотой 100 Гц., а также управление клапанами по заданному алгоритму с последующей передачей текущего состояния виброзащитного устройства (давление и состояний клапанов) на персональный компьютер для визуализации и анализа результатов экспериментов. Параметры алгоритма управления клапаном передаются от персонального компьютера [2].

Основным модулем системы является отладочная плата *STM32VLDISCOVERY*[5], включающая микроконтроллер *STM32F100RB*. Программирование его осуществляется через внутрисхемный *ST-Link* отладчик/программатор. На вывод 1 – первый канал АЦП микропроцессора – подается сигнал с датчика давления в диапазоне от 0 В. до 5 В.

Принципиальная схема модуля управления клапанами приведена на рис. 1. Питание на схему подается от источника постоянного тока 24 В. через стабилизатор напряжения *MC33063A* (*DA2*). Драйвер для управления клапанами построен на основе микросхемы мостового усилителя *L298P*.

На рис. 2 изображена принципиальная схема интерфейса связи с персональным компьютером. Питание 5 В. на вышеуказанную схему подается с одного из выводов отладочной платы. Связь с персональным компьютером осуществляется по интерфейсу *RS-232* на скорости 9600 Бод без аппаратного и программного управления потоком и контроля четности. Асинхронный интерфейс реализуется с помощью встроенного последовательного порта микропроцессора. Микросхема *PL2303*(*DD1*) преобразователя интерфейса *RS-232* в *USB*, включенная по типовой схеме, обеспечивает согласование уровней микроконтроллера и интерфейса *RS-232* по линиям передачи и приема.

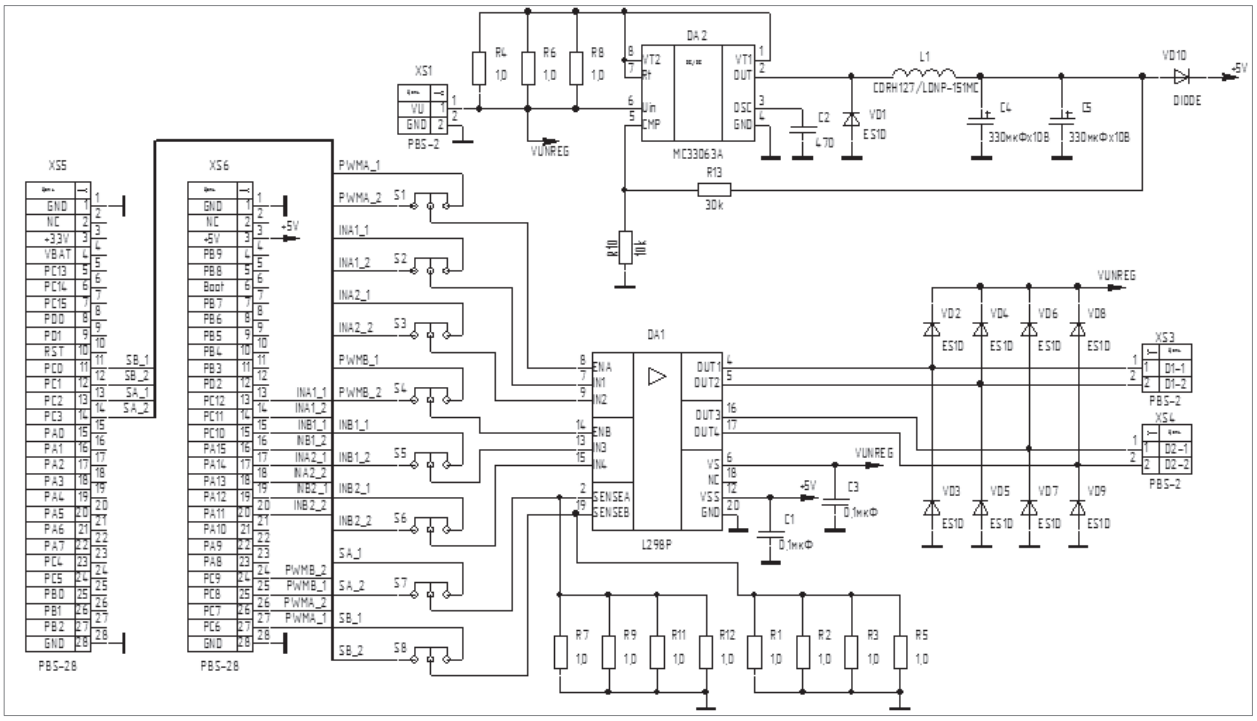


Рис. 1. Принципиальная схема модуля управления клапанами

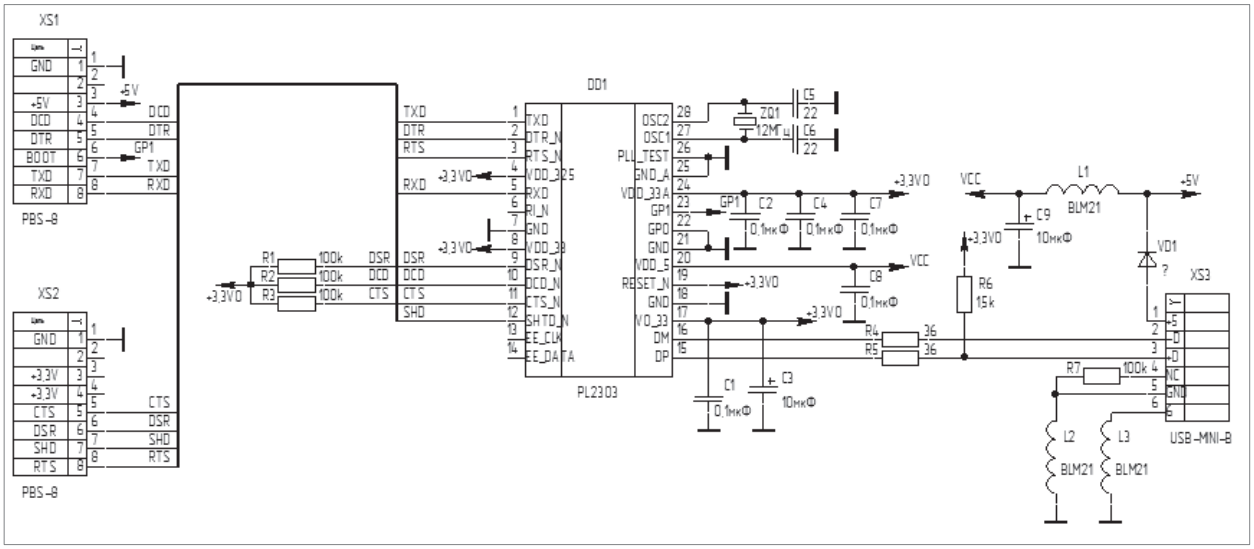


Рис. 2. Принципиальная схема интерфейса связи с персональным компьютером

При проведении экспериментальных исследований разработанной системы использовался описанный ранее[2] алгоритм работы модуля управления клапанами, реализованный в программе микроконтроллера. Он основан на алгоритме «*skyhook*»(«небесный рычаг»)[4] и заключается в перекрытии соединения рабочей полости пневморессоры с дополнительным объемом во время возвращения величины давления после преодоления неровности к среднему значению – при отсутствии движения.

На основе полученных данных при плавном изменении частоты колебаний от нуля до двух Гц. были построены спектры вертикальных ускорений подрессоренной массы. Спектры без алгоритма (с открытыми клапанами) сравниваются со спектрами, полученными при использовании алгоритма. Согласно им применение разработанной системы уменьшает среднеквадратичное отклонение на рабочем интервале частот – 0,8-1,6 Гц. – в среднем на 2,07%.

Также был проведен ряд экспериментов с другими значениями параметров алгоритма, при которых продолжительность этапа спада давления, во время которого клапаны закрыты, была больше. В этом случае среднеквадратическое отклонение (СКО) в среднем уменьшилось на 5,04%.

Также был испробован вариант алгоритма при фиксированной продолжительности этапа спада давления. Производились эксперименты при закрытии клапанов на 0,1 с., 0,2 с и 0,3 с. Согласно полученным результатам СКО при использовании такого варианта алгоритма было уменьшено на 31,51% при продолжительности этапа спада давления 0,1 с., 24,60% при 0,2 с., а при 0,3 с. – увеличено на 6,79%.

На рис. 3 приведены усредненные спектры ускорений подрессоренной массы при открытых клапанах (зеленый график) и при использовании описанного выше варианта алгоритма регулирования жесткости подвески (красный график) при закрытии клапанов на 0,1 с.

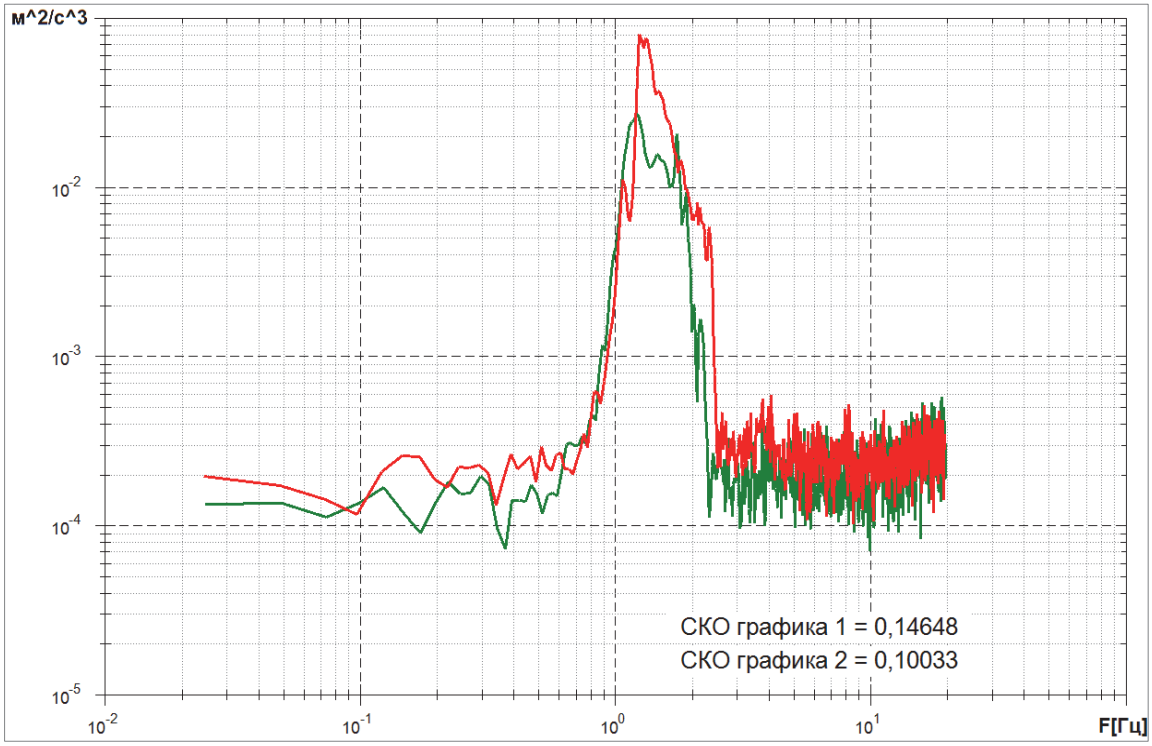


Рис. 3. Спектры ускорений подрессоренной массы. Постоянное время закрытия клапанов 0,1 с.

Для учета разных скоростей движения подрессоренной массы при растяжении и сжатии был испробован доработанный алгоритм, во время работы которого среднее значение давления, относительно которого происходит изменение состояний автомата системы, изменяется на определенный коэффициент. Эксперименты с данной модификацией алгоритма проводились при значениях коэффициента 1,3 и 1,5. Среднеквадратическое отклонение вследствие данных изменений увеличилось в среднем на 4,42% при коэффициенте 1,3 и уменьшилось в среднем на 11,49% при коэффициенте 1,5 по сравнению со среднеквадратическим отклонением при постоянно открытых клапанах.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов можно оформить в сводную таблицу, приведенную ниже.

Сводная таблица результатов экспериментов

Вариант алгоритма	Уменьшение СКО, %
Без модификаций	2,07
Увеличенная продолжительность закрытия клапанов	5,04
Постоянное время закрытия клапанов 0,1 с.	31,51
Постоянное время закрытия клапанов 0,2 с.	24,60
Постоянное время закрытия клапанов 0,3 с.	-6,79
Увеличенное в 1,3 среднее значение давления	-4,42
Увеличенное в 1,5 среднее значение давления	11,49

Основываясь на приведенных итогах можно сделать вывод, что наибольшую эффективность

показал вариант использования постоянного времени закрытия клапанов, причем, на самое меньшее время. Закрытие клапанов на большее время ведет к ухудшению эффекта от применения системы. Однако очевидно, что данная модификация алгоритма не будет показывать таких положительных результатов при несинусоидальных воздействиях.

Отрицательный эффект, продемонстрированный вариантом алгоритма при увеличении среднего значения давления в 1,3, требует дальнейшего изучения. При коэффициенте 1,5 применение системы показало положительный результат.

Таким образом, применение вышеописанного интеллектуального устройства управления жесткостью пневмоподвески при грамотном подборе используемого алгоритма может обеспечивать существенный эффект демпфирования колебаний подрессоренной массы, что обеспечит более комфортное для пассажира движение автомобиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Горобцов, А.С.* Исследование возможностей системы виброзащиты со ступенчато изменяющимися параметрами / А.С. Горобцов // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты: Тез. докл. IV Всесоюз. симпозиума / Ин-т машиноведения им. А.А.Благонравова и др. - М., 1982. - С. 74-75.

2. Пневматический виброподвес с микропроцессорным управлением демпфированием / А.В. Еременко, В.Н. Скакунов, А.С. Дьяков, А.С. Олейников // Известия ВолгГТУ. Серия "Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь". Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 3. - С. 94-100.

3. *Хамитов Р.Н.* Синтез системы управления импульсным электродинамическим клапаном пневмоамортизатора, Справочник. // Инженерный журнал, 2008, №2 – с.62-64

4. *D. Karnopp, M. J. Crosby, and R. A. Harwood*, “Vibration control using the semi-active force generators”, ASME J. Eng. Ind., vol. 96, pp. 619–626, 1974.

5. STM32VLDISCOVERY Discovery kit for STM32F100 Value Line - with STM32F100RB MCU - STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа: http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF250863

УДК 004.3:681.5

В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Еременко, А. А. Кравчук

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

Волгоградский государственный технический университет

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Рассматриваются вопросы построения сенсорных систем шагающих машин, работающих в супервизорном режиме, особенности аппаратной реализации систем управления приводами роботов с ортогональными движителями.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, распределенная система управления, контроллеры-сенсоры, супервизорное управление.

V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, A. V. Eremenko, A. A. Kravchuk

HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE ONBOARD CONTROL SYSTEM FOR THEWALKING ROBOT WITH ORTHOGONAL PROPULSORS

Volgograd State Technical University

The questions of construction of the sensory systems of stepping machines working in the supervisor mode are examined, features of hardware representation of control system by the drives of robots with orthogonal propulsors.

Keywords: the robot with the orthogonal propulsors, the distributed control system, controllers sensors, supervisory management.

Введение

Одно из направлений развития робототехники является использование роботов в технологических процессах сельскохозяйственного производства [1]. Подавляющее большинство мобильных роботов имеют колесный или гусеничный движитель. Однако имеют место эксплуатационные ситуации, когда использование подобных движителей невозможно. Применение шагающих движителей позволяет повысить проходимость робота, перемещаться по лестничным маршам, а также снизить разрушающее воздействие на плодородный слой почвы.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а).

Механическая конструкция робота

На рис. 1 изображена робототехническая система, состоящая из мобильного робота, оснащенного площадкой для размещения технологического оборудования.

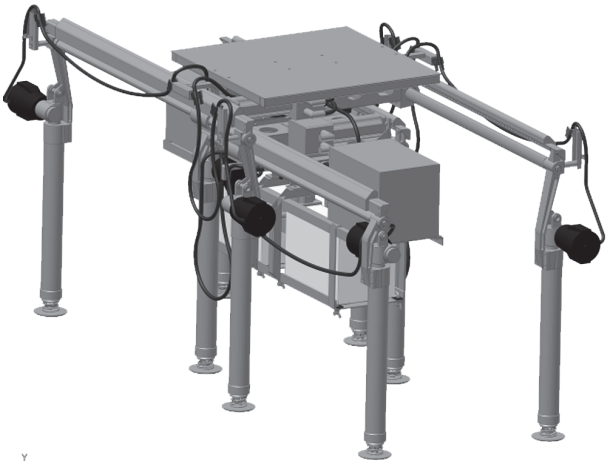


Рис. 1. Конструктивная схема робота

Робот состоит из верхнего корпуса, связанного механизмом поворота с нижним корпусом. С каждой из частей корпуса связаны две пары направляющих, изготовленные в виде шлицевых валов с шариковой гайкой LBST30 DD CL, с ходом 942 мм и 1042 мм, с приводами горизонтального перемещения. В качестве приводов горизонтального перемещения и привода поворота используются приводы изготовленные компанией «Maxon motors» (серводвигатели RTG060-004 и RTG060-100). Каждый из приводов включает в себя серводвигатель, планетарный редуктор, тормоз, датчик положения (энкодер HEDL9140, 500 имп/об). Крутящий момент – 4 Нм; угловая скорость – 425 об/мин. Максимальный момент на валу привода поворота - 34 Нм; угловая скорость на приводном валу - 17 об/мин.

На концах штанг смонтированы приводы вертикальной адаптации робота к опорной поверхности. В качестве привода используются актуаторы CAT33Hx400x4AG1F производства шведской компании «SKF group». Мощность привода опорных стоек 87 Вт; усилие – 500 Н; скорость – 0,174 м/с; ход – 400 мм. Исполнительные механизмы имеют возможность работать независимо друг от друга. Питание робота осуществляется от аккумуляторных батарей общей емкостью 55а/ч, напряжение силовой цепи 24 В.

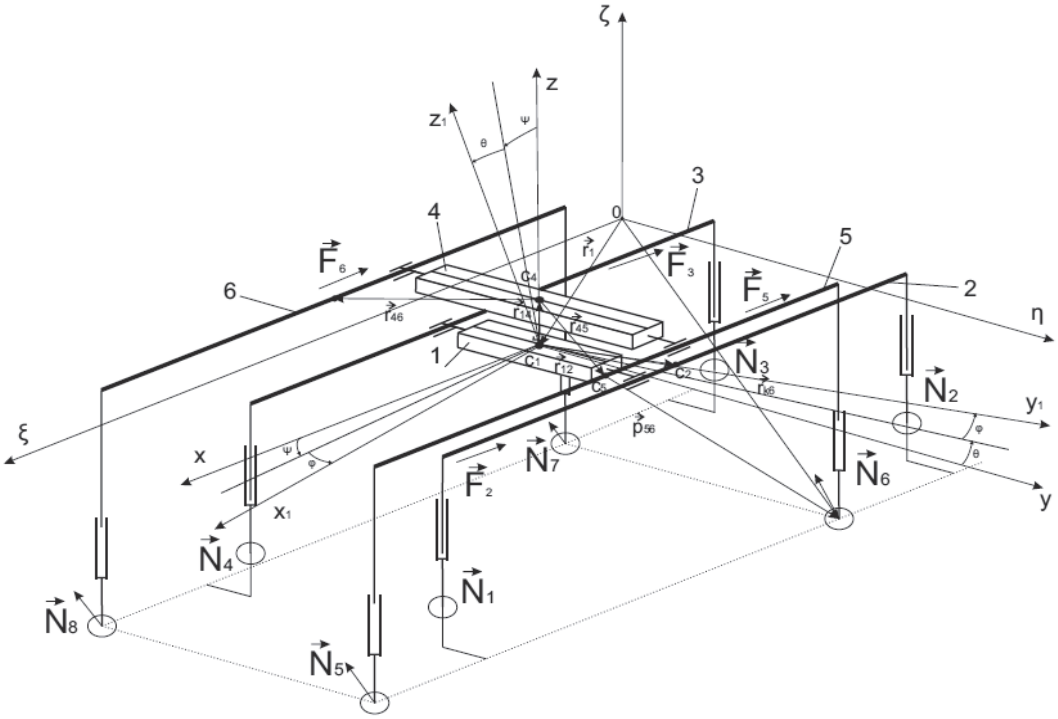


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота

Достоинства выбранной конструкции состоят в надежности механизмов, исполнительные органы которых совершают поступательное движение; достаточности двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетической эффективности, обусловленной отсутствием затрат энергии на

поддержание веса машины и более простых алгоритмах управления траекторией и законом движения опорной точки. Структура и функции блока управления в целом определяются характером программных движений, рассматриваемого шагающего робота.

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, построена на основе расчетной схемы, показанной на рис. 2 [2]. Уравнения движения робота составлены в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Мобильный робот с шагающими движителями, представляет собой сложную мехатронную систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов. Механическая часть представляется в виде шести абсолютно твердых тел массой m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, связанных с приводами перемещения. Рассматривается движение робота относительно неподвижной системы отсчета $O\xi\eta\varsigma$. Оси координат C_1XYZ связаны с центром масс нижней части корпуса и перемещаются поступательно относительно неподвижной системы координат. Положение центра масс определяется радиус - вектором $\vec{r}_1$, вектором скорости $\vec{V}$ и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С каждым из твердых тел связываются подвижные системы координат $C_kX_kY_kZ_k$ $(k=1\div 6)$. Их положения относительно осей C_1XYZ задаются с помощью корабельных углов Эйлера φ, ψ, θ.

Дифференциальные уравнения движения робота в матричной форме имеют вид

$$A\ddot{q} = B(q,\dot{q}) + F(q,\dot{q},t) + N(q,\dot{q}), \qquad (1)$$

где A – 10x10 симметричная матрица коэффициентов инерции; $B(q,\dot{q})$ - матрица столбец слагаемых, зависящих от обобщенных координат и скоростей; $F(q,\dot{q},t)$ - матрица столбец управляющих сил; $N(q,\dot{q})$ - матрица столбец сил реакций опорной поверхности [2].

Проведенные численные исследования позволили сформулировать технические требования к приводам экспериментального образца мобильного робота приведенной конструкции.

Архитектура системы управления шагающим роботом

Разработанная система управления шагающим роботом основана на двухуровневой распределенной архитектуре (рис. 3). На верхнем уровне управление роботом выполняет встроенный компьютер Rigid 772, а нижний уровень включает подсистемы, реализующие функции оценки состояния внешней среды, контроля и управления исполнительными устройствами. В настоящей работе рассматриваются различные подходы к схемной реализации двух основных подсистем: подсистемы управления электроприводами, с учетом особенностей схем управления различных типов линейных двигателей, и сенсорных подсистем, поддерживающих автономный и супервизорный режимы работы робота.

Управление приводами, построенными на двигателях постоянного тока, осуществляется с помощью регулируемого источника напряжения питания. В серводвигателях типа RTG 060-004 и RTG 060-100 функции управления выполняют специализированные контроллеры положения EPOS2 70/10. Контроллеры могут управлять двигателями с датчиками Холла и энкодером при включении в сеть в качестве ведомого устройства, соединенного с ЭВМ верхнего уровня по интерфейсам USB или RS-232. Для управления линейными двигателями CATR(L) 33Hx400x4A1G1F требуются внешние полномостовые усилители, обеспечивающие изменение направления и скорости вращения двигателей постоянного тока. В качестве усилителей для линейных двигателей этого типа используются двухканальные драйверы Dual VNH2SP30-E Motor Driver Carrier MD03A POLOLU, способные отдавать в нагрузку ток до 15А по каждому каналу. На каждой из двух платформ шагающего робота размещены отдельные управляющие контроллеры на базе отладочной платы STM32F3Discovery. Контроллеры реализуют функции управления приводами на нижнем уровне и функции сбора, предобработки и передачи данных от сенсоров робота на встроенный компьютер верхнего уровня. Каждый контроллер управляет 4 линейными приводами вертикальных опор с помощью ШИМ-сигналов и принимает сигналы следящей обратной связи в цифровом или аналоговом виде от линейных приводов и специализированных контроллеров положения. Контроллеры управления приводами по интерфейсу RS-232 принимают прямые команды управления от встроенного компьютера верхнего уровня, реализующего различные алгоритмы передвижения робота [2,4].

Сенсорная подсистема состоит из двух основных частей: управляющего контроллера (плата STM32F3Discovery) и наборов ультразвуко-

вых и инфракрасных датчиков на каждой из подвижных платформ. В качестве дальномеров используются ультразвуковые датчики расстояния MaxSonar-EZ, а для обнаружения препятствий – инфракрасные датчики Sharp GP2Y0A710K0F. Кроме того, в сенсорную подсистему входят датчик геопозиционирования (GPS-приемник Tramble 67415) и элементы системы технического зрения. Особая роль отводится датчиками горизонтирования платформ шагающего робота. Операции, связанные с определением локального положения робота, выполняются с помощью акселерометра, гироскопа и цифрового компаса, встроенных на платах управляющих контроллеров STM32F3-Discovery. Данные с инерциальных датчиков, установленных на управляющих контроллерах, по USB-интерфейсу передаются на встроенный компьютер Rigid 772 для последующей обработки.

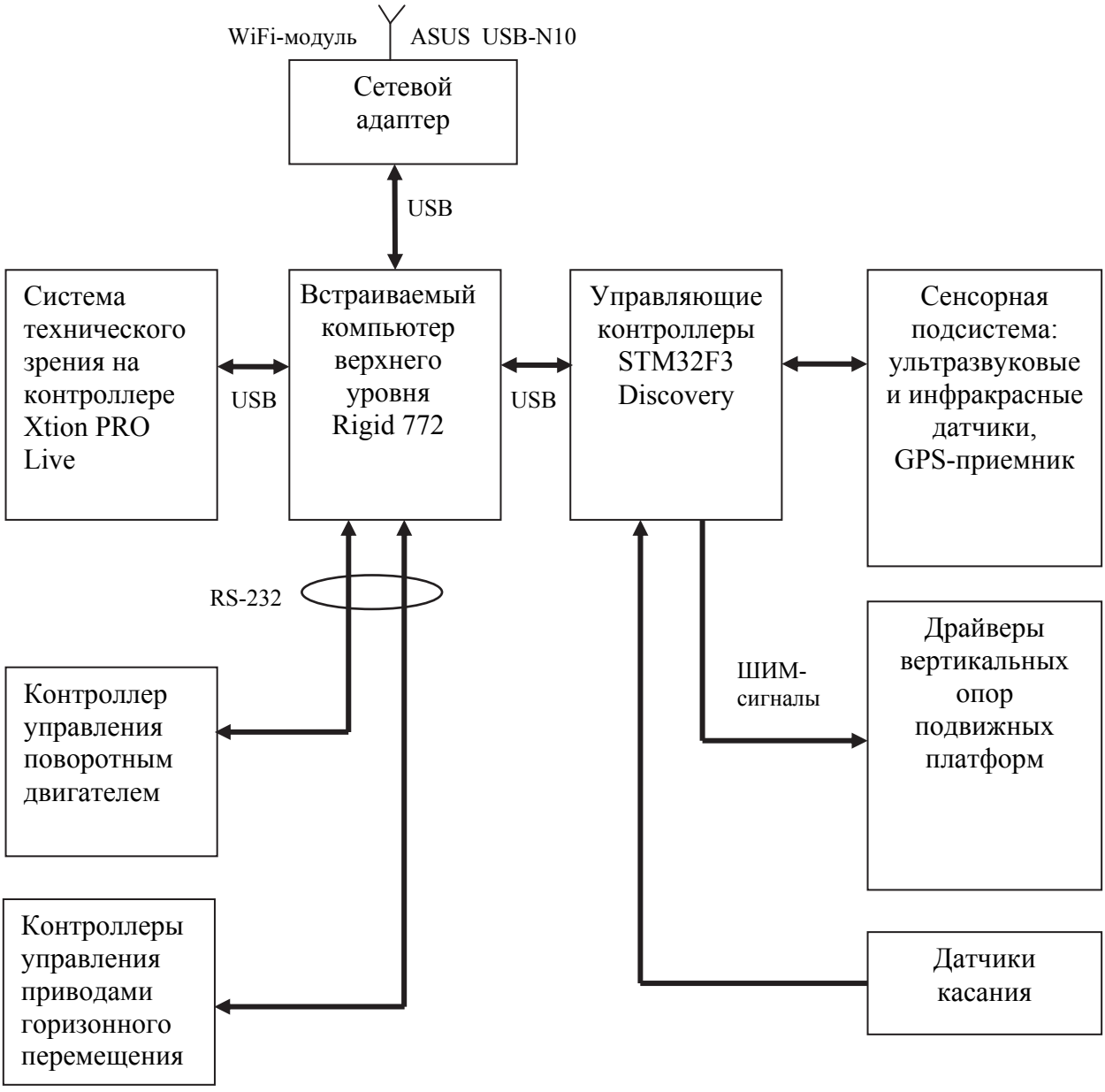


Рис. 3. Структурная схема блока управления шагающим роботом

Разработка системы технического зрения

В системах супервизорного управления анализ данных, определение цели и маршрута движения выполняется человеком, получающим более 80% информации через зрение [3]. В связи с этим при разработке системы технического зрения (СТЗ) использовались наиболее перспективные в настоящее время модифи-

кации времяпролетных камер (технология tof–tine off light). К ним относятся контроллеры MS Kinect и ASUS Xtion Pro Live, близкие по принципу действия и функциональным возможностям. В эти устройства встроены датчики глубины, на основе инфракрасного проектора и КМОП-матрицы, цветная видео камера и микрофонная решетка. Контроллеры позволяют формировать в реальном времени карту глубины пространства и, кроме того, использовать известные алгоритмы обработки изображений, полученных с видеокамер.

В СТЗ на базе контроллера MS Kinect исследовались разработанные алгоритмы разпознавания объектов и препятствий в рабочем пространстве робота [5]. Однако достоверность распознавания образов системой технического зрения сильно зависит от большого набора факторов: освещенности, загороженности сцены рабочего пространства и т.п. Кроме того, обработка изображения требует значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет применение контроллеров этого типа в реальном масштабе времени. Во многих практических случаях поддержка автономного режима становится проблематичной.

Больший интерес представляют возможности СТЗ при реализации дистанционного управления. Для проведения экспериментальных исследований системы технического зрения в качестве прототипа шагающего робота [2] построена модель мобильного робота на колесной платформе (полноприводное шестиколесное шасси Dagu Wild Thumper 6WD) с более простой системой управления приводом на двигателях постоянного тока. Система работает под управлением одноплатного компьютера Raspberry Pi Model B, установленного на борту робота. Преимуществами компьютера Raspberry в данном случае являются миниатюрные габариты и малое энергопотребление. В то же время Raspberry является полноценным компьютером с ARM-процессором и основными портами для подключения устройств (интерфейсы USB, Ethernet, выводы GPIO). Структура разработанной СТЗ показана на рис. 4.

Для получения карт глубины используется времяпролетная камера ASUS Xtion PRO Line. Принцип ее работы таков: встроенный ИК лазер излучает структурированный свет, отражение которого улавливается ИК-камерой. На основе времени, за которое отраженный свет достиг камеры, вычисляется расстояние до точки на объекте внешней сцены. Преимуществами таких камер являются сравнительная дешевизна, они не требуют дополнительной обработки изображения для получения трехмерной картины (в отличие от стереокамер) и сканирования сцены по частям (в отличие от лазерных дальномеров). К недостаткам можно отнести ограничения при получении и обработке данных от близко расположенных объектов (интенсивность отраженного света слишком высока, так как он не рассеян нужным образом) и при работе камеры при дневном свете из-за инфракрасного шума.

Компьютер Raspberry работает под управлением ОС Linux, дистрибутив Raspbian – Debain Wheezy, оптимизированный для архитектуры ARM.

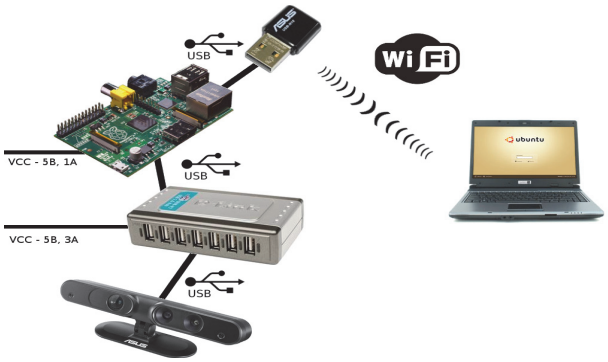
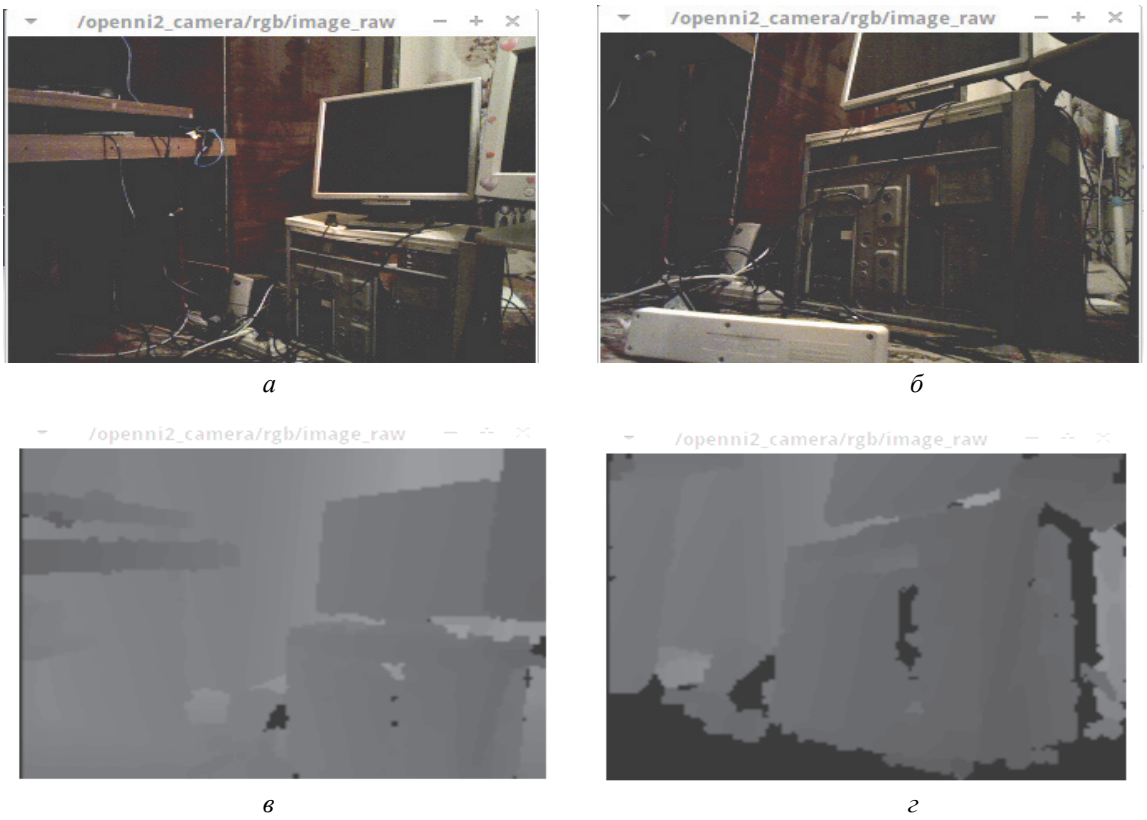


Рис. 4. Структура системы технического зрения

Для работы с ASUS Xtion были установлены драйверы и библиотеки Open NI2, а также надстройка над ОС – система ROS Groovy Galapagos, предоставляющая решения для типичных робототехнических задач. Для работы с изображениями используется библиотека Open CV, имеющая множество функций для обработки изображений, в том числе конвертацию между различными форматами и рисование примитивов. Библиотека была установлена в составе ROS и не требовала дополнительной настройки.

Карты глубины в стандарте Open NI– это изображение, каждый пиксель которого представляется 16-битным беззнаковым целым числом, определяющим дальность до данной точки в миллиметрах. Ноль указывает на отсутствие какой-либо информации о глубине. Для получения расстояния до точки необходимо просто считать значение пикселя по данным координатам. Для визуализации изображение часто нормируют, чтобы получить различаемое изображение. На рис. 5 показаны изображения, полученные от видео- и ИК-камер.



а *б*

в *г*

Рис 5. Примеры работы с камерой Xtion PRO Live:
а, б – обычное изображение, *в, г* – карта глубины

Особенность при работе контроллера Xtion с компьютером Raspberry заключается в необходимости дополнительного питания, которое может быть получено через USB-хаб с внешним источником питания или при прямом подключении к выводам GPIO компьютера Raspberry. Одной из проблем при работе с различными библиотеками на Raspberry является отсутствие многих из них в собраном виде для ARM-процессоров, вызывающее необходимость отслеживания зависимостей и правильности настроек компиляции, а также длительное время самой компиляции, что вынуждает выполнять сборку на более мощной машине в настроенной среде кросс-компиляции.

а *б*

Рис. 6. Интерфейс программы:
а – режим RGB, *б* – режим карты глубины

Технология получения карт глубины (Prime Sense) и разрешение камер у контроллеров Xtion и Kinect одинаковы, также как и драйверы для работы с камерами (Open NI) и программы ROS. Оператор может получить информацию о расстоянии до произвольной точки на изображении, кликнув на нее. Если точка выбрана, то она будет отмечена на изображении, и внизу изображения будет выведены координаты точки и дальность до нее в миллиметрах (рис. 6). Также есть возможность вывода карты глубины вместо обычного изображения, например, в условиях низкой освещенности.

Для управления роботом в супервизорном режиме большое значение имеет точность измерения расстояний. Оценка точности производилась сравнением показаний, полученных при физическом измерении, и данных от камеры для предметов простой формы, которые устанавливались на разном расстоянии от камеры. В качестве действительного было принято значение, полученное физическим измерением. На рис. 7 показаны результаты измерений.

а *б*

Рис. 7. Зависимость погрешности от расстояния:
а – абсолютная погрешность, *б* – относительная погрешность

Заключение

Оценка точности измерения проводилась с целью определения максимального расстояния, на котором ошибка не превышает допустимого значения. Поэтому погрешность измерения глубины в 30 см при расстоянии в 5 метров вполне приемлемая величина, учитывая относительно низкую скорость передвижения шагающего робота. Эти данные согласуются с приведенными в спецификации ASUS Xtion Live Pro, где заявлены рабочие расстояния от 80 см до 350 см при ошибке (3-5)%. Как показали исследования, точность измерения расстояния сильно зависит от степени дневного освещения, в том числе отраженного света, угла отражения от поверхности, до которой измеряется расстояние, и ее прозрачности.

Макетирование отдельных подсистем управления движителей шагающих машин, сенсорных подсистем, системы технического зрения и их экспериментальное исследование показали достаточно высокие эксплуатационные характеристики разработанных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жога В.В.* Система показателей качества шагающих транспортных машин // Справочник. Инженерный журнал. № 5.- М.: Машиностроение, 1997. - С. 21 – 28.

2. *Жога В.В*. Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Филимонов, Д.В. Голубев // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 :межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8. - С. 14 – 22.

3. *Андреев В.П.* Мобильные технологические роботы и тренажеры:интеграционное программное обеспечение группового взаимодействия/В.П. Андреев, К.Б.Кирсанов, А.В. Костин и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. №4.-М. 2013.- С. 74 – 79.

4. *Жога В.В.* Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями/ В.В.Жога, А.Е. Гаврилов, А.В. Еременко // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 6. - С. 28-32.

5. *Быков С.А*. Алгоритм анализа облака трехмерных точек для обработки видеоизображений / С.А. Быков, В.В. Жога, В.Н. Скакунов, В.А. Шурыгин // Экстремальная робототехника : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петер-бург, 25-26 сент. 2012 г. / ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - СПб, 2012. - С. 194-200.

УДК 629.1.03

Я. В. Калинин, С. А. Устинов, Д. В. Шкутан

ЗАДАЧИ ПОИСКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ МАШИН*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

В статье сформулированы актуальные задачи поиска энергетически эффективных алгоритмов движения шагающих роботов с двигателями различных типов, в том числе электрических, гидравлически и двигателей внутреннего сгорания. Обсуждаются пути их решения при наложении различных условий и ограничений. Представлены результаты численного исследования полученных алгоритмов.

Ключевые слова: алгоритмы управления, цикловой движитель, ортогональный движитель, шагающая машина, энергетическая эффективность, вариационные задачи.

Ya. V. Kalinin, S. A. Ustinov, D. V. Schkutan

PROBLEMS OF SEARCH OF ENERGETICALLY EFFECTIVE ALGORITHMS OF WALKING MACHINES MOVEMENT

Volgograd State Technical University

In article actual problems searching of energetically effective movement algorithms of walking robots with engines of various types, including electric, hydraulically and internal combustion engines are formulated. Ways of their decision are discussed when imposing various conditions and restrictions. Presents the results of numerical investigations obtained algorithms.

Keywords: control algorithm, cycle mover, orthogonal mover, walking machine, energy efficiency, variation tasks.

Альтернативные движители для транспортных средств и в первую очередь транспортно-технологических комплексов ведутся со времени появления колеса. Открытые в XIX веке гусеничный и шагающий движители устойчиво заняли свои ниши, причем исследования и разработки в области шагающих движителей и машин на их основе ведутся во всех развитых странах мира. При этом в силу сложности, принципиальной неуравновешенности и низкой энергоэффективности шагающих движителей и их механизмов внедрение шагающих машин и роботов испытывает известные трудности [1, 2]. Несмотря на то, что количество известных образцов машин и роботов измеряется несколькими сотнями, большинство из них представлены лабораторными макетами, не предназначенными для работы в реальных условиях. Всего несколько разработок достигли уровня, при котором их практическое использование уже становится возможным. Среди таких разработок можно назвать машины Plustech (Финляндия), Dante, ASV и BigDog (США), Asimo (Япония), «Кубань», «Восьминог» (Россия) (рис. 1) [3] и новый шагающий робот «Ортоног» (рис. 2), созданный на кафедре "Теоретическая механика" ВолгГТУ совместно с ОАО "ЦКБ "Титан".

Рис. 1. Шагающая машина «Восьминог»

Разработки шагающих машин и роботов также затруднены сложностями практической реализации оптимальных по какому-либо критерию алгоритмов движения. В первую очередь это связано со сложностью взаимосвязей составляющих движения шагающего робота со многими приводами, а также с отсутствием теории оптимального движения шагающих аппаратов. Для применения в различных условиях и выполнения широкого спектра задач, которые могут быть поставлены для шагающих машин и роботов, требуется достижение целого ряда важных параметров движения: энергоэффективность, проходимость и преодоление препят-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ № 12-01-31398 мол_а

ствий, маневренность, ограничение максимальных усилий в приводах, комфортабельность движения (ограничение максимальных ускорений корпуса), безударность постановки опор на грунт в заранее определенных местах и др.

Шагающие роботы с цикловыми движителями достаточно подробно исследованы [1, 2, 3, 4], поставленные задачи энергетической эффективности позволили создать целое направление исследований, в котором получены положительные результаты, теперь эти задачи требуют дальнейшего развития и уточнения: например, развития постановок от однокритериальной оптимизации к многокритериальной, учитывающий не только энергетическую эффективность, но и, например, усилия в приводах, максимальные усилия в шарнирах и звеньях; расширение на прочие типы приводных двигателей, в том числе гидравлические и двигатели внутреннего сгорания.

Так как развитию и более широкому применению шагающих машин препятствует на данный момент несколько факторов, ведущая роль среди которых принадлежит недостаточной энергетической эффективности привода шагания. Проблема увеличения скорости передвижения шагающих машин влечет за собой увеличение необходимой для передвижения мощности двигателя в приводе курсового движения шагающих машин, пиковые значения которой пропорциональны кубу скорости [5]. Такие задачи повышения энергетической эффективности движения за счет изменения законов движения предлагается на базе вариационных методов, когда по поставленному критерию оптимальности находятся требуемые законы перемещения корпуса шагающего робота и движителей.

Для шагающих машин с цикловыми движителями, движущихся без остановки корпуса машины в процессе движения, правомерна постановка задачи определения такого закона изменения относительной горизонтальной скорости опорной точки механизма шагания, при котором мощность, приводного двигателя курсового движения все время движения, будет постоянна и минимальна [1, 6].

При этом в результате решения вариационной задачи получается уравнение, описывающее закономерности изменения кинетической энергии в механической системе корпус робота-переносимый шагающий движитель:

$$\dot{T} + QV_{корпуса} = QV_{ср}, \qquad (1)$$

где T - кинетическая энергия системы, Q - постоянная сила сопротивления движению V - скорость корпуса при движении и средняя скорость движения робота соответственно.

Шагающие роботы с ортогональными движителями являются достаточно новыми и еще мало исследованы. Однако, такие движители перспективны для применения в наземных и подводных транспортно-технологических комплексах, а также для исследования поверхности других планет, они не копируют природу, а создают принципиально другой способ работы элементов движителя между собой. Предложенные профессором Н.В. Умновым относительно недавно ортогональные движители имеют воплощение в нескольких образцах шагающих роботов и макетов и являются базой для перспективных исследований. Набор задач, стоящих перед исследователями ортогональных движителей и роботов на их основе огромен: задачи энергетической эффективности, задачи разработки оптимальных алгоритмов движения, причем под оптимальностью может пониматься очень широкий спектр критериев: максимальные скорости, энергетическая эффективность, минимальные усилия в приводах, условия переступания через препятствия либо условия постановки опор только в определенных зонах и многие другие. Также возможна различная комбинация предложенных критериев.

Подходы и методы решения поставленной задачи основываются на применении положений теоретической механики, мехатроники и робототехники, теории механизмов и машин, математического моделирования, теории оптимизации и теории оптимального управления.

Рис. 2. Шагающий робот "Ортоног"

Основными возможными задачами в таком исследовании шагающих роботов с ортогональными движителями являются:

- исследование работы системы взаимосвязанных приводов курсового движения шагающих роботов;
- разработка критерия оптимальности на основе постановки изопериметрических вариационных задач;
- разработка методов определения потерь энергии в приводах, усилий, комфортабельности, входящих в критерий оптимальности движения шагающих роботов;
- разработка методов определения компромисса между противоречивыми требованиями, накладываемых на работу приводов курсового движения с формированием комплексного критерия оптимальности движения шагающих роботов;
- разработка методов построения оптимальных алгоритмов движения шагающих роботов и их движителей;
- экспериментальная проверка полученных результатов.

Подобные задачи ранее ставились и были решены для шагающей машины с одним управляемым приводом курсового движения («Восьминог», ВолгГТУ). Однако, в общем случае, для шагающих движителей с несколькими управляемыми степенями свободы такая задача ранее не ставилась и не решалась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

2. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

3. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями : монография / Е.С. Брискин [и др.]; под ред. Е.С. Брискина.—М.: Машиностроение, 2009. —192 с.

4. *Брискин, Е.С.* Энергетическая эффективность цикловых механизмов робототехнических систем / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, В.В. Чернышев // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (часть 2). – С. 69–71.

5. *Лапшин, В.В.* Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия АН СССР. МТТ. № 1.— 1993.— С.38–43.

6. *Калинин, Я.В.* Оценка энергетической эффективности шагающей машин с цикловыми движителями / Я.В. Калинин // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 12. – С. 40–44.

УДК 004

В. А. Камаев, А. И. Крыжановский, И. Ю. Никляев, П. С. Пыхтин

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ГУСЕНИЧНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ RRT

Волгоградский государственный технический университет

pavel.pykhtin@gmail.com

В работе описывается модифицированная модель динамики для гусеничного движетеля, а также предложена схема расчета движения с использованием описанной модели для применения ее в алгоритмах семейства RRT.

Ключевые слова: планирование движения, поиск пути, мобильные роботы, RRT, гусеничный движитель.

V. A. Kamaev, A. I. Kryzhanovsky, I. U. Niklyaev, P. S. Pykhtin

PATH PLANNING FOR A MOBILE ROBOT WITH A CATERPILLAR DRIVE TO BE USED WITH RRT ALGORITHM.

Volgograd State Technical University

This article describes modified dynamics model of differential drive and efficient approach to path planning task which utilize benefits of either dynamics and kinematics-only models.

Keywords: Motion planning, math planning, mobile robots, RRT, caterpillar drive.

Введение

Одной из ключевых задач при разработке автономных мобильных роботов является реализация подсистемы управления движением. Данная подсистема отвечает за расчет последовательности состояний (конфигураций) робота, удовлетворяющих всем накладываемым на него ограничениям (отсутствие столкновений с пре-

пятствиями, уравнения кинематики и динамики робота и т. д.), которая бы позволила последовательно перевести робота из начального состояния в целевое.

Эта последовательность может быть задана в явном виде, описывая состояние отдельных узлов робота (координаты робота, углы поворота манипуляторов и т. п.), так и косвенно через последовательность управляющих воздействий.

Основными проблемами, возникающими при решении данной задачи, являются большая размерность пространства конфигураций, вычислительная сложность поиска пересечения объектов в пространстве конфигураций, построение траекторий, удовлетворяющих ограничениям динамики и кинематики.

Постановка задачи

Целью данной работы являлась разработка системы планирования движения для гусеничного мобильного робота. В ее рамках были выделены следующие задачи:

- разработать модель мобильного робота;
- адаптировать модель мобильного робота для использования в алгоритме планирования;
- реализовать подсистему планирования для разработанной модели.

Рассматриваемая модель робота имеет малые габариты (относительно размеров препятствий), что позволяет не учитывать геометрию робота при проверке столкновений с препятствиями, считая его точкой. Для этого карта препятствий дополнительно обрабатывается. Каждое препятствие увеличивается на радиус окружности с центром в точке центра масс и описанной вокруг робота.

Гусеничный привод робота приводится в действие двумя двигателями постоянного тока. Двигатели соединены с ведущим колесом соответствующей гусеницы через редуктор. Управление производится путем изменения напряжения подводимого к двигателям. Таким образом, управляющее воздействие описывается двумя значениями U_1 и U_2, соответствующими напряжениям на правом и левом двигателях.

Результатом работы системы планирования движения является траектория движения робота, а также последовательность управляющих воздействий, которые позволят двигаться по данной траектории. Таким образом, модель робота должна включать в себя как кинематические, так и динамические ограничения.

В качестве алгоритма планирования был выбран алгоритм RRT, так как он имеет более высокую производительность по отношению к PRM алгоритмам при одиночных запросах, а также, в отличие PRM алгоритмов позволяет учитывать на этапе построения дорожной карты динамические ограничения.

Модель

В литературе достаточно хорошо освещена кинематика дифференциального привода для движения на плоскости, описывающая поведение гусеничной платформы. Она описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \qquad (1)$$

где x, y – декартовы координаты робота; θ – угол поворота робота относительно оси X; v – линейная скорость; ω – угловая скорость.

Данная модель может быть применена для планирования с последующей корректировкой, однако, требования, предъявляемые к подсистеме корректировки оказываются весьма высокими, так как она должна сглаживать все недочеты планирования. При этом возрастает вероятность возникновения коллизий с препятствиями. Выходом может стать дополнение модели кинематической модели уравнениями динамики.

За основу в данной работе взяты следующие уравнения, описывающие динамику гусеничной платформы, приводимой в действие двумя двигателями постоянного тока:

$$\begin{aligned} m\frac{dv}{dt} &= \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) - \mu_X mg \\ J\frac{d\omega}{dt} &= \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) - \mu_Y \frac{mgl}{3} \\ L\frac{dI_i}{dt} &= -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d \cdot \omega\right) + U_i,\ i = 1,2, \end{aligned} \qquad (2)$$

где n – передаточное соотношение редуктора; d – расстояние между гусеницами; r – радиус ведущего катка гусеницы; μ_X – коэфициент продольного трения; μ_Y – коэффициент поперечного трения; J – момент инерции относительно вертикальной оси; L – индуктивность обмотки двигателя; c_e – постоянная ЭДС двигателя; c – постоянная момента двигателя; l – длина гусеницы; R – сопротивление обмотки двигателя; I_i –

токи в обмотке двигателей; U_i – напряжения, подводимые к двигателям платформы.

Численное решение

Данные уравнения описывают случай движения с положительными угловой и линейной скоростями. Для того чтобы расширить эти уравнения на другие случаи движения, введем дополнительные множители k_v и k_ω. Уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}
&m\frac{dv}{dt} = \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) - k_v \mu_X mg \\
&J\frac{d\omega}{dt} = \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) - k_\omega \mu_Y \frac{mgl}{3} \\
&L\frac{dI_i}{dt} = -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d\cdot\omega\right) + U_i,\ i = 1,2 \\
&k_v = \operatorname{sgn}(v) \\
&k_\omega = \operatorname{sgn}(\omega)
\end{aligned} \tag{3}$$

Численное решение этих уравнений оказывается неустойчивым в случае если скорости (угловая или линейная) оказываются близкими к 0, тяга двигателей направлена против сил трения, и усилие, развиваемое двигателями, меньше сил трения. При этом возникает ситуация, когда на интервале интегрирования направление сил трения успевает измениться вследствие изменения направления движения под действием самих сил трения.

Чтобы обойти эту проблему, нами было предложено использовать для описанного случая упрощенную модель. В этом случае получаем:

$$\begin{aligned}
&F_{mp} = -k_v \mu_X mg \\
&F_m = \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) \\
&M_m = \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) \\
&M_{mp} = -k_\omega \mu_Y \frac{mg}{3} \\
&m\frac{dv}{dt} = \begin{cases} F_T + F_{TP} \ \textit{при}\ |F_T| \ge |F_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(F_T) \ne \operatorname{sgn}(F_{TP}) \\ -C_v \ \textit{при}\ |F_T| < |F_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(F_T) = \operatorname{sgn}(F_{TP}) \end{cases} \\
&J\frac{d\omega}{dt} = \begin{cases} M_T + M_{TP} \ \textit{при}\ |M_T| \ge |M_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(M_T) \ne \operatorname{sgn}(M_{TP}) \\ -C_\omega \ \textit{при}\ |M_T| < |M_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(M_T) = \operatorname{sgn}(M_{TP}) \end{cases} \\
&L\frac{dI_i}{dt} = -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d\cdot\omega\right) + U_i,\ i = 1,2 \\
&k_v = \operatorname{sgn}(v) \\
&k_\omega = \operatorname{sgn}(\omega)
\end{aligned} \tag{4}$$

Данная упрощенная модель позволяет найти решение в случае, когда решение полной системы неустойчиво; в остальных случаях получаемое решение соответствует решению полной версии уравнений (3).

Применение к RRT

Алгоритм RRT хорошо зарекомендовал себя при решении задач планирования движения. Этот алгоритм позволяет построить дорожную карту, равномерно покрывающую исследуемую

область. Он включает в себя следующие шаги:

1. Выбрать конфигурацию C_n.

2. Найти в дереве T конфигурацию C_i, ближайшую к C_n.

3. Построить путь $P_{i,n}$ от C_i к C_n.

4. Проверить на наличие коллизий путь $P_{i,n}$.

5. Если коллизии не были найдены, добавить C_n и $P_{i,n}$ в дерево T.

6. Если C_n не является целевой конфигурацией, перейти к шагу 1.

Решая описанные ранее уравнения кинематики и динамики, мы можем получить траекторию движения робота. Полученная траектория может быть использована для проверки коллизий. Наиболее простым, с точки зрения вычислительной сложности, является расчет траектории на основе одних лишь уравнений кинематики.

Очевидно, что полученные таким образом траектории будут отличаться от реального поведения объекта. Возникающая при этом ошибка будет расти по мере удаления от начальной точки, что может привести к планированию некорректных путей, которые будут недоступны для реального объекта. На рисунке представлены деревья путей сгенерированные по уравнениям кинематики и уравнениям динамики для одинаковых управляющих воздействий. В ряде случаев возникает ситуация, когда управляющие воздействия, рассчитанные на основе траектории движения, предсказанной кинематической моделью, приводят к столкновению после применения динамических ограничений.

Решением этой проблемы может служить дополнение кинематической модели уравнениями динамики. При наличии достаточно точной модели динамики вероятность коллизий при движении по проложенному пути существенно снижается. В тоже расчет дополненной модели требует больших вычислительных ресурсов.

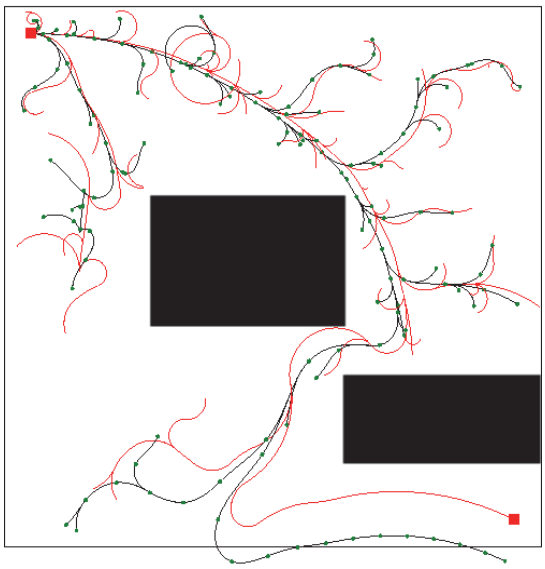
Одним из этапов построения траектории является поиск управляющих воздействий, которые, будучи примененными, позволят достигнуть выбранной на данном шаге конфигурации C_n из исходной конфигурации C_i. Они могут быть найдены минимизацией функции ошибки между полученной конечной конфигурацией C_n' и выбранной C_n, что предполагает многократный расчет траектории. Зачастую это нереализуемо на практике, особенно в случае мобильного робота, когда накладываются жесткие ограничения на энергопотребление, габариты и вес компонентов.

Обойти это ограничение можно, используя для поиска значений управляющих напряжений уравнения для установившегося режима. В этом случае в процессе оптимизации участвуют только уравнения кинематики, что существенно снижает вычислительную сложность задачи.

В качестве функции ошибки была выбрана следующая функция:

$$E(\omega, v) = \left| C_n - K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right) \right|, \qquad (5)$$

где $K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right)$ – функция, описывающая кинематику системы в установившемся режиме.



Траектория движения, рассчитанная с учетом кинематических (красная линия) и кинодинамических (черная) ограничений

Данная функция ошибки имеет большое количество локальных минимумов, что осложняет ее численную минимизацию. Однако, в рассматриваемом случае движения с постоянными линейной и угловой скоростями оптимальная траектория представляет собой дугу окружности. Локальные минимумы образуются при полном обороте по этой окружности. Для того чтобы избежать этого немного изменим ее вид:

$$E(\omega, v) = \frac{\left| C_n - K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right) \right|}{\left| C_n - C_i \right|} + \tau \frac{|\omega|}{\pi}, \qquad (6)$$

где τ – интервал времени, на котором происходит движение. Первое слагаемое принимает значения от 0 до 1. Второе слагаемое превышает значение 1 для всех решений, полученных при повороте более чем на 180 градусов.

Минимизируя данную функцию ошибки, получаем значения скоростей. Далее мы можем использовать эти значения в уравнениях динамики в установившемся режиме.

Найденные таким образом значения управляющих воздействий могут быть использованы для численного интегрирования исходной модели и нахождения описываемого ею пути от C_i к C'_n. Итоговая конфигурация C'_n, полученная таким образом, будет отличаться от исходной конфигурации C_n, однако, алгоритм RRT не требует детерминированного выбора новых конфигураций и допускает случайный выбор.

Для того чтобы оценить эффективность предложенного метода расчета, был проведен ряд экспериментов. Для сравнения были взяты реализации метода расчета траектории на основе уравнений кинематики (управляющие воздействия и траектория движения робота рассчитываются по уравнениям кинематики модели) и метода расчета на основе уравнений динамики (управляющее воздействие и траектория движения находятся путем решения уравнений динамики модели).

Усредненные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение среднего значения времени, затрачиваемого на поиск пути различными алгоритмами

Метод расчета	Время расчета, мс
Расчет на базе уравнений кинематики	0,15
Расчет на базе уравнений динамики	536,15
Предложенный метод расчета	25,78

Как видно из представленных результатов, предложенный метод расчета существенно уступает в производительности расчету траектории на основе только лишь уравнений кинематики. Однако, он существенно превосходит по тому же показателю метод расчета с использованием уравнений динамики. При этом предложенный метод обладает главным преимуществом расчета на основе уравнений динамики – генерируемые траектории более точно описывают движение моделируемого объекта, что позволяет избежать планирования путей, которые не могут быть реализованы на практике.

Также нами были проведены эксперименты для сравнения эффективности описанных методов. Результаты, представленные в табл. 2, говорят о том, что способ расчета траектории не влияет на число итераций поиска.

Таблица 2

Сравнение среднего количества итераций, необходимого для нахождения пути при использовании различных алгоритмов

Метод расчета	Среднее количество итераций
Расчет на базе уравнений кинематики	2541,6
Предложенный метод расчета	2548,6

Выводы

В данной статье описана дополненная модель динамики гусеничной платформы, которая может быть использована для всех случаев движения без продольного проскальзывания гусениц. Был проведен ряд вычислительных экспериментов с целью рассмотрения поведения модели в характерных ситуациях, в ходе которых были получены результаты непротиворечащие поведению реального объекта.

Предложенный в данной статье метод расчета траектории показал более высокую производительность по отношению к классическому методу расчета, использующему уравнения динамики системы. Вычислительная сложность описываемого метода оказалась выше таковой для метода расчета с использованием уравнений кинематики. Однако, было продемонстрировано, что траектории движения, описываемые кинематической моделью, могут не соответствовать реальным траекториям, получаемым с учетом динамики системы. Что может приводить к генерации некорректных путей, содержащих коллизии с препятствиями.

В дальнейшем предполагается сравнение поведения модели с поведением моделируемого объекта, а также ее апробация в задаче поиска пути мобильным роботом на гусеничной платформе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кабанов А.А.* Моделирование и управление движением гусеничного мобильного робота // Управление в технических, эргатехнических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС-2012. С. 740

2. *Матяш С.П.* Теория трактора и автомобиля: Краткий курс лекций / С.П. Матяш, П.И. Федюнин, С.П. Сальников. – Новосибирск: НГАУ, 2010. – 83 с.

3. *Михайлов, В.К.* Принцип построения алгоритма управления состоянием линейных инерционных объектов / В. К. Михайлов, И.А. Плешаков // Известия Волгоград-

ского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.14). – С. 36-41.

4. *Americo C.* Human-Automation Collaborative RRT for UAV Mission Path Planning [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/ papers/ americoThesis.pdf

5. *Bruce J.* Real-Time Randomized Path Planning for Robot Navigation [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: http://www.cs.cmu.edu/~mmv/papers/02iros-rrt.pdf

6. *Lambert A.* Path Planning using a Dynamic Vehicle Model [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: http://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/reading/rosssiddpresentation.pdf

УДК 621.865.8

М. М. Князьков, Е. А. Семенов

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ*

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),
Россия, 119526, г. Москва, пр. Вернадского 101-1, тел. (495) 433-77-66,
IPM_LabRobotics@mail.ru

Рассматриваются моменты и силы возникающие при движении инспекционной робототехнической системы по вертикальной поверхности. Рассмотрена структурная схема и принцип работы робототехнической системы вертикального перемещения.

Инспекционная робототехническая система состоит из модулей построенных на базе транспортного робота вертикального перемещения, технологической платформы, на которой установлено измерительное и инспекционное оборудование и подсистемы управления движением и измерениями. Настоящий технологический комплекс является одним из основных компонентов проекта по созданию комплексной системы диагностики, суть которой заключается в комплексном подходе к инспектированию и освидетельствованию объектов.

Комплексная система диагностики объединяет целый ряд разно ориентированных программно-технических средств, в том числе: систему передвижения технологического оборудования по поверхности объекта исследования, управление различными типами измерений, сохранение полученной информации и доступ к ней программ для работы с информацией, совместимость протоколов доступа программ, управление программами обработки, доступ к полученной отчетной информации и наконец, хранение информации и отчетов в формате удобном для последующего использования.

Ключевые слова: инспекционные робототехнические системы, диагностика, роботы вертикального перемещения, программное управление.

M. M. Knyazkov, E. A. Semenov

DIAGNOSTIC ROBOTIC COMPLEX OF VERTICAL MOVEMENT

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

The moments and forces arising in the motion of an inspection robotic system on a vertical surface are considered. The structural schematic and the principle of work of the robotic system for vertical motion are discussed.

The inspection robotic system consists of modules constructed on the basis of a wall-climbing transport robot and a technological platform on which both the measuring inspection equipment and subsystems for motion and measurement control are mounted. The technological complex under consideration is one of the basic components of the project on the creation of a complex diagnostic system, the essential distinctive feature of which consists in the complex approach to the inspection of objects.

The complex inspection system combines a number of variously oriented hardware and software components that provide the motion of the technological equipment along the surfaces of the object to be inspected, the control of various types of measurements, saving of the primary information and access of the processing programs to it, the compatibility of the access protocols, the control of the processing programs, the access to the report and, finally, the storage of the information and reports in a format convenient for the subsequent use.

Keywords: inspection robotic system, wall-climbing robot, programmed control.

1. Структурная схема робототехнической системы и принцип работы

Структура робототехнической системы проектировалась на принципах открытой модульности. В зависимости от решаемых технологических задач, его структура может изменяться при сохранении принципа модульного подхода к построению структуры в целом [1-3].

Инфраструктура робототехнической системы включает следующие базовые модули (рис. 1):

* Работа выполнена при финансовой поддержке Грантов РФФИ № 12-08-00374-а и №11-01-92002-ННС_а.

транспортный (5,6), технологический (4,7) и управляющий (3), а также сервисные подсистемы: коммуникационную, энергопитания (1,2) и безопасной эксплуатации (8).

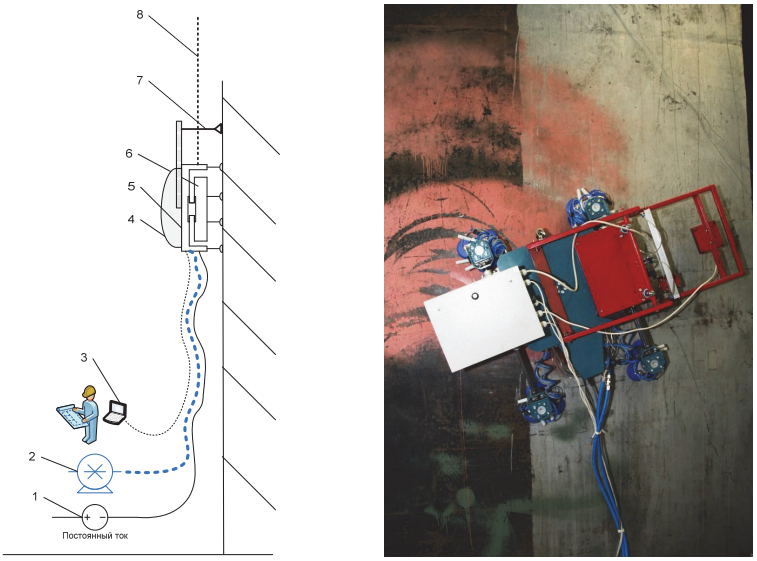


Рис. 1. Компоненты модульной структуры робототехнической системы

Назначение компонент инспекционной робототехнической системы:

• **Транспортный модуль** обеспечивает сцепление и движение робота по поверхности перемещения. Система приводов транспортного модуля осуществляет движение платформ, подъем – опускание схватов, фиксацию схватов на поверхности перемещения во время движения робота и выполнения технологических операций.

• **Технологический модуль** обеспечивает работу измерительных процедур, синхронизацию измерений с движением транспортного модуля, а также организует необходимый контакт и траекторию движения измерительного оборудования относительно поверхности перемещения.

• **Консоль управления** представляет собой набор операторских пультов для управления движением и выполнением технологических операций.

Принцип работы:

Операционный процесс начинается с установки робототехнической системы в начальную позицию на поверхности перемещения, для этого робототехническая система поднимается и прижимается к поверхности. На электропневматическую подсистему подается электропитание и воздух, что обеспечивает сцепление робототехнической системы с поверхностью. После проверки состояния сцепления, робототехническая система готова к выполнению команд оператора. Оператор с консоли дает команду на начало движения и выводит робототехническую систему в рабочую зоны на поверхности объекта, далее может дать команду на выполнение измерений или продолжить маневр.

Для окончания работы, робототехническую систему перемещают в начальную позицию и прекращают подачу воздуха. Робототехническая система теряет сцепление с поверхностью и после отключения питания готов к транспортировке.

2. Алгоритм работы робототехнического комплекса

Технологическое оборудование входит в состав технологического модуля и крепится на верхней части транспортного модуля. Технологический модуль состоит из двух основных узлов: электромонтажного шкафа и пантографов с датчиками измерительной подсистемы.

Рабочее давление пневмоцилиндров составляет от 2,5 до 10бар, усилие в режиме втягивание/выдвижение до 500н. Продвижение измерительного датчика по поверхности объекта обеспечивает линейный пневмопривод. Использование линейного пневмопривода позволяет получить непрерывные линейные, до 30 см, измерения участка поверхности, в месте проведения измерений.

На пантографе устанавливаются датчики измерительного оборудования, фотокамеры для проведения визуального контроля поверхности. На рис. 3 показаны установленные на пантографе датчик структуроскопа и толщиномера на линейном приводе.

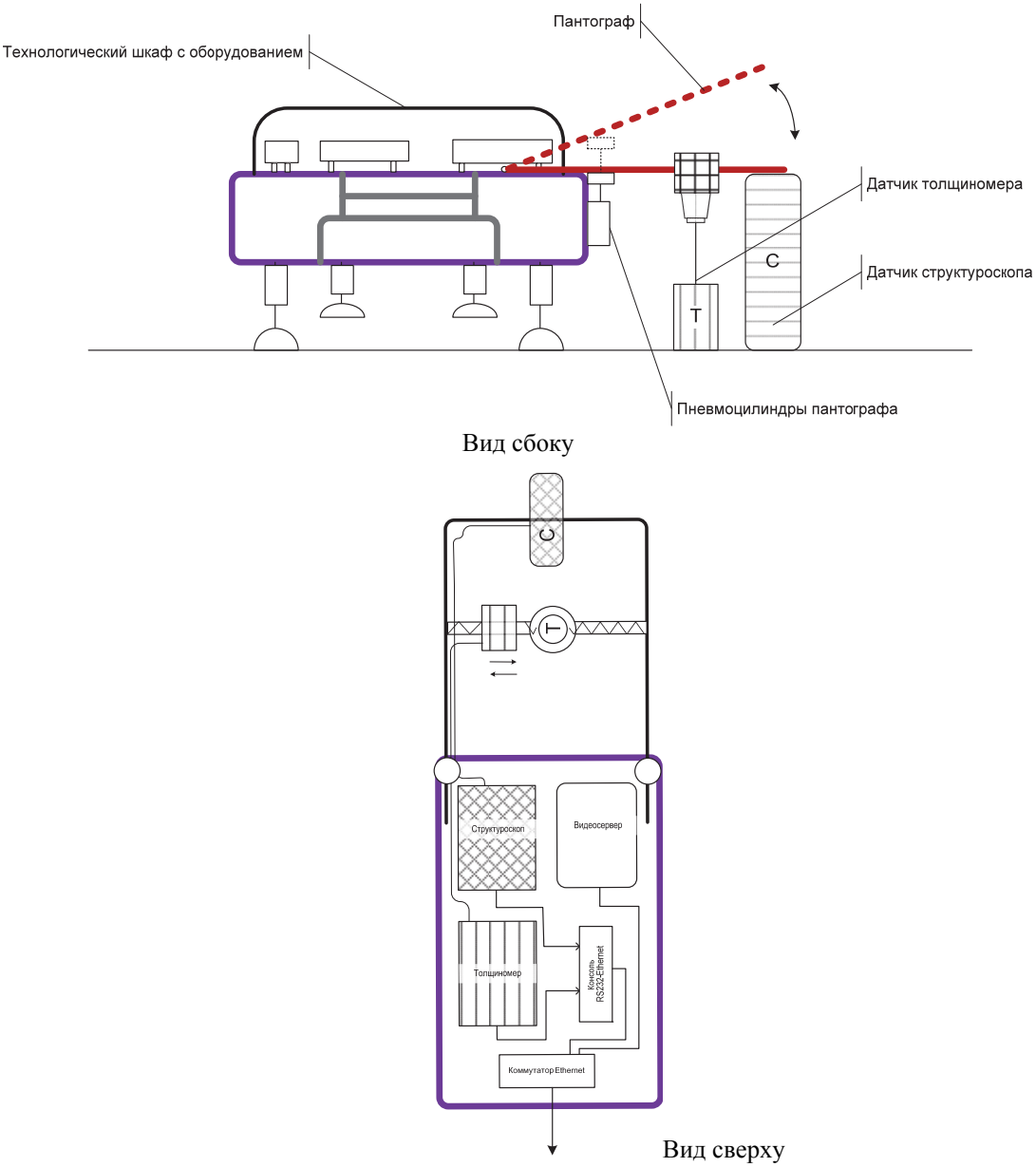


Рис. 2. Размещение технологического оборудования на робототехнической системе.

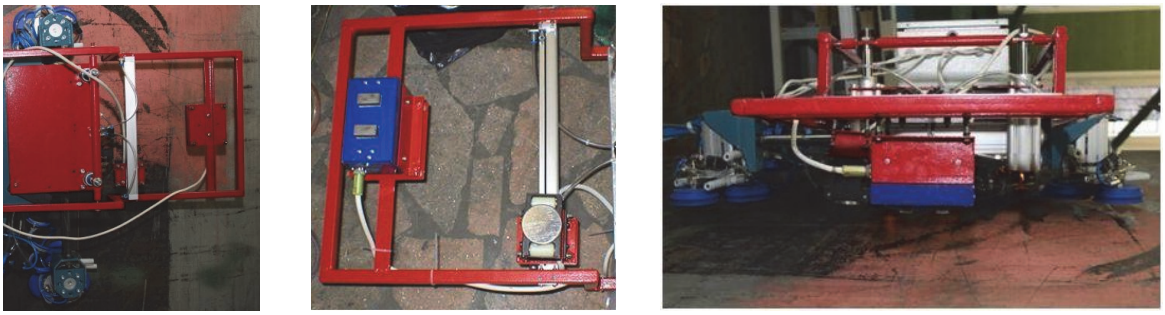


Рис. 3. Размещение датчиков измерительного оборудования (толщиномер, структуроскоп) на пантографе

Исходным положением для выполнения измерений у робототехнического комплекса соответствует положение, когда обе его платформы имеют сцепление с поверхностью объекта. В этом положении пантограф с измерительным оборудованием прижимает датчики измерительного оборудования к поверхности для выполнения измерений.

Алгоритм операций следующий:

1) Пантограф опущен. Датчик толщиномера и структуроскопа прижаты к поверхности объекта. Дается команда на начало измерений толщины и коэрцитивной силы.

2) Толщиномер двигается по линейному приводу и проводит измерения на линии 30 см. Операционный цикл для выполнения измерения структуроскопом 6-8 сек. Для выполнения всех измерений отводится 10с.

3) Окончание процедуры измерений. Пантограф поднимается. Датчики отрываются от поверхности объекта.

4) Датчик толщиномер отводится в исходное положение. Готовность к выполнению следующей команды.

3. Моменты и силы действующие при движении роботтехнической системы вертикального перемещения

На робот действуют следующие силы:

1. Силы F_i, посредством которых каждый из захватов обеспечивает прижим к поверхности

$$F_i = (P_0 - P_i) \cdot S_i = \Delta P_i S_i$$

$$i = 1,2,\ldots,n$$

Здесь P_0 – атмосферное давление окружающей среды, P_i - давление в вакуумной камере каждой ступни ноги, S_i - эффективная площадь, ΔP_i – перепад давлений.

2. Внешние силы R_i такие, как вес робота, реакции от технологического оборудования и веса кабелей, реакции от внешних сил – силы ветра, силы вибраций, внешних ударов и т.п.

3. Нормальные силы реакций N_i к поверхности, приложенные к каждой i-й стопе и направленные вдоль оси z, i=1,2,…,n.

4. Тангенциальные силы реакций, включающие силы сухого трения и контактные силы. Контактные силы возникают как результат взаимодействия шипов подкладки стопы с поверхностью. Силы сухого трения и контактные силы давления на каждую i-ю стопу робота равны

$$T_i = T_{Ti} + T_{ki},$$

где $i=1,2,\ldots,n$.

Контактные силы давления T_{ki} лежат в плоскости Oyz и равны $T_{ki} = K_T(\Delta PS_i)$, где K_T – экспериментально полученный коэффициент, зависящий от конфигурации шипов, площади взаимодействия с поверхностью и материалов шипа и поверхности.

Силы трения T_{Ti} тоже лежат в плоскости Oyz и вычисляются по закону Кулона.

$$T_{Ti} = fN_i,$$

где N_i – нормальные реакции.

Главный момент всех внешних сил R относительно точки O обозначаем через M_0, а момент всех сил реакций через M_i. Условия равновесия робота в результате действия всех приложенных сил и моментов могут быть записаны в векторной форме:

$$R + \sum_{i=1}^{n} [(N_i - F_i) + T_i] = 0$$

$$M_0 + \sum_{i=1}^{n} [r_i (N_i - F_i) + \sum h_i R] = 0$$

Заключение

Внедрение комплексной системы диагностики при помощи робототехнического комплекса позволит обеспечить предприятия современными информационными диагностическими системами и выведет на новый уровень состояние технической эксплуатации объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук* «Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям», М: Наука, 2001, 359с.

2. *В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, В. Н. Соловцов, Л. Ф. Фомин* «Анализ управления многозвенными мобильными роботами, перемещающимися в пространстве», Препринт ИПМех РАН, №732, М., 2003, 35с.

3. *Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Чащухин В. Г.* «Основные направления и перспективы развития роботов вертикального перемещения» материалы XX международной научно-технической конференции Экстремальная робототехника, нано-, микро- и макророботы, стр. 41-44, 28 сент.- 3 октября Дивноморск 2010, Россия.

УДК 629.1

В. В. Кореновский, Н. Г. Морозов*, Э. Е. Сильвестров*

МЕТОДЫ СИНТЕЗА МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ДВИЖИТЕЛЕЙ И РУЛЕВЫХ УСТРОЙСТВ ШАГАЮЩИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
***Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН**
vkorenovskii@mail.ru

Кратко описан метод синтеза, позволяющий получать множество решений задач синтеза сложных механизмов со многими параметрами синтеза. Этот метод использовался как для определения начальных значений параметров синтеза, так и для окончательного решения задачи. Даются примеры решений задач синтеза для ряда механизмов движителей и рулевых устройств шагающих машин.

Ключевые слова: традиционные методы синтеза механизмов, специальные методы синтеза, целевая функция, параметры синтеза, особая точка, псевдоособая точка, численные методы решения задач синтеза механизмов.

V. V. Korenovsky, N. G. Morozov*, E. E. Silvestrov*

METHODS OF SYNTHESIS OF MULTILINK MECHANISMS OF PROPELLERS AND STEERING DEVICES OF WALKING VEHICLES

Moscow State Technical University (MAMI)
***Ingineering science institute of A. A. Blagonravova of the Russian Academy of Sciences**

The synthesis method, allowing to receive a set of solutions of problems of synthesis of difficult mechanisms with many parameters of synthesis is briefly described. This method was used as for determination of initial values of parameters of synthesis and for final decision of a task. Examples of solutions of problems of synthesis for a number of mechanisms of propellers and steering devices of walking cars are given.

Keywords: traditional method of synthesis the mechanisms, special methods of synthesis, criterion function, synthesis parameters, special point, pseudo-special point, numerical methods of the solution of problems of synthesis of mechanisms.

В [1] приводятся различные подходы к синтезу механизмов движителей шагающих транспортных средств. Обычно, для этих целей, выбирают многозвенные плоские или пространственные рычажные механизмы, так как только они обеспечивают траекторию опорной точки движителя с заданными характеристиками: прямолинейность и равномерность перемещения опорной точки по опорной траектории, а также необходимость соблюдения условия, чтобы опорная часть траектории по отношению к точке подвески движителя была бы внешней. Сложная структурная схема такого механизма порождала большое количество параметров синтеза. Чаще всего при геометрическом синтезе параметрами синтеза были длины звеньев. Из-за большого количества звеньев выражение для целевой функции (функции неувязки значений расчетной траектории от действительных значений) становилось громоздким. Решение задачи синтеза и выбор оптимальных значений параметров все более усложнялись.

Все традиционные методы синтеза основываются на математической теории оптимизации, где целевая функция считается квадратичной. В этом случае, взяв частные производные целевой функции по параметрам синтеза и приравняв их к нулю, получаем систему линейных уравнений. При решении такой системы уравнений получаем значения параметров синтеза при минимальном значении целевой функции. При квадратичной целевой функции, получаемый в результате решения минимум, является единичным (глобальным).

В действительных реальных условиях из-за сложности механизмов целевая функция получается значительно сложнее в виде многочленов высоких степеней. Поэтому получаем значительное количество локальных минимумов. Следовательно, возникает вопрос о количестве локальных минимумов и нахождении глобального минимума.

В ИМАШ РАН и на кафедре ТММ МГМУ «МАМИ» разработан и предложен метод определения начальных приближений параметров в задачах синтеза механизмов. Он позволяет определять множество так называемых псевдоособых точек (в отличие от особых точек, в псевдоособых точках не все частные производные равны нулю). Таким образом, определяются начальные приближенные значения для параметров синтеза. Необходимо отметить, что эти значения параметров являются реальными.

В основе этого метода [2] находится предположение, что уравнение целевой функции можно представить в виде n-мерной поверхно-

сти, по которой скатывается некая «тяжелая» точка. Движение этой точки отслеживается при помощи соответствующего программного обеспечения, тем самым можно получить координаты этой точки в процессе ее движения и определения параметров синтеза в каждой псевдоособой точке. На рис. 1, 2 и 3 показаны

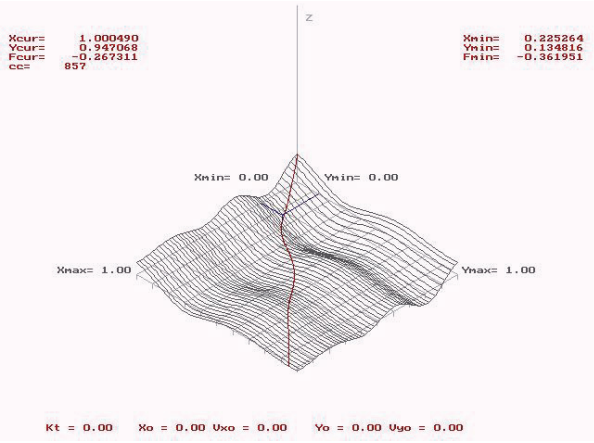


Рис. 1. Коэффициент трения 0

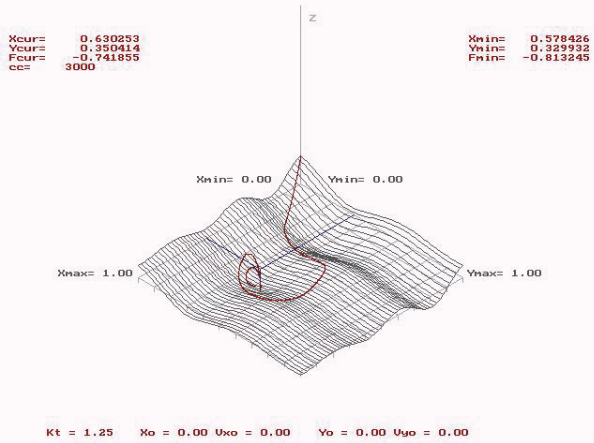


Рис. 2. Коэффициент трения 1.25

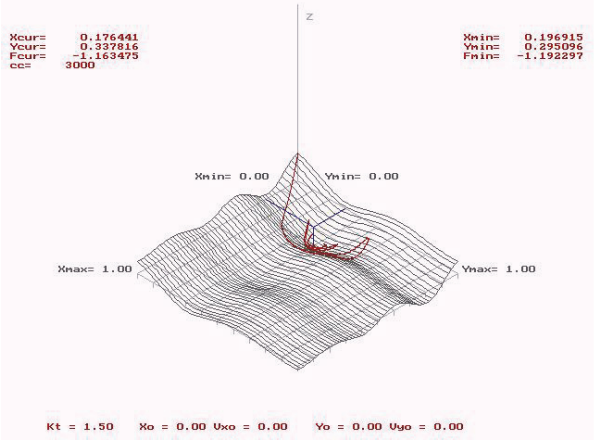


Рис. 3. Коэффициент трения 1.5

траектории движения материальной точки и поиск псевдоособых точек в результате скатывания ее с одного и того же места с различными коэффициентами трения.

Из приведенных рисунков видно, что скатывание «тяжелой» точки проходило по направлению, примерно соответствующему направлению антиградиента. Если менять силу трения в точке касания с поверхностью, можно получить различные варианты траекторий движения, что является достоинством данного метода при поиске начальных приближений.

Движение «тяжелой» точки по поверхности, имитирующей целевую функцию в задачах синтеза, проводилось путем решения системы дифференциальных уравнений Лагранжа первого рода. В упрощенном варианте эта система уравнений выглядит так:

$$\frac{dp_i}{dt} = v_i,$$

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial f(p_i)}{\partial p_i}, \qquad i = 1,...n.$$

Здесь первое уравнение системы является производной параметра синтеза по времени, а второе уравнение определяет производную по времени от скорости изменения параметра, равную частной производной целевой функции по параметру синтеза. Индекс i показывает номер параметра. Знак минус нужен для организации движения «тяжелой» точки по направлению антиградиента. Компьютерное решение данной системы уравнений позволяет получать начальные значения параметров синтеза, скорости изменения параметров синтеза.

При синтезе механизмов движителей для шагающих машин был оптимизирован сложный механизм 4 класса, у которого было 20 параметров синтеза [3]. Здесь необходимо отметить, что решение таких задач возможно только при применении предложенного метода синтеза.

При синтезе движителей шагающих устройств ставилась задача повышения точности, а также прямолинейности траектории опорной точки механизма. Из-за требований по высокой точности воспроизведения траектории на опорной части, а также из-за большого числа варьируемых параметров решение задачи синтеза было выполнено в два этапа. Структурная схема механизма делилась на две подцепи, задающую и выходную. Опорную точку механизма G перемещали по желаемой траектории и определяли координаты точки C. При этом точка C имела некую замкнутую траекторию, которую

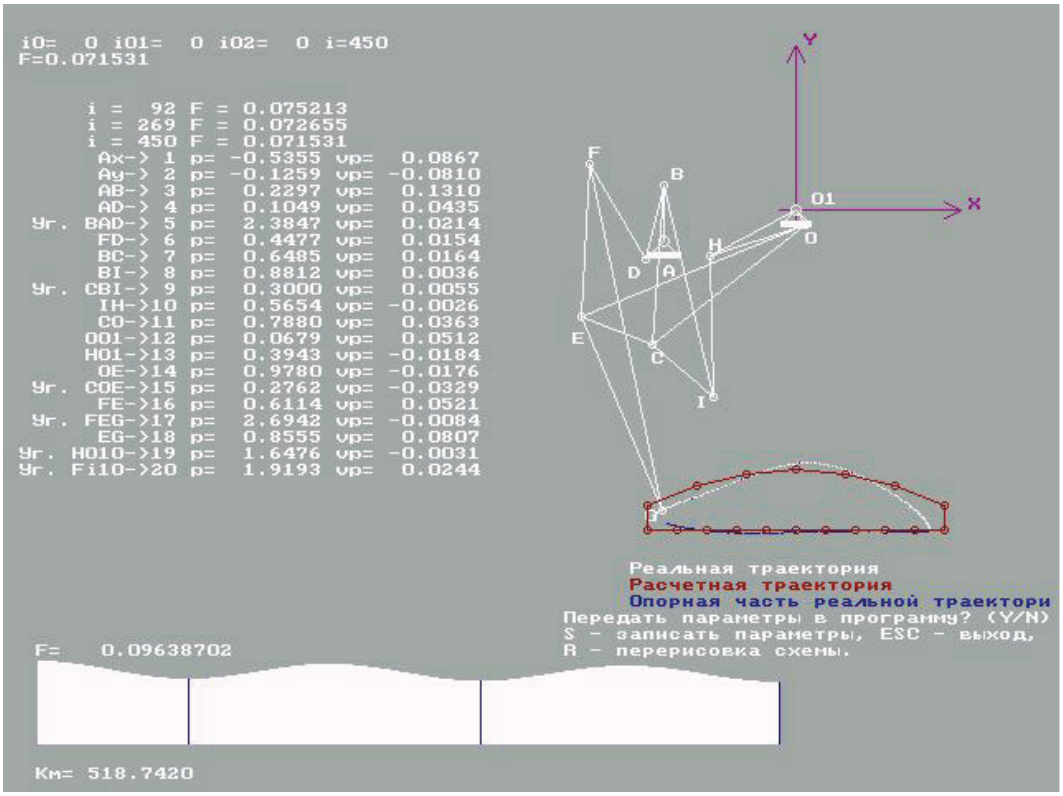


Рис. 4. Предварительный этап синтеза механизма 4 класса

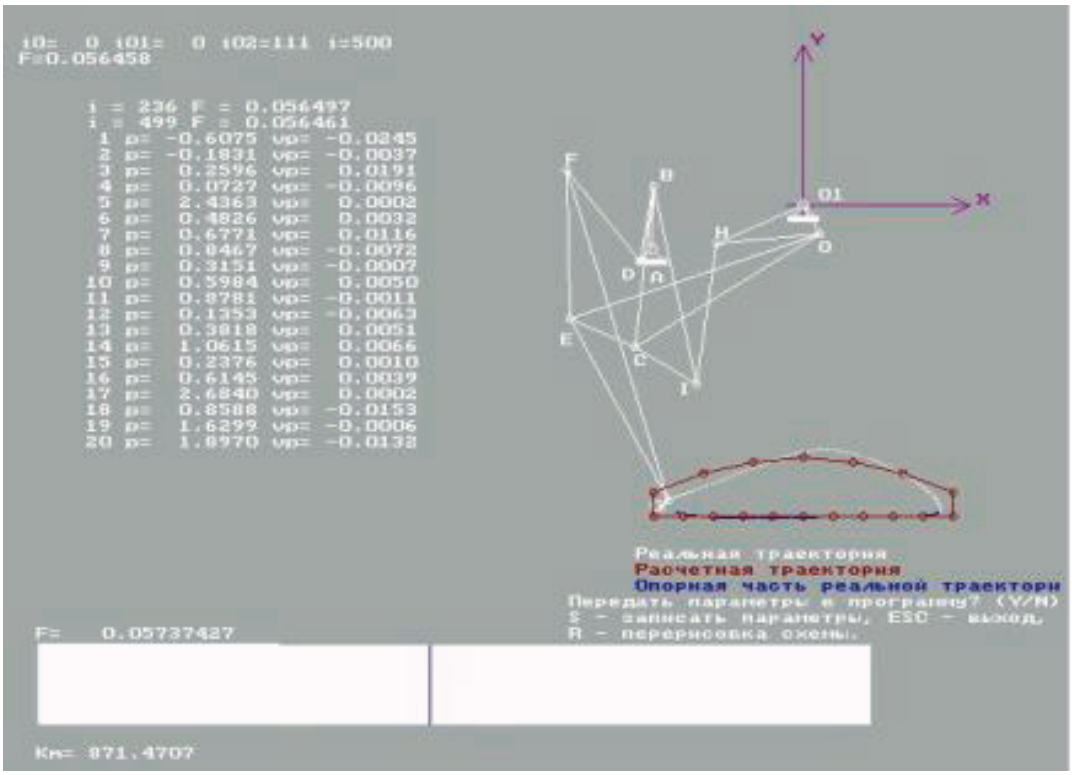


Рис. 5. Финальный этап синтеза механизма 4 класса

и должен реализовывать задающий механизм. Уменьшение объема вычислений происходит из-за уменьшения числа параметров в задающем механизме. Анализ траекторий всевозможных схем задающей подцепи показал, что они имеют характерную, «серповидную» фор-

му. Наиболее подходящим механизмом для задающей подцепи, был выбран зубчато-рычажный механизм, который имел широкое применение в конструкции лесопильной рамы [4], а его модификация использовалась для механизма движителя шагающей машины [5], изображенного на рис. 6. При таком подходе к решению задачи синтеза были получены хорошие результаты по точности воспроизведения опорной части траектории. Отклонение по вертикали на опорной части траектории составляла всего 0.07 %.

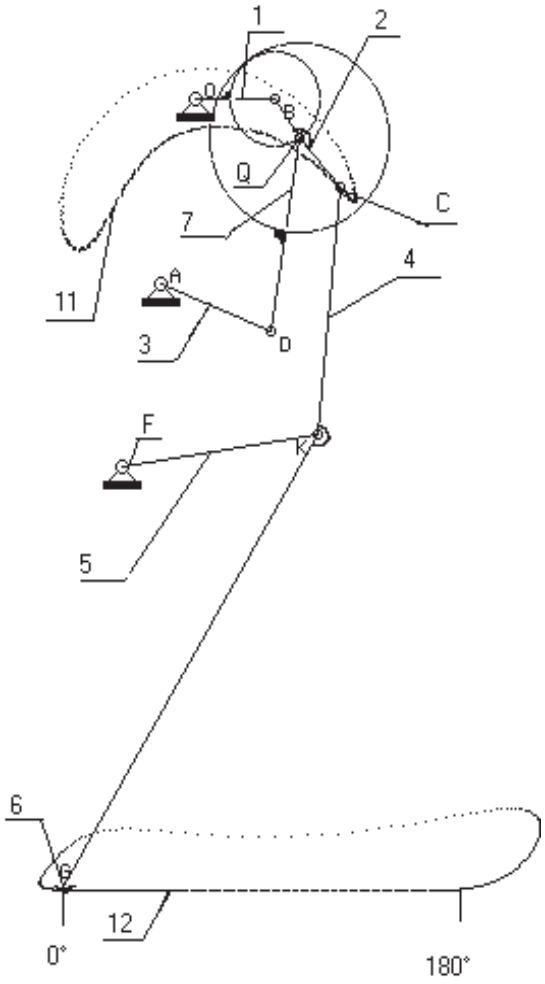


Рис. 6. Схема зубчато-рычажного механизма, используемого в качестве движителя ШМ

При синтезе рулевых механизмов использовались известные схемы, применяемые на транспортных колесных машинах. Задача проектирования рулевых механизмов для шагающих машин является более сложной, т.к. приходится применять специальные электронные схемы для определения скоростей относительного движения ног по разным бортам шагающей машины (эту задачу в транспортных машинах выполняют автомобильные дифференциалы), а также управлять углами отклонения направляющих движителей от продольной оси корпуса шагающей машины. В кинематически - точном повороте шагающих машин очень важно знать относительное положение каждой опорной ноги в системе координат, связанной с корпусом шагающей машины.

В качестве прототипов рулевых механизмов использовались рулевые трапеции Жанто. Рассматривались четырех-, шести- и восьмизвенные рулевые трапеции. Опытным путем установлено, что трапеции с большим количеством параметров синтеза могут иметь большую точность в воспроизводстве закона движения. Установлено, что точность работы шестизвенной рулевой трапеции примерно в 2 раза выше точности работы четырехзвенной трапеции, а точность работы восьмизвенной – примерно в 2 раза выше шестизвенной [7].

В данной статье рассмотрены только шестизвенные рулевые трапеции. Рис. 7 и 8 показывают результаты синтеза рулевой трапеции: предварительный этап синтеза и финишный. Информация, выводимая на экран, включает текущее значение целевой функции, таблицу значений параметров синтеза и скоростей изменения параметров в текущей псевдоособой точке, график целевой функции, проецированный на монитор. На графике целевой функции представлены также координаты псевдоособых точек. В правой верхней части экрана выводится окно с графиками эталонной и реальной функций, а также выводится значение суммарного отклонения.

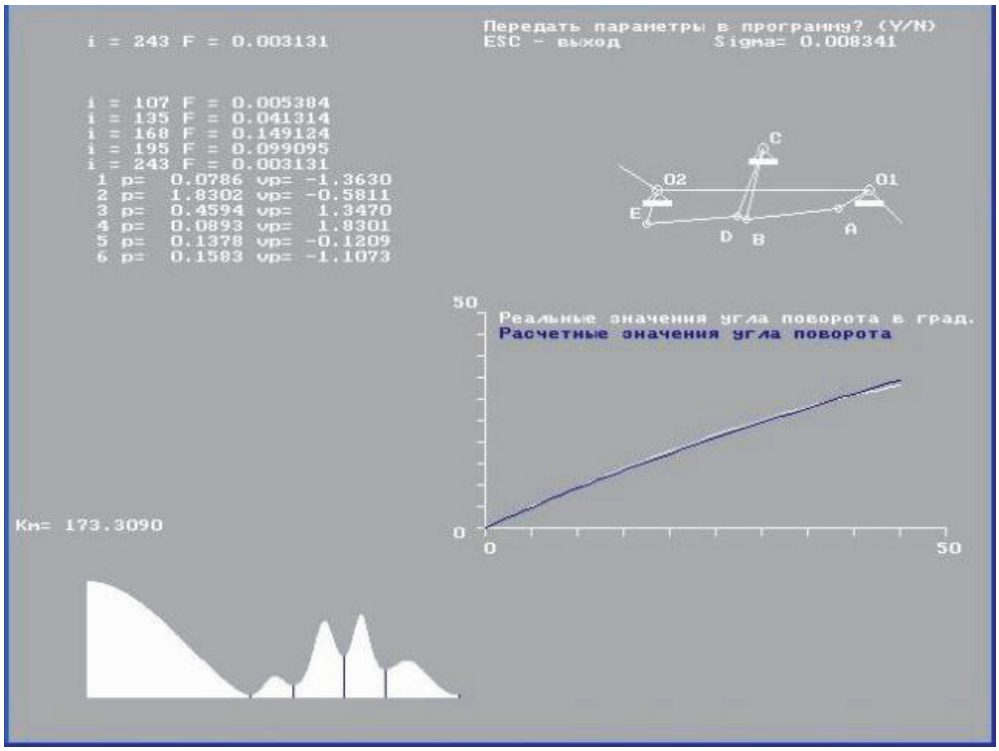


Рис. 7. Первый этап синтеза рулевого рулевого механизма

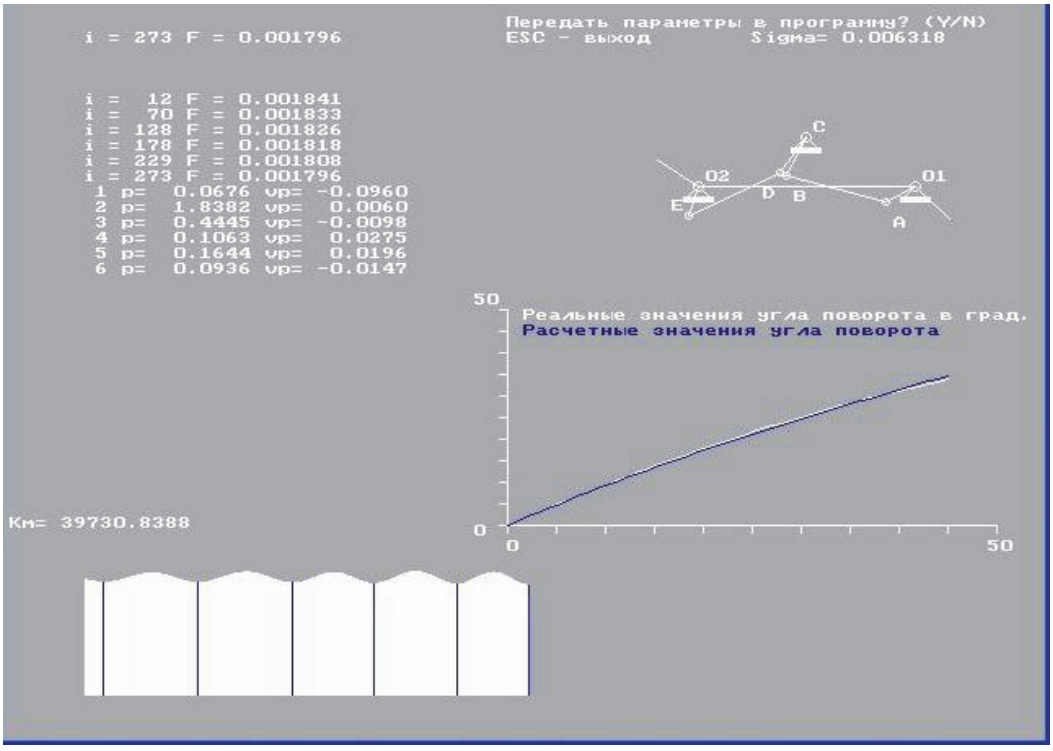


Рис. 8. Финальный этап синтеза рулевого механизма

Заключение

Разработаны новые методы синтеза механизмов, которые нашли широкое применение при решении задач синтеза механизмов движителей шагающих машин, а также при синтезе рулевых устройств транспортных машин. В отличие от традиционных, классических методов, где получается только одно решение поставленной задачи, здесь получается множество решений, причем все решения задачи синтеза

получаются с действительными значениями корней многочлена высокой степени (выражения для целевой функции). Эти решения удобно показывать графически, используя метод проекции перемещения «тяжелой» точки на плоскость, а значение целевой функции позывалось в виде вертикальной координаты. Разработанное программное обеспечение позволяет вести поиск минимума как по направлению антиградиента, так и в любом другом направлении. Для этого необходимо в выбранной псевдоособой точке обнулить скорости изменения параметров синтеза и запустить движение точки вниз, по новому направлению антиградиента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е., Морозов Н.Г.* Особенности синтеза шестизвенных направляющих механизмов движителей шагающих машин. // Проблемы механики современных машин. Т. 1, Улан-Удэ; Изд-во ВСГТУ, 2000.

2. *Кореновский В.В.* Метод определения начальных приближений в задачах синтеза плоских рычажных механизмов. В кн.: Проблемы механики современных машин. Материалы международной конференции Т.1, Улан-Удэ; Изд-во ВСГТУ, 2000 г., стр. 273-278..

3. *Кореновский В.В., Морозов Н.Г.* Синтез механизмов высоких классов. В кн.: Международная конференция по теории механизмов и механике машин. Сб. докладов. Краснодар, 2006 г., стр. 44-46.

4. Патент РФ № 2329887. Лесопильная рама// Морозов Н.Г. и др., 2008.

5. Патент РФ № 2402450. Бюллетень № 30. 2010 г. Рычажный прямолинейно-направляющий механизм // Морозов Н.Г., Умнов Н.В., Кореновский В.В.

6. *Кореновский В.В., Хоборков С.В.* Синтез рулевого устройства для транспортных шагающих машин. В кн.: Проблемы механики современных машин. Материалы 2-ой международной конференции. Том 3. Из-во ВСГТУ, Улан-Удэ, 2003, стр. 3-7.

7. *Кореновский В.В., Сильвестров Э.Е., Умнов Н.В.* Синтез рулевых шестизвенных механизмов. Автомобильная промышленность, 2012 г., № 5. с. 18-20.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард, В. Е. Павловский

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВОРОТНО-ЦИКЛОВОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ*

Волгоградский государственный технический университет
Институт прикладной математики им. Келдыша РАН

Alex-Leonard@yandex.ru, vlpavl@mail.ru

Рассматривается построение системы управления для шагающего движителя, который представляет собой сдвоенные цикловые механизмы шагания. Предлагается способ организации обратной связи.

Ключевые слова: цикловой движитель с направляющей, система управления шагающего движителя.

A. V. Leonard, V. E. Pavlovky

DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR CYCLE - TURNING WALKING MOVER

Volgograd State Technical University
Keldysh Institute of Applied Mathematics

The design of control system for walking mover, which is a dual cycle walking mechanisms, has been considered. The way of organizing feedback has been proposed.

Keywords: cycle walking propeller with directing, control system of walking mover.

С целью снижения энергетических затрат шагающей машины «Восьминог» разработан движитель, реализующий прямолинейную опорную фазу (рис. 1) [1-6].

На рис. 1: 1 – поддерживающая рама, 2 – движитель. Данный движитель представляет собой сдвоенные механизмы шагания с криволинейными направляющими. Корпус движителя способен поворачиваться относительно рамы. Для осуществления энергетически эффективного перемещения шагающей машины вдоль прямой линии необходимо, что бы фаза опоры одного механизма равнялась фазе переноса другого по времени, а курсовая скорость машины была постоянной. Решена задача согласованного управления энергетически эффективным перемещением шагающей машины [7]. В результате проведенного теоретического исследования установлено, что движитель должен быть оснащен системой управления, задающей и отслеживающей согласованные движения механизмов шагания.

* Работа поддержана РФФИ (проект № 13-01-90710 мол_рф_нр, 12-08-31375, 12-01-31398)

За основу системы управления цикло – поворотного шагающего движителя [8] принимается структурно – функциональная схема, представленная на рис. 2.

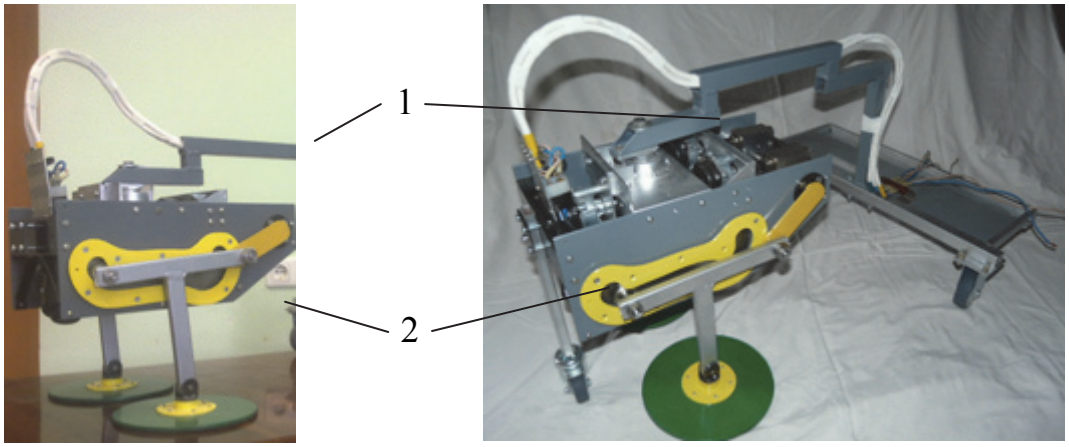


Рис. 1. Физическая модель движителя

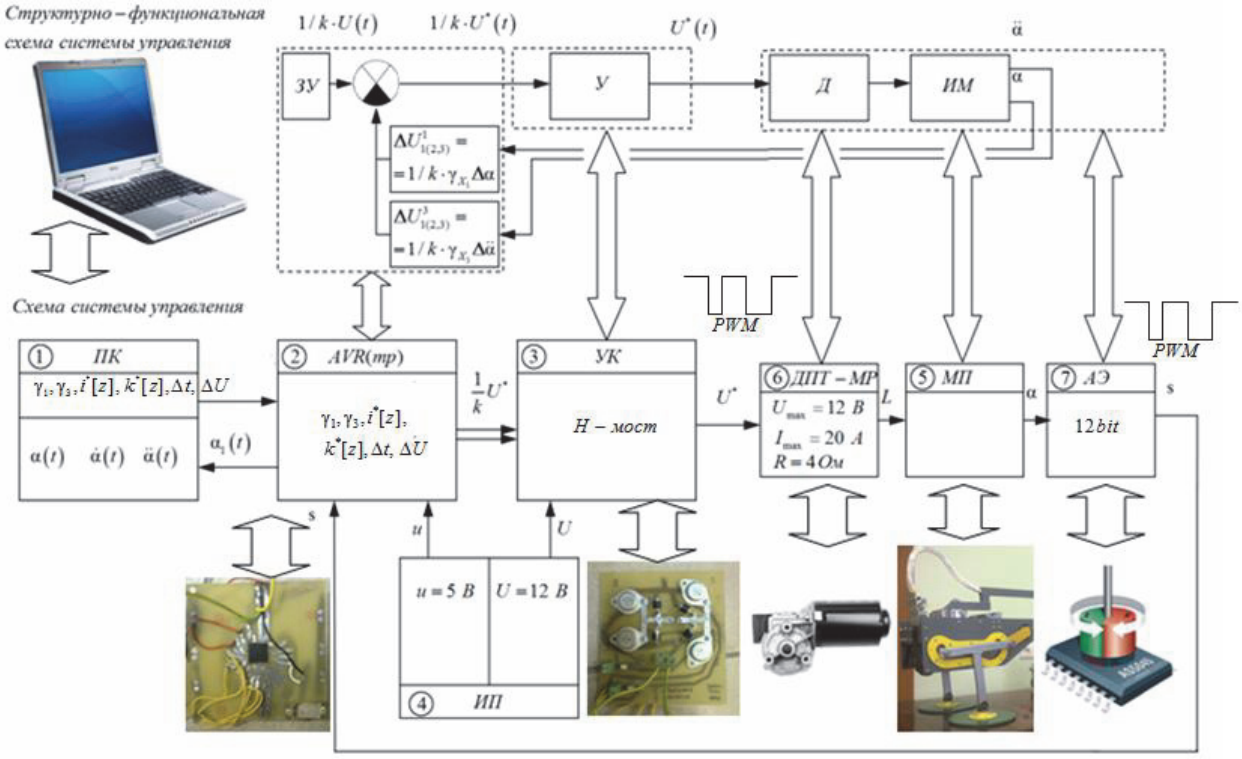


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления

В качестве верхнего уровня принятия решений может использоваться как персональный компьютер, так и быстродействующий микропроцессор (например, AT91SAM9X25 с тактовой частотой 400 МГц типа ARM), взаимодействующий с ПК. В случае использования операционной системы (ОС) реального времени ПК способен практически напрямую регулировать усилители – приводы движителя (двигатели постоянного тока). В текущей научно - исследовательской работе осуществляется построение системы управления, когда ПК (с обычной ОС) реализует предварительный расчет управляющих параметров и формирует из них набор данных для передачи на нижний уровень (рис. 3).

В существующей версии авторской программы (язык С++), при помощи которой производится ввод данных об объекте управления, можно задать параметры механизмов шагания, механические характеристики привода, напряжение питания и режим перемещения движите-

ля. В результате расчета формируются массивы данных $i^{*}_{1(2)}[t]$ - уровни напряжений. Графически управляющие напряжения представляют собой ступенчатые кривые (рис. 4).

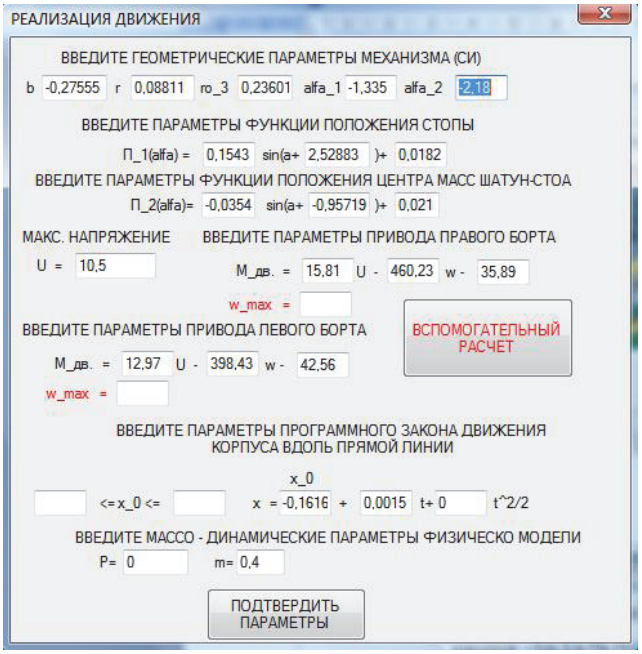


Рис. 3. Окно ввода параметров физической модели и режима движения

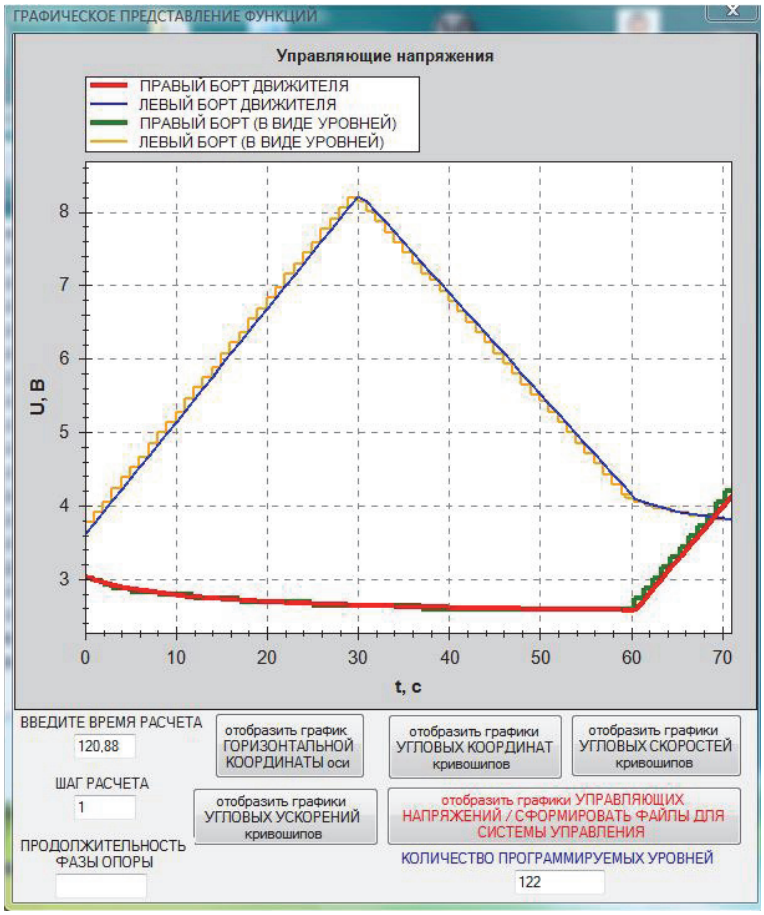


Рис. 4. Окно отображения теоретических характеристик движения физической модели / формирования массивов программных уровней напряжений

Нижний уровень принятия решений – микроконтроллер (Atmega2560 с тактовой частотой 8 – 16 МГц). Задача контроллера формировать последовательность уровней i управляющих напряжений $(U = i\Delta U)$ через усилитель с заданным временным интервалом Δt на основе набора данных математической модели ПК и данных, принимаемых от угловых датчиков привода движителя. В качестве усилителей используются Н – мостовые схемы на биполярных транзисторах (рис. 5).

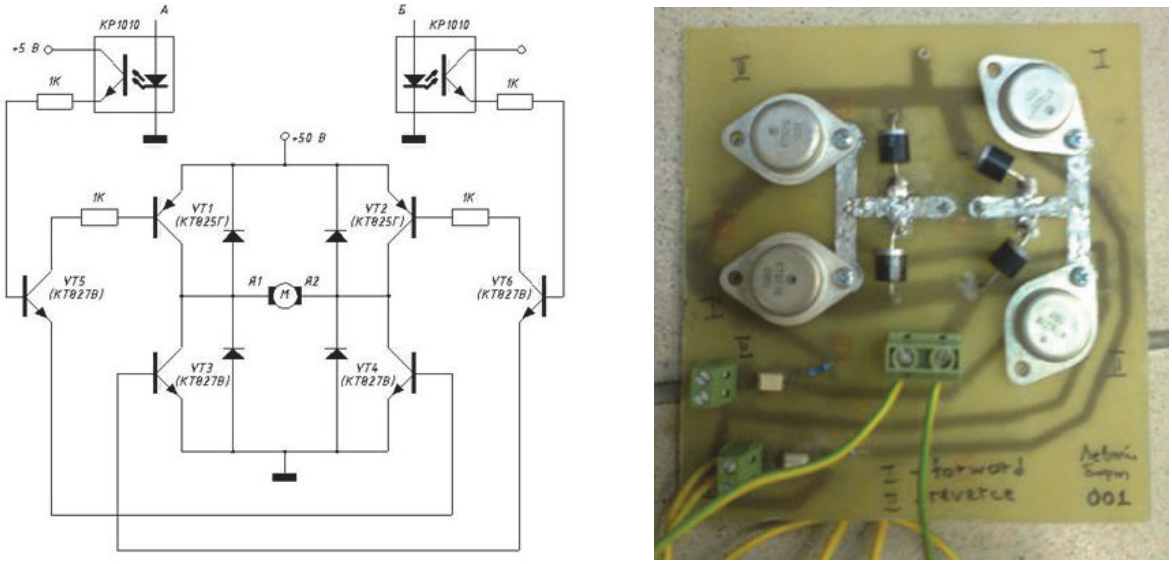


Рис. 5. Н – мостовая схема усилителя на биполярных транзисторах

Предлагается организовать прием данных от абсолютного углового энкодера (12 – битный датчик AS5045 с тактовой частотой 1 МГц) посредством PWM - сигнала. Программным способом производится подсчет количества k микросекунд посылки PWM - сигнала высокого логического уровня. В этом случае число k пропорционально измеренному угловому значению α. Согласно решенной задаче об управлении напряжение, генерируемое системой управления, U определяется суммой трех слагаемых:

$$U = U^* + U_{\Delta\alpha} + U_{\Delta\ddot{\alpha}},$$

где U^* – значение программного напряжения, полученного из уравнений динамики, $U_{\Delta\alpha}$ – корректировочное значение напряжения, которое обусловлено рассогласованием действительного значения угла поворота кривошипа и его программного значения, $U_{\Delta\ddot{\alpha}}$ — корректировочное значение напряжения, которое обусловлено ошибкой углового ускорения.

$$U = U^* + \gamma_1(\alpha - \alpha^*) + \gamma_3(\ddot{\alpha} - \ddot{\alpha}^*). \qquad (1)$$

γ_1, γ_3 – коэффициенты обратных связей, удовлетворяющие условиям асимптотической устойчивости. Учитывая линейную связь между параметрами α и k, между U и i, аналитическое выражение управляющего напряжения (1) с обратными связями по угловой координате и ускорению можно представить в виде целочисленного выражения, определяющего величину уровня напряжения i с временным шагом Δt и интервалом между соседними уровнями ΔU:

$$i = i^* + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_1}{\Delta U 4096}\left(k_0 - \lceil k^*_0 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_3}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k_2^* \rceil - 2\left[k_1 - \lceil k_1^* \rceil\right] + k_0 - \lceil k_0^* \rceil\right)\right\rceil.$$

Где параметры с индексом «ноль» – значения для текущего момента времени, параметры с индексом «один» – значения через промежуток времени Δt, параметры с индексом «два» – значения через промежуток времени $2\Delta t$.

Рис. 6. Временная схема выполнения алгоритма расчета управляющего уровня *i* по обратной связи

При этом в начале запуска системы, по мере поступления данных, подключается сначала обратная связь по угловой координате, а затем – по ускорению (рис. 6):

$$i_0 = i^*_0 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_0 - \lceil k^*_0 \rceil\right)\right\rceil; \quad i_1 = i^*_1 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_1 - \lceil k^*_1 \rceil\right)\right\rceil;$$

$$i_2 = i^*_2 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k^*_2 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_3}}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k_2{}^* \rceil - 2\left[k_1 - \lceil k_1{}^* \rceil\right] + k_0 - \lceil k_0{}^* \rceil\right)\right\rceil;$$

$$i_3 = i^*_3 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_3 - \lceil k^*_3 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_3}}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_3 - \lceil k_3{}^* \rceil - 2\left[k_2 - \lceil k_2{}^* \rceil\right] + k_1 - \lceil k_1{}^* \rceil\right)\right\rceil;$$

Анализ временных затрат на выполнение программы управления показал, что время приема элементарной посылки PWM – сигнала от датчика и ее перекодировки составляет порядка 8 мс, а расчет управляющих уровней будет происходить за 1,1 мс. Максимальное угловое ускорение кривошипа для перемещения движителя со скоростью 7 мм/с, составляет $\varepsilon = 0{,}03$ рад/с^2. Тогда, если принять эту величину постоянной на протяжении $t = 20$ мс, то $\delta\alpha \approx \varepsilon t^2/2 \approx 2{,}1 \cdot 10^{-6}$, град. Время работы шагающего механизма в опорной фазе $\tau = 26{,}37$ с. В этом случае возможная суммарная ошибка угла поворота кривошипа (обусловленная перемещением машины на один шаг, длина которого 170 мм) составит: $\Delta\alpha \approx \tau/t \cdot \delta\alpha \approx 0{,}27$ град, что соответствует $\Delta x_{\max} \approx 2{,}25$ мм и $\Delta y_{\max} \approx 0{,}15$ мм (максимальная горизонтальная и вертикальная ошибки перемещения стопы). Полученные величины гипотетических ошибок являются вполне приемлемыми для реализации движения физической модели вдоль прямой линии.

Серия предварительных экспериментов по реализации энергетически эффективного режима перемещения физической модели подтвердила теоретические выводы о необходимости наличия обратных связей в системе управления. Предложенный способ организации обратных связей позволит сформировать устойчивое энергетически эффективное перемещение представленного движителя.

В дальнейшем выполняется модификация системы управления аппарата на основе модулей микроконтроллерной системы управления РОБОКОН-1 [9-10] (рис. 7).

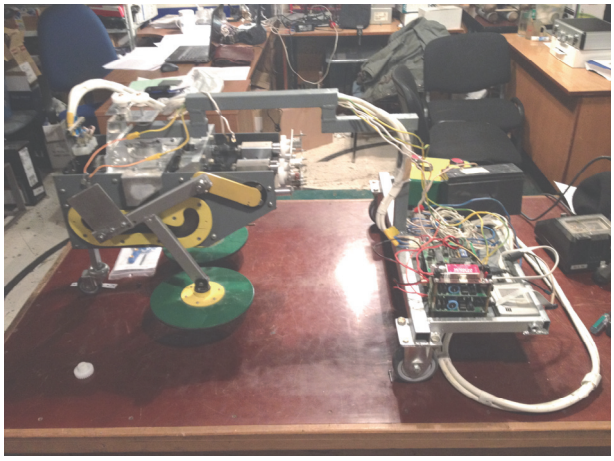


Рис. 7. Движитель «Циклон» с системой управления РОБОКОН-1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Леонард А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 10. С. 18-22

2. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Леонард А.В., Брискин Е.С.; ВолгГТУ. – 2011;

3. *Брискин, Е.С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Брискин Е.С., Леонард А.В., Малолетов А.В. // Теория механизмов и машин. - 2011. - Т. 9, № 1. - С. 14-24;

4. *Леонард, А.В*. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 81-85;

5. Пат. 2063354 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.

6. Пат. 2063353 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е. С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.

7. *Брискин, Е.С.* Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, А.В. Леонард // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2013. - № 6. - С. 131-138;

8. *Леонард, А.В.* Построение системы управления для физической модели цикло - поворотного движителя / Леонард А.В. // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. – С 325-326.

9. *В.Е.Павловский, В.В.Павловский*. Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, ISSN 2071-2898 (печатная версия), М., 2012, №86. – 32 с.

10. *В.Е.Павловский, В.В.Павловский*. Масштабируемая система управления роботами РОБОКОН-1. // Информационно-измерительные и управляющие систем. Издательство "Радиотехника". - 2013. - Т.11. - №4. - С.80-92.

УДК 62-5, 681.5, 004.94

А. Д. Мохов[1], Е. Г. Громов[1], В. А. Серов[2], К. Б. Мироненко[2]

ПРОГРАММА СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ ШАГАЮЩЕГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ДВИЖИТЕЛЯ*

[1]Волгоградский государственный технический университет
[2]ОАО «Центральное конструкторское бюро «Титан»
alexander.mokhov@gmail.com, cdb@cdbtitan.ru, dixvgd@gmail.com

В статье описывается способ синтеза управления движениями шагающего движителя на основе решения обратной задачи. Подход основан на формировании команд системы управления в процессе решения обратной задачи в режиме реального времени. Предложен способ интегрирования математического ядра в состав системы управления. Представлен способ задания математической модели для обратной задачи динамики шагающей машины с ортогональным движителем. Приведены результаты численного моделирования, а также сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: робототехника, математическое моделирование, шагающие роботы, метод обратной задачи.

A. D. Mokhov[1], E. G. Gromov[1], V. A. Serov[2], K. B. Mironenko[2]

THE PROGRAM OF SYNTHESIS OF MOTION CONTROL OF WALKING ORTHOGONAL DRIVER*

[1]Volgograd State Technical University
[2]Central Design Bureau «Titan»

The way of synthesis of controlling for the movements of legged mover on the basis of the solution of the inverse problem is described in the article. The approach is based on the generation of the commands for the controlling system during the solution of the inverse problem in real-time mode. The way of integration of the mathematical core in the controlling system and the way of definition of mathematical model for the inverse problem of dynamics of a legged machine with orthogonal mover are presented. Both the results of numerical modeling and the comparison of the results of computer-simulated and experimental data are shown.

Keywords: robotics, walking robots, control system, mathematic modelling, inverse problem.

Растущая сложность современных роботов ставит новые проблемы с точки зрения организации системы управления движениями. Развитие элементной базы позволяет создавать робототехнические системы, обладающие десятками и сотнями степеней свободы, при этом системы управления могут работать с частотами в сотни герц [8].

Управление шагающим роботом можно разделить на тактический и исполнительный уровни [3]. На тактическом уровне определяются траектории и цели движения. Задачи генерации управляющих сигналов, обеспечивающих требуемое движение, решаются на исполнительном уровне.

В данной статье рассматривается синтез управляющих сигналов на исполнительном уровне. Для решения этой задачи предлагается использовать метод обратной задачи, который

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00955).

сводится к определению законов движения звеньев управляемой системы по заданным кинематическим параметрам движения некоторых характерных точек [6].

На тактическом уровне определятся траектория движения корпуса робота, параметры этой траектории могут меняться с помощью пульта управления, траектории движения стоп задаются с помощью специальных алгоритмов.

Математическая модель и программное движение

Шагающий движитель представляет собой кинематическую цепь, элементы которой соединены между собой посредством кинематических пар. В шагающем движителе можно выделить следующие основные элементы: корпус робота, шагающие движители, состоящие из ног и стоп.

Представление математической модели шагающего робота основано на уравнениях Лагранжа первого рода. Уравнения динамики механической системы в этом случае слагаются из уравнений свободного движения тел и уравнений связей от кинематических пар. Кроме кинематических пар, связи между телами могут задаваться силами от упруго-демпфирующих элементов, соединяющих тела.

Уравнения движения при таком подходе записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p = f\left(\dot{x}, x, t\right) + u\left(t\right) \\ D\ddot{x} = h\left(\dot{x}, x\right) \end{cases}, \qquad (1)$$

где x – вектор обобщенных координат всей системы размерностью n, M – матрица инерции, $f\left(\dot{x}, x, t\right)$ – вектор внешних сил, $u\left(t\right)$ – вектор управляющих сил, D – матрица переменных коэффициентов уравнений связей от кинематических пар размерностью $k \times n$, k – число связей, $h\left(\dot{x}, x\right)$ – вектор правых частей уравнений связей, p – вектор множителей Лагранжа [4]. Синтез алгоритмов управления сводится к определению управляющих функций $u\left(t\right)$, обеспечивающих движение по траекториям $w\left(t\right)$. Действие управляющих сил в уравнениях движения (1) можно заменить уравнениями связей, тогда уравнения (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p - D_w{}^T p_w = f\left(\dot{x}, x, t\right) \\ D\ddot{x} = h\left(\dot{x}, x\right) \\ D_w\ddot{x} = \ddot{w}\left(t\right) \end{cases}, \qquad (2)$$

где D_w – матрица переменных коэффициентов уравнений связей точек, для которых заданно программное движение, $w\left(t\right)$ – функция, описывающая программные траектории заданных точек, p_w – вектор множителей Лагранжа, соответствующий связям с программными траекториями.

Программное движение складывается из двух движений:

$$w\left(t\right) = w_b\left(t\right) + w_f\left(t\right), \qquad (3)$$

где $w_b\left(t\right)$ – траектория движения точек корпуса, $w_f\left(t\right)$ – траектория движения точек шагающих движителей.

Управление роботом на тактическом уровне сводится к изменению функции $w_b\left(t\right)$, а на исполнительном определяются функциями $w_f\left(t\right)$.

Алгоритм задания движения стопы шагающего движителя

Алгоритм задает функцию $w_f\left(t\right)$, что обеспечивает движение точки стопы по П-образной траектории, в зависимости от параметров: длина шага, высота подъема стопы, поперечное расстояние между точкой опоры и кузовом, вертикальное расстояние между точкой опоры и кузовом, продольное расстояние между точкой опоры и кузовом, минимальный период шага, координаты точки крепления ноги в системе корпуса. В зависимости от скорости и направления движения точки крепления шагающего движителя выбирается направление и расстояние продольного перемещения точки стопы. Максимальная длина шага зависит от параметра шага – максимального смещения точки шагающего движителя относительно точки на корпусе.

Это обеспечивает автономное управление шагающим движителем и применимо к шагающему движителю произвольной структуры.

Система управления

На рис. 1 приведена схема интеграции математического ядра в систему управления [7].

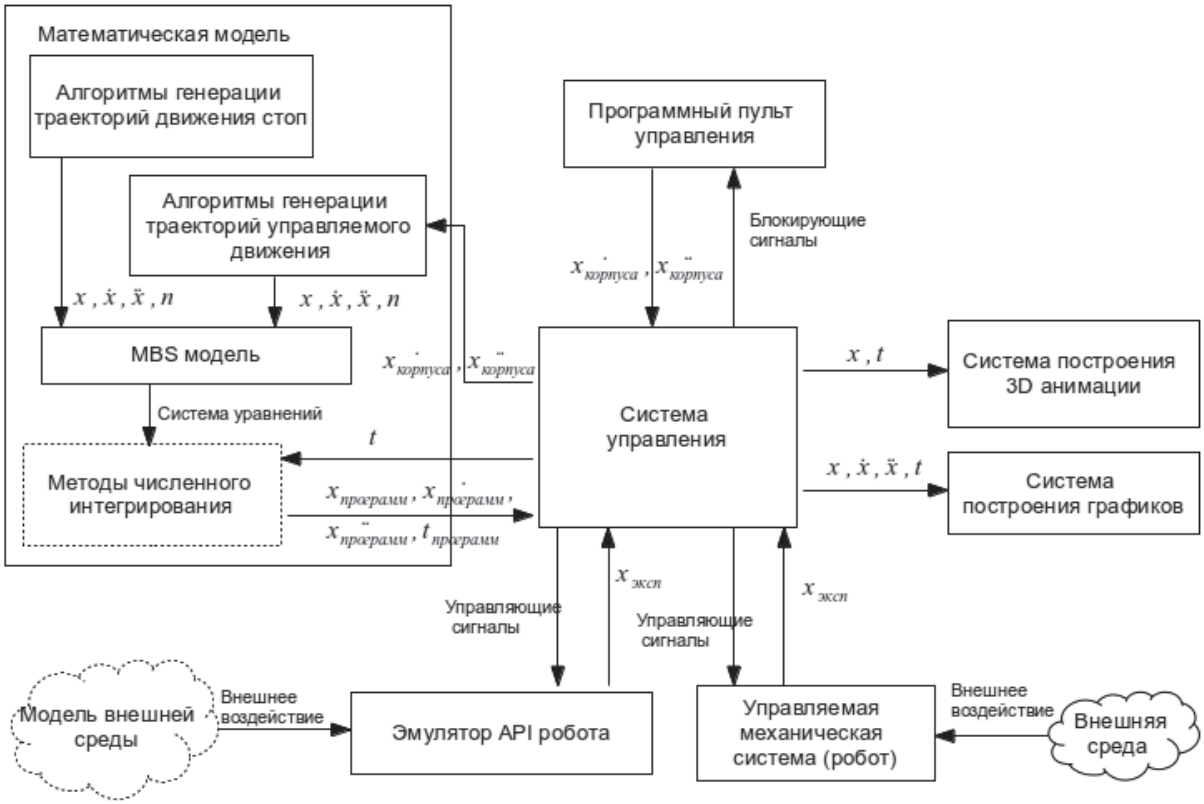


Рис. 1. Схема системы управления

Математическое ядро обеспечивает генерацию и расчет траекторий движения точек системы. Результатом решения математической модели являются относительные перемещения в приводах движителей, соответствующие заданному перемещению корпуса робота. Перемещения корпуса робота определяются через параметры траектории движения трех характерных точек корпуса. Так как управление осуществляется через изменение параметров математической модели, полезно видеть различия программного движения и аппаратного движения. Для этого в системе предусмотрен интерфейс вывода этих данный в виде трехмерной модели или графиков.

Система управления выполняет генерацию управляющих сигналов на основе данных, получаемых от сенсоров приводов, и результатов численного моделирования (решения обратной задачи динамики). В системе управления реализован ПИД регулятор, позволяющий генерировать управляющие сигналы для исполнительных устройств на основе отклонения между программными и измеренными значениями относительных перемещений и скоростей приводов. Математическая модель, используемая для решения обратной задачи, модифицируется для обеспечения ее решения в режиме реального времени путем увеличения минимальных инерционных коэффициентов.

Эксперименты

Апробация предложенного метода проводилась на роботе со сдвоенным ортогонально поворотным движителем, разработанным на кафедре «Теоретическая механика» Волгоградского государственного технического университета [1]. Робот представляет собой основание, на котором закреплено 4 поворотных опоры, оснащенных 4 поступательными приводами, 2 из которых обеспечивают движение стопы в горизонтальном и 2 в вертикальном направлении. Таким образом, робот содержит 20 приводов. На рис. 2 приведена расчетная схема и изображение робота «Ортоног».

Для описанной конструкции была построена математическая модель в системе ФРУНД. Модель содержит 21 тело и более 20 соединительных элементов. В модель добавлены средства, позволяющие задавать величины и направления ускорения трех характерных точек корпуса.

Движения корпуса задается оператором через программный пульт управления. Движение

стоп задается с помощью специальной подпрограммы. Приведенная схема описывается системой из 370 дифференциально-алгебраических уравнений.

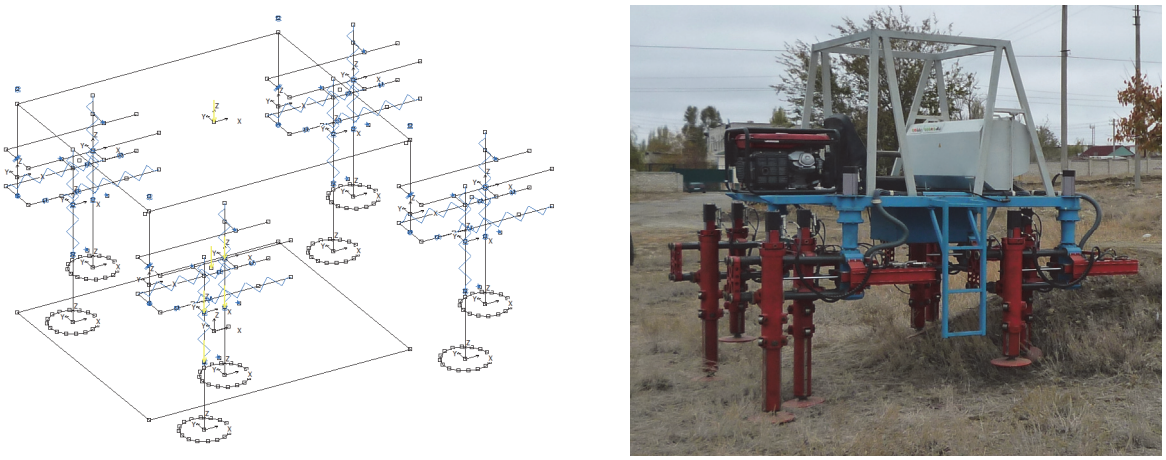


Рис. 2. Схема робота «Ортоног»

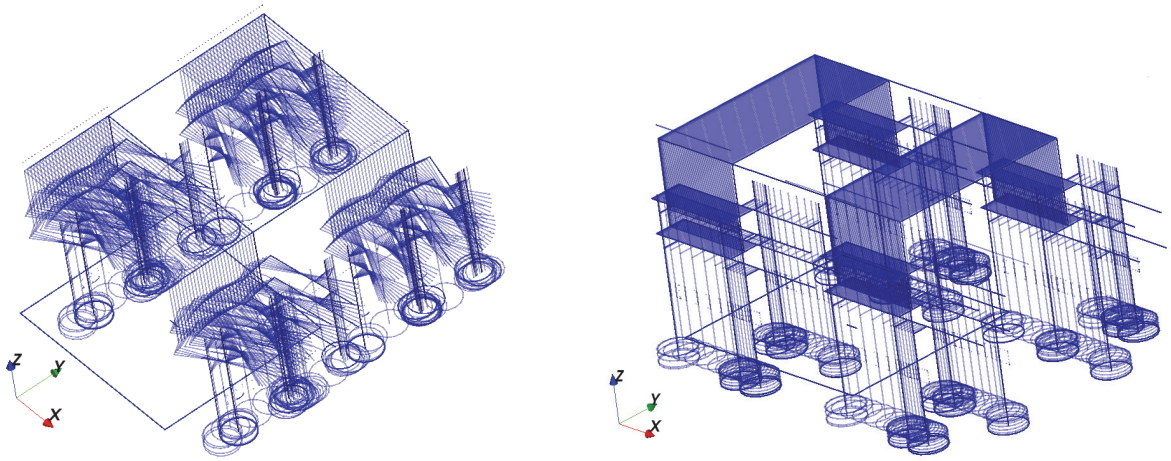


Рис. 3. След программного движения

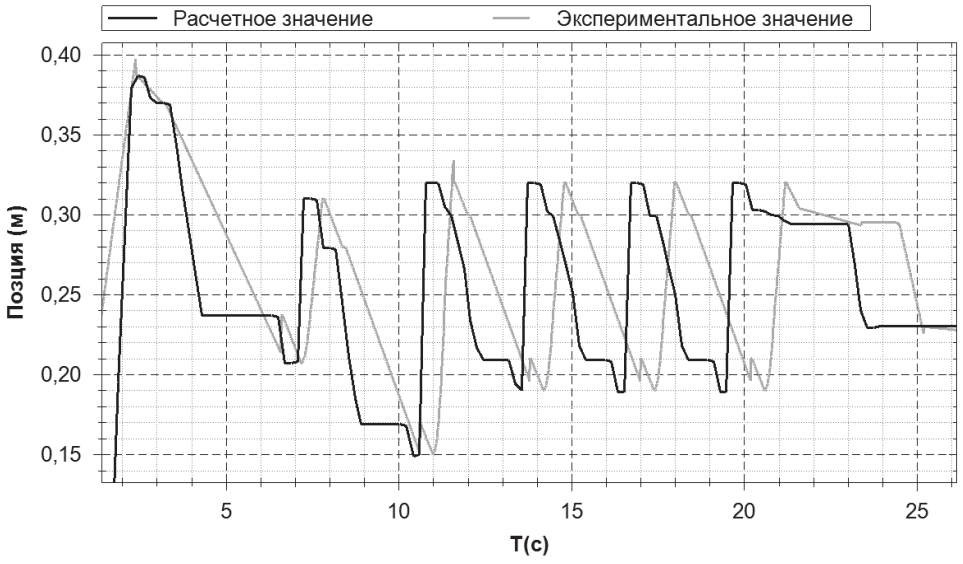


Рис. 4. График относительных перемещений горизонтального привода

Представленная модель позволяет генерировать управление для произвольного движения корпуса робота – на рис. 3 показаны варианты продольного и поперечного перемещения.

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные графики относительного перемещения продольного привода одного из сдвоенных ортогональных поворотных движителей. Смещение графиков относительно друг друга обусловлены большими временными задержками в системе передачи команд.

Выводы

Рассматриваемый метод и его реализация позволяет синтезировать теоретические параметры управления движением механических систем произвольной структуры. Формат команд управления определяется интерфейсом приводов и для каждого типа приводов формируется отдельно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов,* Об управлении поворотом шагающих машин со сдвоенными движителями /Е.С. Брискин,А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // УТЭОСС Санкт-Петербург. – 2012. – с. 698-701.

2. *Бурдаков, С.Ф.* Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко. – М.: Высшая школа, 1986.

3. *Вукобратович, М.* Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами : Пер. с англ. / М. Вукобратович, Н. Кирчански, Д. Стокич, А. С. Ющенко [и др.]. – М. : Мир, 1989 . – 376 с. : ил. – Предм.указ.: с. 374. – ISBN 5-03-000540-4.

4. *Горобцов, А*. С.Синтезпараметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. –№6. – 2004/

5. *Ержуков, В.В.* Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры / Л.А.Рыбак, В.В. Ержуков.–М :Физматлит, 2011.

6. *Крутько, П. Д.*Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций : учеб.пособие для вузов / П. Д.Крутько.– М. : Машиностроение, 2004. – 573 с. –Библиогр.: с. 560-573. – ISBN 5-217-03215-4.

7. *Hodgins, Jessica K.* Animation of dynamic legged locomotion / Marc H. Raibert, Jessica K. Hodgins // ACM SIGGRAPH Computer Graphics Homepage. – Vol. 25,№4. – July 1991. –p. 349-358.

8. *Vukobratovic, M.* Robot-environment dynamic interaction survey and future trends / M.Vukobratovic //Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2010. – № 49. – p. 329-342.

УДК 531.1

В. Е. Павловский[1,2], А. Ю. Шамин[2]

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-БУЕРА

[1]Институт прикладной математики им М. В. Келдыша РАН, Москва
[2]Механико-математический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
vlpavl@mail.ru, Shamin_AY@mail.ru

Работа посвящена построению теоретической модели движения трехколесного робота-буера с парусом и исследованию задачи оптимального быстродействия в управлении им. В работе выписываются уравнения движения в лаконичной форме, а также системы уравнений, составляющих принцип максимума Понтрягина. Численно решена задача быстродействия при некоторых углах направления ветра и различной длине выноса переднего колеса.

Ключевые слова: робот-буер, оптимальное управление, быстродействие.

V. E. Pavlovsky, A. Yu. Shamin

THE DYNAMIC MODEL AND OPTIMAL CONTROL OF THE MOTION OF THE ROBOT-YACHT

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow
Mechanics-mathematical faculty of the Moscow State University of M. V. Lomonosov, Moscow

This work is devoted to the construction of the theoretical model of motion three-wheeled robot with a sail and a study of the problem of optimal performance. We write the equations of motion and the system of equations, the Pontryagin maximum principle. Numerically solved the problem of optimal control in some angles of the wind direction and lengths of a suspension bracket of a front wheel.

Keywords: robot-yacht, optimal control, control quickness.

1. Введение. Уравнения движения

В данной работе рассматривается робот-буер – трехколесная тележка с закрепленным на ней парусом. Управление роботом осуществляется парусом и рулевым колесом, которое может быть передним или задним. Подобные

аппараты являются новым, экологически чистым, видом транспорта и могут представлять интерес для организации специальных перевозок, например, на больших открытых пространствах, где имеется доступ к свободному ветру. Такие пространства имеются, к примеру, в степных регионах.

Теоретико-механическая модель робота-буера представлена на рис. 1. Она детально описана ниже. Модель обобщает предложенную в [5] схему.

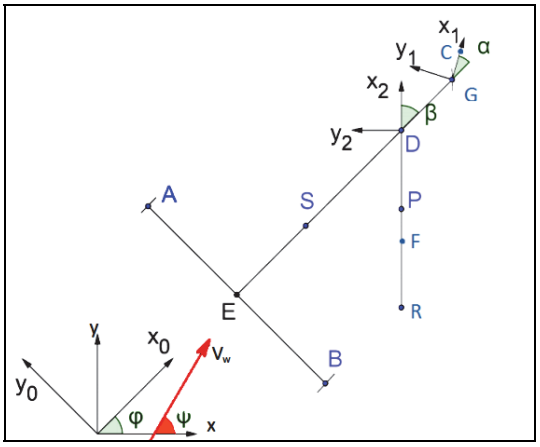


Рис. 1. Механическая модель

1.1. Модель механической системы

Буер движется по горизонтальной плоскости. Колеса A, B, C катятся без проскальзывания. Переднее колесо C вынесено вперед на поворотной вилке GC. Точка E является пересечением оси вращения задних колес и продольной оси симметрии буера. Центр масс тележки находится на оси симметрии в точке S, причем $ES = s$. Мачта буера также расположена на оси симметрии и удалена от точки E на расстояние $ED = d$. Парус является плоским прямоугольником, обозначен DFP, где F - центр масс паруса, $DF = l$. Расстояния до задних колес $EA = EB = a$. Ось вилки G расположена на оси симметрии тележки, причем $EG = c$. Длина вилки $GC = n$, ее центр масс находится в точке U, где $GU = u$. Радиусы задних колес R_k, а переднего R_c.

Движение буера рассматривается в неподвижной системе координат Oxy. Ведем подвижную систему координат Ex_0y_0, жестко связанную с корпусом буера. Ее центром будет служить точка E, ось Ex_0 направим вдоль оси симметрии, а ось Ey_0 перпендикулярно ей. Таким образом, положение этой системы определяется координатами (x, y) точки E, а также углом φ между положительными направлениями осей Ox и Ex_0. Углы α и β задают повороты соответственно рулевого колеса и паруса относительно корпуса буера. Введем еще одну подвижную систему координат Cx_1y_1, связанную с центром масс переднего колеса, причем ось Cx_1 всегда направлена по вилке. В этой системе координат поворот переднего колеса вокруг оси Cy_1 задается углом ψ_C, а повороты задних колес A и B относительно оси Ey_0 - соответственно углами ψ_A, ψ_B.

Таким образом, положение буера в неподвижной системе координат задается восемью координатами: $x, y, \varphi, \psi_A, \psi_B, \psi_C, \alpha, \beta$.

На систему наложены связи, а именно: скорости тех точек колес A, B, C, которые соприкасаются с горизонтальной плоскостью, равны нулю. Таким образом, приходим к системе уравнений кинематических связей:

$$\begin{cases} \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi - a\dot{\varphi} - R_k\dot{\psi}_A = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi + a\dot{\varphi} - R_k\dot{\psi}_B = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi - (\dot{\varphi}+\dot{\alpha})n\sin\alpha = \dot{\psi}_C R_C\cos\omega, \\ \dot{\varphi}c + (\dot{\varphi}+\dot{\alpha})n\cos\alpha = \dot{\psi}_C R_C\sin\alpha. \end{cases} \quad (1)$$

Так как связи (1), наложенные на механическую систему, являются неголономными (это легко проверяется), то для вывода уравнений движения необходимо пользоваться соответствующими методами. В данном случае воспользуемся уравнениями движения в лаконичной форме [1]. Замкнутая система уравнений будет состоять из 8 выражений обобщенных скоростей через псевдоскорости, которые введены ниже (уравнения (2)), 8 выражений для обобщенных импульсов и 3 уравнений на псевдоскорости. В качестве псевдоскоростей выберем V (проекция скорости точки E на продольную ось буера), Ω (угловая скорость $\Omega = \dot{\alpha}$), ω (угловая скорость $\omega = \dot{\beta}$).

Первая группа уравнений имеет вид (2):

$$
\begin{aligned}
&\dot{x} = V\cos\varphi,\\
&\dot{x} = V\sin\varphi,\\
&\dot{\varphi} = \frac{V\sin\varphi - \Omega n}{n + \cos\alpha},\\
&\dot{\alpha} = \Omega,\\
&\dot{\beta} = \omega,\\
&\dot{\psi}_A = \frac{V(n + c\cos\alpha - a\sin\alpha) + an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)},\\
&\dot{\psi}_B = \frac{V(n + c\cos\alpha + a\sin\alpha) - an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)},\\
&\dot{\psi}_C = \frac{V(c + n\cos\alpha) - cn\Omega\sin\alpha}{R_c(n + c\cos\alpha)}.
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Вычисляя обобщенные импульсы и используя их в схеме составления уравнений движения [1], исключаем их из уравнений, затем дополняем систему (2) тремя уравнениями на псевдоскорости V, Ω, ω.

Эти уравнения имеют вид (3):

$$
\begin{aligned}
&\left(M + 2\frac{J_k^{\,y}}{R_k^{\,2}} + \left(2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + J\right)\frac{\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2md\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{2m\sin\alpha\sin\beta}{n + c\cos\alpha} + \frac{J_c^{\,y}(c + n\cos\alpha)^2}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2}\right)\dot{V} +\\
&\left(\left(J_2 - J_c^{\,y}\frac{n^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{c\sin\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2n\sin\alpha(m_1c\cos\alpha - md\cos\beta)}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\dot{\Omega} +\\
&\left(\frac{(J_1 - md\cos\beta)\sin\alpha}{n + c\cos\alpha} + m\sin\beta\right)\dot{\omega} + \left(\frac{2m\sin\alpha\cos\beta}{n + c\cos\alpha} + \frac{2md\sin^2\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\omega +\\
&\left(\frac{2md(c + n\cos\alpha)\sin\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{\left(J + \frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}(c^2 - n^2)}{R_c^{\,2}} - 3m_1n\right)(c + n\cos\alpha)\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3}\right)\Omega V +\\
&\left(\frac{m(c^2 + n^2)\cos\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{mcn\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{nc(m_1\sin\alpha - m\sin\beta)\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{m_1c^2\cos\alpha\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3}\right)\Omega V +\\
&\left(-\frac{\left(J + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)ns\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{J_c^{\,y}c^2n^2\sin^2\alpha\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{2cnmd\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{cnm\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)\Omega^2 +\\
&\left(-\frac{2m_1c^2n\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{J_c^{\,y}c^2n\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{J_c^{\,y}cn^2\cos^2\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{3m_1cn\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{m_1c}{n + c\cos\alpha}\right)\Omega^2 -\\
&\left(\frac{2dnm\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{mn\cos\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\Omega\omega + \left(m\cos\beta + \frac{dm\sin\alpha\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\omega^2 = Q_V,\\
&\left(\left(J_2 - J_c^{\,y}\frac{n^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{c\sin\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2n\sin\alpha(m_1c\cos\alpha - md\cos\beta)}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\dot{V} +\\
&\left(\left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n^2}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(\frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}} + 2m_1n - J_2\right)\frac{c^2\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2mdn^2\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)\dot{\Omega} +\\
&\frac{n(md\cos\beta - J_1)}{n + c\cos\alpha}\dot{\omega} + \frac{m_1n\sin\alpha(c + n\cos\alpha)}{(n + c\cos\alpha)^2}V^2 +\\
&\left(-\frac{\left(J + \frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}(c^2 - n^2)}{R_c^{\,2}} - 3m_1n\right)nc^2\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{2cnm\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{Jn\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{m_1c^2\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega +\\
&\left(-\frac{2m_1cn\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{m_1c\cos^2\alpha}{n + c\cos\alpha} - \frac{2m_1c^2n\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{2J_k^{\,y}a^2n\cos\alpha}{R_k^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{2mdn\cos\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega +\\
&\frac{J_2\cos\alpha(c^2 + n^2 + 2nc\cos\alpha)}{(n + c\cos\alpha)^3}V\Omega + \left(-\frac{2mdn\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\cos\beta}{n + c\cos\alpha}\right)V\omega +
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

$$\left(\frac{m_1 cn\sin\alpha}{n+c\cos\alpha}+\frac{Jcn^2\sin\alpha}{(n+c\cos\alpha)^3}+\frac{2m_1c^2n^2\sin\alpha\cos\alpha}{(n+c\cos\alpha)^3}-\frac{2mdcn^2\sin\alpha\cos\beta}{(n+c\cos\alpha)^3}-\frac{J_2cn\sin\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}\right)\Omega^2+$$

$$\left(-\frac{m_1c^2n\sin\alpha\cos\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{J_c^{\,y}c^2n^2\sin\alpha\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{2J_k^{\,y}a^2n^2c\sin\alpha}{R_k^{\,2}(n+c\cos\alpha)^3}+\frac{m_1n^2c\sin^2\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{J_c^{\,y}c^3n^2\sin^3\alpha}{R_c^{\,2}(n+c\cos\alpha)^3}\right)\Omega^2+$$

$$\frac{2mdn^2\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}\Omega\omega-\frac{mdn\sin\beta}{n+c\cos\alpha}\omega^2=Q_\Omega,$$

$$\left(m\sin\beta+(J_1-md\cos\beta)\frac{\sin\alpha}{n+c\cos\alpha}\right)\dot V+\frac{n(md\cos\beta-J_1)}{n+c\cos\alpha}\dot\Omega+J_1\omega-\left(\frac{md\sin^2\alpha\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{m\sin\alpha\cos\beta}{n+c\cos\alpha}\right)V^2+$$

$$\left(\frac{mn\cos\beta}{n+c\cos\alpha}+\frac{(J_1-md\cos\beta)(c+n\cos\beta)}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{2mdn\sin\alpha\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega=Q_\omega.$$

Совокупность (2) и (3) является полной системой динамических уравнений движения. Для ее замыкания необходимо вычислить обобщенные силы.

1.2. Обобщенные силы. Замыкание системы уравнений движения

Для окончательного замыкания системы необходимо определить силы и моменты сил, которые действуют в системе, а затем найти обобщенные силы Q_V, Q_Ω, Q_ω.

1.2.1. Аэродинамические силы

Для описания аэродинамического воздействия на аппарат воспользуемся квазистатическим представлением [2,3]. Будем считать, что аэродинамическая сила приложена в центре давления паруса F_S.

Искомую аэродинамическую силу разложим на 2 составляющие: силу лобового сопротивления $\vec S$ и подъемную силу $\vec P$. Сила лобового сопротивления $\vec S$ сонаправлена с вектором относительной (вымпельной) скорости ветра $\vec V_r$, и ее значение равно $S=\frac{\rho S_s}{2}s(\gamma)V_r^2$, где S_s - площадь паруса, γ -угол атаки, т.е. угол между плоскостью паруса и вектором вымпельной скорости, $s(\gamma)$ -аэродинамический коэффициент, зависящий от угла атаки.

Подъемная сила $\vec P$ перпендикулярна вымпельной скорости, а ее направление зависит от угла атаки: если $\gamma>0$, то $\vec S$ и $\vec P$ составляют правую пару осей, если $\gamma<0$, то левую. Ее значение равно $S=\frac{\rho S_s}{2}p(\gamma)V_r^2$, здесь $p(\gamma)$ -аэродинамический коэффициент для подъемной силы. Коэффициент $s(\gamma)$ неотрицателен, что характеризует сопротивляемость среды, функция $p(\gamma)$ - нечетна в силу того, что направление подъемной силы изменяется на противоположное при смене знака угла атаки.

Несмотря на то, что поле скоростей ветра в неподвижной системе координат однородно, поле вымпельных скоростей около паруса таким свойством не обладает, так как каждая точка паруса может иметь разную скорость и по модулю и по направлению. Отсюда следует, что центр давления F зависит от распределения вымпельных скоростей.

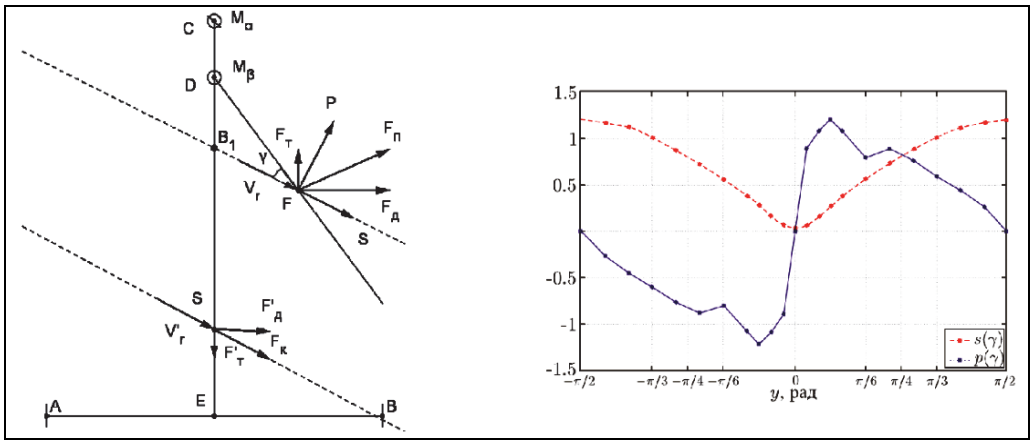


Рис. 2. Аэродинамические силы и коэффициенты

Аэродинамические силы можно далее разложить по осям системы координат Ex_0y_0, связанной с буером, на силу тяги $\vec{F}_m$ и силу дрейфа $\vec{F}_d$ (рис. 2).

Для произвольной точки W на парусе, удаленной от мачты на расстояние μ, вымпельная скорость ветра равна:

$$\vec{V}_{Wr} = \vec{V}_\omega - \vec{V}_w =$$
$$\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right)\vec{x}_0 +$$
$$\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right)\vec{y}_0 .$$

Сила тяги:

$$\vec{F}_m = \frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\vec{V}_{wr} + p(\gamma)\left[\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}\right]), \vec{x}_0)\, d\mu\, \vec{x}_0 =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right) -$$
$$p(\gamma)\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right))\ d\mu\, \vec{x}_0$$

Сила дрейфа:

$$\vec{F}_d = \frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\vec{V}_{wr} + p(\gamma)\left[\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}\right]), \vec{x}_0)\, d\mu\, \vec{y}_0 =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right) +$$
$$p(\gamma)\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right))\, d\mu\, \vec{y}_0 \quad ,$$

где угол атаки γ есть угол между вымпельной скоростью и парусом.

Чтобы найти центр давления, найдем момент аэродинамических сил:

$$\vec{M}_D = \int_0^l -\mu\left[(\cos\beta\,\vec{x}_0 + \sin\beta\,\vec{y}_0) \times \vec{F}(\mu)\right] d\mu =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l \mu V_{wr}(\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right)(s(\gamma)\sin\beta - p(\gamma)\cos\beta) -$$
$$\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right)(s(\gamma)\sin\beta - p(\gamma)\cos\beta))\, d\mu\, \vec{z}_0$$

Тогда расстояние f центра давления от центра мачты будет:

$$f = \frac{\left\|\vec{M}_D\right\|}{\left\|\vec{F}_m\right\|\sin\beta - \left\|\vec{F}_d\right\|\cos\beta}.$$

Заметим, что силы тяги и дрейфа действуют и на парус, и на корпус аппарата. Последние будем обозначать штрихами.

1.2.2. Управляющие моменты и обобщенные силы

Помимо аэродинамических сил, в системе действуют управляющие моменты $\bar{M}_\alpha$ и $\bar{M}_\beta$, которые приложены соответственно к вилке переднего колеса и парусу в точках G и D. При таком определении сил, действующих в системе, обобщенные силы выражаются следующим образом:

$$Q_V = F_m' + F_m' + \frac{\sin\alpha}{n + c\cos\alpha}(F_d d + F_d' s) + \frac{f\sin\alpha}{n + c\cos\alpha}(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta),$$

$$Q_\Omega = \frac{n}{n + c\cos\alpha}(F_d d + F_d' s) - \frac{f\, n}{n + c\cos\alpha}(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta) + M_\alpha,$$

$$Q_\omega = f(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta) + M_\beta.$$

Так получаем замкнутую систему уравнений движения робота-буера.

2. Задача оптимального быстродействия

2.1. Задача с ограничениями

Задача оптимального управления ставится в постановках: с ограничением на траекторию и без ограничений, ограничение в первом случае заключается в том, что точка E может двигаться только по оси абсцисс Ox.

Формализованная задача оптимального быстродействия при наличии ограничений выглядит следующим образом (I - функционал задачи):

$$I = \int_0^T dt = T \to \min$$

$$\begin{cases} \dot V = f_1(V, \Omega, \omega, x, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta) \\ \dot\Omega = 0 \\ \dot\omega = f_3(V, \Omega, \omega, x, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta) \\ \dot x = V \\ \dot y = 0 \\ \dot\varphi = 0 \\ \dot\alpha = 0 \\ \dot\beta = \omega \\ \dot\psi_A = \dfrac{V}{R_k}, \quad \dot\psi_B = \dfrac{V}{R_k}, \quad \dot\psi_C = \dfrac{V}{R_c} \end{cases}$$

$$V(0) = 0,\ \Omega(0) = 0,\ \omega(0) = 0,\ x(0) = -r_0,\ y(0) = 0,\ \alpha(0) = 0,\ \beta(0) = 0,$$
$$\psi_A(0) = 0,\ \psi_B(0) = 0,\ \psi_C(0) = 0,\ x(T) = 0,\ y(T) = 0,$$
$$\| M_\alpha \| < M_1,\ \| M_\beta \| < M_2.$$

2.2. Задача без ограничений

Здесь формализованная задача имеет вид:

$$I = \int_0^T dt = T \to \min$$

$$
\begin{cases}
\dot{V} = f_1(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{\Omega} = f_1(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{\omega} = f_3(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{x} = V\cos\alpha \\
\dot{y} = V\sin\alpha \\
\dot{\varphi} = \dfrac{V\sin\varphi - \Omega n}{n + c\cos\alpha} \\
\dot{\alpha} = \Omega \\
\dot{\beta} = \omega \\
\dot{\psi}_A = \dfrac{V(n + c\cos\alpha - a\sin\alpha) + an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)}, \quad \dot{\psi}_B = \dfrac{V(n + c\cos\alpha + a\sin\alpha) - an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)}, \\
\dot{\psi}_C = \dfrac{V(c + n\cos\alpha) - cn\Omega\sin\alpha}{R_c(n + c\cos\alpha)}
\end{cases}
$$

$$
V(0) = 0,\ \Omega(0) = 0,\ \omega(0) = 0,\ x(0) = -r_0,\ y(0) = 0,\ \alpha(0) = 0,\ \beta(0) = 0,
$$

$$
\psi_A(0) = 0,\ \psi_B(0) = 0,\ \psi_C(0) = 0,\ x(T) = 0,\ y(T) = 0,
$$

$$
\|M_\alpha\| < M_1,\ \|M_\beta\| < M_2 .
$$

Управление осуществляется моментами $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$.

Для численного решения используется принцип максимума Понтрягина. Составляется система сопряженных уравнений, и выписываются необходимые условия оптимальности. Краевые условия находятся из условий трансверсальности. Далее полученная система интегрируется численно методом Рунге-Кутта 4 порядка с динамическим выбором шага. Для определения необходимых начальных условий используется вычислительный метод пристрелки.

2.3. Результаты численного интегрирования

Сначала была решена задача оптимального управления при движении по прямой. Затем решались задачи для движения по произвольной, но оптимальной, траектории.

В результате численного эксперимента были получены управляющие моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$. Рассматривалось также поведение управляющих углов α, β. Результаты расчетов приведены ниже на графиках.

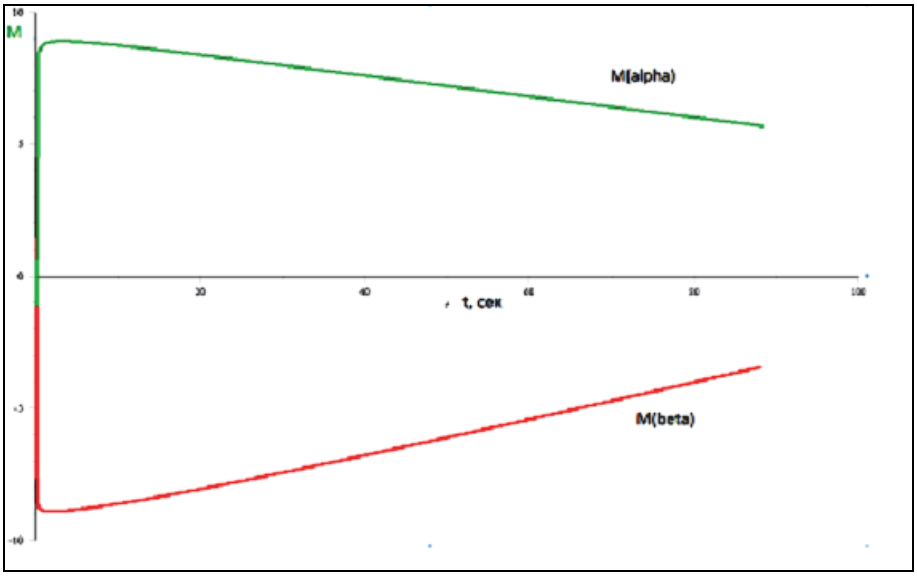


Рис. 3. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при угле ветра $\psi = 0$, движение по прямой

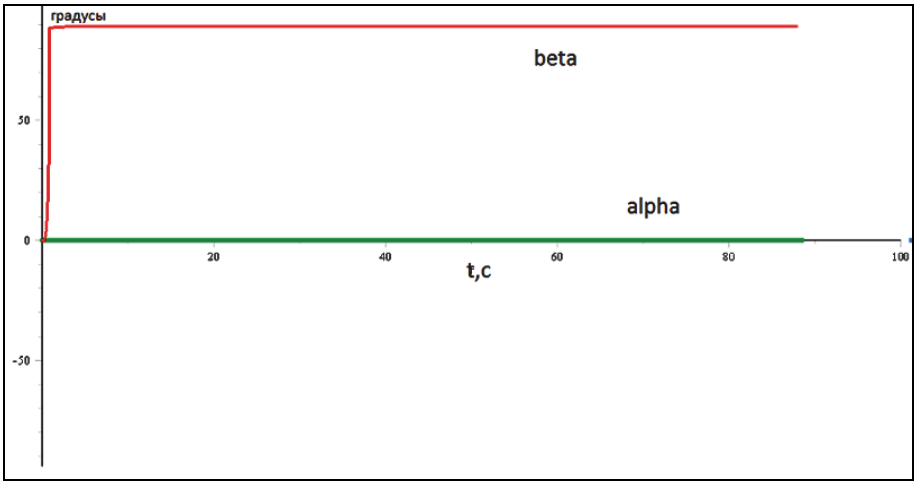


Рис.4. Углы α, β при $\psi = 0$, движение по прямой

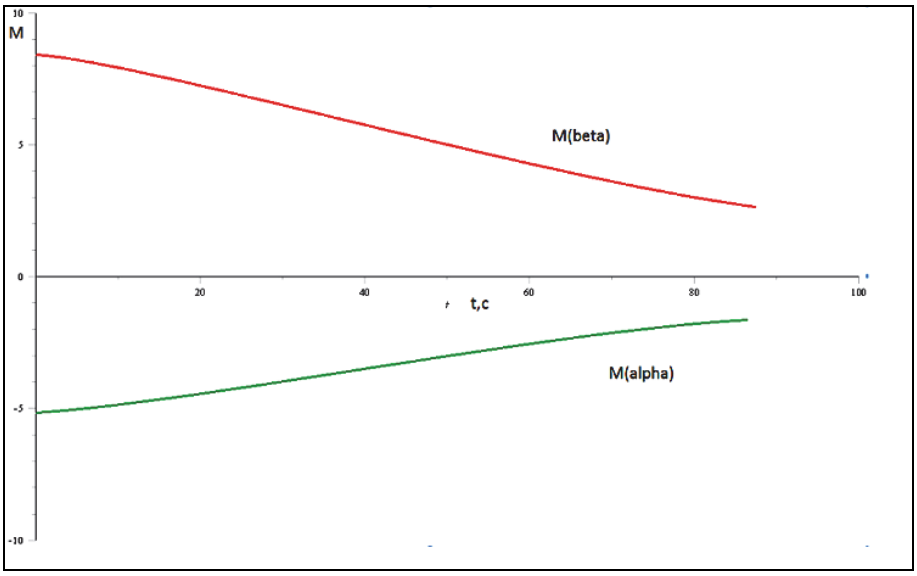


Рис.5. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при $\psi = \frac{\pi}{3}$, движение по прямой

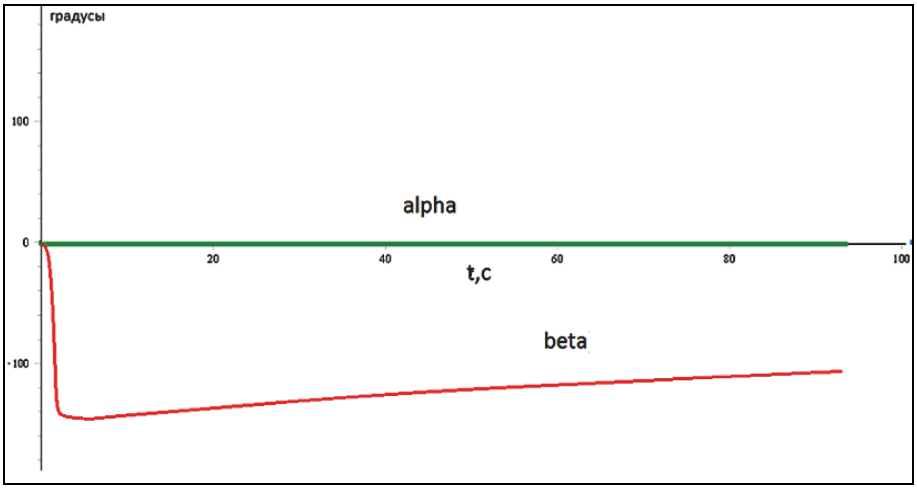


Рис.6. Углы α, β при $\psi = \frac{\pi}{3}$, движение по прямой

После этого были получены решения оптимального управления без ограничений на траекторию. Были получены следующие результаты при угле ветра $\psi = \pi/3$.

Также исследовалась зависимость траектории движения от величины выноса переднего колеса. Результаты экспериментов приведены на рис. 9.

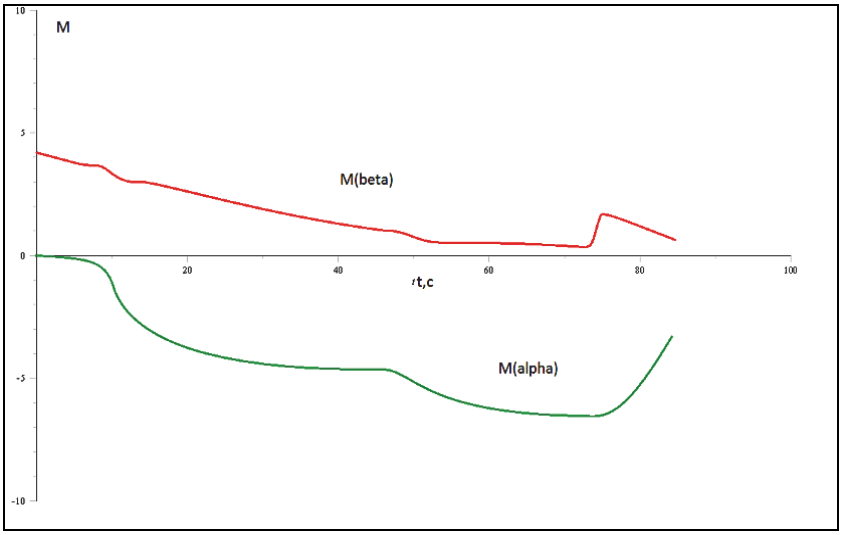


Рис. 7. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при $\psi = \pi/3$, движение без ограничений

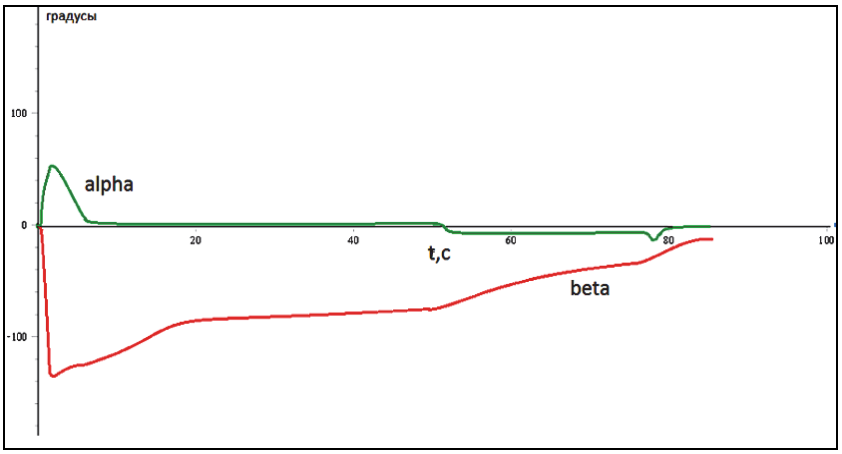


Рис. 8. Углы α, β при $\psi = \pi/3$, движение без ограничений

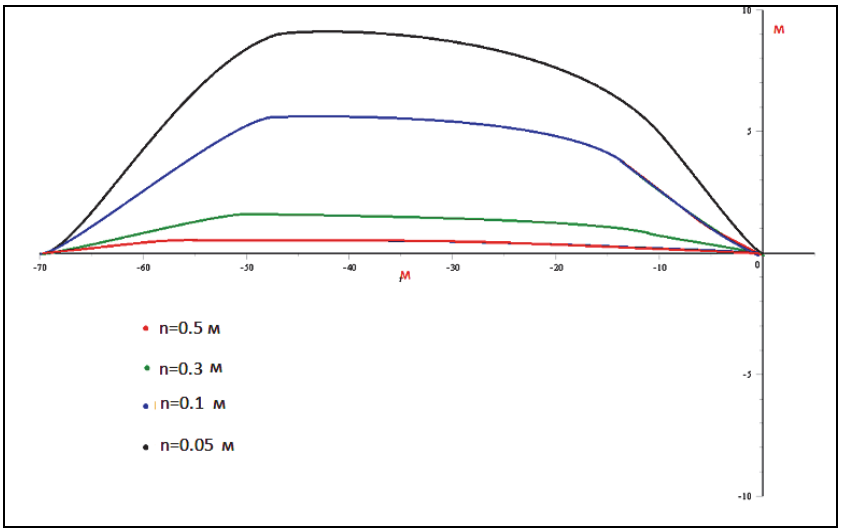


Рис. 9. Траектории при различной длине выноса

Как следует из представленного графика, по мере увеличения длины выноса переднего колеса траектории «прижимаются» к оси Ox, причем значения функционала времени растут с увеличением выноса подвески колеса.

В следующей таблице приведены результаты экспериментов при различных направлениях выноса переднего колеса в начальный момент времени. Вынос колеса назад соответствует условию $\alpha(0) = \pi$.

Результаты экспериментов при различном выносе колеса и направлениях ветра

Направление ветра ψ	Время прибытия по прямой при выносе вперед, секунд	Время прибытия по прямой при выносе назад, секунд	Время прибытия без ограничений при выносе вперед, секунд	Время прибытия без ограничений при выносе назад, секунд
0	71.2	71.2	71.2	71.2
$\pi/8$	74.2	74.2	72.8	73.3
$\pi/6$	80.9	80.9	75.8	76.7
$\pi/5$	85.1	85.1	78.3	80.4
$\pi/4$	88.5	88.5	80.5	83.9
$\pi/3$	92.3	92.3	81.3	84.1

3. Заключение

В данной работе разработана теоретико-механическая модель роботизированного буера с выносом переднего колеса. Она может применяться при синтезе управления буером в реальных условиях.

Построено оптимальное управление буером при фиксированных значениях модуля скорости ветра и его направлениях $\psi = 0, \psi = \pi/3$ при движении по прямой и при движении без ограничений на траекторию, для этого численно были найдены управляющие моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$, тем самым для этих значений решена задача оптимального быстродействия. Таким образом, подтверждены правила выставления паруса в морской навигации [4] и результаты работы [5].

Были проведены эксперименты с различными длинами выноса переднего колеса в результате которых можно сделать вывод, что при увеличении длины выноса значение достигаемого функционала времени увеличивается. Так были проведены эксперименты с различным направлением выноса (вперед/назад) и получено, что при прочих остальных идентичных условиях задачи, значения функционалов времени, которые достигаются при выносе вперед, меньше, чем при выносе назад (81,3 сек. при выносе вперед и 84,1 сек. при выносе назад). Тем самым обосновывается факт, что существующие модели радиоуправляемых буеров, предназначенные для гонок [6], имеют вынос переднего колеса, направленный вперед.

В продолжение работы выполняется разработка макета управляемого робота-буера. На нем будет проверена созданная модель управления этим объектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Татаринов Я. В.* Уравнения классической механики в новой форме // Вестник МГУ. Сер. Матем. Механ., 2003, №3, с.67-76.

2. *Локшин Б. Я., Привалов В.А., Самсонов В.А.* Введение в задачу о движении точки и тела в сопротивляющейся среде. М.: МГУ, 1992. 75 с.

3. *Жуковский Н.Е.* Теоретические основы воздухоплавания: Ч.2// Полное собрание сочинений: Лекции: Вып.2. А.П.Котельников, В.С. Пышнов, В.А.Семенов (ред.);-ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. М.-Л.:Оборонгиз, 1939. 206 с.

4. *Леонтьев Е.П.* Школа Яхтенного капитана. М.: Физкультура и спорт, 1983. 245 с.

5. *Павловский В.Е., Глазкова Л.В., Панченко А.В.* Динамика, моделирование и управление колесным робобуером // Нелинейная динамика, 2012, т.8, №4, с.679-687.

6. Электронный ресурс: http://www.modellandyachts.com/

УДК 531.1

А. В. Панченко

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНОГИМ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ С МНОГОЗВЕННЫМ КОРПУСОМ

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
PanchenkoAV@vap.ru

В работе описан кинематический алгоритм управления многоногим шагающим аппаратом с многозвенным корпусом. Проведена верификация алгоритма управления на примере модели трехзвенного корпуса.
Ключевые слова: шестиногий аппарат, ломающийся корпус, управление, шагающий аппарат.

A. V. Panchenko

KINEMATIC CONTROL ALGORITHM FOR MULTILEGGED WALKING ROBOT WITH ARTICULATED BODY

Lomonosov Moscow State University

In this paper kinematical control algorithm for multilegged robot with articulated body is described. Control algorithm was verified on two six legged robot models: three segment body.
Keywords: hexapod, articulated body, control, walking robot.

Многозвенные корпуса шагающих аппаратов обладают рядом преимуществ. Рассмотрим классическую ситуацию: преодоление аппаратом с жестким корпусом препятствия типа «расщелина». Соотношения размеров аппарата и размеров препятствия могут быть таковы, что робот в какой-то момент не дотянется до опорной поверхности и зацепится корпусом за опорную поверхность, либо не сможет иметь достаточной опоры под ногами, чтобы переместить корпус. На рис. 1 схематически изображен случай застревания аппарата при преодолении препятствия типа расщелина.

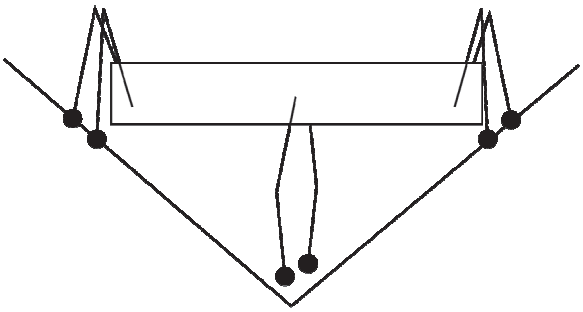


Рис. 1. Препятствие типа расщелина

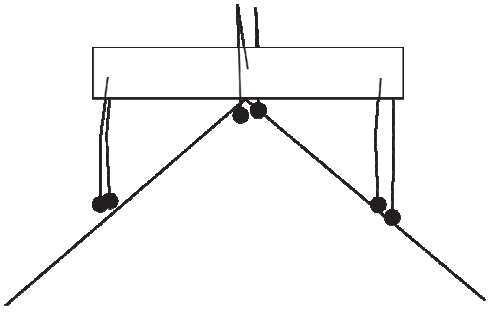


Рис. 2. Препятствие типа камень

Аналогичная ситуация возникает при преодолении препятствий типа камень. Корпус аппарата цепляется своей средней частью за камень, а передние или задние ноги не дотягиваются до опорной поверхности.

Аппарат с дополнительными шарнирами в корпусе способен адаптироваться к препятствию за счет внутренних степеней свободы корпуса. При изменении геометрии корпуса происходит смещение точек крепления ног.

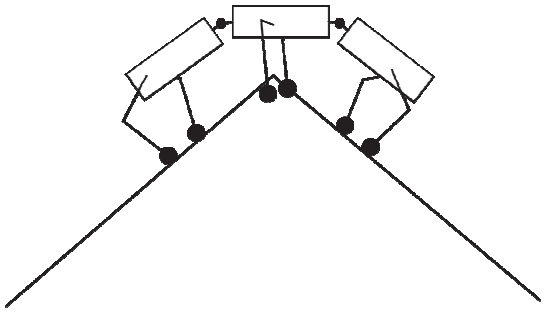


Рис. 3. Аппарат с трехзвенным корпусом

Добавление внутренних подвижностей в корпусе аппарата усложняет управление. В данной работе будет показан общий подход к построению управления корпусом аппарата. Дополнительно требуется, чтобы движение аппарата являлось кинематически точным, т. е. ноги, находящиеся в опорной фазе не должны проскальзывать во время движения аппарата.

Рассмотрим структуру аппарата с шестью ногами и трехзвенным корпусом. Звенья корпуса последовательно соединены в цепочку, к каждому звену корпуса присоединена пара ног (рис. 4).

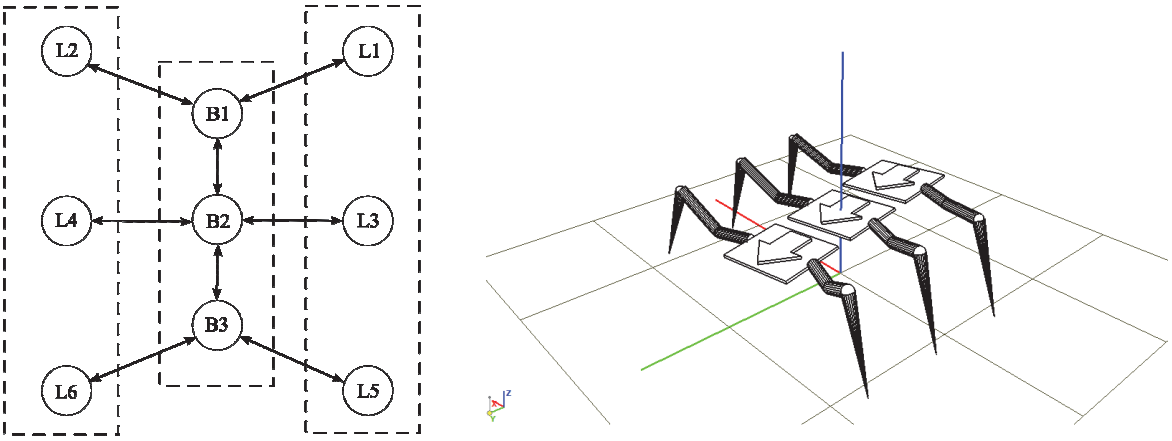


Рис. 4. Структура аппарата с трехзвенным корпусом

Структура аппарата представлена в виде дерева. Вершины дерева соответствуют функциональным сегментам аппарата. Сегменты B1, B2, B3 соответствуют сегментам корпуса (Body). Вершины L1 – L6 соответствуют ногам аппарата (Legs). Ребра дерева соответствуют механическим шарнирам. Каждому ребру между звеньями дерева соответствует закон перехода между системами координат связанных с соответствующими сегментами.

В общем случае, если в корпусе аппарата есть замкнутые кинематические цепи, то структура аппарата задается в виде графа. Для каждого графа можно построить минимальное остовное дерево. В данной статье не будет рассматриваться вопрос исследования условий совместности системы с замкнутыми кинематическими схемами.

Пусть корень дерева – вершина B2, соответствующая среднему звену корпуса. Звено, соответствующее корню дерева, назовем главным. Для главного звена заданы преобразования сдвига и поворота. Сдвиг задается в системе координат (СК) главного звена при помощи вектора сдвига $\mathbf{P} = (p_1,p_2,p_3)$, поворот главного звена задается в углах Крылова и записывается в виде матрицы поворота $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{\gamma}\mathbf{A}^{\theta}\mathbf{A}^{\psi}$. Требуется выполнить преобразования сдвига и поворота так, чтобы после преобразования абсолютные координаты стоп опорных ног не изменились.

Пусть текущее положение стопы для 1-ой ноги задается вектором $\boldsymbol{\rho}_1$ и известны текущие координаты шарниров корпуса. Найдем выражение положения стопы $\boldsymbol{\rho}_1$ в СК главного звена B2. Для выражения координат 1-ой стопы требуется выполнить переход от вершины L1 к корню B2. При последовательном переходе по ребрам пути от L1 к B2 требуется последовательно совершать преобразования над вектором $\boldsymbol{\rho}_1$, соответствующие проходимым ребрам. В зависимости от направления прохода ребра выполняется прямое или обратное преобразование. Координаты стопы 1-ой ноги в СК главного звена:

$$(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)$$

Символ ○ над стрелкой преобразования означает, что при выполнении преобразования координат используются нулевые значения шарнирных координат корпуса. В СК главного звена заданы преобразования сдвига и поворота, для координат стопы требуется выполнить обратные преобразования:

$$\mathbf{A}^T[(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)-\mathbf{P}]$$

После преобразований главного звена требуется выразить новые координаты стопы в исходной системе координат ноги L1. Для этого выполняется переход от корня дерева B2 к звену L1 с выполнением обратных преобразований:

$$(B2 \xrightarrow{\bullet} B1 \xrightarrow{\bullet} L1)^*A^T[(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)-\mathbf{P}]$$

Символ ● над стрелкой преобразования означает, что при выполнении преобразования координат используются текущие значения шарнирных координат корпуса. Для остальных ног аппарата строятся аналогичные цепочки преобразований координат стоп.

Описанный алгоритм преобразования координат подходит для общих случаев структуры

шагающих аппаратов. В частности, аппарат с жестким корпусом имеет структуру:

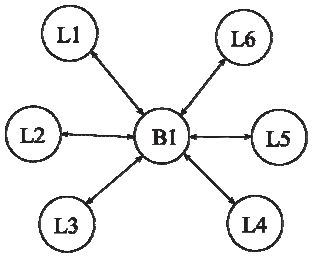


Рис. 5. Шестиногий аппарат с жестким корпусом

Корпус аппарат состоит из одного звена B1, оно всегда будет главным. Преобразования координат стоп ног L1,…, L6 будут выполняться по схожим формулам, т.к. структура ветвей (L1,B1), …, (L6,B1) единообразна.

Структура аппарата может быть произвольной. Ниже приведен пример аппарата со случайным структурным деревом (рис. 6).

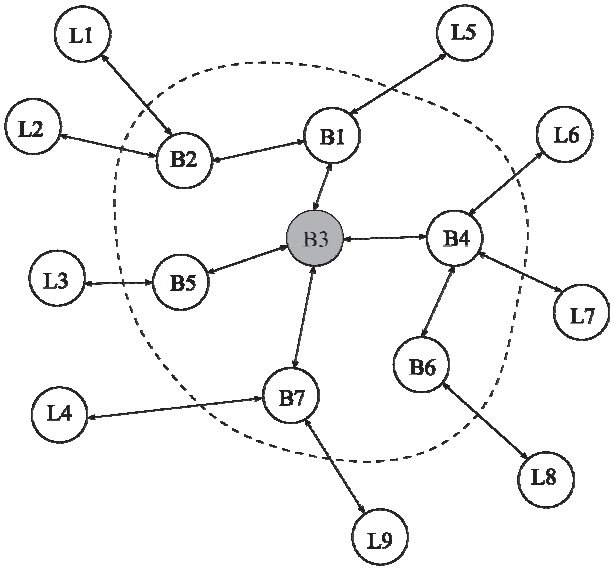


Рис. 6. Пример произвольного аппарата с многозвенным корпусом

Аппарат состоит из семизвенного корпуса и девяти ног. Есть сегменты корпуса, к которым присоединены две ноги – B2, B4,B7, есть сегменты с одной ногой – B1, B5, B6, есть сегменты без присоединенных ног – B3. В качестве главного звена – корня структурного дерева, может быть выбран произвольный сегмент корпуса.

Структурное представление шагающего аппарата в виде дерева позволяет автоматизировать анализ шагающих аппаратов. По заданному структурному дереву можно в автоматическом режиме синтезировать алгоритм управления корпусом в терминах задания программного движения для главного звена и задания законов изменения шарнирных координат корпуса. В представленной работе не решается задача управления избыточными степенями свободы в корпусе, предполагается, что закон изменения шарнирных координат корпуса известен.

Верификация алгоритма преобразования координат стопы выполняется при помощи программного комплекса «Универсальный Механизм» (ПК УМ). В терминах данной программы механическая система описывается как система твердых тел соединенных различными шарнирами. При помощи файла управления модели программируются все преобразования координат для конкретной модели аппарата в зависимости от заданного программного движения аппарата.

Алгоритм управления корпусом верифицировался на модели аппарата с трехзвенным корпусом. Корпус аппарата состоит из трех одинаковых звеньев, соединенных между собой цилиндрическими вращательными шарнирами. Оси вращения лежат в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 7.

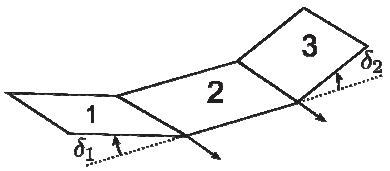


Рис. 7. Кинематическая схема трехзвенного корпуса

Ноги имеют так называемую инсектоморфную схему. Для каждого сегмента заданы все динамические параметры, такие как тензор инерции, масса и положение центра масс. Модель контакта ноги с опорной поверхностью точечная. Математическая модель контакта соответствует модели кулоновского трения в режиме скольжения. В режиме сцепления используется модель упругого сцепления [6].

Ключевым проверочным параметром правильности построенного алгоритма является отсутствие проскальзывания в точках контакта ног с опорной поверхностью. Другими словами, в результате работы алгоритма управления корпусом, абсолютное положение ног аппарата не должно изменяться.

Пусть заданы углы Крылова:

$$(\psi\ ,\ \theta\ ,\ \gamma)\ (t) = (0.1\ \sin(2\ t)\ ,\ 0.05\sin(3\ t)\ ,\ 0.25\sin(6\ t))$$

Внутренние шарнирные координаты корпуса постоянные и равны нулю. Смещение главного звена отсутствует. Все ноги аппарата находятся в опорной фазе.

После интегрирования уравнений движения получаем:

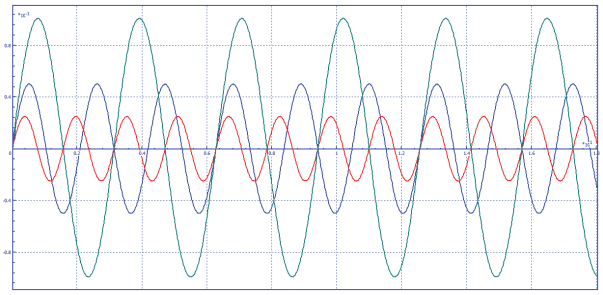


Рис. 8. Углы ориентации главного звена

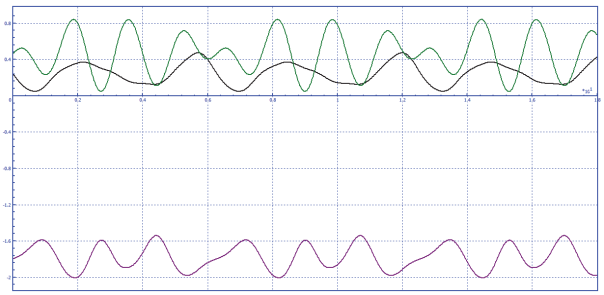
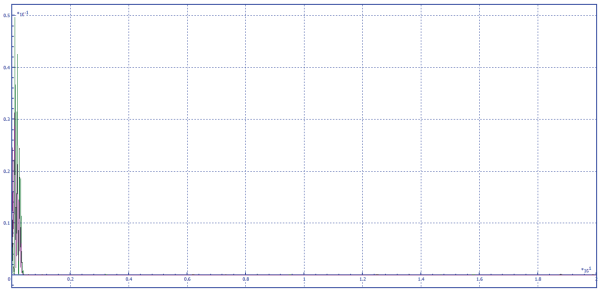


Рис. 9. Шарнирные углы ноги L1

Возмущения скорости в начале графика связанны с перераспределением опорных реакций в начальный момент времени и моделью серво управления в шарнирах модели.

График модуля скорости стопы L1 равен нулю:



Построенный алгоритм управления корпусом дополняет алгоритм управления движением аппарата из [1]. Алгоритм управления корпусом может быть получен автоматически по структурному дереву аппарата. Условие совместности структурного дерева аппарата – непротиворечивости конструкции корпуса требует в дальнейшем подробного изучения, корректной и полной формулировки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *В.Е. Павловский, А.В. Панченко*. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота. М.: Изд-во «Новые технологии», №11, 2012. Стр. 23-28.

2. *Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев*. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984.

3. *Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, Е.И. Кугушев, В.С. Ярошевский*. Система построения движений шагающего аппарата «Модель Т3». Ордена Ленина Институт прикладной математики АН СССР, препринт №7 за 1977 год.

4. *В.В. Лапшин*. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

5. Видеоролики моделей http://www.youtube.com/user/SurferMGU

6. Универсальный Механизм http://www.umlab.ru

УДК 004.94

А. Б. Рогудеев, В. В. Сомов, В. М. Константинов, А. О. Пивоваров, А. В. Малолетов

ВЫДЕЛЕНИЕ И ПОДСЧЕТ ИЗБЫТОЧНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛЕЙ В AUTODESK INVENTOR*

Волгоградский государственный технический университет
rogudeevml@yandex.ru, alexbeer8891@mail.ru, vassuv@yandex.ru

Рассматривается задача автоматизации процесса анализа избыточных связей в моделях механических систем, построенных в Autodesk Inventor.

Ключевые слова: моделирование, механизм, избыточная связь, кинематическая пара, Autodesk Inventor

A. B. Rogudeev, V. V. Somov, V. M. Konstantinov, A. O. Pivovarov, A. V. Maloletov

DETERMINATION AND COUNT OF EXCESS BONDS IN BUILDING MODELS IN AUTODESK INVENTOR

Volgograd State Technical University

The problem of automation of the analysis of excess bonds in models of mechanical systems built into Autodesk Inventor is discussed.

Keywords: modeling, mechanism, excess bond, kinematic pair, Autodesk Inventor

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-01144-а, № 13-01-97057- р_поволжье_а.

Введение

Избыточными или пассивными связями в механизмах называют связи, не оказывающие влияния на характер движения механизма в целом [1]. Пассивные связи часто используются в различных механизмах [2, 3] для перераспределения нагрузок внутри механизма, повышения плавности хода, уравновешивания и других целей. В то же время, избыточные связи приводят к статически неопределимым конструкциям и, как следствие, к повышению нагрузок, увеличению потерь на трение, повышению износа, более высоким требованиям к точности изготовления деталей [4]. Поэтому при проектировании механизмов необходимо учитывать наличие в них пассивных связей, как одного из факторов влияющих на долговечность машины [5]. Разрабатываются также способы проектирования механизмов без избыточных связей [6].

Для проверки механизма на наличие в нем избыточных связей обычно используется структурная формула Малышева [1]:

$$q = w - 6n + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1, \qquad (1)$$

где q – число избыточных связей; n – число подвижных звеньев; w – реальная подвижность механизма; p_i – количество кинематических пар i-го класса.

В работе решается задача автоматизации процесса анализа избыточных связей в моделях механических систем, построенных в Autodesk Inventor. При этом предполагается, что реальная подвижность механизма известна.

1. Особенности построения модели механизма в Autodesk Inventor

Autodesk Inventor является системой трехмерного твердотельного и поверхностного проектирования. Для создания модели механизма в этой системе, необходимо:

1) создать детали, из которых состоит механизм;

2) создать сборку механизма, в которую будут включены все необходимые детали;

3) в сборке задать зависимости между деталями.

Для задания связей между деталями в Autodesk Inventor существуют сборочные зависимости, задающие позиционирование компонентов сборки друг относительно друга. При наложении зависимостей удаляются степени свободы и ограничивается возможность перемещения деталей.

Однако, имеющиеся виды зависимостей не вполне соответствуют общепринятой в механике классификации кинематических пар, что часто приводит к необходимости использования нескольких зависимостей для моделирования одной кинематической пары. Некоторые зависимости предназначены для задания связи между перемещениями тел, и не востребованы для моделирования кинематических пар.

В Autodesk Inventor реализованы следующие виды зависимостей [7]:

1. Зависимость **«совмещение/заподлицо»** обеспечивает совмещение плоских граней, прямых линий или точек компонентов. Возможна любая комбинация совмещаемых элементов: плоскость-плоскость, плоскость-линия, плоскость-точка, линия-линия, линия-точка и точка-точка. Сами компоненты при этом могут располагаться напротив или заподлицо друг с другом.

2. Зависимость **«угол»** служит для позиционирования ребер или плоских граней двух компонентов под заданным углом.

3. Зависимость **«касательность»** служит для позиционирования плоскостей, сплайнов, а также цилиндрических, сферических и конических поверхностей по касательной друг к другу. Касание может быть как с внутренней, так и с внешней стороны кривой.

4. Зависимость **«вставка»** служит для позиционирования плоских граней цилиндрических конструктивных элементов перпендикулярно оси цилиндра.

5. Зависимость **«вращение-вращение»** задает вращение одной детали относительно другой с рассчитанным передаточным числом.

6. Зависимость **«вращение-поступательное движение»** служит для моделирования вращения одной детали в зависимости от поступательного движения другой детали.

Из них, для моделирования кинематических пар используются «вставка», обеспечивающая пять ограничений на стенени свободы, и «совмещение/заподлицо», дающее от одной до четырех ограничений при выборе различных частей взаимодействующих тел (табл. 1). Здесь и далее используются сокращения: символом «П» обозначается ограничение на поступательную степень свободы, «В» – ограничение на вращательную степень свободы. Цифры перед символами «П» и «В» означают количество соответствующих ограничений.

Таблица 1

Соотношение между зависимостью и накладываемыми ограничениями

Зависимость			Ограничения на степени свободы	Количество ограничений
Тип зависимости	Выбранная часть первого объекта	Выбранная часть второго объекта		
Совмещение/заподлицо	Плоскость	Плоскость	1 П + 2 В	3
	Плоскость	Линия	1 П + 1 В	2
	Плоскость	Точка	1 П	1
	Линия	Линия	2 П + 2 В	4
	Линия	Точка	2 П	2
	Точка	Точка	3 П	3
Вставка	Любой	Любой	3 П + 2 В	5

2. Моделирование кинематических пар в Autodesk Inventor

Одному и тому же классу соответствуют различные кинематические пары, задающие различные ограничения на степени свободы тел. Кинематическая пара может быть по разному технически реализована, и различным образом смоделирована в Autodesk Inventor. В табл. 2 приведены все возможные варианты моделирования кинематических пар с помощью зависимостей «Совмещение/заподлицо» и «Вставка». Для зависимостей «Совмещение/заподлицо» используются сокращения: П-Т – Плоскость-Точка, П-Л – Плоскость-Линия, П-П – Плоскость-Плоскость, Л-Л – Линия-Линия, Л-Т – Линия-Точка, Т-Т – Точка-Точка. В тех случаях, когда кинематическая пара имеет широко используемое название, оно приведено в последнем столбце таблицы.

Таблица 2

Соотношения между кинематической парой и зависимостями в Autodesk Inventor

Кинематическая пара		Зависимости, оделирующие пару	Название кинематической пары
Класс кинематической пары	Ограничения на степени свободы		
1	1 П	П-Т	Шар-плоскость
2	2 П	2 П-Т	Шар-цилиндр
		Л-Т	
	1 П + 1 В	П-Л	
3	1 П + 2 В	П-П	Плоскостная
		2 П-Л	
	2 П + 1 В	2 П-Л	
		П-Л + П-Т	
	3 П	3 П-Т	Сферическая
		Т-Т	
4	1 П + 3 В	3 П-Л	
	2 П + 2 В	2 П-Л	Цилиндрическая
		П-П + П-Т	
		Л-Л	
	3 П + 1 В	3 П-Л	Сферическая с пальцем
		2 П-Л + П-Т	
		П-Л + 2 П-Т	

Окончание табл. 2

Кинематическая пара		Зависимости, оделирующие пару	Название кинематической пары
Класс кинематической пары	Ограничения на степени свободы		
5	2 П + 3 В	2 П–П	Скользящая заделка
		П–П + П–Л	
		П–П + 2 П–Т	
		П–П + П–Т + Л–Л	
		П–П + П–Т + Л–Т	
		П–П + Л–Л	
		П–Л + Л–Л	
	3 П + 2 В	П-П + 2 П–Т	Вращательная
		П–П + Л–Л	
		П–П + Л–Т	
		П–П + Т–Т	
		П–Л + Л–Л	
		2 П–Л + Л–Т	
		2 П–Л + Т–Т	
		П–Т + Л–Л	
		Л–Л + Л–Т	
		Л–Л + Т–Т	
		Вставка	

3. Алгоритм подсчета количества избыточных связей и его программная реализация

Программа анализа избыточных связей в модели механизма разработана на языке C# с использованием API Autodesk Inventor. Для корректной работы программы Autodesk Inventor должен быть запущен, и анализируемая модель должны быть в нем открыта. Используемые классы, атрибуты и методы приведены в табл. 3.

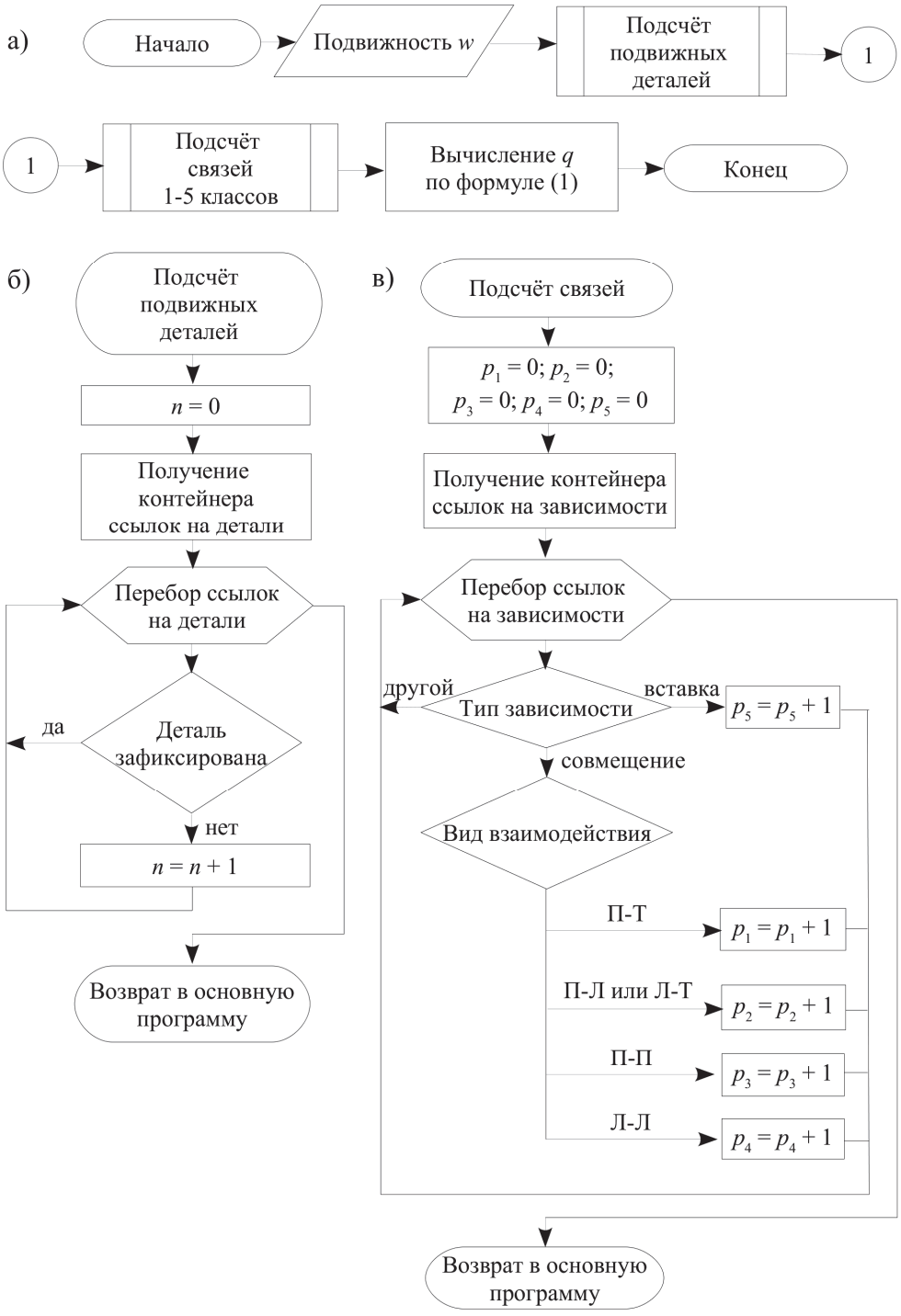
Таблица 3

Описание классов пространства имен Inventor

Описание	Тип данных	Код для получения объекта
Ссылка на открытое приложение	Application	System.Runtime.InteropServices.Marshal.GetActiveObject ("Inventor.Application")
Ссылка на открытый документ	AssemblyDocument	Application.ActiveDocument
Объект класса AssemblyComponentDefinition	AssemblyComponent Definition	AssemblyDocument.ComponentDefinition
Контейнер ссылок на детали	ComponentOccurrences	AssemblyComponentDefinition. Occurences
Ссылка на деталь	ComponentOccurrence	AssemblyComponentDefinition. Occurences[]
Фиксированность детали	bool	ComponentOccurrence.grounded
Контейнер ссылок на зависимости	AssemblyConstraints	AssemblyComponentDefinition. Constraints
Ссылка на зависимость	AssemblyConstraint	AssemblyComponentDefinition. Constraints[]
Тип зависимости (перечисление)	ObjectTypeEnum	AssemblyConstraint.Type
Выбранная часть первой детали при наложении зависимости	dynamic	AssemblyConstraint.EntityOne
Выбранная часть второй детали при наложении зависимости	dynamic	AssemblyConstraint.EntityTwo

Алгоритм работы программы приведен на рисунке *а* и состоит из последовательности действий: указание реальной подвижности механизма w, анализа модели на количество подвижных деталей n и количество связей различных классов p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, вычисления числа пассивных связей по формуле (1).

Подсчет количества подвижных деталей (рисунок *б*) в свою очередь заключается в переборе всех деталей механизма и проверке их на свойство «Фиксированность детали». А подсчет количества связей различных классов (рисунок *в*) осуществляется путем перебора всех зависимостей, в рамках которого анализируется тип каждой зависимости и для зависимости типа «Совмещение/заподлицо» анализируется также вид взаимодействия.



Блок-схемы алгоритма анализа модели механизма на избыточные связи

Заключение

Разработанный алгоритм и реализованная на его основе программа позволяют автоматизировать анализ механических систем на избыточные связи и могут быть востребованы инженерами, проектирующими механизмы и узлы машин с использованием программной системы Autodesk Inventor.

Поскольку анализу подвергается не сама механическая система, а ее модель, то и результат работы программы следует трактовать не как количество избыточных связей в механизме, а как количество избыточных связей в модели. Если при моделировании будут наложены зависимости дублирующие друг друга, то в модели появятся пассивные связи, отсутствующие в реальном механизме. А так как в кинематике избыточные связи себя никак не проявляют, то дублирующие зависимости могут остаться незамеченными. Поэтому для анализа модели на избыточные связи необходимо накладывать только те зависимости, которые соответствуют кинематическим парам моделируемого механизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Артоболевский, И. И.* Теория механизмов и машин. - М.: Наука, 1988. - 640 с.

2. *Чернышев, В. В*. Многофункциональный механизм поворота для транспортно-технологических шагающих машин / В.В.Чернышев, А.В.Малолетов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2001. № 1. С. 48.

3. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А.В.Леонард, А.В.Малолетов // Теория механизмов и машин. 2011. Т. 9. № 17. С. 14-24.

4. *Иосилевич, Г. Б.* Детали машин. - М.: Машиностроение, 1988. - 368 с.

5. *Пивоваров, А. О*. Повышение долговечности планетарного механизма поворота : монография / А.О. Пивоваров, Вл.П. Шевчук. - Saarbrucken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. - 105 с.

6. *Пивоваров, А. О.* Разработка конструкции планетарной передачи без избыточных связей / А.О. Пивоваров // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 6 (ч. 3). - С. 556-560.

7. Autodesk WikiHelp. Inventor 2012 [Электронный ресурс] / Autodesk WikiHelp. - [2013]. - Режим доступа: http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/rus/2012

УДК 621

А. И. Смелягин, И. В. Юхневич

ПОДВИЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Кубанский государственный технологический университет

asmelyagin@yandex.ru

В работе анализируются и исследуются наиболее распространенные в промышленности и быту мобильные транспортные устройства. Найдены структурные формулы основных транспортных средств и определена их подвижность.

Ключевые слова: транспортные средства, устройства, тележки, мобильные роботы, структурные схемы и формулы, кинематические пары, подвижность.

A. I. Smelyagin, I. V. Yukhnevich

MOBILITY VEHICLES

Kuban State University of Technology

This paper analyzes and explores the most common in industry and everyday life mobile transport device. Found major structural formulas of vehicles and picked their mobility.

Keywords: vehicles, devices, carts, mobile robots, block diagrams and formulas, kinematic pairs, mobility.

Транспортные устройства широко применяются в технике. На их базе созданы автомобили, мобильные роботы и манипуляторы, велосипеды, вагоны и тому подобные устройства, передвигающиеся как по дороге, так и по рельсам. Структурные схемы простейших бесповоротных транспортных тележек представлены на рис. 1.

На рис. 1, *а* показано транспортное средство, применяемое в велосипедах, самокатах других подобных устройствах. Эта устройство имеет плохую вертикальную устойчивость. Поэтому на практике чаще применяют не его, а тележки:

• с разнесенным задним (передним) колесом (рис. 1, *б*), точнее с разнесенной [1] высшей кинематической парой C (C');

• с широким задним (передним) колесом (рис. 1, *в*);

• с разнесенной вращательной кинематической парой D (D') (рис. 1, *в*);

• с разнесенными передним и задним колесами (рис. 1, *г*) или парами B (B') и C (C').

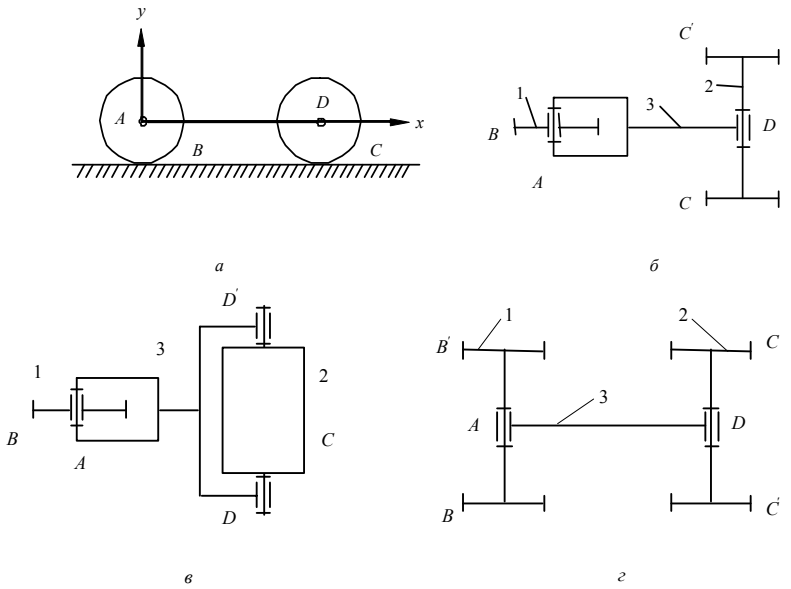


Рис. 1 Двухколесные транспортные тележки:
1, 2 – опорные колеса; 3 – рама; A, D (D′) – низшие вращательные кинематические пары;
B (B′), C (C′) – высшие цилиндр – плоскость кинематические пары

Все эти конструкции эквивалентны друг другу. Это обусловлено тем, что разнесение кинематических пар не влияет на их число и не отражается на структуре устройства.

У всех тележек (рис. 1) высшие кинематические пары есть не что иное, как кинематическая пара цилиндр – плоскость. Значит, эти пары одноподвижные и допускают только одно перемещение вдоль оси x. Все вращательные кинематические пары исследуемых транспортных тележек имеют параллельные оси и вращаются вокруг оси z.

Значит, двухколесные бесповоротные транспортные тележки существуют в двухмерном (М=2) двухподвижном (П=2) пространстве. В соответствии с [1] подвижность этих тележек определится по формуле

$$W = 2n - p_1.$$

Все тележки (рис. 1) имеют три (n=3) подвижных звена и четыре (p_1=4) одноподвижные кинематические пары. Тогда их подвижность определится:

$$W = 2 \cdot 3 - 4 = 2.$$

Одна подвижность нужна для перемещения тележки по дороге (рельсу), а вторая подвижность является избыточной или так называемой местной подвижностью опорного колеса.

Известно [1], что местные подвижности не влияют на работу основного механизма и, поэтому, нет необходимости их устранять. Если эту подвижность все-таки надо устранить, то опорное колесо можно заменить, например, кинематической парой плоскость-плоскость (лыжей) (см., например, рис. 3).

Недостатком транспортной тележки с лыжей является то, что в кинематической паре плоскость-плоскость возникает большое трение скольжения, поэтому они применяются довольно редко.

При передвижении транспортных средств (рис. 1) по рельсам их колеса снабжаются ребордами, которые не дают тележкам перемещаться в поперечном направлении. Реборды в данном случае ни как не влияют на определение подвижности, так как поперечное перемещение в таких тележках и так не реализуется.

При установке транспортных тележек (рис. 1) на зубчатые рельсы, их колеса так же выполняются зубчатыми. В этом случае в таких тележках возникает передача зубчатое колесо – рейка. Поэтому рассмотрим, определение подвижности пары зубчатое колесо – рейка.

Передача зубчатое колесо – рейка состоит из двух ($n = 2$) подвижных звеньев – колеса и рейки, которые при соединении между собой образуют высшую кинематическую пару.

В этой передаче, как и в передачах с зубчатыми колесами, существует взаимозависимость вращательного движения зубчатого колеса и поступательного рейки. Покажем это.

Передаточное отношение для передачи зубчатое колесо – рейка может быть определено следующим образом:

$$i = \omega / V;$$

$$i = \omega / (\omega R) = 1 / R,$$

где ω - угловая скорость колеса; V – линейная скорость оси симметрии колеса; R – радиус зубчатого колеса.

Из формулы передаточного отношения видно, что вращательное движение зубчатого колеса и поступательное движение рейки являются взаимозависимыми, значит, при определении подвижности пространства, в котором существует исследуемый механизм, надо учитывать только одно из этих движений.

Анализ движений в кинематических парах тележек (рис. 1) показывает, что в них соответственно реализуются вращательное движение вокруг оси z и поступательное перемещение вдоль оси x.

В кинематических парах В(С) в зависимости от профиля и наклона зубьев, как было установлено в [1], могут реализоваться следующие движения:

эвольвентная прямозубая – два поступательных вдоль осей X и Y;

эвольвентная косозубая – три поступательных вдоль осей X, Y и Z;

круговинтовая (Новикова) – одно поступательное вдоль оси Z;

с торцевыми зубьями – два поступательных вдоль осей X и Y.

В зависимости от профиля и наклона зубьев передача зубчатое колесо – рейка будет существовать соответственно в двух, трех и четырехподвижном пространствах. А значит, для каждого из пространств будет своя структурная формула для определения подвижности [1]. Однако подвижность, определяемая по любой из формул, всегда будет равна 1. Следовательно, подвижность транспортных тележек выполненных по рис. 1 будет определяться, так же как и при круглых колесах.

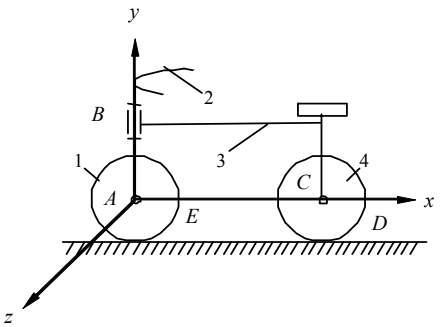


Рис. 2. Поворотная транспортная тележка:
1, *4* – опорные колеса; *2* – руль; *3* – рама; *A*, *B*, *C* – низшие вращательные пары; *E*, *D* – высшие кинематические пары цилиндр – плоскость

Для изменения направления движения транспортные тележки делаются поворотными (рис. 2) и снабжаются рулем.

Из рис. 2. видно, что исследуемая тележка отличается от предыдущей (рис. 1) тем, что в нее введены кинематическая пара B и дополнительное подвижное звено *2*, которое может вращаться вокруг оси y. Эти нововведения превратили высшие кинематические пары E и D в двухподвижные. Действительно, элементы кинематической пары E движутся поступательно вдоль оси x и вращаются вокруг оси y

Итак, в данной тележке реализуются следующие независимые движения: x, y, φ_z, φ_y, т. е. она существует в трехмерном (М=3) четырехподвижном (П=4) пространстве.

В соответствии с [1] подвижность этой тележки определится по формуле

$$W = 4n - 3p_1 - 2p_2 - p_3.$$

Тележка имеет четыре (n=4) подвижных звена, три (p_1=3) одноподвижные вращательные кинематические пары A, B, C и две двухподвижные (p_2=2) кинематические пары D, E цилиндр – плоскость.

Следовательно, подвижность этой тележки определится:

$$W = 4 \cdot 4 - 3 \cdot 3 - 2 \cdot 2 = 3.$$

Одна подвижность в этой тележке необходима для приведения ее в движение, другая - обеспечивает поворот, а третья является местной подвижностью опорного колеса.

Местную подвижность можно устранить, если одно из опорных колес, например переднее, заменить кинематической парой плоскость-плоскость (лыжей) (рис. 3).

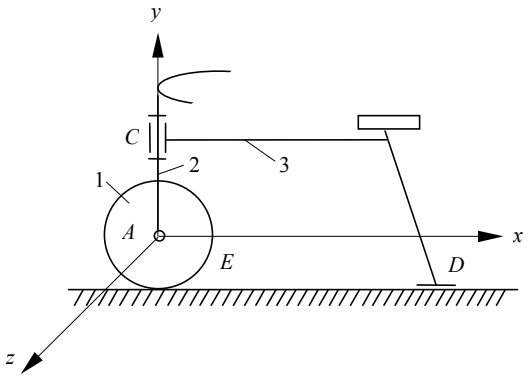


Рис. 3. Двухопорная транспортная тележка с кинематической парой плоскость – плоскость:
1, 2, 3 – подвижные звенья; *A, C* –одноподвижные низшие вращательные кинематические пары; *E, D* – двухподвижные высшие кинематические пары

Транспортная тележка (рис. 3) существует в том же четырехподвижном пространстве, что и предыдущая, но имеет три подвижных звена (n=3), две одноподвижные (p_1=2) и две двухподвижные (p_2=2) кинематические пары.

Подвижность двухопорной транспортной тележки с кинематической парой плоскость – плоскость определится:

$$W = 4 \cdot 3 – 3 \cdot 2 – 2 \cdot 2 = 2.$$

Эти подвижности необходимы для реализации основного движения и изменения направления перемещения. Недостатком транспортной тележки такой конструкции является то, что в кинематической паре D возникает большое трение скольжения, поэтому они применяются довольно редко.

Итак, определены структурные формулы и подвижности основных транспортных средств. Установлено, что транспортные тележки с колесами могут иметь избыточные (местные) подвижности, которые не влияют на основную работу устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смелягин А.И.* Структура механизмов и машин. – М.; Высшая школа, 2006.

2. *Смелягин А.И. Юхневич И.В.* Подвижность транспортных средств. // Материалы Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2013» ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 301…302.

УДК 629.369

В. В. Чернышев, В. А. Шурыгин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ПОДВОДНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА С ГРУНТОМ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Рассматриваются результаты моделирования динамики взаимодействия шагающего движителя с подводным грунтом с низкой несущей способностью. Выясняется влияние на динамику машины плывунных свойств грунта и компрессионного эффекта при смене стоп. Показано, что в подводных условиях шагающие машины существенно превосходят по проходимости традиционные транспортные средства.

Ключевые слова: шагающий движитель, аппараты передвигающиеся по дну, взаимодействие с грунтом, динамическое моделирование.

V. V. Chernyshev, V. A. Shurygin

SIMULATION OF DYNAMICS OF INTERACTION UNDERWATER PROPULSION WALKING APPARATUS WITH THE SOIL WITH LOW BEARING CAPACITY

Volgograd State Technical University

The article considers the results of the dynamic simulation of interaction of the walking propulsion with underwater soil with low bearing capacity. It turns out the influence on the dynamics of machines sinking ground properties of the soil and compression effect when changing feets. It is shown that the passability of walking machines in underwater environments far superior passability of traditional vehicles.

Keywords: walking propulsion, vehicles moving across the bottom, interaction with the soil, dynamic modelling.

Практика подводно-технических работ ставит ряд задач, связанных с проведением грунтовых работ. Эти работы требуют значительных тяговых усилий на рабочий инструмент (ковши, подборщики, отвалы и др.). В качестве средств передвижения по дну уже используются машины с движителями гусеничного типа. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и пересеченностью поверхности дна, делают малопригодными традиционные типы движителей. Для подводных условий более подходят шагающие движители, отличающиеся исключительно высокой грунтовой и профильной проходимостью [1-3].

В работе рассматриваются результаты математического моделирования динамики взаимодействия шагающего движителя со слабонесущими водонасыщенными грунтами с учетом их некоторых специфических особенностей. В частности выясняется влияние на динамику шагающей машины плывунных свойств грунта (плывун – насыщенный водой грунт, разжижающийся при механическом воздействии на

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекта № 13-08-01144-а).

него) и компрессионного эффекта при смене ног (при смене ног из-за разрежения под стопой имеет место сила, препятствующая отрыву стопы от грунта).

Основная сложность математического моделирования процесса взаимодействия шагающего движителя с реальным грунтом состоит в достоверном аналитическом описании процесса реализации тягового усилия и динамики смены стоп. Кроме многообразия грунтов с различными физико-механическими свойствами и конструкции стопы, в рассматриваемом случае также необходимо учитывать скорость нагружения грунта и виброударные процессы, возникающие при смене стоп. По этой причине модели грунта, используемые для традиционных колесных и гусеничных машин малопригодны. Кроме того, в отличие от традиционных транспортных средств, нет возможности рассматривать динамику взаимодействия шагающего движителя с опорной поверхностью без учета динамики всей шагающей машины, совершающей пространственные колебания [4], вызванные самим шагающим способом передвижения.

При моделировании шагающая машина рассматривается в виде системы тел – корпуса и невесомых шагающих движителей (ног). В качестве расчетной, принимается двуногая схема с вертикальным поступательным движением корпуса (рис. 1). Рассматривается случай статически устойчивых машин. Влиянием курсового движения на динамику изменения опорных реакций пренебрегалось, что соответствует ходьбе с малой скоростью.

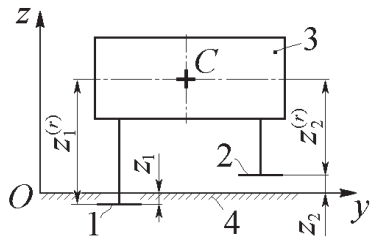


Рис. 1. Расчетная схема:
1, 2 – стопы; 3 – корпус; 4 – грунт

Вертикальное положение стоп определяется переносным движением корпуса машины и их относительным движением по отношению к корпусу

$$z_i = z - z_i^{(r)}, \qquad (1)$$

где $z = z(t)$ – закон вертикального движения корпуса; $z_i^{(r)} = z_i^{(r)}(t)$ – закон вертикального перемещения стоп в относительном движении ($i = 1, 2$).

Движение корпуса машины происходит под действием создаваемых движителями кинематических возмущений, характер которых определяется относительным движением опорных точек механизмов шагания в фазе опоры на грунт. Моделировались режимы с периодическим движением ног. Зависимости $z_i^{(r)}(t)$ в интервале $(0, T)$, где $T = 2\pi/\omega$ – период цикла, ω – частота шагания, аппроксимировались тригонометрическим полиномом. Учитывалось, что при числе механизмов шагания в движителе равном 2, как правило, наиболее существенны члены 2-й гармоники [5].

При математическом описании грунтов используется вязкоупругопластичная модель с различными соотношениями вязких и упругих свойств. Большинство слабонесущих грунтов под действием движителя разрушаются, поэтому в модели учитывалась необратимость пластических деформаций. Для учета сил сопротивления при взаимодействии стопы с грунтом вводится сила F_i, пропорциональная деформации грунта и сила вязкого трения R_i, пропорциональная скорости деформации

$$F_i = \begin{cases} c_z z_i U_i & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ k_{Cz} c_z z_i U_i & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \qquad (2)$$

$$R_i = \begin{cases} \mu_z \dot{z}_i U_i & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ 0 & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \qquad (3)$$

где c_z – жесткость грунта в нормальном направлении; μ_z – коэффициент вязкого сопротивления; $k_{Cz} = z_{i\max} / (z_{i\max} - h)$ – коэффициент, характеризующий увеличение жесткости грунта вследствие его пластической деформации; $z_{i\max}$ – максимальная деформация грунта; h – глубина следовой дорожки; U_i – единичная функция, описывающая состояние i-той ноги, принимающая лишь два значения: 1 в фазе опоры и 0 при переносе.

При исследовании компрессионного эффекта к силам F_i и R_i также добавлялась сила Q_i, действующая на стопу при отрыве от грунта. Природа этой силы пока недостаточно изучена. Очевидно, что она зависит от площади и физического состояния опорной поверхности. Практика показывает, что компрессионная сила существенно зависит от скорости стопы. Предполагается, что с увеличением глубины компрессионная сила будет возрастать из-за роста

давления внешней среды. При моделировании принималось, что сила Q пропорциональна степенной зависимости скорости отрыва стопы от грунта, также считалось, что сила действует только при обратном ходе стопы и только в зоне упругих деформаций грунта

$$Q_i = \begin{cases} 0 & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ \alpha\, Sp \left| z_i^{\beta} \right| U_i & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}. \qquad (4)$$

где α и β – коэффициенты, определяемые физическим состоянием опорной поверхности стопы и гидрофильными свойствами грунта; S – площадь стопы; p – давление внешней среды.

Уравнение поступательного движения корпуса вдоль оси Oz имеет вид

$$m\ddot{z} = N_1 + N_2 - G, \qquad (5)$$

где m и G – масса и отрицательная плавучесть шагающего аппарата, соответственно; $N_i = F_i + R_i + Q_i$ – нормальные реакции грунта под стопами.

Уравнения (1)–(5) образуют систему, определяющую вертикальное движение корпуса и стоп шагающей машины, а также опорные нормальные реакции грунта. Система уравнений решалась численно. При моделировании варьировалась вязкоупругие характеристики грунта, скорость его нагружения и коэффициенты, характеризующие компрессионный эффект. Были получены законы движения стоп $z_i(t)$ и центра масс корпуса $z(t)$, а также зависимости $N_i(t)$ нормальных реакций грунта. Полученные временные характеристики представлялись в функции от фазы шага $\varphi = \omega t$.

Моделирование показало, что характер колебаний в системе в зависимости от типа грунта и скорости нагружения существенно меняется [6]. На упругих грунтах, после смены стоп, наблюдаются затухающие малые колебания стопы на грунте. На вязкоупругих грунтах имеют место более существенные колебания стопы на грунте, которые происходят с частотой

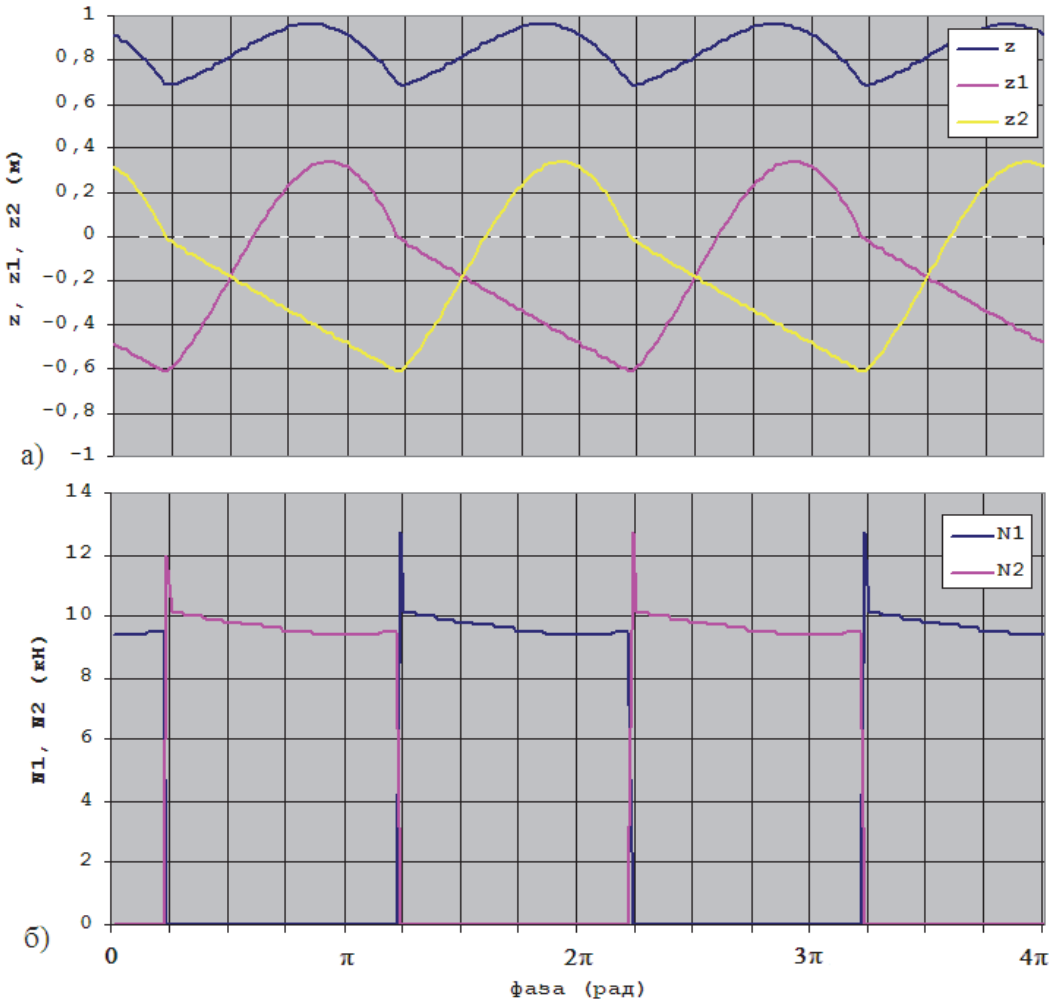


Рис. 2. Вертикальные перемещения стоп (кривые 1, 2) и центра масс (кривая 3) шагающего аппарата (а) и нормальные реакции грунта (б) для вязкого грунта с нулевой жесткостью (c_z=0; μ_z=100 кН·с/м)

того же порядка, что и частота шагания. На вязких грунтах стопа в течение полуцикла (шага) погружается в грунт, после смены стоп процесс повторяется с нулевого уровня. Во всех случаях имел место рост максимальных значений опорных реакций, в сравнении со статическими. При увеличении скорости нагружения значения опорных реакций возрастают.

Для водонасыщенных грунтов, как показывает анализ их реологических свойств, наблюдается промежуточный вариант между вторым и третьим рассмотренным случаем. На рис. 2, *а* и 3, *а* представлены зависимости $z(\varphi)$, $z_1(\varphi)$ и $z_2(\varphi)$ для шагающего аппарата массой 1000 кг при частоте шагания $\omega = 1$ рад/с, характерные для наиболее тяжелых случаев движения. В первом случае грунт имеет нулевую жесткость (плывун), во втором – имеет место большая компрессионная сила. Характер изменения опорных реакций для тех же грунтов показан на рис. 2, *б* и 3, *б*.

На плывунных грунтах (рис. 2) стопы шагающего аппарата постепенно, в течение полуцикла (шага), погружаются в грунт. При смене стоп происходит кратковременный рост опорных реакций. После переступания, если высота шага больше глубины погружения стопы, процесс повторяется с нулевого уровня. Это позволяет организовать курсовое движение шагающей машины без потери грунтовой проходимости даже на грунтах с нулевой жесткостью. У гусеничных и колесных машин, в случае грунта малой жесткости, движитель погружается в грунт вплоть до посадки днищем на грунт и полной потери грунтовой проходимости.

При больших значениях компрессионной силы (рис. 3) происходит значительный рост опорных реакций. Это приводит на слабых грунтах к увеличению глубины колеи и требует существенных дополнительных энергозатрат на прессование грунта. Вместе с тем, при достаточно большой высоте шага, курсовое движение возможно и в этом случае.

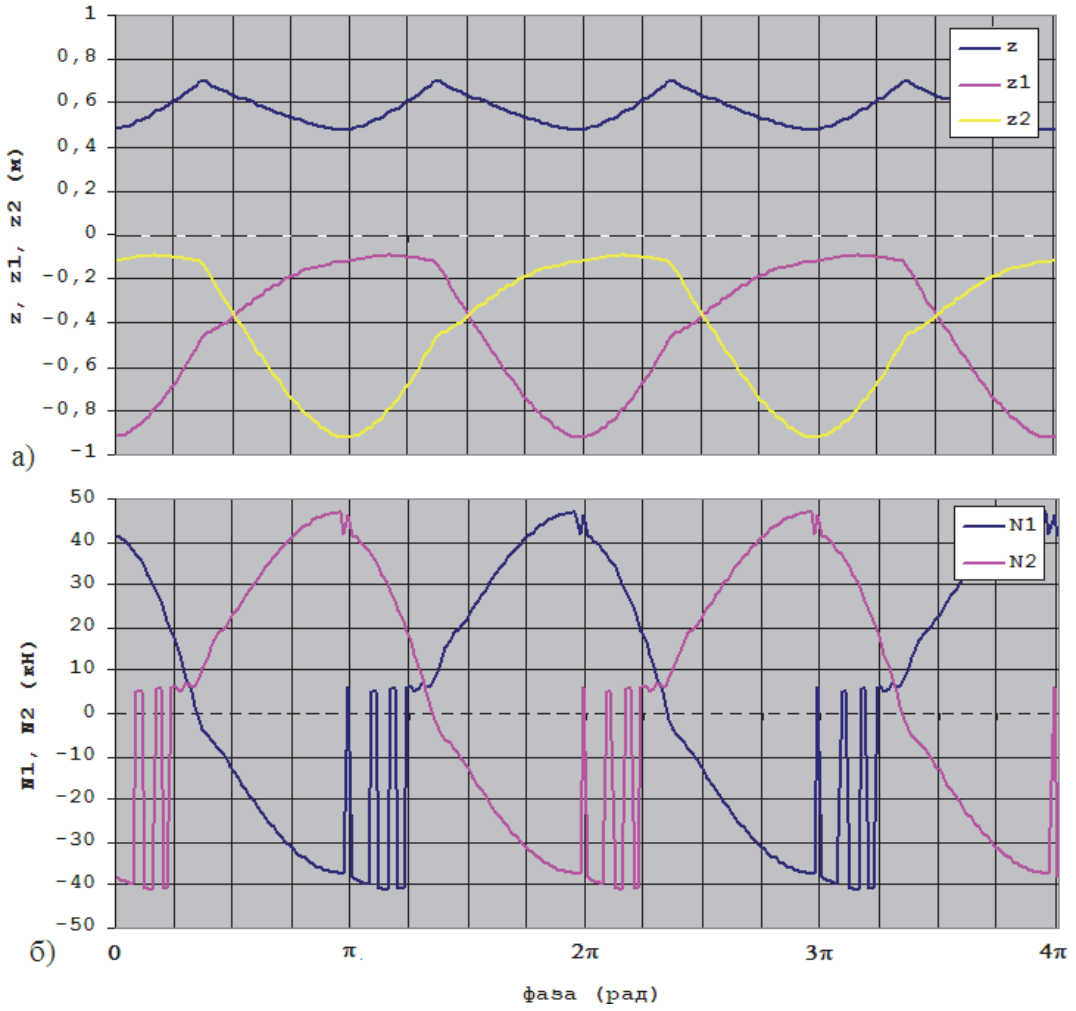


Рис. 3. Вертикальные перемещения стоп (кривые 1, 2) и центра масс (кривая 3) шагающего аппарата (а) и нормальные реакции грунта (б) для вязкоупругого грунта (c_z=50 кН/м; k_{Cz}=2; μ_z=10 кН·с/м) в случае большой компрессионной силы (Q_{max}/G=5)

Таким образом, на слабонесущих подводных грунтах, из-за динамичности процесса ходьбы, шагающие машины обладают в сравнении с колесными и гусеничными более высокими тягово-сцепными свойствами и проходимостью. Математическое описание процессов, происходящих при взаимодействии шагающего движителя с подводным грунтом, позволяет решить проблему проектирования основных узлов и систем подводных шагающих робототехнических систем, предназначенных для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернышев, В.В.* Исследование тягово-сцепных свойств шагающих машин на подводных грунтах с низкой несущей способностью // Технические проблемы освоения мирового океана: матер. V Всерос. науч.-техн. конф. / Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2013. – С. 177-181.

2. *Брискин, Е.С.* Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е.С. Брискин, В. В. Чернышев, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. 2011. – № 9. – С. 27-31.

3. *Чернышев, В.В.* Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти / В.В. Чернышев // Безопасность жизнедеятельности. 2003. – №5. – С. 28-30.

4. *Чернышев, В.В.* Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твердых тел с упругодиссипативными связями / В.В. Чернышев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 9: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 11. – С. 32-35.

5. *Чернышев, В.В.* Пассивное подрессоривание в мобильных робототехнических системах с цикловыми механизмами шагания / В.В. Чернышев // Известия вузов. Машиностроение. 2003. – №1. – С. 31-39.

6. *Брискин, Е.С.* Моделирование динамики смены стоп шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Искусственный интеллект. 2009. – № 3. – С. 293-299.

УДК 62-503.5

С. Ф. Яцун, Л. Ю. Волкова, А. В. Ворочаев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАЗГОНА ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО ПРЫГАЮЩЕГО АППАРАТА

Юго-Западный государственный университет

teormeh@inbox.ru, mila180888@yandex.ru, sasha-vorochaev@yandex.ru

В работе предложена методика реализации прыжка четырехзвенным прыгающим аппаратом, разработана математическая модель его движения во время одного прыжка, исследованы режимы разгона устройства в зависимости от параметров робота и свойств среды.

Ключевые слова: прыгающий аппарат, позиционирование, разгон, отрыв, полет, приземление.

S. F. Jatsun, L. Yu. Volkova, A. V. Vorochaev

INVESTIGATION OF ACCELERATION MODES OF THE FOUR-LINK JUMPING DEVICE

South-West State University

The technique of realization of the jump four-link jumping device is offered, a mathematical model of its motion during a jump is developed, regimes of acceleration device depending on the parameters of the robot and the properties of the environment is investigated.

Keywords: jumping device, positioning, acceleration, lift-off, flight, landing.

Введение

Аппараты, перемещающиеся с отрывом от поверхности, также называемые прыгающими, являются особым классом устройств, имеющим свою терминологию. Под прыжком будем понимать быстрое, резкое перемещение тела, вызванное отталкиванием от точки опоры. Прыгающие устройства представляют собой многозвенные механизмы, отрыв от поверхности которых происходит за счет относительных движений звеньев [1-5]. Наиболее важными видами движения объектов во время прыжка являются: позиционирование, разгон, полет и приземление. Позиционирование представляет собой изменение положения звеньев друг относительно друга и относительно препятствия при нахождении объекта на поверхности. Разгон заключается в практически мгновенном приобретении аппаратом скорости, отрывающей его от поверхности. Полет характеризуется движением с отрывом от поверхности, а приземление заключается во взаимодействии устройства с поверхностью после полета.

Работа посвящена исследованию динамических режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата.

Описание объекта исследования

В работе представлен аппарат, который состоит из прыжкового и колесных модулей, как показано на рис. 1.

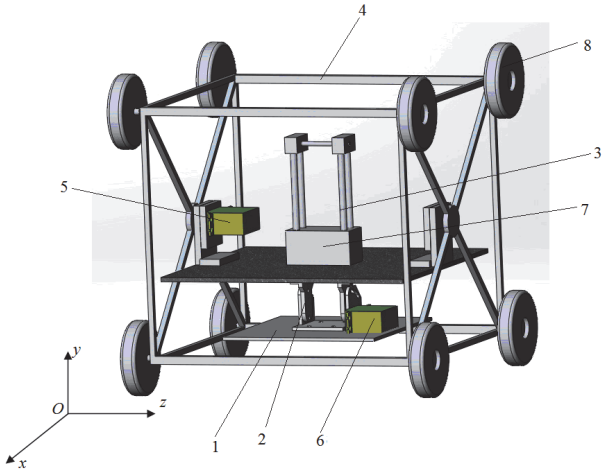


Рис. 1. Трехмерная модель прыгающего аппарата

Прыжковый модуль образован звеньями 1–4, причем звено 1 является стопой, звенья 2 и 3 образуют ногу, а звено 4 представляет собой корпус. На звеньях 4 и 2 установлены приводы вращательного движения 5 и 6 соответственно, которые обеспечивают поворот звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. На звене 2 также закреплен привод поступательного движения 7, позволяющий звеньям 2 и 3 перемещаться друг относительно друга. Корпус представляет собой каркас в форме параллелепипеда, в вершинах которого установлены колесные модули 8, каждый из которых состоит из колеса и привода, обеспечивающего вращение колеса или его стопорение. Движение объекта по достаточно ровной поверхности происходит за счет колес, а для преодоления препятствий используется прыжковый модуль [6-8].

Методика реализации прыжка

Для описания методики реализации прыжка введем абсолютную неподвижную систему координат *Oxyz*. Прыжок устройства осуществляется в вертикальной плоскости *Oxy* и представляет собой последовательность семи этапов *k*=1-7, характеризующихся определенными видами движения звеньев (рис. 2) [9].

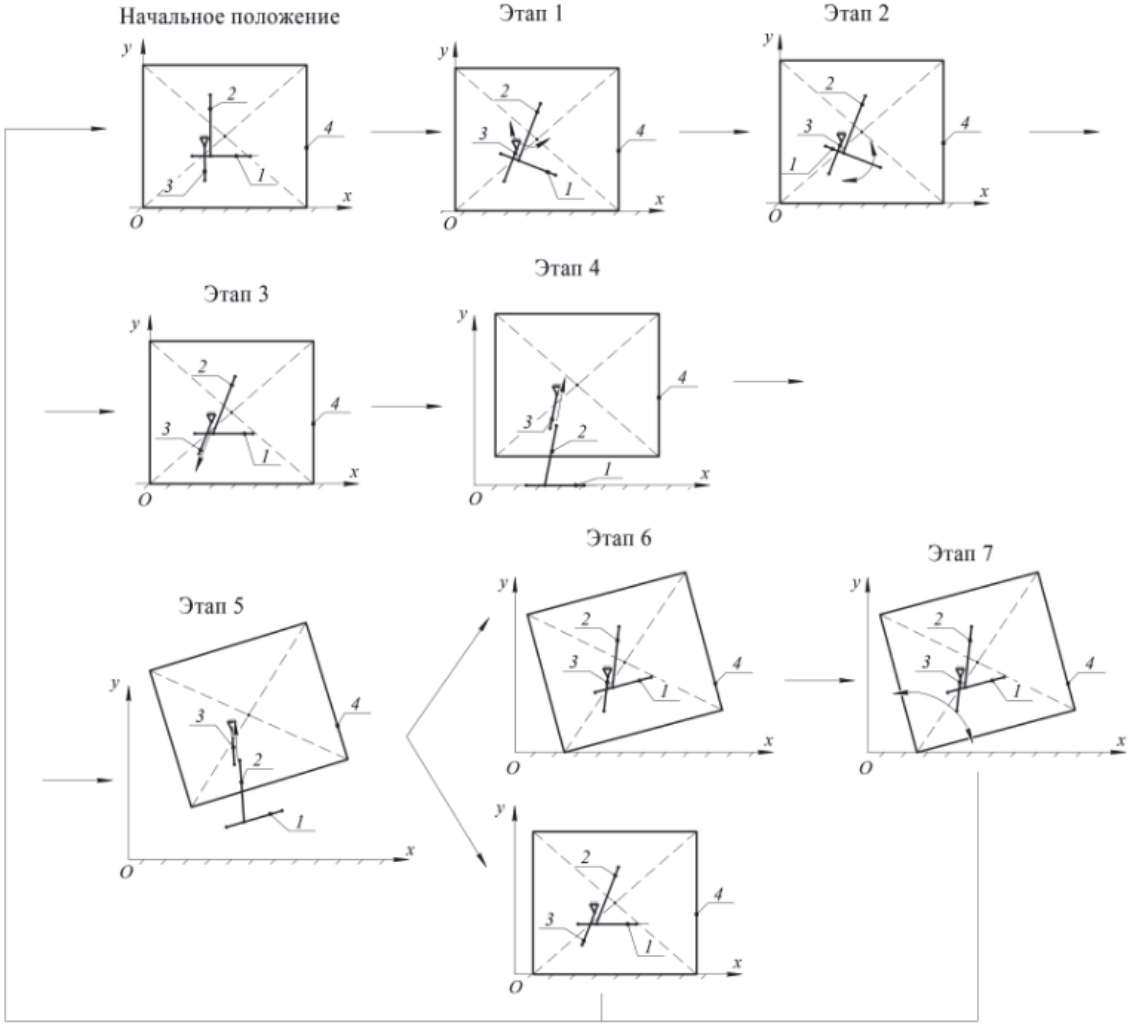


Рис. 2. Методика реализации прыжка

Во время этапов 1 – 3 происходит позиционирование объекта для совершения прыжка, при этом корпус робота взаимодействует с поверхностью, а разгонный модуль, состоящий из звеньев 1–3, меняет свое положение относительно корпуса для реализации прыжка под требуемым углом к горизонту.

На этапе 1 звенья 1, 2 и 3 поворачиваются внутри корпуса таким образом, чтобы звено 2 расположилось под требуемым углом к горизонту. Второй этап характеризуется поворотом звена 1 до тех пор, пока оно не станет параллельным стороне корпуса, точки которой взаимодействуют с поверхностью. Во время третьего этапа звенья 1 и 2 выдвигаются из корпуса до взаимодействия звена 1 с поверхностью. Четвертый этап соответствует разгону устройства, во время которого звено 1 находится на поверхности, а звенья 3 и 4 приобретают скорость, достаточную для отрыва робота от поверхности. Этап 5 описывается движением робота с отрывом от поверхности, при этом наблюдается втягивание звеньев 1 и 2 в корпус, а этапы 6 и 7 – приземлением объекта на корпус и его позиционированием до тех пор, пока корпус не займет устойчивого положения на поверхности. Причем, этап 7 может наблюдаться только в том случае, если аппарат неустойчив при приземлении, в противном случае после этапа 6 объект готов к реализации следующего прыжка.

При выбранных кинематической схеме и методике прыжка для позиционирования объекта применяются пары вращательного движения, что позволяет разгонному модулю точно позиционироваться относительно поверхности, а для разгона и отрыва от поверхности – пара поступательного движения, за счет чего устройству не сообщается дополнительная угловая скорость в момент отрыва от поверхности, что, в свою очередь, обеспечивает минимизацию нежелательного вращения аппарата во время полета. Приземление устройства на корпус позволяет избежать ударных нагрузок на звенья стопы и ноги, следовательно, данные звенья могут изготавливаться достаточно легкими по сравнению с корпусом и втягиваться в последний во время полета тем же приводом, посредством которого осуществляется разгон. Важной особенностью является то, что за счет вращательной пары, соединяющей звенья ноги и корпуса, объект может позиционироваться для реализации следующего прыжка независимо от того, на какую сторону корпуса произойдет приземление.

Математическая модель движения прыгающего аппарата

Для разработки математической модели прыгающего аппарата рассмотрим схему, показанную на рис. 3.

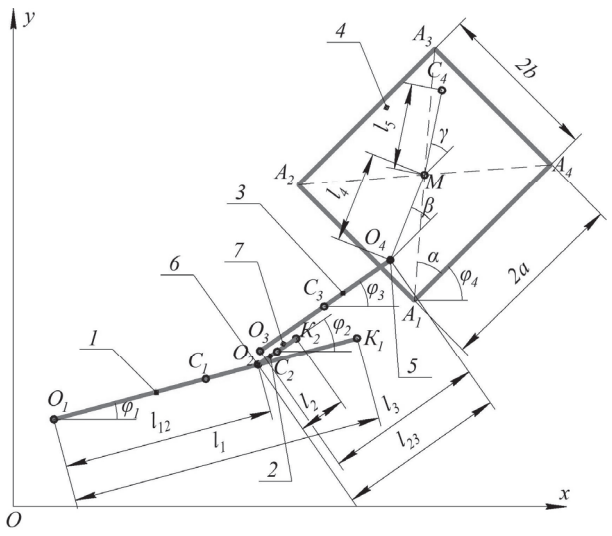


Рис. 3. Схема четырехзвенного прыгающего аппарата

Будем считать, что все звенья устройства являются абсолютно твердыми телами, причем звенья 1 – 3 представляют собой стержни длинами l_i, i=1 – 3, а звено 4 – прямоугольник $A_1A_2A_3A_4$ размерами 2ax2b, причем $b = atg\alpha$. Массы m_i, i=1-3, звеньев сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i. Центр масс корпуса (звено 4) находится в точке C_4, смещенной относительно центра симметрии прямоугольника (точки M) на расстояние l_5 под углом γ. Длина ноги определяется расстоянием l_{23} между точками O_2 и O_4, положение последней в корпусе задается расстоянием l_4 и углом β.

Движение каждого звена аппарата описывается тремя обобщенными координатами $x_{Ci}, y_{Ci}, \varphi_i$, i=1-4, где x_{Ci}, y_{Ci} - координаты центра масс звена, φ_i - угол наклона звена к положительному направлению горизонтальной оси, для корпуса угол φ_4 представляет собой угол, под которым сторона корпуса A_1A_4 наклонена к оси Ox. Таким образом, общее число координат, определяющих положение робота, равно W=12. В то же время на механизм наложены связи двух типов:

1. постоянно действующие стационарные связи s, определяемые геометрическими соотношениями, вытекающими из кинематической схемы робота;

2. периодически возникающие стационарные неудерживающие связи l, обусловленные последовательностью этапов прыжка и взаимодействием с опорной поверхностью.

Таким образом, число степеней свободы определяется по формуле

$$n = W - s - l. \quad (1)$$

К постоянно действующим относятся связи, определяемые из кинематической схемы аппарата, их число равно s=7. Первые 6 связей описывают соотношения между проекциями положений центров масс звеньев 2 – 4 и теми же величинами первого звена, а седьмая связь обусловлена тем, что звенья 2 и 3 представляют собой поступательную пару.

Размерность n вектора q обобщенных координат является переменной и варьируется в диапазоне n=0–5. В общем виде вектор обобщенных координат можно записать следующим образом

$$\overline{q} = \left(q_1 \ldots q_n\right)^T. \quad (2)$$

Во время реализации одного прыжка устройство может взаимодействовать с поверхностью звеном 1 или 4 или двигаться с отрывом от поверхности, что было рассмотрено ранее. Это приводит к тому, что на этапе 4, когда с поверхностью контактирует звено 1, для описания положения устройства в системе $Oxyz$ без учета периодически действующих связей l используется вектор обобщенных координат

$$\overline{q} = \left(x_{C1} \quad y_{C1} \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_4\right)^T. \quad (3)$$

На тех этапах прыжка, когда на поверхности находится корпус робота или наблюдается полет объекта, для задания его положения также при отсутствии связей l используются обобщенные координаты x_{C4}, y_{C4} центра масс четвертого звена и углы φ_1, φ_2, φ_4 поворота звеньев 1, 2 и 4, вектор q принимает следующий вид

$$\overline{q} = \left(x_{C4} \quad y_{C4} \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_4\right)^T. \quad (4)$$

Для удобства анализа систему дифференциальных уравнений движения прыгающего аппарата можно представить в матричной форме

$$A_{km}(g)\ddot{g} + B_{km}(g)D(\dot{g})\dot{g} + C_{km}(g)\dot{g}_6\dot{g}_8 = Q_{km}, \quad (5)$$

где k =1-7 – номер этапа, m=1-4 – номер подэтапа.

При этом вместо вектора q обобщенных координат введем обобщенную матрицу-столбец g, представляющую собой матрицу восьми координат, при помощи которых можно описать движение объекта на любом этапе прыжка: g_1=x_{C1}, g_2=y_{C1}, g_3=x_{C4}, g_4=y_{C4} – координаты центров масс звеньев 1 и 4 в абсолютной системе, g_5=φ_1, g_6=φ_2 и g_7=φ_4 – углы поворота соответствующих звеньев, g_8=l_{23} – длина ноги устройства. Матрица g может быть записана следующим образом:

$$g = \left(g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad g_4 \quad g_5 \quad g_6 \quad g_7 \quad g_8\right)^T. \quad (6)$$

Матрицы $A_{km}(g)$, $B_{km}(g)$, $C_{km}(g)$, Q_{km} определяются на каждом подэтапе m всех этапов k движения робота в соответствии с разработанной методикой реализации прыжка.

В соответствии с предложенной методикой прыжка взаимодействие аппарата с поверхностью может происходить звеном 1 или 4, при этом возникают силы трения и нормальной реакции. Положим, что прыжок устройства осуществляется с горизонтальной шероховатой абсолютно твердой поверхности, совпадающей с осью Ox.

Примем допущение, что в случае если звено 1 или 4 лежит на поверхности, то в двух точках опоры будут возникать нормальные реакции, а сила трения только в одной из них (в противном случае задача становится статически неопределимой). При точечном контакте звена с поверхностью эта точка представляет собой центр приведения сил трения и нормальной реакции. Возникающая сила трения описывается моделью Кулона [10]. При нахождении одного из звеньев 1 или 4 на поверхности возможны несколько вариантов движения объекта:

1. Звено неподвижно лежит на поверхности и взаимодействует с ней в двух точках.

2. Звено взаимодействует с поверхностью в двух точках и перемещается вдоль оси Ox.

3. Звено контактирует с поверхностью в одной точке, которая неподвижна.

4. Звено взаимодействует с поверхностью в одной точке, которая движется вдоль оси Ox.

В качестве объекта моделирования рассматривается прыгающий аппарат, масса корпуса которого сосредоточена в центре симметрии прямоугольника (l_5=0) и существенно больше массы остальных звеньев $m_4 / m_{i=1-3} = 7$. Задачей моделирования является исследование динамических режимов разгона и выявление области параметров объекта, при которых прыжок происходит без проскальзывания и опрокидывания перед отрывом от поверхности.

Режимы разгона аппарата при закреплении ноги в центре масс корпуса

По приведенным на рис. 4 графикам можно выделить две области: 1 – звено 1 неподвижно находится на поверхности, 2 – звено 1 скользит по поверхности, взаимодействуя с ней в двух точках. Причем видно, что при всех значениях коэффициента трения есть область, в которой независимо от угла φ_2^0 и ускорения $\ddot{l}_{23}^4$, с которым звенья 3 и 4 разгоняются до отрыва от поверхности, звено 1 будет перемещаться по поверхности, причем с ростом коэффициента трения эта область сужается. Затем, по мере увеличения φ_2^0 уменьшается значение $\ddot{l}_{23}^4$, определяющее границу между областями 1 и 2, это означает, что при меньшем ускорении во время четвертого этапа возможен прыжок без проскальзывания во время разгона.

Данный вид диаграмм объясняется тем, что при малых ускорениях разгона значения силы, разгоняющей звенья 3 и 4, и силы тяжести звеньев 3 и 4 имеют одинаковый порядок, влияние силы тяжести существенно и приводит к уменьшению угла, под которым действует суммарная сила, складывающаяся из разгоняющей силы и сил тяжести, что, в свою очередь, обусловливает увеличение горизонтальной проекции общей силы, а, значит, и силы трения в точке O_2. С ростом угла φ_2^0 угол действия общей силы увеличивается, что позволяет при меньшем ускорении $\ddot{l}_{23}^4$ звену 1 оставаться неподвижным на поверхности. При угле φ_2^0=1,265 независимо от значений f и $\ddot{l}_{23}^4$ звено 1 всегда будет неподвижно.

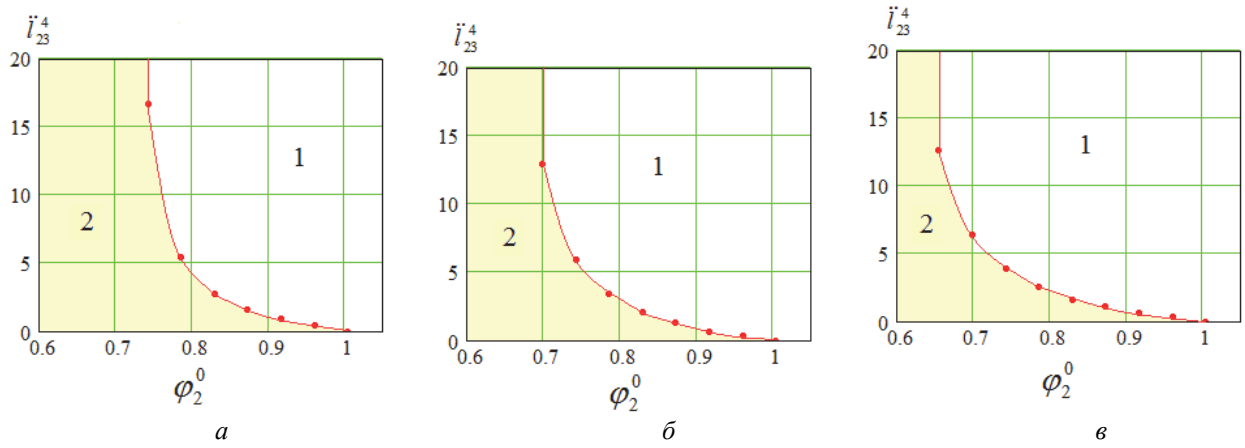


Рис. 4. Диаграммы режимов разгона аппарата при закреплении ноги в центре масс корпуса, две точки контакта с поверхностью:
1 – без проскальзывания, 2 – с проскальзыванием, а – f=0,7, б – f=0,8, в – f=0,9

Также установлено, что с увеличением расстояния l_{23}^0, на котором осуществляется разгон, и соотношения масс звеньев $m_4 / m_{i=1-3}$, область значений φ_2^0 и $\ddot{l}_{23}^4$, при которых наблюдается проскальзывание, возрастает.

Режимы разгона аппарата при закреплении ноги вне центра масс корпуса

Рассмотрим случай, когда точка O_4 закрепления ноги в корпусе аппарата не совпадает с центром симметрии последнего, ее положение определяется расстоянием l_4 и углом β. Результаты моделирования приведены на рис. 5, где выделены следующие области: 1 – область, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью в двух точках без проскальзывания, 2 – область, в которой при двух точках контакта звена 1 с поверхностью наблюдается проскальзывание, 3 – область, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью в одной точке без проскальзывания, 4 – область, в которой наблюдается проскальзывание точки, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью.

По диаграммам рис. 5, *а* видно, что при малом коэффициенте трения существуют две области, в которых взаимодействие звена 1 с поверхностью происходит в одной или двух точках с проскальзыванием. Причем, опрокидывание звена 1 наблюдается при углах $\varphi_2^0 < \beta < (\varphi_2^0 + \pi)$, когда линия действия силы F_{23} проходит через звено 1 между точками O_1 и K_1 вне центра масс корпуса, граница между областями 2 и 4 представляет собой параболу, выпуклость которой

направлена вниз, абсцисса вершины параболы равна $\varphi_2^0+\pi/2$. При большем коэффициенте трения проскальзывания звена 1 по поверхности при одной точке контакта не происходит, область 4 сменяется областью 3, граница которой остается неизменной при вариации коэффициента трения, кроме этой области еще существуют 1 и 2, область 1 отделяет области 2 и 3 (рис. 5, *б–д*). Граница между зонами 1 и 2 представляет собой кривую, выпуклость которой направлена вниз, минимум функции наблюдается при $\beta=\varphi_2^0+\pi/2$. В отличие от границы между областями 1 и 3, данная граница изменяется с ростом коэффициента трения: расширяется диапазон значений угла β и уменьшаются значения ускорения $\ddot{l}_{23}^4$, при которых разгон аппарата будет происходить без проскальзывания и опрокидывания.

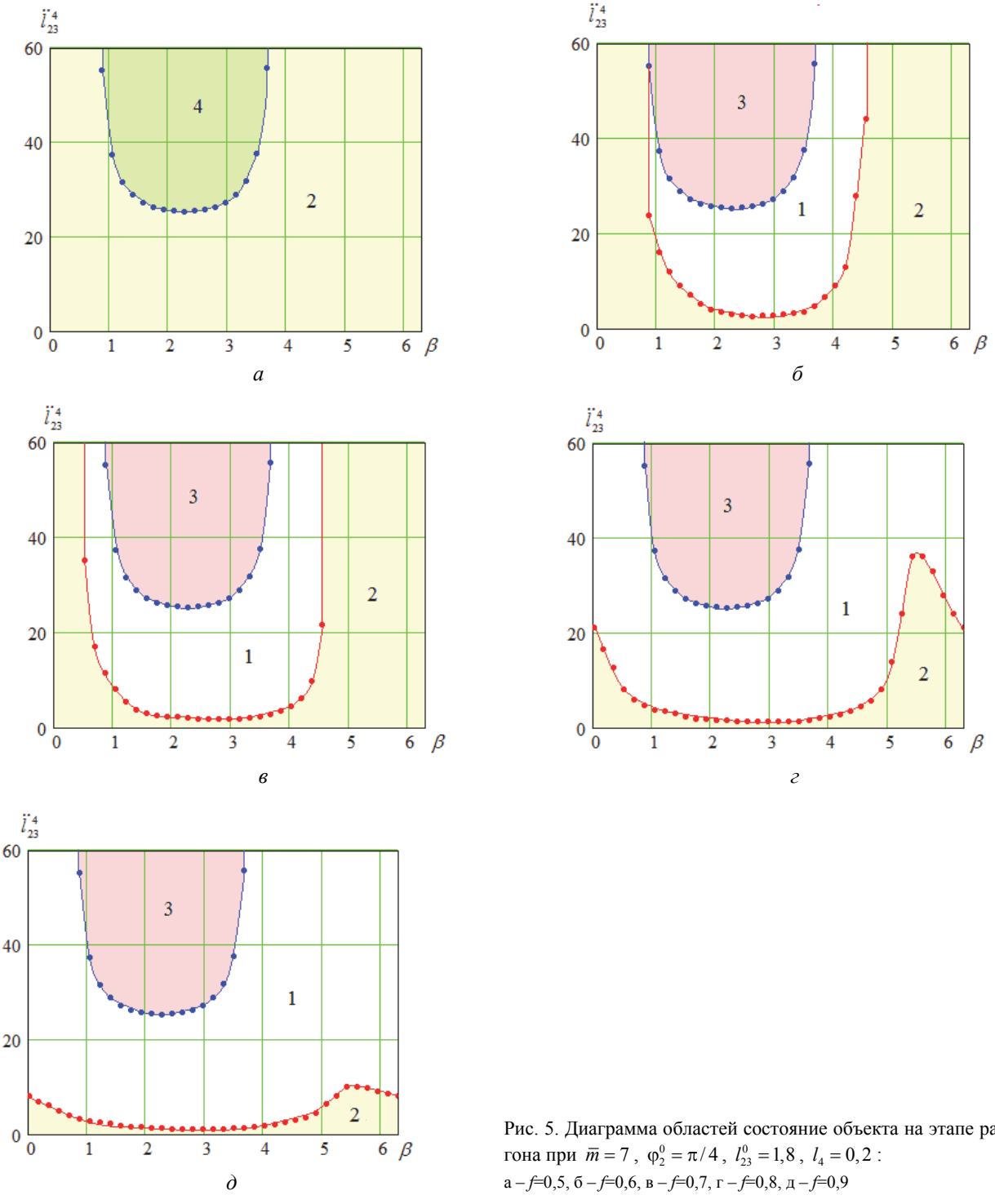


Рис. 5. Диаграмма областей состояние объекта на этапе разгона при $\bar{m}=7$, $\varphi_2^0=\pi/4$, $l_{23}^0=1{,}8$, $l_4=0{,}2$:
а – *f*=0,5, б – *f*=0,6, в – *f*=0,7, г – *f*=0,8, д – *f*=0,9

При f=0,8 – 0,9 во всем диапазоне β=0 – 2π существуют такие значения ускорения $\ddot{l}_{23}^{4}$, при которых объект будет находиться в области 1, причем у границы между областями 1 и 2 появляется максимум при $\beta=\varphi_2^0+3\pi/2$, когда линия действия разгоняющей силы наиболее удалена от центра масс корпуса и проходит вне звена 1, ускорения $\ddot{l}_{23}^{4}$, при которых осуществляется переход из зоны с проскальзыванием в зону без проскальзывания, наибольшие.

С увеличением угла φ_2^0, отношения $m_4 / m_{i=1-3}$, расстояния l_4 наблюдается сужение области, в которой разгон происходит без проскальзывания и опрокидывания.

Выводы

В работе предложена методика реализации прыжка мобильным четырехзвенным аппаратом, выделены этапы прыжка и условия перехода из одного этапа в другой. Разработаны математическая модель движения аппарата во время реализации прыжка и модель взаимодействия с поверхностью, позволившие исследовать режимы разгона устройства.

Выявлено, что при закреплении звена 3 в центре масс корпуса, совмещенном с центром симметрии последнего, разгон прыгающего робота может происходить в двух режимах: с проскальзыванием и без него. Причем, область разгона без проскальзывания, ограниченная углом наклона звеньев ноги к поверхности и развиваемым на этапе разгона ускорением, расширяется с ростом коэффициента трения, отношения массы корпуса к массе других звеньев и уменьшением наибольшего значения длины ноги.

Для внецентренного закрепления звена 3 в корпусе выявлены четыре динамических режима разгона аппарата: разгон с проскальзыванием и без него при взаимодействии звена 1 с поверхностью в одной или двух точках, обусловленные массогабаритными параметрами робота, свойствами поверхности и параметрами этапов позиционирования и разгона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Carl´esi, N.* Nonlinear Model Predictive Running Control of Kangaroo Robot: a One-Leg Planar Underactuated Hopping Robot [Text] / N. Carl´esi, A. Chemori // Intelligent Robots and Systems: Proc. of the IEEE/RSJ International Conference. – Taiwan, 2010. - P. 3634-3639.

2. *Dubowsky, S.* Hopping mobility concept for search and rescue robots [Text] / S. Dubowsky, S. Kesner, J. Plante, P. Boston // Journal of Industrial Robot. - 2008. - Vol. 35. - N. 3. - P. 238-245.

3. *Hutter, M.* Planar Hopping with a Robotic Leg [Text] / M. Hutter, D. Remy, R Siegwart. - Eidgen□ssische Technische Hochschule Zurich, 2011. – 92 p.

4. *Hyon, S.* Development of a biologically inspired hopping robot—Kenken [Text] / S. Hyon, T. Mita // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Stanford, 2002. - P. 3984–3991.

5. *Kovac, M.* Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics [Text]: Ph.D. dissertation / Mirco Kovac. - Ecole Polytechnique F´ed´erale de Lausanne, 2010. – 194 p.

6. *Яцун, С.Ф.* Прыгающий робот – перспективное транспортное средство [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: материалы Международной научно-практической конференции. - Волгоград, 2013. – С. 291-292.

7. *Яцун, С.Ф.* Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Изв. РАН. ТиСУ. - 2013. - № 4. - С. 137–149.

8. *Волкова, Л.Ю.* Изучение влияния положения точки закрепления ноги прыгающего робота в корпусе на характер движения устройства [Текст] // Л.Ю. Волкова, С.Ф. Яцун // Нелинейная динамика. - 2013. - Т. 9. - № 2. - С. 327–342.

9. *Яцун, С.Ф.* Моделирование прыжка четырехзвенного робота [Текст] / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, В.В. Серебровский, Л.Ю. Волкова // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 10. - С. 308-315.

10. *Болотник, Н. Н.* Динамика управляемых движений вибрационных систем [Текст] / Н. Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман, С.Ф. Яцун // Изв. РАН.ТиСУ. - 2006. - №5. - С. 157–167.

Дорогие коллеги!

Этот выпуск журнала «Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах"» посвящен проблемам динамики и управления движением мобильных робототехнических систем. Такие системы используются сегодня практически во всех сферах деятельности человека: в промышленности, при проведении научных исследований в средах, труднодоступных человеку, в экстремальных ситуациях при ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в военном деле, в медицине, в быту. Совершенствование мобильных роботов требует глубоких научных исследований в области механики и автоматического управления и новаторских инженерных решений.

Проблемам мобильной робототехники была посвящена специальная секция «Мобильные робототехнические и специальные транспортные системы» на Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем-2013», проходившей в Волгограде в сентябре 2013 года. Тематика докладов, представленных на этой секции, охватывала очень широкий круг научных и инженерных проблем, от задач, касающихся общих принципов движения и управления мобильными роботами, до методик проектирования робототехнических систем и их испытаний. В значительной части докладов обсуждались проблемы, возникшие при отработке различных узлов и систем в реальных машинах.

Секция объединила ученых и инженеров, работающих в академических институтах, вузах, на предприятиях транспортного машиностроения и показала, что мобильная робототехника востребована и развивается во многих научных центрах нашей страны. Мероприятия, подобные прошедшей конференции, усиливают взаимосвязь между коллективами исследователей и разработчиков мобильных роботов, способствуют выходу отечественной робототехники на передовой мировой уровень, привлекают молодежь к научной и инженерной деятельности, дают возможность молодым ученым, аспирантам и студентам заявить о себе.

Материалы докладов, представленных на секции «Мобильные робототехнические и специальные транспортные системы», составляют содержание статей этого выпуска журнала.

Я приветствую всех авторов и читателей, желаю им успехов в важном и интересном деле развития мобильной робототехники.

Академик *Ф. Л. Черноусько*
Председатель Научного совета по робототехнике и мехатронике
Российской академии наук,
Директор Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук

УДК 681.5

В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин

РАЗРЕШЕНИЕ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В КОЛЛЕКТИВЕ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
duprein@gmail.com

В статье представлен алгоритм коллективного поведения автономных аппаратов при их функционировании в группе на ограниченной территории. Рассматривается задача покрытия территории группой автономных аппаратов и предлагается алгоритм разрешения конфликтных ситуаций, основанный на предварительном разделении территории на операционные подпространства.

Ключевые слова: коллективное управление, автономные аппараты, разрешение конфликтов.

V. A. Alexandrov, K. A. Kirik, A. I. Kobrin

CONFLICT RESOLUTION IN THE GROUP OF AUTONOMOUS APPARATUS

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

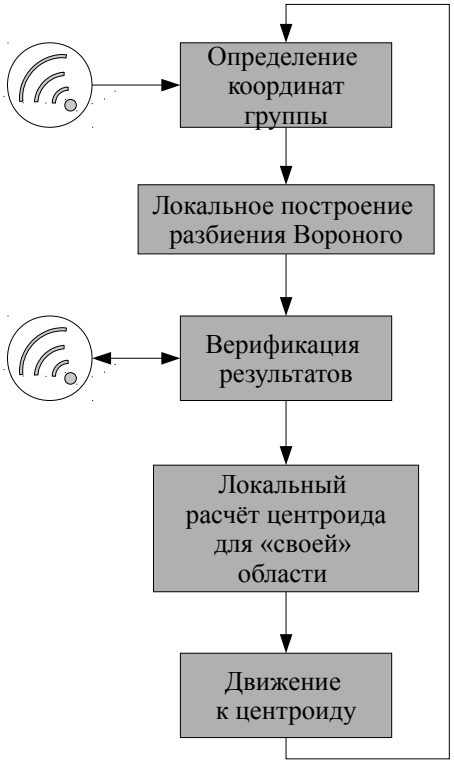
This article describes the algorithm of conflict resolution through collective actions applied to the group of autonomous apparatus. The area coverage task has been considered and the collaboration algorithm based on an area tessellation has been proposed.

Keywords: collective behavior, autonomous apparatus, conflict resolution.

Применение методов группового или коллективного управления встречается практически во всех областях науки и техники. Так, например, актуальными являются задачи обеспечения взаимодействия внутри группы автоматически управляемых автономных аппаратов при обследовании территорий (особенно на крайнем Севере [1]), разминировании [2], обеспечении совместных операций на роботизированных складах [3].

Время и вычислительные ресурсы автономных аппаратов при их функционировании в группе на общей единой территории по необходимости тратятся не только на выполнение алгоритмов, приводящих к решению поставленной задачи, но и на координацию действий при возникновении конфликтных ситуаций (например, столкновения и следование к одной цели), и на кооперативное взаимодействие с целью оптимизации процесса решения задачи (например, распределение целей и достижения равновероятного направления обхода препятствий).

При уменьшении соотношения характерных размеров территории и автономных аппаратов накладные расходы на решение координационных задач увеличиваются в связи с возрастанием количества взаимодействий. В работе рассматривается метод координации действий в задаче покрытия территории группой автономных аппаратов, основанный на предварительном разделении территории на операционные подпространства для каждого аппарата на основе итерационного алгоритма кластеризации Ллойда [4] для получения разбиения Вороного построенного на центроидах. Связь между автономными аппаратами-агентами в группе организована в соответствии с архитектурой ограниченной распределенной доски объявлений [5]. Структурная схема алгоритма представлена на рисунке, где символом связи в круге выделена коммуникационная процедура обмена данными между всеми автономными аппаратами, входящими в группу.



Структурная схема многоагентного алгоритма выделения операционных подпространств

Рассмотрим группу автономных аппаратов ***G***, функционирующую в плоскостной среде $\boldsymbol{E} \in \boldsymbol{E}\left[\Re^2\right]$. Количество аппаратов равно *N*. Область функционирования на опорной плоскости $Q \in \Re^2$ удовлетворяет условию полной достижимости всех ее точек $O[x,y] \in Q$, а граница пространства ∂Q является границей рабочей среды.

Работа алгоритма начинается с определения координат группы автономных аппаратов. При этом информационное поле доски объявлений, отвечающее координатам каждого автономного аппарата, заполняется им самим. Обозначим через $\mathbf{C}_g$ массив координат всех аппаратов в группе:

$$\mathbf{C}_g(t) = \begin{bmatrix} (x_1(t), y_1(t)) \\ (x_2(t), y_2(t)) \\ \vdots \\ (x_6(t), y_6(t)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Дискретность системы управления, с учетом непрерывности и неизменности управляющих параметров и измерений на промежутке времени Δt, позволяет представить этот массив в виде:

$$\mathbf{C}_g[i] = \begin{bmatrix} (x_1[i], y_1[i]) \\ (x_2[i], y_2[i]) \\ \vdots \\ (x_6[i], y_6[i]) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $i = 0...N$, $t = \Delta t \cdot i$. После формирования базы данных для всех точек этого массива, каждым автономным аппаратом производится триангуляция Делоне, которой затем однозначно сопоставляется разбиение Вороного [6]. После построения разбиения Вороного, производится анализ полученных данных на предмет наличия вершин на бесконечности и производится обрезание границ разбиения [7] в соответствии с границей рабочей области заданной вершинами многоугольника:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (B_x[0], B_y[0]) \\ (B_x[1], B_y[1]) \\ \vdots \\ (B_x[M], B_y[M]) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где *M* – количество вершин многоугольника рабочей области. Затем происходит верификация результатов в группе, полученных аппаратами локально. Она сводится к подтверждению информации публикуемой на доске объявлений о текущих вершинах разбиения. Далее, каждый автономный аппарат локально рассчитывает площадь и центроид области разбиения, построенной относительно его текущего месторасположения:

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \\ P_x[j] &= \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_x[j,i] + g_x[j,i+1])\cdot(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \\ P_y[j] &= \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{i=G_N[j]-1}(g_y[j,i] + g_y[j,i+1])\cdot(g_x[j,i]\cdot g_y[j,i+1] - g_x[j,i+1]\cdot g_y[j,i]), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{G}[j] = [g_x[j,i], g_y[j,i]], i = 0...G_N[j]$ – массив координат границы области разбиения V_j для месторасположения *j*-го автономного аппарата, а A_j, $P[j]_x$, $P[j]_y$ – площадь этой области и координаты ее центроида P_j.

Координаты центроида, полученного на текущем шаге, становятся целевой точкой для по-

зиционирования автономного аппарата. Таким образом, в результате работы алгоритма, рабочая область функционирования группы аппаратов делится на операционные подпространства с оптимальные с точки зрения объемов покрытия.

Исходя из определения разбиения Вороного, можно отметить, что с самого первого шага алгоритма автономные аппараты разделены виртуальными границами разбиения, а рассчитанные значения центроидов лежат внутри областей разбиения, что гарантирует отсутствие коллизий в процессе работы алгоритма.

Для примера рассмотрим применение рассмотренного алгоритма выделения операционных подпространств в задаче покрытия территории. Введем понятие объема работы по покрытию для автономного аппарата находящегося в точке P_j области разбиения V_j:

$$W = \int_{Y \in V_j} \left| Y - P_j \right|^2 dY , \qquad (5)$$

где $\left| Y - P_j \right|$ – метрика расстояния. Тогда функционал

$$F = \sum_{i=0}^{N} \int_{Y \in V_j} \left| Y - P_j \right|^2 dY , \qquad (6)$$

будет отражать общие затраты на покрытие территории Q при разбиении V_j.

Утверждение 1. Применение алгоритма разбиения территории приводит к ее разделению на участки таким образом, что общие затраты на последующее ее покрытие будут минимальны, а в конце разбиения автономные аппараты будут находиться в центроиде ассоциированных с ними участков соответственно.

Доказательство. В соответствии с Предположением 3.1 стр. 650 (Proposition 3.1, p. 650) [8] разбиение Вороного построенное на центроидах приводит к минимуму функционал следующего вида:

$$F((z_i, V_i), i = 1,...,k) = \sum_{i=0}^{N} \int_{y \in V_j} \rho(y) \left| Y - P_j \right|^2 dy , \qquad (7)$$

где $\rho(y)$ – некоторая функция плотности заданная на пространстве разбиения, а z_i – центроид для которого построена область V_i разбиения Вороного V.

Принимая плотность $\rho(y) \equiv 1$ получаем утверждение о минимизации функционала затрат, а так как в процессе работы алгоритма автономные аппараты перемещаются на каждом шаге по направлению к центроиду, то по окончании работы алгоритма они находятся в нем. Это означает справедливость утверждения 1.

Рассматривая покрытие территории, необходимо отметить, что алгоритм выполняется в две фазы: в первой фазе производится разбиение на операционные подпространства, а во второй – индивидуальное покрытие территории, например, жадным алгоритмом. Известно, что для NP-полных задач, к которым можно отнести задачу покрытия территории, жадный алгоритм не дает оптимального варианта решения, но близок к нему. При этом во второй фазе возможно использовать любой алгоритм решения задачи покрытия территории одним аппаратом, так как координация действий была полностью произведена в первой фазе. Далее приведен алгоритм покрытия территории, с использованием предварительного разбиения, записанный псевдокодом:

Алгоритм 1. Покрытие территории, основанное на разбиении Вороного

Цель: Покрытие территории по сетке группой автономных аппаратов

Входные данные: Сетка покрытия Tlist[M], начальные положения объектов, вершины многоугольника границы

Фаза 1:
do
for *i=0* → *N*, для объектов
1: загрузить сетку разбиения *T[M]*;
2: загрузить вершины границы *B*;
3: считать область общей памяти **blackboard** → координаты R_j, $j \neq i$;
4: построить разбиение **VoronoiDivide()**:

$$V_i = [P[x, y], \|P - R_i\| \leq \|P - R_j\|, i \neq j]$$

5: отсекание полигоном границы polygon_clip(): $V = V^{\infty} \cap B$
6: результат → **blackboard**
7: расчет центроида $P[i]_x$, $P[i]_y$ по формулам (4);
8: **goto**($P[i]_x$, $P[i]_y$)

end for
while ($R_i[x,y] \neq P[i][x,y]$)

Фаза 2:
do
for $i=0 \rightarrow N$, для объектов
1: поиск $\overline{T}_i, \left\| R_i - \overline{T}_{ij} \right\|_{j=0...M} \rightarrow \min$
2: goto($\overline{T}_i[x], \overline{T}_i[y]$)
3: $T[M] = T[M] \setminus \overline{T}_i$
end for
while ($T[M] \notin \varnothing$)

Утверждение 2. Применение алгоритма 1 приводит к решению задачи покрытия территории.

Доказательство. Действительно, так как в соответствии с определением разбиения Вороного оно образует покрытие в пространстве $\Re^2$, то соответственно все точки принадлежат хотя бы одной из областей разбиения. А это в свою очередь означает, что во время второй фазы алгоритма они будут целевыми точками для применяемого индивидуального алгоритма покрытия. Используемый жадный алгоритм за конечное время приводит к решению получаемых индивидуальных подзадач, что в свою очередь означает и решение первоначальной основной задачи покрытия.

Также важное место в рассматриваемой задаче занимает избегание столкновений как с препятствиями, располагающимися в рабочей среде, так и с другими членами группы аппаратов. Для решения задачи объезда препятствий используется следующий алгоритм: сначала с помощью алгоритма поиска пути осуществляется поиск оптимального пути, причем функция качества является взвешенной суммой расстояния до целевой точки и расстояние до ближайшего препятствия относительно каждой точки пути. Вес второго критерия определяется в первую очередь геометрическими размерами аппаратов исходя из желаемой минимальной дистанции объезда препятствий. Далее полученная траектория сглаживается. В отличие от [9], используется критерий оптимизации не вводящий ограничения на максимальную кривизну траектории, что упрощает прохождение узких мест. Оптимизация производится по трем критериям: минимизация расстояния между точками траектории, минимизация расстояния между точками исходной и сглаженной траектории, минимизация расстояния от каждой точки траектории до ближайшего препятствия. Первый критерий служит для сглаживания траектории, второй критерий сдерживает вырождение траектории в прямую, а третий – отталкивает новую траекторию от препятствий. После получения сглаженной траектории, по точкам строится сплайн, который может быть использован для построения управления двигателями автономных аппаратов.

В отличие от [10] в приведенном алгоритме покрытия территории используется итерационное обновление координат центроидов, что сокращает путь до требуемой конфигурации автономных аппаратов в рабочей области, однако предъявляет повышенные требования к системе распределенной коммуникации. Кроме того, введена многоагентная система обмена информацией с применением распределенной ограниченной доски объявлений, а также реализован алгоритм построения разбиения Вороного для произвольных границ рабочей области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бурдун И.Е., Бубин А.Р.*, Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое освоение шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. – Новосибирск, 2010. – с. 141-149.

2. *Andres S.* Mack, MineSweeper: Not Just a Game Anymore // Journal of Mine Action. – CISR, James Madison University, Virginia, USA, 2007.

3. *Smith N.,* Picky Robots Grease the Wheels of e-Commerce // Business News Daily. – TechMedia Network, UT, USA, June 2, 2011.

4. Qiang D., Emelianenko M., Ju L., Convergence of the Lloyd algorithm for computing centroidal Voronoi tessellations // SIAM Journal on Numerical Analysis. – Philadelphia, USA, Vol. 44, 2006, pp. 102–119.

5. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: фи-лософия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.

6. *Burkardt J., Gunzburger M., Peterson J., Brannon R.,* User Manual and Supporting In-formation for Library of Codes for Centroidal Voronoi Point Placement and Associated Zeroth, First and Second Moment Determination // Technical Report: SAND2002-0099. – NM, USA, Sandia National Laboratories, February, 2002.

7. General Polygon Clipper library, http://www.cs.man.ac.uk/~toby/alan/software/index.html

8. *Qiang Du,* Vance Faber, Max Gunzburger, Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms // Society for Industrial and Applied Mathematics. – Philadelphia, USA, 1999, Vol. 41, No. 4, pp. 637–676.

9. *Dolgov D., Thrun S.* Montemerlo M., Diebel J., Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving // Proceedings of the First International Symposium on Search Techniques in Artificial Intelligence and Robotics (STAIR-08). – AAAI Chicago, USA, June, 2008.

10. *Breitenmoser A., Schwager M.*, Metzger J.-C., Siegwart R., Rus D., Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots // ICRA 2010. – Anchorage, AK, USA, 2010, pp. 4982 — 4989.

УДК 629.369

Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, С. С. Фоменко

РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС СО СДВОЕННЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Реконфигурируемый мобильный робот представляет собой несколько однотипных модулей. Применение модульной реконфигурируемой структуры позволяет разработать однотипный подход для различных транспортных операций.

Ключевые слова: шагающая машина, модуль, управление движением, ортогональный механизм шагания.

E. S. Briskin, N. G. Sharonov, S. S. Fomenko

RECONFIGURABLE TRANSPORT COMPLEX WITH DUAL WALKING MOVERS

Volgograd State Technical University

Reconfigurable mobile robot is a multiple similar modules. The application of modular reconfigured structure allows of develop a consistent approach for different transport operations.

Keywords: walking machine, module, motion control, orthogonal mechanism of walking.

Модульный подход [1] позволяет «собирать» роботы произвольной конфигурации. Известны исследования модульных робототехнических систем с колесными движителями (сочлененные колесные тележки) [2, 3], змееподобные ползающие роботы [4], шагающие модули [5–7]. Применение условия реконфигурируемости робота позволяет получать транспортные системы [1-8], которые обладают уникальными, по сравнению с обычными транспортными средствами, особенностями.

В работе рассматриваются транспортные комплексы с изменяемым в зависимости от решаемой задачи числом шагающих движителей и, соответственно, грузоподъемностью и маневренностью. Под идеальной маневренностью понимается способность корпуса машины совершать любое движение в плоскости опорной поверхности [9].

Реконфигурируемый робот рассматривается как «транспортный комплекс», состоящий из объекта транспортировки и транспортных модулей [10]. Объектом транспортировки является груз или платформа с грузом – «корпус» робота. Транспортный модуль представляет собой машину, имеющую индивидуальный привод, рабочим органом которой является движитель. Например, имеющая модульную структуру шагающая машина «Ортоног» (рис. 1) состоит из рамы и четырех сдвоенных ортогонально-поворотных движителей [11]. В то же время, реконфигурируемый робот может иметь и более сложную иерархическую структуру. В этом случае модуль может быть выполнен либо в виде самостоятельного транспортного средства (многоопорный, прототип - шагающая машина «Восьминог» [12]) (рис. 2), либо в виде шагающего движителя (одноопорный, прототип – шагающая опора дождевальной установки «Кубань» [13]) (рис. 3), предназначенного для работы только в составе комплекса.

В качестве движителей перечисленных выше машин применены сдвоенные механизмы шагания:

- движитель с механизмом шагания Чебышева – Умнова [14] (рис. 4),

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-01-97057-а, № 13-08-31375-мол_а.

- движитель на основе циклового механизма с криволинейной направляющей [15] (рис. 5),
- сдвоенный ортогонально-поворотный движитель [11] (рис. 6).

Рис. 1. Робот «Ортоног» с шагающими ортогонально-поворотными движителями

Рис. 2. Робот «Восьминог» с цикловыми сдвоенными механизмами шагания и механизмом поворота

Рис. 3. Дождевальная установка «Кубань» с шагающими движителями

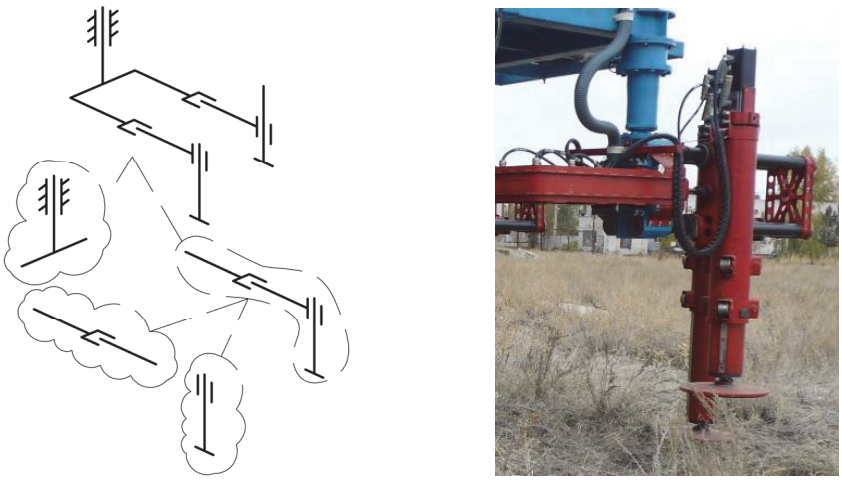


Рис. 4. Сдвоенный ортогонально-поворотный движитель

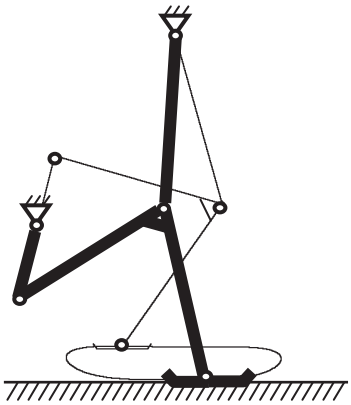


Рис. 5. Сдвоенный движитель с кинематически связанными цикловыми механизмами шагания Чебышева – Умнова

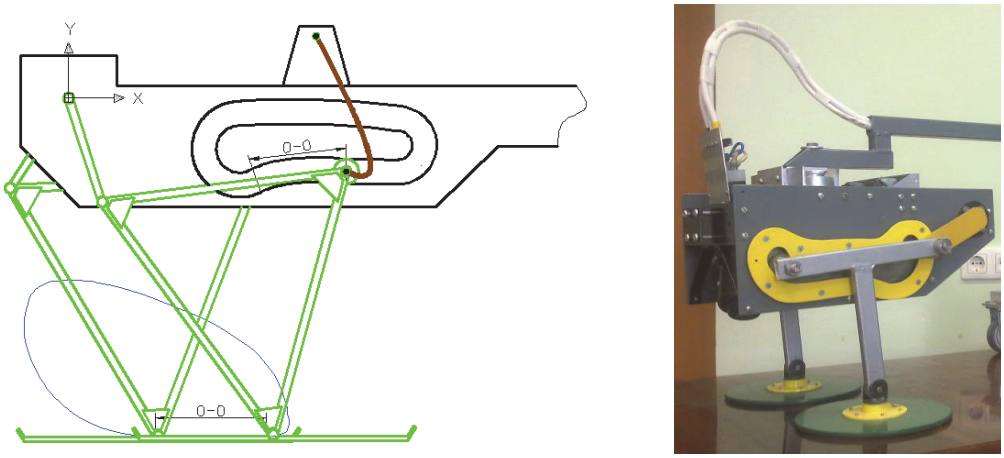


Рис. 6. Сдвоенный движитель на основе циклового механизма с криволинейной направляющей

Особенность работы сдвоенного движителя заключается в том, что когда один из механизмов шагания находится в фазе переноса, второй механизм обеспечивает опору на грунт. При наличии достаточного количества движителей, это гарантирует статическую устойчивость машины [16].

На примере шагающей машины модульной структуры «Ортоног» реализован метод организации программного движения объекта транспортировки (корпуса) для системы с избыточным количеством приводов. Предложенный метод применим к модульному роботу с N движителями и позволяет разработать однотипный подход для различных режимов движения. Сдвоенный ортогонально-поворотный движитель (рис. 6) машины «Ортоног» состоит из двух плоских ортогональных механизмов шагания, имеющих по два привода: привод курсового (горизонтального) движения и привод адаптации (вертикального движения). Направляющие приводов курсового движения обоих механизмов соединены друг с другом и посредством общего привода поворота имеют возможность поворачиваться относительно корпуса машины, меняя ориентацию плоскостей шагания ортогональных механизмов. Использование общего привода поворота с одной стороны обеспечивает достаточное количество управляемых степеней свободы для реализации любых геометрически возможных движений корпуса машины, а с другой стороны – приводит к упрощению кинематической схемы машины, требуя пять приводов для двух механизмов шагания, вместо трех приводов на каждый механизм шагания в случае их независимого использования.

Следует отметить, что геометрически возможным движением корпуса машины в плоскости движения является произвольное перемещение любой точки корпуса при произвольной его ориентации. Направление скорости центра машины и угол поворота корпуса независимы друг от друга. Такими возможностями не обладают традиционные транспортные средства, хотя использование поворотных колес [3] позволяет реализовать те же возможности, но с проскальзыванием при движении по реальному грунту.

Отличительной особенностью метода математического моделирования является то, что конструкция сдвоенного ортогонально-поворотного движителя позволяет разделить задачи определения программных законов управления приводами курсового движения и адаптации. Это, в свою очередь, позволяет упростить построение и изучение математических моделей, сведя их к рассмотрению плоскопараллельных движений твердых тел, рассматривая отдельно задачу переступания (управления приводами адаптации) и вопросы перемещения по опорной поверхности (управления поворотными и курсовыми приводами). Применение такого подхода позволяет свести к одной расчетной схеме модели различных сдвоенных движителей (рис. 4–6).

Процесс шагания в случае сдвоенного ортогонально-поворотного движителя реализуется попеременным подъемом и опусканием стоп двух механизмов шагания, образующих один движитель. В пределах одного движителя возможны фазы движения, при которых только один механизм будет находиться в опоре, оба механизма будут в опоре или оба механизма будут в переносе. В большинстве случаев реализуется режим, при котором только один механизм шагания, из двух входящих в движитель, в каждый момент времени контактирует

с грунтом. Следуя терминологии, предложенной в [16], здесь реализуется полноопорная походка. Фаза переноса состоит из зоны «свободного» хода и двух зон адаптации: непосредственно перед наступанием на грунт и непосредственно после поднятия стопы с грунта.

Например, при описании движения нескольких модулей, жестко связанных между собой одним корпусом (как у машины «Ортоног»), по достаточно ровной поверхности шагающая машина рассматривается как система твердых тел, совершающая плоское движение (рис. 7), и включающая в себя: корпус машины, П-образную несущую конструкцию движителя, поворачивающегося вокруг вертикальной оси на необходимый угол за счет работы привода поворота, и перемещающуюся вдоль одной из направляющих движителя опорную стойку, взаимодействующую с грунтом. При этом, предполагается, что привод курсового движения переносимого механизма работает согласованно с движением опорного механизма.

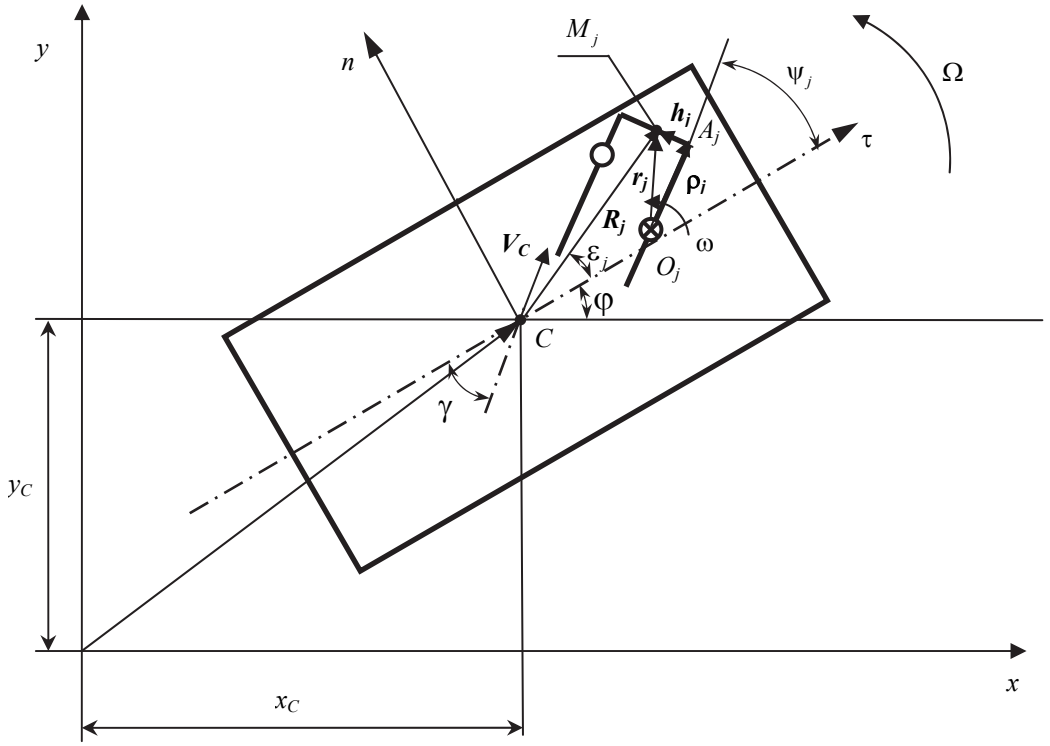


Рис. 7. Расчетная схема кинематики плоскопараллельного движения машины

В качестве независимых обобщенных координат, характеризующих положение движителя, выбираются угол поворота движителя относительно корпуса и перемещение штока привода курсового движения механизма шагания, находящегося в опоре.

Обобщенные координаты рассматриваемой системы могут быть записаны в виде компонент (2*N*+3)-мерного вектора. Количество (2*N*+3) степеней подвижности рассматриваемой механической системы на три меньше числа 2*N* уравнений кинематики движения. Следовательно, необходимо ввести еще три уравнения, описывающих управляющие воздействия на машину. Эти уравнения удобно представить в матричной форме

$$A \times V = U,$$

где *A* — матрица управления размерности 3x(2*N*+3), а *U* — матрица-столбец управляющих воздействий размерности 3, компоненты которого могут быть произвольными функциями времени *t* и обобщенных координат *q*.

В результате получается система 2*N*+3 алгебраических уравнений линейных относительно 2*N*+3 скоростей, которая может быть разрешена одним из известных методов. Последующее решение полученной системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно обобщенных координат осуществляется методами численного интегрирования.

Матричное соотношение соответствует трем линейным относительно компонентов вектора *V* алгебраическим уравнениям. Программные движения, задаваемые такими уравнениями, могут устанавливать законы движения корпуса или отдельных приводов, обеспечивая требуе-

мое движение корпуса, движителей и стоп. Математическая модель позволяет, например, задавать законы движения корпуса и рассчитывать законы управления приводами движителей. Или задавать движение некоторых из приводов и рассчитывать законы движения других приводов и корпуса. Выше сказанное относится только к системе жестко связанных модулей.

В отличие от традиционных наземных транспортных средств, где управление с точки зрения водителя сводится к управлению всего двумя основными параметрами — величиной курсовой скорости и угловой скоростью корпуса машины, в рассматриваемых шагающих машинах требуется управление тремя параметрами: наиболее удобными из возможного набора параметров являются величина и направление скорости некоторого полюса машины, и угловой скорости поворота корпуса.

Разработанный метод позволяет определять законы изменения всех остальных компонент вектора скоростей и уравнения программных движений корпуса машины и приводов.

При этом одной из проблем применения мобильных роботов реконфигурируемой структуры является необходимость не только оценивать положение относительно локальных ориентиров [17], но и проводить постоянную идентификацию состояния робота.

На основе предложенного метода математического моделирования разработана программа [18] имитационного моделирования процесса программного и супервизорного управления движением реконфигурируемого модульного мобильного робота, предназначенная для использования в верхнем уровне системы управления [19]. Программа допускает указание необходимого количества движителей машины, всех конструктивных параметров, элементов матрицы управления A, управляющих воздействий U. В режиме супервизорного управления осуществляется непосредственное изменение значений управляющих воздействий U. Реализована 2D-анимацию с возможностью сохранения промежуточных положений для последующего их изучения, предусмотрен вывод результатов расчетов в виде графиков и табличных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Юревич Е.И.* Управление роботами и робототехническими системами. СПб.: Изд. СПбГПУ, 2001.

2. *Павловский В. Е., Петровская Н. В.* Синтез и исследование алгоритмов управления движением робопоезда в стесненных условиях сложных сред.

3. *Мартыненко Ю.Г., Митрофанов И.Е., Письменная Е.В., Формальский А.М.* О супервизорном управлении мобильной платформой на четырех поворотных колесах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 2. С. 147-157.

4. *Черноусько Ф.Л.* Движение многозвенника по горизонтальной плоскости//ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 1. С. 8-18.

5. *Ion I, A. Marin, A. Curaj, L.* Vladareanu - Desing and Motion Synthesis of Modular Walking Robot MERO, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol.2, no.4, 2008, pg. 25-30.

6. *Брискин, Е.С.* Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г. // Искусственный интеллект. - 2007. - №4. - С. 408-415.

7. *Шаронов, Н.Г.* Синтез алгоритма управления приводом цикловых движителей шагающей машины в особых условиях / Шаронов Н.Г., Калинин Я.В. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 11. - С. 40-43.

8. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

9. Comparative analysis of wheeled and walking machines / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER`2013) : тр. 7-го междунар. симпозиума, Санкт-Петербург, 2-3 окт. 2013 г. / РФФИ, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. - СПб., 2013. - С. 99-107. - Англ.

10. *Калинин, Я.В.* Энергетически эффективные режимы управления приводами при согласованном групповом движении транспортных модулей / Калинин Я.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 12 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 11. - С. 16-19.

11. *Шурыгин, В.А*. Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / Шурыгин В.А., Серов В.А., Шаронов Н.Г. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 41-44.

12. Концепция проектирования шагающих машин / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Фролова Н.Е. // Наука - производству. - 2005. - №1. - С. 33-38.

13. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В. // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - № 9. - С. 27-31.

14. Пат. 2063353 РФ, МПК 6 В 62 D 57/032 Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.; ВолгГТУ. - 1996.

15. *Леонард, А.В*. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 81-85.

16. *Малолетов А.В., Брискин Е.С., Колесов А.М.* О походках реконфигурируемой модульной шагающей маши-

ны с ортогонально-поворотными движителями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 50-55.

17. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми движителями / Брискин Е.С., Жога В.В., Малолетов А.В., Покровский Д.Н., Шаронов Н.Г., Шурыгин В.А. // Искусственный интеллект. - 2007. - №3. - С. 357-366.

18. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614123 от 24 апреля 2013 г. РФ, МПК (нет). Автоматизированная система определения параметров программного и супервизорного управления шагающей машиной со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Леонард А.В.; ВолгГТУ. - 2013.

19. Отработка методов нечеткого управления шагающим роботом «Ортоног» в полевых условиях / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Исследования наукограда. - 2013. - № 2. - С. 43-48.

УДК 62-523.8

А. Е. Гаврилов, Д. В. Голубев, А. С. Даншин

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ПЛАТФОРМА С ШАГАЮЩИМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

В работе рассматривается конструкция роботизированной транспортной платформы, в которой для перемещения используется шагающий ортогональный движитель. Ортогональный движитель в сравнении с другими шагающими движителями имеет ряд преимуществ. Рассматриваются алгоритмы перемещения платформы по местности содержащей препятствия, размеры которых не превышают пределов адаптации робота.

Ключевые слова: ортогональный движитель, мобильный робот, транспортная платформа, закон движения.

A. E. Gavrilov, D. V. Golubev, A. S. Danshin

ROBOTIC TRANSPORT PLATFORM WITH ORTHOGONAL WALKING MOVER

Volgograd State Technical University

Abstract. In this paper the design of robotic transport platform, which is used to move the walking orthogonal mover. Orthogonal mover in comparison with other walking movers has several advantages. The algorithms for moving the platform on terrain containing obstacles whose dimensions do not exceed the limits of adaptation of the robot.

Keywords: ortogonal mover, mobile robot, transport platform, movement law.

Мобильные робототехнические системы применяются для осуществления безопасности работ в зонах опасных для жизни людей [1] и увеличения производительности различных технологических операций по сравнению с производительностью человеческого труда. При проектировании мобильных робототехнических систем невозможно не учитывать специфику условий окружающей среды, в которой в дальнейшем предстоит использовать РТС. Анализируя весь комплекс поставленных практикой задач, представляется возможным разработка базовой конструкции транспортной платформы небольших габаритов и массы, с применением блочно-модульного принципа конструирования [11, 12, 13]. Это позволяет оперативно производить смену технологического оборудования, узлов и механизмов ходовой части и силовой установки для скорейшей адаптации робота к условиям эксплуатации при динамичном изменении внешней среды функционирования и изменении поставленных задач.

Основной проблемой автоматизации при создании мобильных роботов является проблема адаптации робота к особенностям среды функционирования [10]. Мобильные роботы работают в условиях минимальной информации об окружающей среде. Причем эта информация недетерминирована как статически (наличие и расположение препятствий, форма и состояние опорной поверхности), так и динамически (скорость перемещения движущихся препятствий), что затрудняет способность робота выполнять поставленные ему задачи без непосредственного участия человека [2].

Разработкой мобильных роботов, использующих различные способы перемещения, занимаются во многих странах мира. Основными разработчиками и производителями мобильных роботов предназначенных для автономного функционирования являются научные центры США, Испании, Японии, Великобритании, Франции, Италии, Китая, Южной Кореи, Германии и др. Развитие робототехники в развитых зарубежных странах, позволило совершить скачок в развитии производственных техноло-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ проект №12-08-00301-а, №12-01-31398мол_а.

гий. Дальнейшее развитие систем управления движением, систем навигации, систем очувствления роботов и роботизированных изделий позволит совершать дополнительный объем производственных операций без потери качества выполняемых работ. В мире насчитывается большое количество производств где объем производственных операций совершаемый роботами превышает объем работ совершаемых человеком.

Существует необходимость в создании роботизированных платформ для установки различного технологического оборудования для автономного функционирования в условиях опасных для жизни и здоровья человека. Большинство известных мобильных роботов легкого класса имеют гусеничный или колесный движители. Однако существует множество задач, которые с помощью роботов использующих гусеничные и колесные движители решить невозможно.

Разработка перспективных образцов мобильных роботов для применения в условиях чрезвычайных ситуаций наряду с решением ряда приоритетных задач связана, в том числе с созданием нетрадиционных типов движителей и уменьшением их массогабаритных показателей, что обусловлено необходимостью повышения показателей грунтовой и профильной проходимости, для расширения спектра решаемых задач [3].

Применение шагающих движителей в конструкции мобильных роботов позволяет повысить грунтовую и профильную проходимость робота, комфортабельно перемещаться по неровной поверхности, внутри помещений, в узких коридорах, проходить в дверные проемы, двигаться по лестничным маршам, совершать маневрирование в ограниченном пространстве [4].

Мобильные роботы с шагающими движителями могут быть использованы в качестве транспортно-технологических машин. Благодаря высокой маневренности, высокой профильной и опорной проходимости [5], такие роботы могут быть использованы для мониторинга окружающей среды; обнаружения и ликвидации аварий природных и техногенных катастроф; проведения работ по гуманитарному разминированию; проведения работ по осушению заболоченных мест в условиях городской среды, их биологической очистке; выполнения работ в сельском хозяйстве, выполнения различных задач в условиях военных действий, при проведении контртеррористических операций и др. Установка манипулятора на корпусе платформы позволит проводить отбор проб в местах радиоактивного и химического загрязнения, проводить специальные операции.

Конкретное исполнение шагающего движителя и применение различных схем управления движением шагающей машины в большей степени зависят от назначения и ее среды функционирования. Область применения шагающих машин с ортогональным движителем определяется их положительными качествами в сравнении с другими типами шагающих движителей [8,9]. В отличие от большинства кинематических схем шагающих движителей, ортогональный движитель в энергетическом отношении имеет преимущество [6,7], поскольку при перемещении робота использующего такой движитель, как по ровной поверхности, так и при движении по поверхности сложного профиля в режиме адаптации, не затрачивает работу на поддержание собственного веса [6]. Также ортогональный шагающий движитель имеет возможность адаптации к заранее неизвестной опорной поверхности, регулируемую грунтовую и повышенную профильную проходимость.

С целью создания мобильной платформы для размещения технологического оборудования различного назначения спроектирована и изготовлена роботизированная платформа с ортогональным шагающим движителем (рис. 2). Кинематическая схема платформы представлена на рис. 1.

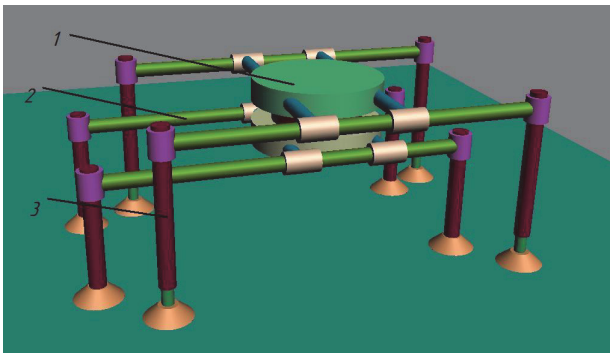


Рис. 1. Кинематическая схема мобильной шагающей платформы:
1 – поворотный корпус, 2 – модуль горизонтального перемещения, 3 – модуль вертикального перемещения (модуль адаптации)

Робот состоит из верхнего корпуса 1, связанного механизмом поворота с нижним корпусом 2. На каждом корпусе смонтированы две пары выдвижных опорных стоек 3, имеющие привод горизонтального перемещения и инди-

видуальный привод адаптации на каждую стойку. Питание осуществляется от аккумуляторных батарей с напряжением 12В.

Робот снабжен сенсорной системой: имеются рефлексные датчики для определения момента касания опорными стойками опорной поверхности; многооборотные потенциометрические датчики, позволяющие определить относительное смещение направляющих путем пересчета сопротивления в угол поворота винта, а угла поворота, в свою очередь, в линейную координату центра масс рамы относительно корпуса; инфракрасные дальномеры для определения расстояния до опорной поверхности; датчики герметичного контакта для защиты двигателя и рам от разрушения в процессе эксплуатации; двухосевой инклинометр для измерения крена и работы системы горизонтирования [15].

Существует множество возможных программных законов движения робота. Робот может двигаться в старт-стопном режиме, при котором операции движения рам и выдвижения, поднятия опорных стоек производятся последовательно. Кинематическая схема позволяет реализовывать алгоритм, при которой корпус робота перемещается непрерывно, а безударная адаптация робота к неровностям опорной поверхности обеспечивается программными законами относительного перемещения его частей [5].

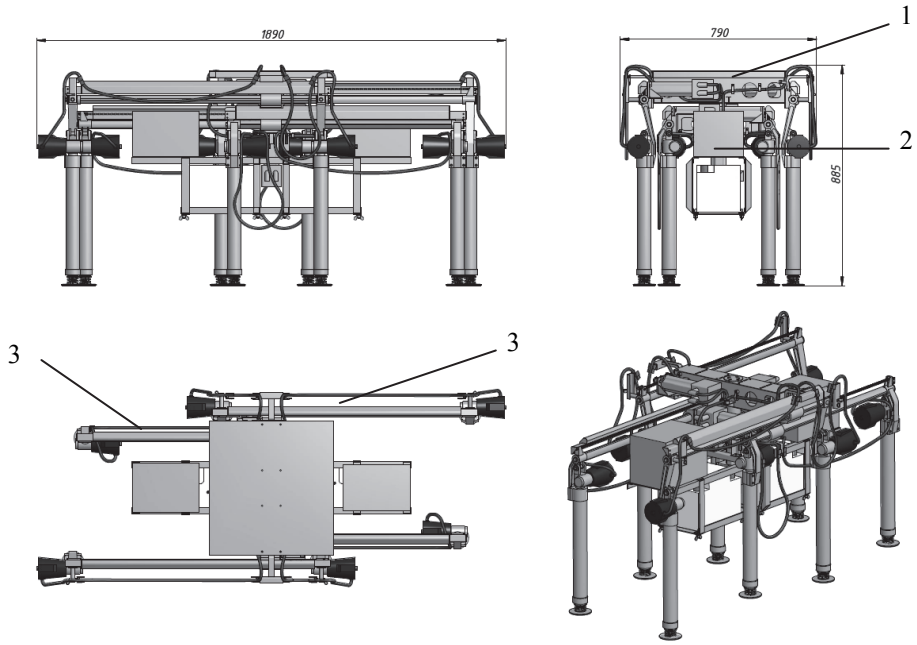


Рис. 2. Роботизированная шагающая платформа с ортогональным движителем:
1- верхний корпус; 2- нижний корпус; 3- пары выдвижных опорных стоек

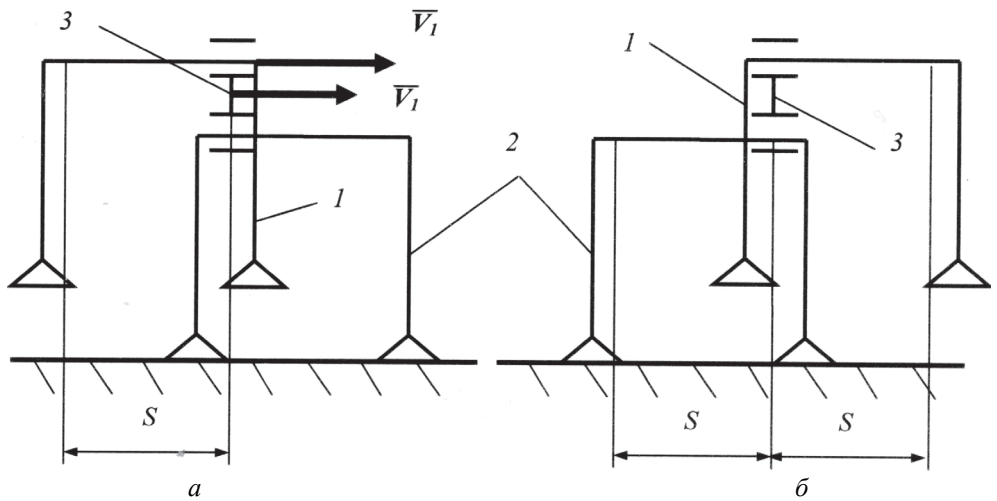


Рис. 3. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 1:
а – начальное положение первой фазы; *б* – конечное положение первой фазы

Рассмотрим некоторые из возможных симметричных походок платформы. К симметричным походкам относятся походки при реализации которых, опорные стойки правого и левого бортов перемещаются по одинаковым законам. Прямолинейное перемещение платформы по местности, не содержащей препятствий соизмеримых с линейными размерами робота, происходит следующим образом. В начальном положении робот находится в состоянии покоя и опирается на четыре опорные стойки рамы 2 (рис. 3, *а*). Опорные стойки рамы 1 подняты на величину равную максимальной высоте препятствия на маршруте движения.

Фаза 1. С помощью приводов горизонтального перемещения корпус 3 перемещается на расстояние *S*, а неопорная рама 1 проходит расстояние *S* относительно корпуса. Окончанию этой фазы соответствует состояние робота (рис. 3, *б*).

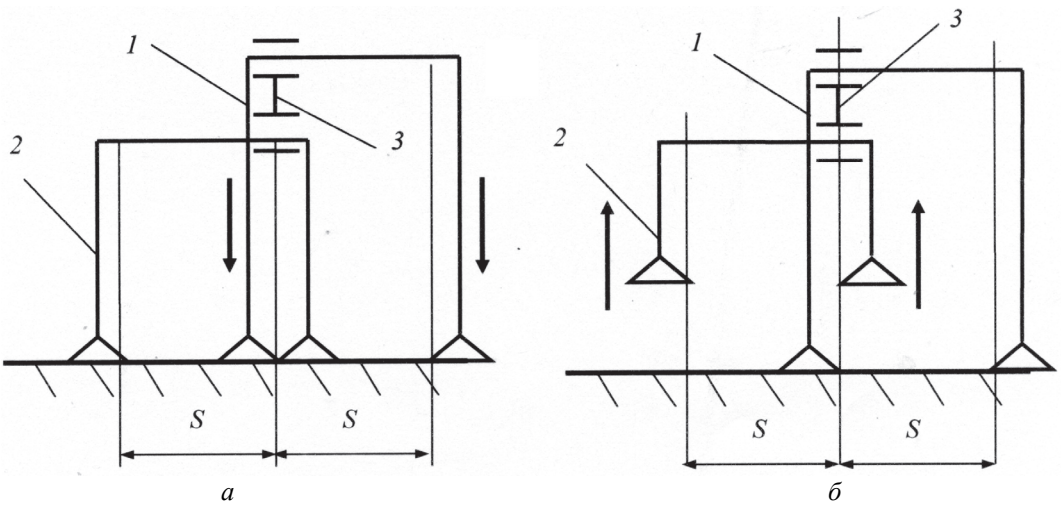


Рис. 4. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 2:
а – начальное положение второй фазы; *б* – конечное положение второй фазы

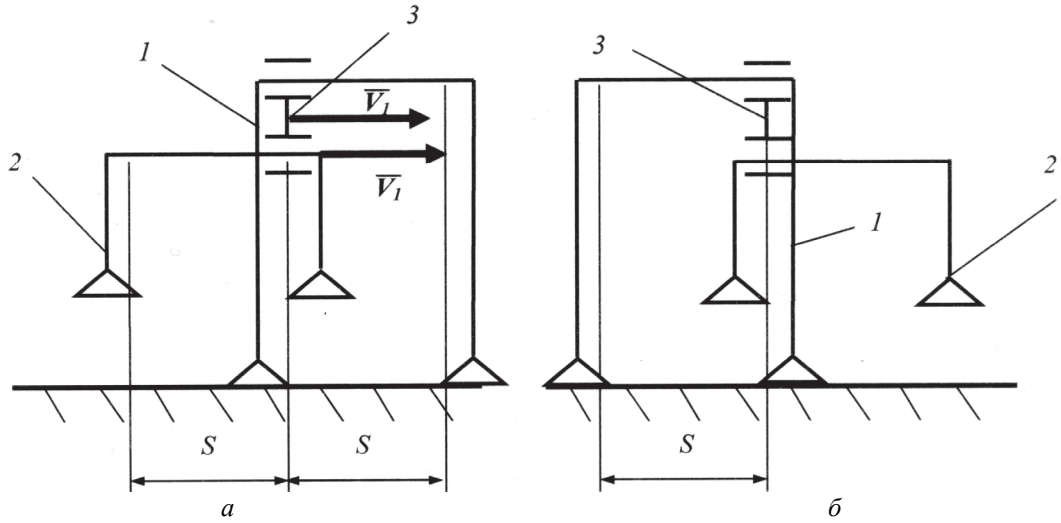


Рис. 5. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 3:
а – начальное положение третьей фазы; *б* – конечное положение третьей фазы

Фаза 2. Стойки неопорной рамы 1 опускаются до касания с опорной поверхностью (рис. 4, *а*), а стойки рамы 2 поднимаются. При этом система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение рам робота (рис. 4, *б*).

Фаза 3. С помощью приводов горизонтального перемещения корпус 3 перемещается на расстояние *S* (рис. 5, *а*) относительно рамы 1, а рама 2 перемещается на расстояние *S* относительно корпуса (рис. 5, *б*).

Фаза 4. Стойки неопорной рамы 2 опуска-

ются до касания с опорной поверхностью (рис. 6, *а)*, а стойки рамы 1 поднимаются до среднего положения, при этом система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение робота. Это состояние (рис. 6, *б*) соответствует начальному положению робота (рис. 3, *а*).

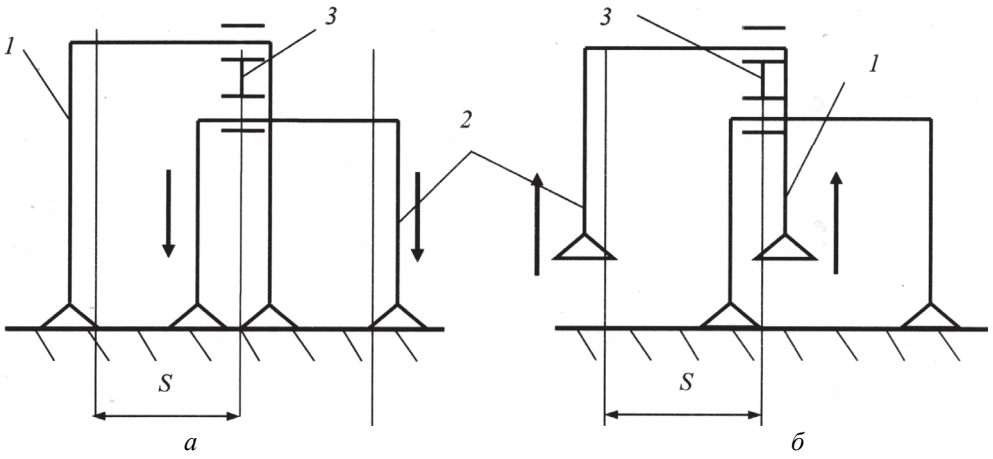


Рис. 6. Старт-стопный режим перемещения робота с шагающим ортогональным движителем. Фаза 4:
а – начальное положение четвертой фазы; *б* – конечное положение четвертой фазы

Возможны и другие варианты походок [5] с перемещением корпуса на такое же расстояние S за цикл, с поочередным перемещением корпуса и рам робота, которые могут быть востребованы в зависимости от параметров неровностей опорной поверхности и характера решаемых задач.

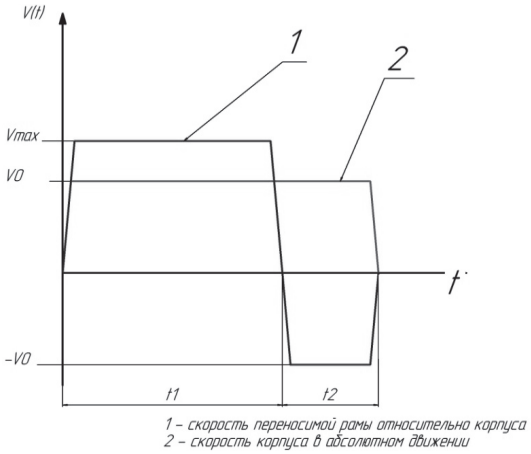


Рис. 7. График скоростей движущихся частей робота при реализации алгоритма перемещения корпуса робота с постоянной скоростью:
1 - скорость переносимой рамы относительно корпуса, 2 – скорость корпуса в абсолютном движении, t_1 – фаза 1 при которой переносимая рама движется с опережением корпуса, t_2 – фаза 2 при которой происходит безударная смена опорных ног, при этом скорость корпуса V_0 остается постоянной

Реализация описанных движений робота может происходить с различными значениями длины шага S, причем она может иметь различные значения для верхней и нижней рамы, что даёт возможность изменять следовую дорожку, меняя длину шага в диапазоне от 0 до S.

Вид графика изменения скорости движущихся частей робота при реализации алгоритма движения с заданной скоростью корпуса представлен на рис. 7.

Скорости перемещения движущихся частей робота обеспечиваются приводами горизонтального перемещения [14].

Перед началом движения по алгоритму обеспечивающему заданную скорость V_2 корпуса, система управления обеспечивает относительное положение элементов его конструкции, при котором корпус 3 робота отстоит от своего крайнего положения относительно опорной рамы в сторону обратному направлению движения на величину Δ и движется с заданной скоростью V_2. Рама 1, не имеющая в данный момент контакта с опорной поверхностью, находится в своем крайнем положении, в направлении обратном направлению движения (рис. 8, *а*).

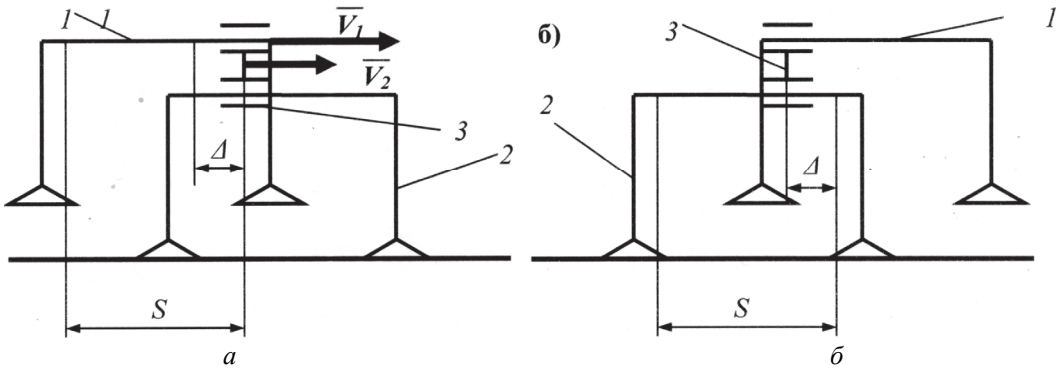


Рис. 8. Фаза 1 – режим непрерывного перемещения корпуса

Фаза 1. Из начального положения (рис. 8, *а*) неопорная рама 1 движется относительно корпуса со скоростью V_1. За время, за которое рама 1 пройдет путь от одного своего крайнего положения до другого, т. е переместится на расстояние S относительно корпуса, корпус 3 в абсолютном движении перемещается на расстояние $[S - 2\Delta]$, как показано на рис. 8, *б*.

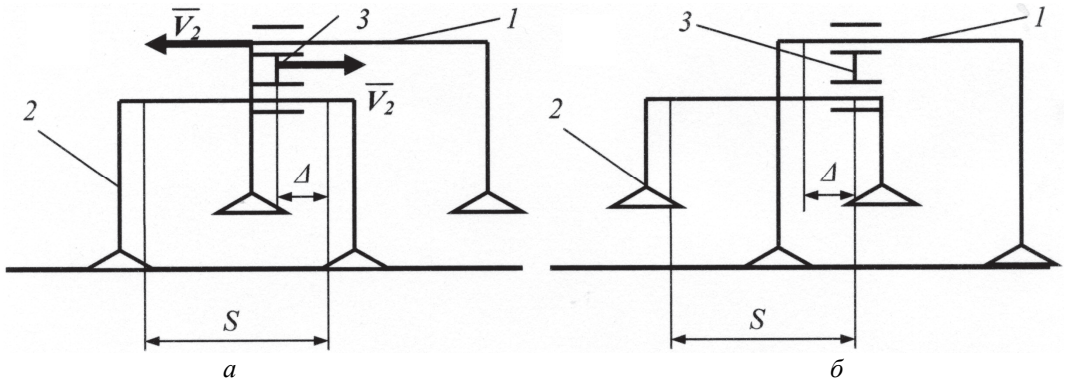


Рис. 9. Фаза 2 – режим непрерывного перемещения корпуса

Фаза 2. Во второй фазе движения (рис. 9), для смены опорных стоек, необходимо обеспечить абсолютную скорость свободной рамы равной нулю. С этой целью в момент t_1 (рис. 9, *а*) достижения свободной рамой своего крайнего положения, включается реверс двигателя продольного перемещения рамы 1, и перемещение осуществляется в обратную сторону с относительной скоростью V_2, равной скорости корпуса. Таким образом абсолютная скорость рамы 1 равна нулю.

Во время прохождения корпусом расстояния Δ, стойки неопорной рамы 1 за время $(t_2\text{-}t_1)$ опускаются до касания с опорной поверхностью, при этом обеспечивается горизонтальное положение робота, а стойки рамы 2 за время $(T\text{-}t_3)$ поднимаются до среднего положения. В интервале времени $(t_3\text{-}t_2)$ стойки обеих рам находятся в опоре т.к. конструкция робота допускает перемещение корпуса по направляющим рам, даже если все опорные стойки обеих рам находятся в контакте с опорной поверхностью.

Фаза 3. В течении этой фазы (рис. 10) неопорная рама 2 движется со скоростью V_1 и проходит путь от одного своего крайнего положения до другого, т.е перемещается на расстояние *S* относительно корпуса 3, сам корпус 3, в относительном движении проходит расстояние $[S - 2\Delta]$. Корпус 3 в этой фазе движения относительно рамы 2 движется со скоростью V_2.

Фаза 4. В четвертой фазе движения (рис. 11), также как и во второй фазе, для смены опорных стоек, обеспечивается равенство нулю абсолютной скорости свободной рамы. Для обеспечения этого условия, достаточно постоянного равенства по модулю скоростей корпуса и свободной рамы, и противоположности их по знаку в одной системе координат (аналогично фазе 2). Стойки неопорной рамы 2 опускаются до касания с опорной поверхностью, а стойки рамы 1 поднимаются до среднего положения, что соответствует начальному относительному положению частей робота. Система горизонтирования обеспечивает горизонтальное положение рам робота.

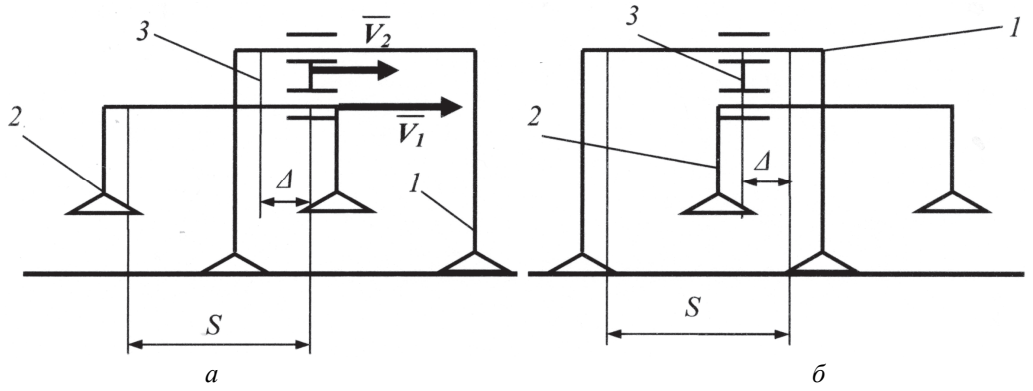


Рис. 10. Фаза 3 – режим непрерывного перемещения корпуса

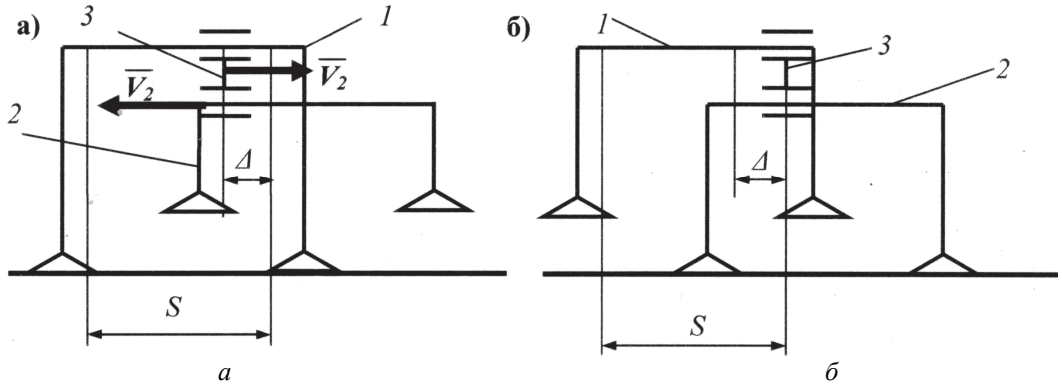


Рис. 11. Фаза 4 – режим непрерывного перемещения корпуса

Положение робота (рис. 11, *б*) идентично начальному положению (рис. 8, *а*). На этом цикл перемещения заканчивается и при дальнейшем перемещении фазы движения повторяются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вечканов В.В., Стекольников А.В.* Проекты разработки ГосИФТП в области создания автономных мобильных роботов малого класса для чрезвычайных ситуаций // Экстремальная робототехника: материалы XI науч.- техн. конф. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 35-45.

2. Сравнительные меры для оценки автономности мобильных роботов / И.Л. Ермолов // Симпозиум по робототехнике и мехатронике-М.: ИПМ РАН, 2008.-с. 86-95.

3. *Батанов А.Ф.* Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. Условия применения и общие технические требования А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин// Симпозиум по робототехнике и мехатронике–М.: ИПМ РАН, 2008.–с. 37-66.

4. Построение программных движений восьминогого робота с ортогональным движителем / В.В. Жога, Е.С. Брискин, А.Е. Гаврилов, В.Е. Павловский // Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. двенадцатой всерос. науч.-практ. конф. (1-3 апр. 2009 г.). В 6 т. Т. 5. Экстремальная робототехника / Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук, НПО спец. материалов. - СПб., 2009. - С. 199-202.

5. *Жога, В.В.* Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В.В. Жога, А.Е. Гаврилов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 22-28.

6. *Гаврилов, А. Е.,* Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, П.В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. - №5.-С. 164-173.

7. *Гаврилов, Ан.Е.* Synthesis of optimal program law for movement of a robot with orthogonal walking drives / Гаврилов Ан.Е., Жога В.В., Федченков П.В. // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2011. - Vol. 50, № 5. - С. 847-857. - Англ.

8. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

9. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

10. Мобильный робототехнический комплекс для гуманитарного разминирования / Брискин Е.С., Жога В.В., Покровский Д.Н., Шурыгин В.А. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2007. - №3. - С. 28-37.

11. *Брискин, Е.С.* Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г. // Искусственный интеллект. - 2007. - №4. - С. 408-415.

12. *Шаронов, Н.Г.* Синтез алгоритма управления приводом цикловых движителей шагающей машины в особых условиях / Шаронов Н.Г., Калинин Я.В. // Изв. ВолгГТУ. Серия

"Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 11. - С. 40-43.

13. *Шурыгин, В.А.* Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / Шурыгин В.А., Серов В.А., Шаронов Н.Г. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 41-44.

14. Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями / Жога В.В., Скакунов В.Н., Филимонов А.В., Голубев Д.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 14-21.

15. Аппаратная реализация бортовой системы управления шагающего робота с ортогональными движителями / Аниськов Р.В., Жога В.В., Еременко А.В., Скакунов В.Н. // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 320.

УДК 631.3-82

А. А. Гончаров, С. Ю. Журилов

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ЦИКЛОВЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ*

Волгоградский государственный технический университет

dvr@vstu.ru

Рассматриваются сельскохозяйственные машины с цикловыми исполнительными механизмами. Синтезируется программное движение привода исполнительных механизмов, обеспечивающее минимум потерь энергии при работе.

Ключевые слова: потери энергии, привод, цикловой механизм, уравнение Эйлера, множитель Лагранжа.

A. A. Goncharov, S. Y. Zhurilov

WAYS TO REDUCE POWER WASTE IN THE DRIVES OF AGRICULTURAL MACHINERY WITH A CYCLE EXECUTING MECHANISM

Volgograd State Technical University

Agricultural machines with cyclic executive mechanisms are considered. Program movement of the drive of the executive mechanisms, providing a minimum of losses of energy during the work is synthesized.

Keywords: energy losses, drive, cyclic mechanism, Euler's equation, Lagrange's multiplier.

Низкая энергетическая эффективность приводов исполнительных механизмов сельскохозяйственных машин является сдерживающим фактором их развития и вызывает огромные непроизводительные потери энергии в масштабах агропромышленного комплекса в целом.

В целом, такими недостатками обладает и созданный в ЗАО "НПО "Европа-Биофарм" опытный образец прицепного устройства для механизированной уборки тыквы с сохранением исходных свойств сырья ЕРКШ.271314.001, разрабатываемый в рамках государственного контракта ГК № 16.522.11.2005 (2012-2.2-522-010-002). Прицепное устройство (рис. 1) служит для механизированной уборки тыквы из предварительно образованных валкообразователем валков агротехнически обоснованной ширины и состоит из трех основных частей: подборочного устройства, транспортировочного узла и выгрузного лотка, находящихся на раме с колесной парой и приводимые гидромоторами МГП-160, питающихся от гидросистемы трактора, агрегатируемого с прицепным устройством. Низкая энергетическая эффективность прицепного устройства обусловлена применением в опытном образце прицепного устройства цепных передач с неуравновешенными ковшами в ковшовом транспортере транспортировочного узла и принципиальной динамической неуравновешенности приводимого от ленточного транспортера главного исполнительного механизма - подборочного устройства, представляющего собой кривошипно-коромысловый механизм.

Мощность двигателя в приводе исполнительных механизмов с неуравновешенными звеньями, пропорциональна кубу скорости для шагающих машин [1, 2] и может быть распространена в рамках исследования по аналогии в силу единых закономерностей структуры потерь энергии на более общие классы цикловых механизмов [3, 4], что значительно ограничивает увеличение скорости работы и производи-

* Работа выполнена в рамках ГК № 16.522.11.2005 (2012-2.2-522-010-002), РФФИ 13-01-97057-р_пов_а

тельности и вызывает значительный потери энергии при работе.

Рис. 1. Общий вид прицепного устройства для механизированной уборки тыквы

Существуют конструктивные способы уменьшения энергозатрат, связанных с периодическим разгоном-торможением неуравновешенных исполнительных механизмов, в том числе за счет изменения структуры механизмов [2] или введения каких-либо рекуператоров [4]. Однако, эти меры приводят к существенному усложнению конструкции машины, увеличению ее массы и снижению КПД приводов. Также эффективность работы рекуператора зависит от скорости движения механизма или машины в целом, что затрудняет его использование при переменных режимах движения.

Для с цикловых механизмов любого рода, в том числе и механизма подборочного устройства опытного образца прицепного устройства правомерна задача определения такого закона изменения относительной горизонтальной скорости конечной точки механизма, при котором мощность, приводного двигателя во время работы, будет минимальна.

Примером машины, для которой может быть поставлена такая задача, является созданное прицепное устройство (ПУ) массой 1,3 т. Для существующего привода плодозахватного механизма данной машины при средней скорости движения ленточного транспортера $V_{ср}$=0,068 м/с максимальное значение реактивной мощности привода, требуемое на поддержание равномерного движения механизма без учета энергозатрат на работу по преодолению сил тяжести и сил сопротивления составляет менее 2,35 Вт, а при скорости 11,5 м/с, характеризующей предельно возможную производительность, требуемая мощность будет превышать 15,9 кВт. При скорости, соответствующей заданной производительности 8 т/ч, мощность привода составляет около 2,8 кВт.

В рамках постановки модельной задачи оценки энергозатрат, по методике предложенной Е.С. Брискиным и Я.В. Калининым [2] механизм представляется системой трех твердых тел (рис. 2): механизма 1, состоящего из кривошипа и шатуна, совершающего рабочий ход и присоединенного к нему противофазно механизма 2, находящегося в переносе, соединенных друг с другом безынерционными обратимыми механизмами (например, клиновыми механизмами свободного хода, работающими синхронно по требуемому закону) 3, выполняющими попеременную раздачу крутящего момента на механизмы и приводимых в движение одним гидромотором МГП-160, что соответствует кинематической схеме ПУ и не может быть распространена на общий случай движителей с большим числом степеней подвижности и/(или) с индивидуальными приводами исполнительных механизмов. Рекуперация энергии происходит следующим образом: в той фазе цикла, когда требуется ускоренное движение переносимого механизма, второй механизм, выполняющий рабочий ход движется замедленно. За счет инерции, момент на ведущем валу второго механизма становится отрицательным, и, при постоянстве момента развиваемого двигателем, момент на ведущем валу первого механизма возрастает. Таким образом, перераспределение кинетической энергии попеременно осуществляется от замедляющегося

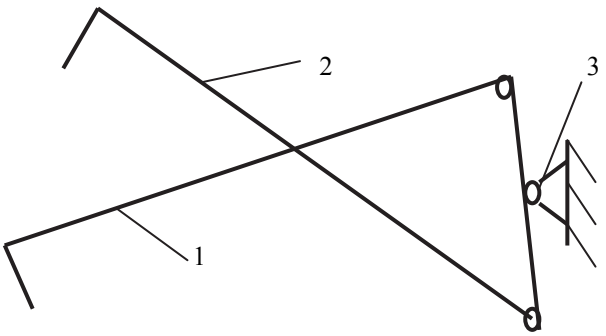


Рис. 2. Кинематическая схема привода плодозахватного механизма:
1 - исполнительный механизм, совершающий рабочий ход; 2 – исполнительный механизм, находящийся в переносе; 3 – безынерционный обратимый раздаточный механизм

механизма к ускоренно движущемуся. Следовательно, при соответствующем выборе параметров механизма и управления им через распределительное устройство можно добиться того, чтобы мощность, развиваемая гидромотором привода оставалась постоянной и была минимальной.

При этом движение механизмов относительно корпуса ПУ должно задаваться таким образом, чтобы в каждый момент времени один механизм совершал рабочий ход, а второй находился в переносе – этим обеспечивается заданная производительность и устойчивость технологического цикла работы ПУ.

Уравнения движения рассматриваемой механической системы, имеющей один общий привод для обоих исполнительных механизмов, как находящегося в рабочей фазе, так и переносимого, включают в себя дифференциальные уравнения движения тел в виде уравнений Лагранжа I рода, уравнения связей, устанавливающие зависимость между перемещением ведущего звена (кривошипа) переносимого исполнительного механизма и механизма, совершающего рабочий ход, и уравнение двигателя (гидромотора) при постоянстве скорости выходного звена при действии постоянной силы сопротивления движению Q (обусловленной сопротивлением движению плодов тыквы вверх по граблине):

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 = \lambda_1 - Q, \\ m\ddot{x}_2 = \lambda_2, \\ x_1 - \Pi_1(\varphi) = 0, \\ x_2 - \Pi_2(\varphi) = 0, \\ L - \lambda_1 \dfrac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi} - \lambda_2 \dfrac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi} = 0; \end{cases} \qquad (1)$$

где M, m – приведенная масса звеньев исполнительного механизма, совершающего рабочий ход и приведенная масса звеньев исполнительного механизма, находящихся в фазе переноса, приведенные к опорной точке (оси крепления кривошипа); x_1, x_2 – горизонтальные координаты конечной точки исполнительного механизма массы M, совершающего рабочий ход и конечной точки переносимого исполнительного механизма массы m, находящегося в фазе переноса; λ_1, λ_2 – неопределенные множители Лагранжа; φ – обобщенная координата приводного двигателя (угол поворота выходного вала), при этом $\dot{\varphi} = \omega = const$; $\Pi_1(\varphi), \Pi_2(\varphi)$ – передаточные функции (функции Вульфсона), определяющие голономные стационарные связи между двигателем и рассматриваемыми телами; L – генерируемая двигателем обобщенная сила (в рассматриваемом случае момент).

Полагая, что необратимые потери мощности W пропорциональны квадрату генерируемой обобщенной силы L, что, например, характерно для двигателей постоянного тока и, с некоторыми оговорками, гидромоторов (в частности примененных гидромоторов МГП-160), а также может распространяться и на другие типы двигателей

$$W = \alpha L^2, \qquad (2)$$

где α – постоянный коэффициент пропорциональности. С учетом того, что

$$\frac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_1, \frac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_2, \qquad (3)$$

после преобразований уравнений (1) имеет место следующее уравнение баланса мощности

$$L\dot{\varphi} = \dot{T} + Q\dot{x}_1. \qquad (4)$$

Для того чтобы минимизировать потери энергии, необходимо обеспечить минимум функционала [2, 4]

$$A = \alpha \int_0^{\tau/2} L^2 dt = \frac{\alpha}{\dot{\varphi}^2} \int_0^{\tau/2} \left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right)^2 dt, \qquad (5)$$

при учете дополнительных, изопериметрических по смыслу, условий

$$\int_0^{\tau/2} \dot{x}_1 dt = S, \int_0^{\tau/2} \dot{x}_2 dt = S, \qquad (6)$$

где S – длина шага механизма шагания, τ – период движения.

Данные условия накладывают требование равенства перемещения за период каждого из механизмов и равенства этих перемещений рабочему ходу механизма.

С учетом (6) функционал (5) можно рассматривать как

$$J = \int_0^{\tau/2} \left[\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right)^2 + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_2 \dot{x}_2 \right] dt, \qquad (7)$$

где μ_1, μ_2 – неопределенные множители Лагранжа.

Тогда уравнения Эйлера-Лагранжа имеют вид:

$$\begin{cases} 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right) m_2 \dot{x}_2 = \mu_2, \\ 2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right) m_1 \dot{x}_1 - 2Q\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right) = \mu_1. \end{cases} \qquad (8)$$

При выполнении граничных условий

$$\dot{x}_2(0) = \dot{x}_2\left(\tau/2\right) = \dot{x}_{10}, \dot{x}_1(0) = \dot{x}_1\left(\tau/2\right) = 0, \quad (9)$$

где $\dot{x}_{10}$ – скорость конечных точек исполнительных механизмов в момент смены фаз (переносимый исполнительный механизм начинает совершать рабочий ход и наоборот).

При наложении граничных условий (9) следует $\mu_2 = 0$ и $\mu_1 = -4Q^2\frac{S}{\tau}$.

Поэтому,

$$\ddot{T} + Q\ddot{x}_1 = 0, \quad (10)$$

и остается одно содержательное уравнение

$$\dot{T} + Q\dot{x}_1 = 2Q\frac{S}{\tau} = Q\dot{x}_{1cp}, \quad (11)$$

которое, при $Q = 0$ сводится к известному, например, для шагающих машин результату $\dot{T} = 0$, [5] где $\dot{x}_{1cp}$ – средняя скорость движения конечной точки исполнительного механизма, совершающего рабочий ход. Эта средняя скорость характеризует производительность плодозахватного механизма.

С целью обеспечения минимума ускорения конечной точки исполнительного механизма, взаимодействующего с плодами тыквы, целесообразно принять равноускоренный закон его движения, что обеспечит меньший травматизм плодов

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} \dot{x}_{10} - at, 0 < t < \dfrac{\tau}{4}, \\ \dot{x}_{10} - a\dfrac{\tau}{4} + a\left(t - \dfrac{\tau}{4}\right), \dfrac{\tau}{4} < t < \dfrac{\tau}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Окончательно определяется требуемый закон переноса механизма шагания в относительном движении $x_{2r} = x_2 - x_1 = \Pi_2(\varphi) - \Pi_1(\varphi)$, построенный по уравнению (11) при различных значениях постоянной силы сопротивления. Такой закон будет обеспечивать оптимальную работы привода в целом за счет перераспределения скоростей переносимого исполнительного механизма и исполнительного механизма, совершающего рабочий ход в определенной пропорции, задаваемой законом (11) и ограничением (12). При этом будет выполняться постоянство мгновенной мощности сил инерции и сил сопротивления движению, описываемое уравнением (11) за счет перераспределения кинетической энергии между переносимым и совершающим рабочий ход исполнительными механизмами как физическими маятниками некоей колебательной системы, совершающей вынужденные механические колебания при наличии постоянной силы сопротивления. Уравнением баланса мощности такой колебательной системы служит уравнение (4), при постоянстве и минимальности генерируемого приводным двигателем момента L, достижение чего и являлось задачей исследования по использованной методике.

Полученные результаты задают кинематическую характеристику привода исполнительного механизма, который будет обеспечивать минимум энергозатрат при движении. Наложение массово-геометрических ограничений на исполнительные механизмы задает техническое задание на проектирование его привода, включающего в себя помимо гидромотора и двух исполнительных механизмов главное управляющее звено – раздаточное устройство на основе клинового механизма свободного хода, которое обеспечивает работу привода в соответствии с уравнением (11) при наложении на движение исполнительного механизма, совершающего рабочий ход, условия (12), как наиболее рационального.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е.С. Брискин, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

2. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

3. *Брискин, Е.С.* Энергетическая эффективность цикловых механизмов робототехнических систем / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, В.В. Чернышев // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (часть 2). – С. 69–71.

4. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

5. *Калинин, Я.В.* Оценка энергетической эффективности шагающей машин с цикловыми движителями / Я.В. Калинин // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 12. – С. 40–44.

УДК 62-529

А. С. Дьяков, А. С. Олейников

ДВУХОБЪЕМНАЯ СИСТЕМА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПОДРЕССОРИВАНИЯ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

В статье рассмотрены принципы построения системы управления демпфированием в рессоре с использованием микропроцессора. В работе приводится описание системы, а также метода управления демпфированием, позволяющего использовать различные алгоритмы. На основе разработанной системы управления были проведены эксперименты, показавшие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: система управления, демпфирование, пневматическая рессора, микропроцессор.

A. S. Dyakov, A. S. Oleynikov

TWO-VOLUME SYSTEM OF AIR CUSHIONING WITH MICROPROCESSOR'S CONTROL

Volgograd State Technical University

In article construction's principles of control systems for damping in the air spring using microprocessor are shown. Within the limits of article the description of control system and management method for damping in the air spring are given. On the basis of the developed control system experiments, showed the effectiveness, were conducted.

Keywords: control system, damping, air spring, microprocessor.

Конструкции современных средств виброзащиты включают в себя элементы активного управления параметрами виброзащитного устройства. На базе существующей микропроцессорной техники возможно создание компактных исполнительных устройств активной системы виброзащиты, в которых будут реализованы достаточно сложные алгоритмы управления [1, 3].

В настоящей работе представлена реализация интеллектуального устройства управления жесткостью пневматической подвески автотранспортного средства. Разработка является развитием работы по устройству, описанному в статье [2].

Основными отличиями от описанного ранее устройства являются доработанная структура с используемым более мощным микроконтроллером, два однопроходных клапана вместо одного, а также увеличенный до 20 л. дополнительный объем для пневморессоры – удлиненный полый металлический цилиндр, с которым клапаны соединяют и разъединяют рабочую полость пневморессоры.

Микроконтроллер обеспечивает выборку данных с датчика давления с частотой 100 Гц., а также управление клапанами по заданному алгоритму с последующей передачей текущего состояния виброзащитного устройства (давление и состояний клапанов) на персональный компьютер для визуализации и анализа результатов экспериментов. Параметры алгоритма управления клапаном передаются от персонального компьютера [2].

Основным модулем системы является отладочная плата *STM32VLDISCOVERY*[5], включающая микроконтроллер *STM32F100RB*. Программирование его осуществляется через внутрисхемный *ST-Link* отладчик/программатор. На вывод 1 – первый канал АЦП микропроцессора – подается сигнал с датчика давления в диапазоне от 0 В. до 5 В.

Принципиальная схема модуля управления клапанами приведена на рис. 1. Питание на схему подается от источника постоянного тока 24 В. через стабилизатор напряжения *MC33063A* (*DA2*). Драйвер для управления клапанами построен на основе микросхемы мостового усилителя *L298P*.

На рис. 2 изображена принципиальная схема интерфейса связи с персональным компьютером. Питание 5 В. на вышеуказанную схему подается с одного из выводов отладочной платы. Связь с персональным компьютером осуществляется по интерфейсу *RS-232* на скорости 9600 Бод без аппаратного и программного управления потоком и контроля четности. Асинхронный интерфейс реализуется с помощью встроенного последовательного порта микропроцессора. Микросхема *PL2303*(*DD1*) преобразователя интерфейса *RS-232* в *USB*, включенная по типовой схеме, обеспечивает согласование уровней микроконтроллера и интерфейса *RS-232* по линиям передачи и приема.

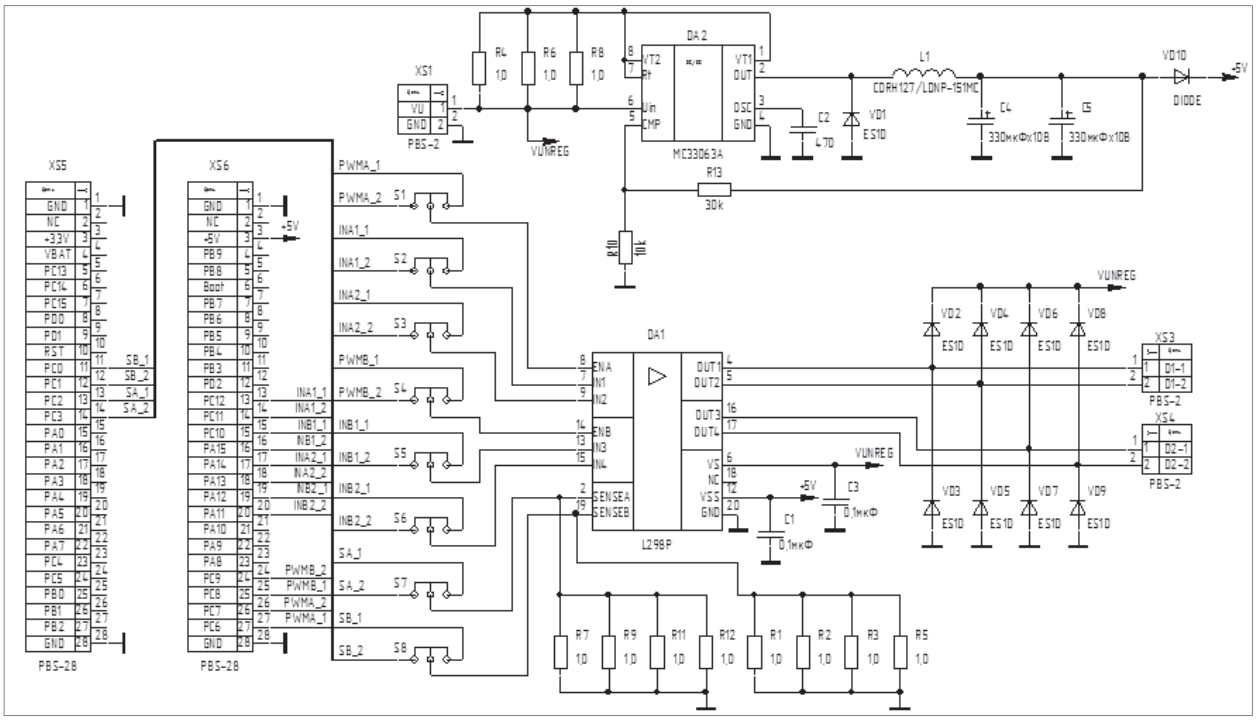


Рис. 1. Принципиальная схема модуля управления клапанами

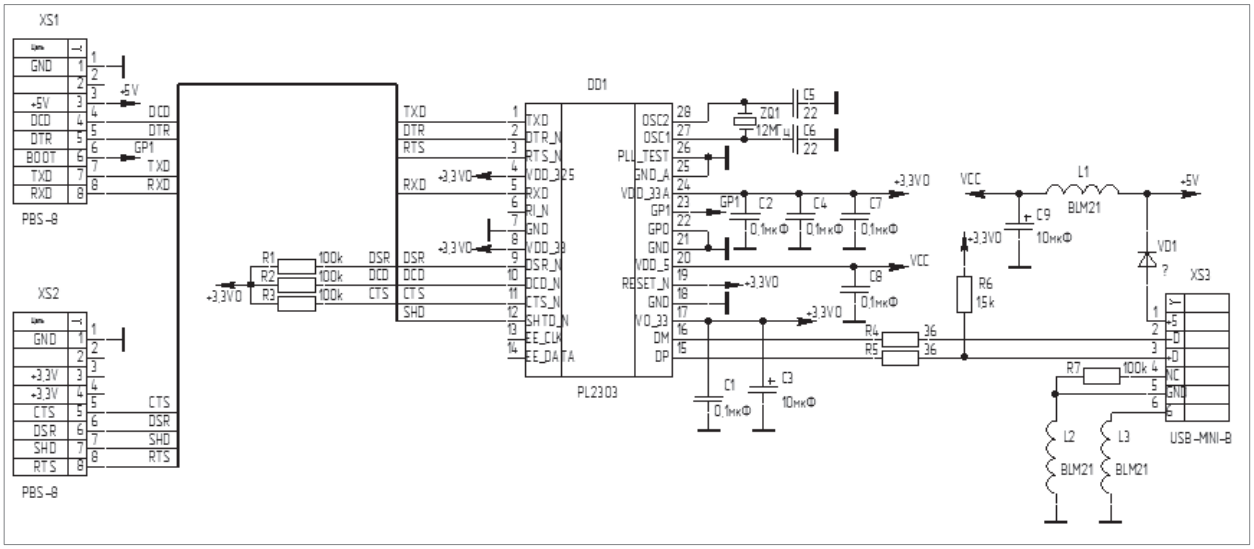


Рис. 2. Принципиальная схема интерфейса связи с персональным компьютером

При проведении экспериментальных исследований разработанной системы использовался описанный ранее[2] алгоритм работы модуля управления клапанами, реализованный в программе микроконтроллера. Он основан на алгоритме «*skyhook*»(«небесный рычаг»)[4] и заключается в перекрытии соединения рабочей полости пневморессоры с дополнительным объемом во время возвращения величины давления после преодоления неровности к среднему значению – при отсутствии движения.

На основе полученных данных при плавном изменении частоты колебаний от нуля до двух Гц. были построены спектры вертикальных ускорений подрессоренной массы. Спектры без алгоритма (с открытыми клапанами) сравниваются со спектрами, полученными при использовании алгоритма. Согласно им применение разработанной системы уменьшает среднеквадратичное отклонение на рабочем интервале частот – 0,8-1,6 Гц. – в среднем на 2,07%.

Также был проведен ряд экспериментов с другими значениями параметров алгоритма, при которых продолжительность этапа спада давления, во время которого клапаны закрыты, была больше. В этом случае среднеквадратическое отклонение (СКО) в среднем уменьшилось на 5,04%.

Также был испробован вариант алгоритма при фиксированной продолжительности этапа спада давления. Производились эксперименты при закрытии клапанов на 0,1 с., 0,2 с и 0,3 с. Согласно полученным результатам СКО при использовании такого варианта алгоритма было уменьшено на 31,51% при продолжительности этапа спада давления 0,1 с., 24,60% при 0,2 с., а при 0,3 с. – увеличено на 6,79%.

На рис. 3 приведены усредненные спектры ускорений подрессоренной массы при открытых клапанах (зеленый график) и при использовании описанного выше варианта алгоритма регулирования жесткости подвески (красный график) при закрытии клапанов на 0,1 с.

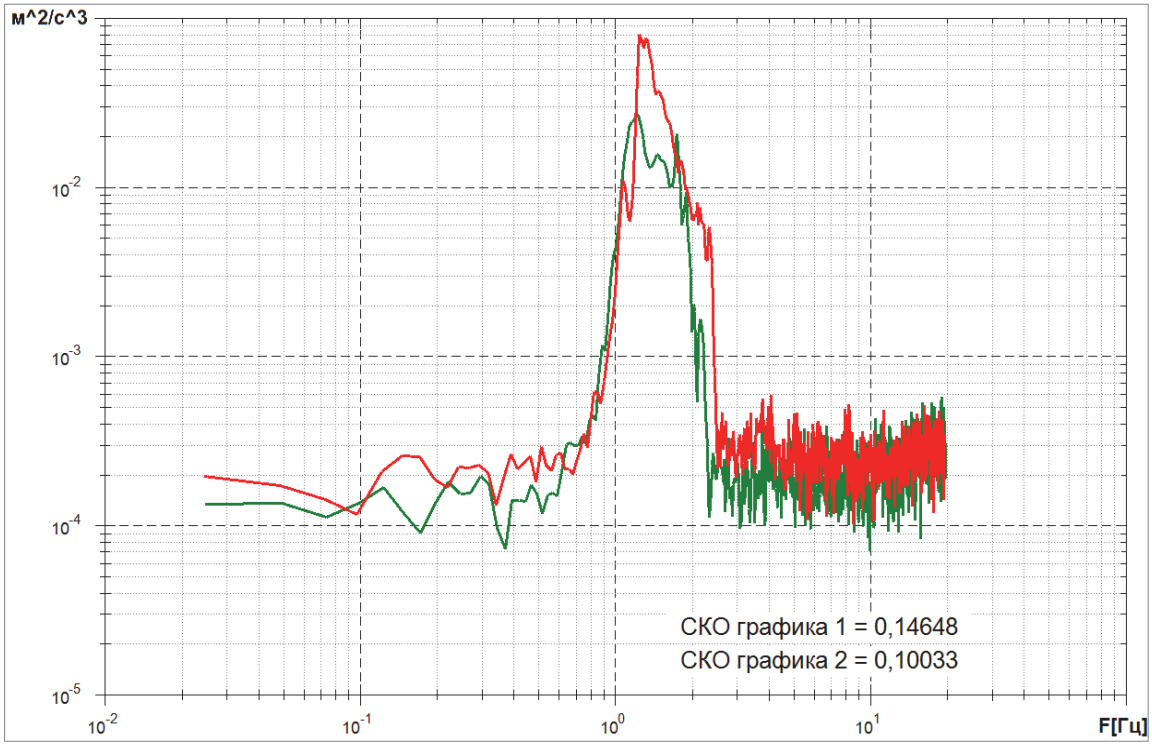


Рис. 3. Спектры ускорений подрессоренной массы. Постоянное время закрытия клапанов 0,1 с.

Для учета разных скоростей движения подрессоренной массы при растяжении и сжатии был испробован доработанный алгоритм, во время работы которого среднее значение давления, относительно которого происходит изменение состояний автомата системы, изменяется на определенный коэффициент. Эксперименты с данной модификацией алгоритма проводились при значениях коэффициента 1,3 и 1,5. Среднеквадратическое отклонение вследствие данных изменений увеличилось в среднем на 4,42% при коэффициенте 1,3 и уменьшилось в среднем на 11,49% при коэффициенте 1,5 по сравнению со среднеквадратическим отклонением при постоянно открытых клапанах.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов можно оформить в сводную таблицу, приведенную ниже.

Сводная таблица результатов экспериментов

Вариант алгоритма	Уменьшение СКО, %
Без модификаций	2,07
Увеличенная продолжительность закрытия клапанов	5,04
Постоянное время закрытия клапанов 0,1 с.	31,51
Постоянное время закрытия клапанов 0,2 с.	24,60
Постоянное время закрытия клапанов 0,3 с.	-6,79
Увеличенное в 1,3 среднее значение давления	-4,42
Увеличенное в 1,5 среднее значение давления	11,49

Основываясь на приведенных итогах можно сделать вывод, что наибольшую эффективность

показал вариант использования постоянного времени закрытия клапанов, причем, на самое меньшее время. Закрытие клапанов на большее время ведет к ухудшению эффекта от применения системы. Однако очевидно, что данная модификация алгоритма не будет показывать таких положительных результатов при несинусоидальных воздействиях.

Отрицательный эффект, продемонстрированный вариантом алгоритма при увеличении среднего значения давления в 1,3, требует дальнейшего изучения. При коэффициенте 1,5 применение системы показало положительный результат.

Таким образом, применение вышеописанного интеллектуального устройства управления жесткостью пневмоподвески при грамотном подборе используемого алгоритма может обеспечивать существенный эффект демпфирования колебаний подрессоренной массы, что обеспечит более комфортное для пассажира движение автомобиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Горобцов, А.С.* Исследование возможностей системы виброзащиты со ступенчато изменяющимися параметрами / А.С. Горобцов // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты: Тез. докл. IV Всесоюз. симпозиума / Ин-т машиноведения им. А.А.Благонравова и др. - М., 1982. - С. 74-75.

2. Пневматический виброподвес с микропроцессорным управлением демпфированием / А.В. Еременко, В.Н. Скакунов, А.С. Дьяков, А.С. Олейников // Известия ВолгГТУ. Серия "Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь". Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 3. - С. 94-100.

3. *Хамитов Р.Н.* Синтез системы управления импульсным электродинамическим клапаном пневмоамортизатора, Справочник. // Инженерный журнал, 2008, №2 – с.62-64

4. *D. Karnopp, M. J. Crosby, and R. A. Harwood*, “Vibration control using the semi-active force generators”, ASME J. Eng. Ind., vol. 96, pp. 619–626, 1974.

5. STM32VLDISCOVERY Discovery kit for STM32F100 Value Line - with STM32F100RB MCU - STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа: http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF250863

УДК 004.3:681.5

В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Еременко, А. А. Кравчук

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

Волгоградский государственный технический университет

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Рассматриваются вопросы построения сенсорных систем шагающих машин, работающих в супервизорном режиме, особенности аппаратной реализации систем управления приводами роботов с ортогональными движителями.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, распределенная система управления, контроллеры-сенсоры, супервизорное управление.

V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, A. V. Eremenko, A. A. Kravchuk

HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE ONBOARD CONTROL SYSTEM FOR THEWALKING ROBOT WITH ORTHOGONAL PROPULSORS

Volgograd State Technical University

The questions of construction of the sensory systems of stepping machines working in the supervisor mode are examined, features of hardware representation of control system by the drives of robots with orthogonal propulsors.

Keywords: the robot with the orthogonal propulsors, the distributed control system, controllers sensors, supervisory management.

Введение

Одно из направлений развития робототехники является использование роботов в технологических процессах сельскохозяйственного производства [1]. Подавляющее большинство мобильных роботов имеют колесный или гусеничный движитель. Однако имеют место эксплуатационные ситуации, когда использование подобных движителей невозможно. Применение шагающих движителей позволяет повысить проходимость робота, перемещаться по лестничным маршам, а также снизить разрушающее воздействие на плодородный слой почвы.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а).

Механическая конструкция робота

На рис. 1 изображена робототехническая система, состоящая из мобильного робота, оснащенного площадкой для размещения технологического оборудования.

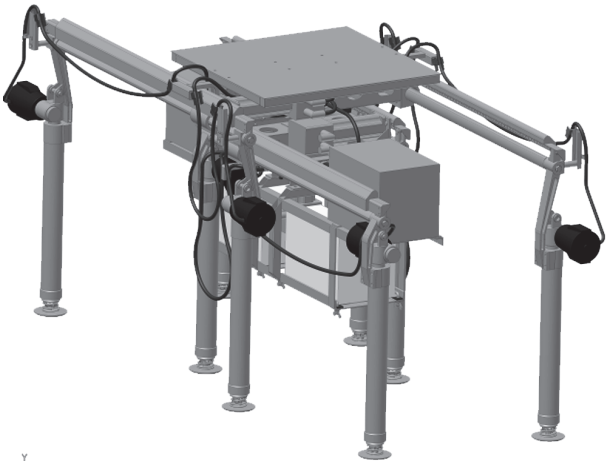


Рис. 1. Конструктивная схема робота

Робот состоит из верхнего корпуса, связанного механизмом поворота с нижним корпусом. С каждой из частей корпуса связаны две пары направляющих, изготовленные в виде шлицевых валов с шариковой гайкой LBST30 DD CL, с ходом 942 мм и 1042 мм, с приводами горизонтального перемещения. В качестве приводов горизонтального перемещения и привода поворота используются приводы изготовленные компанией «Maxon motors» (серводвигатели RTG060-004 и RTG060-100). Каждый из приводов включает в себя серводвигатель, планетарный редуктор, тормоз, датчик положения (энкодер HEDL9140, 500 имп/об). Крутящий момент – 4 Нм; угловая скорость – 425 об/мин. Максимальный момент на валу привода поворота - 34 Нм; угловая скорость на приводном валу - 17 об/мин.

На концах штанг смонтированы приводы вертикальной адаптации робота к опорной поверхности. В качестве привода используются актуаторы CAT33Hx400x4AG1F производства шведской компании «SKF group». Мощность привода опорных стоек 87 Вт; усилие – 500 Н; скорость – 0,174 м/с; ход – 400 мм. Исполнительные механизмы имеют возможность работать независимо друг от друга. Питание робота осуществляется от аккумуляторных батарей общей емкостью 55а/ч, напряжение силовой цепи 24 В.

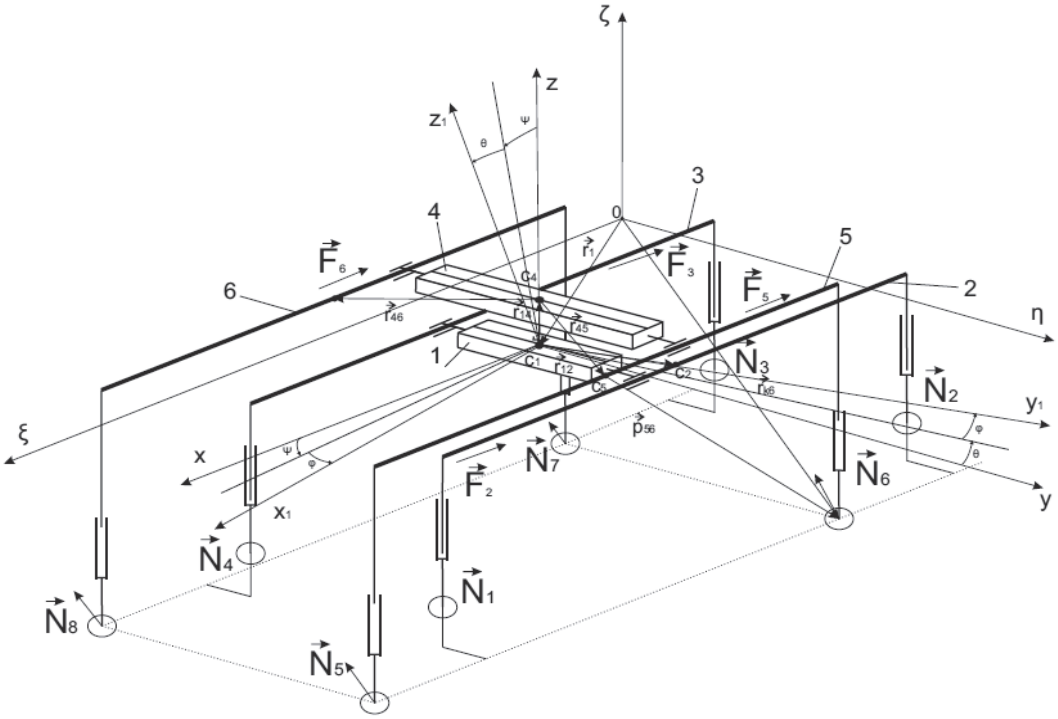


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота

Достоинства выбранной конструкции состоят в надежности механизмов, исполнительные органы которых совершают поступательное движение; достаточности двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетической эффективности, обусловленной отсутствием затрат энергии на

поддержание веса машины и более простых алгоритмах управления траекторией и законом движения опорной точки. Структура и функции блока управления в целом определяются характером программных движений, рассматриваемого шагающего робота.

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, построена на основе расчетной схемы, показанной на рис. 2 [2]. Уравнения движения робота составлены в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Мобильный робот с шагающими движителями, представляет собой сложную мехатронную систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов. Механическая часть представляется в виде шести абсолютно твердых тел массой m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, связанных с приводами перемещения. Рассматривается движение робота относительно неподвижной системы отсчета $O\xi\eta\varsigma$. Оси координат C_1XYZ связаны с центром масс нижней части корпуса и перемещаются поступательно относительно неподвижной системы координат. Положение центра масс определяется радиус - вектором $\vec{r}_1$, вектором скорости $\vec{V}$ и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С каждым из твердых тел связываются подвижные системы координат $C_kX_kY_kZ_k$ $(k=1\div 6)$. Их положения относительно осей C_1XYZ задаются с помощью корабельных углов Эйлера φ, ψ, θ.

Дифференциальные уравнения движения робота в матричной форме имеют вид

$$A\ddot{q} = B(q,\dot{q}) + F(q,\dot{q},t) + N(q,\dot{q}), \qquad (1)$$

где A – 10x10 симметричная матрица коэффициентов инерции; $B(q,\dot{q})$ - матрица столбец слагаемых, зависящих от обобщенных координат и скоростей; $F(q,\dot{q},t)$ - матрица столбец управляющих сил; $N(q,\dot{q})$ - матрица столбец сил реакций опорной поверхности [2].

Проведенные численные исследования позволили сформулировать технические требования к приводам экспериментального образца мобильного робота приведенной конструкции.

Архитектура системы управления шагающим роботом

Разработанная система управления шагающим роботом основана на двухуровневой распределенной архитектуре (рис. 3). На верхнем уровне управление роботом выполняет встроенный компьютер Rigid 772, а нижний уровень включает подсистемы, реализующие функции оценки состояния внешней среды, контроля и управления исполнительными устройствами. В настоящей работе рассматриваются различные подходы к схемной реализации двух основных подсистем: подсистемы управления электроприводами, с учетом особенностей схем управления различных типов линейных двигателей, и сенсорных подсистем, поддерживающих автономный и супервизорный режимы работы робота.

Управление приводами, построенными на двигателях постоянного тока, осуществляется с помощью регулируемого источника напряжения питания. В серводвигателях типа RTG 060-004 и RTG 060-100 функции управления выполняют специализированные контроллеры положения EPOS2 70/10. Контроллеры могут управлять двигателями с датчиками Холла и энкодером при включении в сеть в качестве ведомого устройства, соединенного с ЭВМ верхнего уровня по интерфейсам USB или RS-232. Для управления линейными двигателями CATR(L) 33Hx400x4A1G1F требуются внешние полномостовые усилители, обеспечивающие изменение направления и скорости вращения двигателей постоянного тока. В качестве усилителей для линейных двигателей этого типа используются двухканальные драйверы Dual VNH2SP30-E Motor Driver Carrier MD03A POLOLU, способные отдавать в нагрузку ток до 15А по каждому каналу. На каждой из двух платформ шагающего робота размещены отдельные управляющие контроллеры на базе отладочной платы STM32F3Discovery. Контроллеры реализуют функции управления приводами на нижнем уровне и функции сбора, предобработки и передачи данных от сенсоров робота на встроенный компьютер верхнего уровня. Каждый контроллер управляет 4 линейными приводами вертикальных опор с помощью ШИМ-сигналов и принимает сигналы следящей обратной связи в цифровом или аналоговом виде от линейных приводов и специализированных контроллеров положения. Контроллеры управления приводами по интерфейсу RS-232 принимают прямые команды управления от встроенного компьютера верхнего уровня, реализующего различные алгоритмы передвижения робота [2,4].

Сенсорная подсистема состоит из двух основных частей: управляющего контроллера (плата STM32F3Discovery) и наборов ультразвуко-

вых и инфракрасных датчиков на каждой из подвижных платформ. В качестве дальномеров используются ультразвуковые датчики расстояния MaxSonar-EZ, а для обнаружения препятствий – инфракрасные датчики Sharp GP2Y0A710K0F. Кроме того, в сенсорную подсистему входят датчик геопозиционирования (GPS-приемник Tramble 67415) и элементы системы технического зрения. Особая роль отводится датчиками горизонтирования платформ шагающего робота. Операции, связанные с определением локального положения робота, выполняются с помощью акселерометра, гироскопа и цифрового компаса, встроенных на платах управляющих контроллеров STM32F3-Discovery. Данные с инерциальных датчиков, установленных на управляющих контроллерах, по USB-интерфейсу передаются на встроенный компьютер Rigid 772 для последующей обработки.

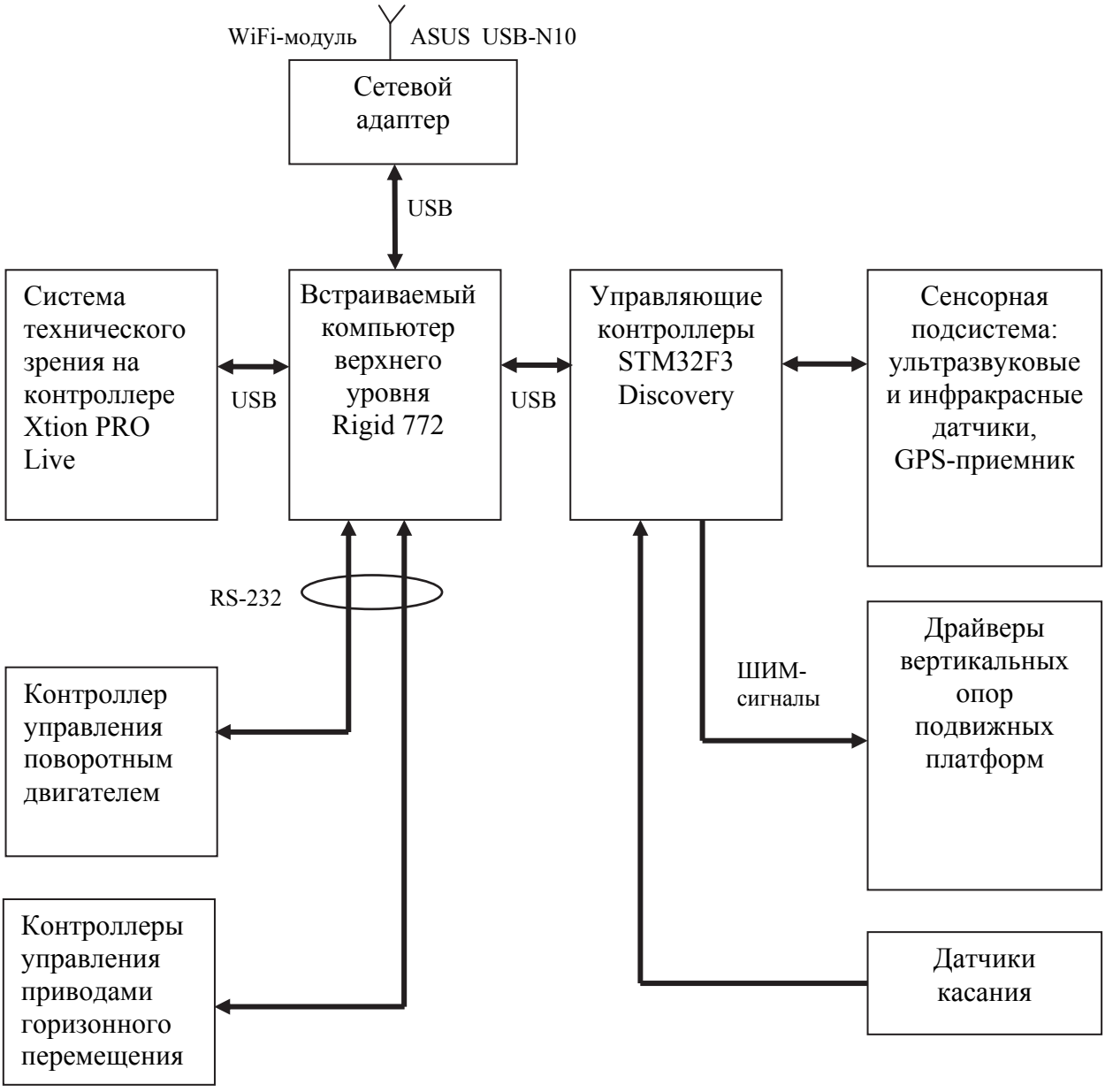


Рис. 3. Структурная схема блока управления шагающим роботом

Разработка системы технического зрения

В системах супервизорного управления анализ данных, определение цели и маршрута движения выполняется человеком, получающим более 80% информации через зрение [3]. В связи с этим при разработке системы технического зрения (СТЗ) использовались наиболее перспективные в настоящее время модифи-

кации времяпролетных камер (технология tof–tine off light). К ним относятся контроллеры MS Kinect и ASUS Xtion Pro Live, близкие по принципу действия и функциональным возможностям. В эти устройства встроены датчики глубины, на основе инфракрасного проектора и КМОП-матрицы, цветная видео камера и микрофонная решетка. Контроллеры позволяют формировать в реальном времени карту глубины пространства и, кроме того, использовать известные алгоритмы обработки изображений, полученных с видеокамер.

В СТЗ на базе контроллера MS Kinect исследовались разработанные алгоритмы разпознавания объектов и препятствий в рабочем пространстве робота [5]. Однако достоверность распознавания образов системой технического зрения сильно зависит от большого набора факторов: освещенности, загороженности сцены рабочего пространства и т.п. Кроме того, обработка изображения требует значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет применение контроллеров этого типа в реальном масштабе времени. Во многих практических случаях поддержка автономного режима становится проблематичной.

Больший интерес представляют возможности СТЗ при реализации дистанционного управления. Для проведения экспериментальных исследований системы технического зрения в качестве прототипа шагающего робота [2] построена модель мобильного робота на колесной платформе (полноприводное шестиколесное шасси Dagu Wild Thumper 6WD) с более простой системой управления приводом на двигателях постоянного тока. Система работает под управлением одноплатного компьютера Raspberry Pi Model B, установленного на борту робота. Преимуществами компьютера Raspberry в данном случае являются миниатюрные габариты и малое энергопотребление. В то же время Raspberry является полноценным компьютером с ARM-процессором и основными портами для подключения устройств (интерфейсы USB, Ethernet, выводы GPIO). Структура разработанной СТЗ показана на рис. 4.

Для получения карт глубины используется времяпролетная камера ASUS Xtion PRO Line. Принцип ее работы таков: встроенный ИК лазер излучает структурированный свет, отражение которого улавливается ИК-камерой. На основе времени, за которое отраженный свет достиг камеры, вычисляется расстояние до точки на объекте внешней сцены. Преимуществами таких камер являются сравнительная дешевизна, они не требуют дополнительной обработки изображения для получения трехмерной картины (в отличие от стереокамер) и сканирования сцены по частям (в отличие от лазерных дальномеров). К недостаткам можно отнести ограничения при получении и обработке данных от близко расположенных объектов (интенсивность отраженного света слишком высока, так как он не рассеян нужным образом) и при работе камеры при дневном свете из-за инфракрасного шума.

Компьютер Raspberry работает под управлением ОС Linux, дистрибутив Raspbian – Debain Wheezy, оптимизированный для архитектуры ARM.

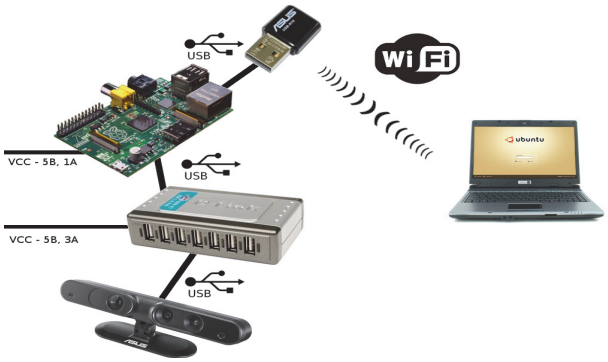
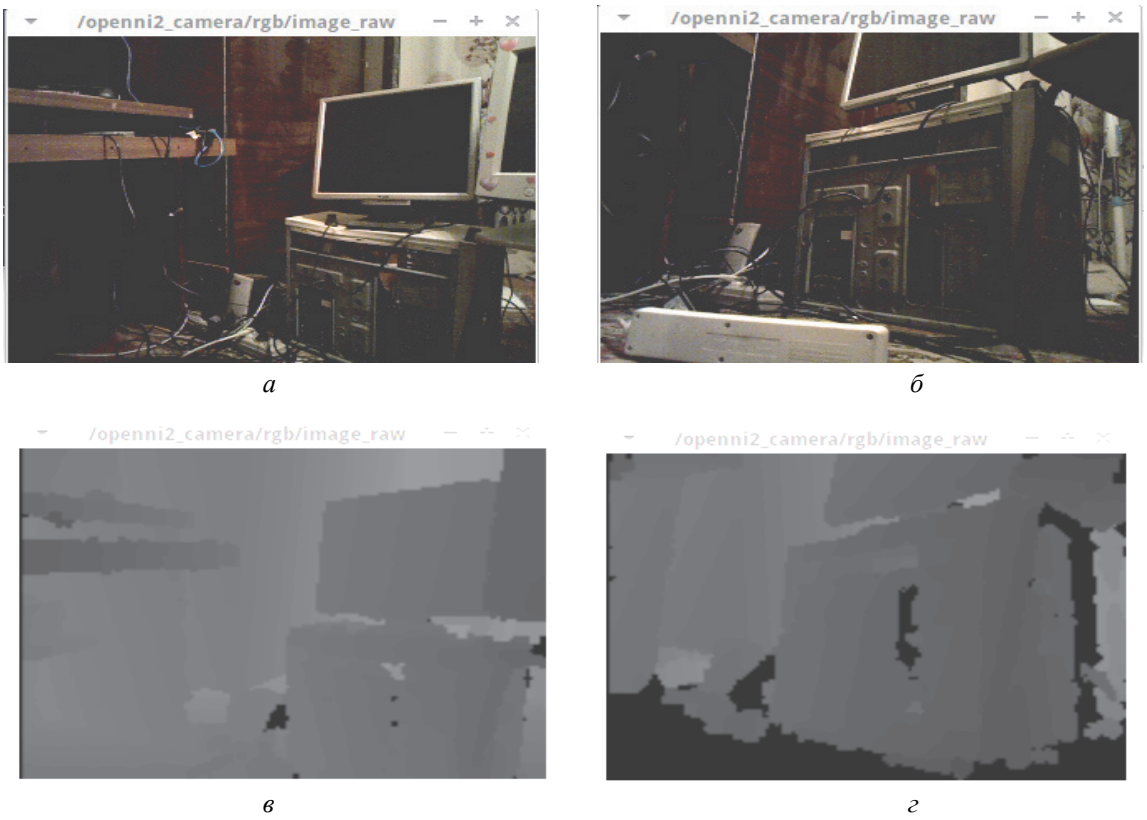


Рис. 4. Структура системы технического зрения

Для работы с ASUS Xtion были установлены драйверы и библиотеки Open NI2, а также надстройка над ОС – система ROS Groovy Galapagos, предоставляющая решения для типичных робототехнических задач. Для работы с изображениями используется библиотека Open CV, имеющая множество функций для обработки изображений, в том числе конвертацию между различными форматами и рисование примитивов. Библиотека была установлена в составе ROS и не требовала дополнительной настройки.

Карты глубины в стандарте Open NI– это изображение, каждый пиксель которого представляется 16-битным беззнаковым целым числом, определяющим дальность до данной точки в миллиметрах. Ноль указывает на отсутствие какой-либо информации о глубине. Для получения расстояния до точки необходимо просто считать значение пикселя по данным координатам. Для визуализации изображение часто нормируют, чтобы получить различаемое изображение. На рис. 5 показаны изображения, полученные от видео- и ИК-камер.



а *б*

в *г*

Рис 5. Примеры работы с камерой Xtion PRO Live:
а, б – обычное изображение, *в, г* – карта глубины

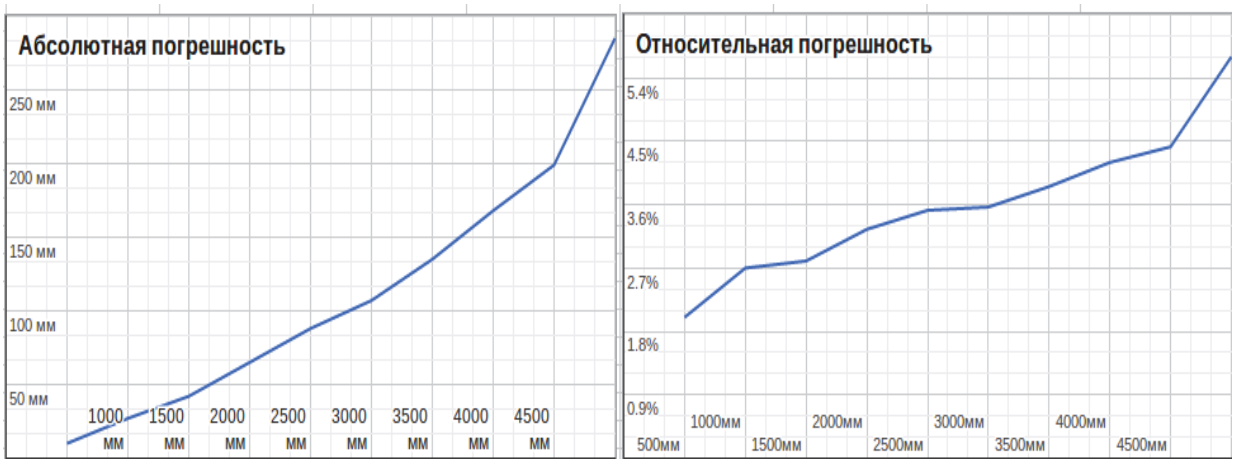
Особенность при работе контроллера Xtion с компьютером Raspberry заключается в необходимости дополнительного питания, которое может быть получено через USB-хаб с внешним источником питания или при прямом подключении к выводам GPIO компьютера Raspberry. Одной из проблем при работе с различными библиотеками на Raspberry является отсутствие многих из них в собраном виде для ARM-процессоров, вызывающее необходимость отслеживания зависимостей и правильности настроек компиляции, а также длительное время самой компиляции, что вынуждает выполнять сборку на более мощной машине в настроенной среде кросс-компиляции.

а *б*

Рис. 6. Интерфейс программы:
а – режим RGB, *б* – режим карты глубины

Технология получения карт глубины (Prime Sense) и разрешение камер у контроллеров Xtion и Kinect одинаковы, также как и драйверы для работы с камерами (Open NI) и программы ROS. Оператор может получить информацию о расстоянии до произвольной точки на изображении, кликнув на нее. Если точка выбрана, то она будет отмечена на изображении, и внизу изображения будет выведены координаты точки и дальность до нее в миллиметрах (рис. 6). Также есть возможность вывода карты глубины вместо обычного изображения, например, в условиях низкой освещенности.

Для управления роботом в супервизорном режиме большое значение имеет точность измерения расстояний. Оценка точности производилась сравнением показаний, полученных при физическом измерении, и данных от камеры для предметов простой формы, которые устанавливались на разном расстоянии от камеры. В качестве действительного было принято значение, полученное физическим измерением. На рис. 7 показаны результаты измерений.



а *б*

Рис. 7. Зависимость погрешности от расстояния:
а – абсолютная погрешность, *б* – относительная погрешность

Заключение

Оценка точности измерения проводилась с целью определения максимального расстояния, на котором ошибка не превышает допустимого значения. Поэтому погрешность измерения глубины в 30 см при расстоянии в 5 метров вполне приемлемая величина, учитывая относительно низкую скорость передвижения шагающего робота. Эти данные согласуются с приведенными в спецификации ASUS Xtion Live Pro, где заявлены рабочие расстояния от 80 см до 350 см при ошибке (3-5)%. Как показали исследования, точность измерения расстояния сильно зависит от степени дневного освещения, в том числе отраженного света, угла отражения от поверхности, до которой измеряется расстояние, и ее прозрачности.

Макетирование отдельных подсистем управления движителей шагающих машин, сенсорных подсистем, системы технического зрения и их экспериментальное исследование показали достаточно высокие эксплуатационные характеристики разработанных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жога В.В.* Система показателей качества шагающих транспортных машин // Справочник. Инженерный журнал. № 5.- М.: Машиностроение, 1997. - С. 21 – 28.

2. *Жога В.В*. Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Филимонов, Д.В. Голубев // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 :межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8. - С. 14 – 22.

3. *Андреев В.П.* Мобильные технологические роботы и тренажеры:интегрированное программное обеспечение группового взаимодействия/В.П. Андреев, К.Б.Кирсанов, А.В. Костин и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. №4.-М. 2013.- С. 74 – 79.

4. *Жога В.В.* Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями/ В.В.Жога, А.Е. Гаврилов, А.В. Еременко // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 6. - С. 28-32.

5. *Быков С.А.* Алгоритм анализа облака трехмерных точек для обработки видеоизображений / С.А. Быков, В.В. Жога, В.Н. Скакунов, В.А. Шурыгин // Экстремальная робототехника : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петер-бург, 25-26 сент. 2012 г. / ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - СПб, 2012. - С. 194-200.

УДК 629.1.03

Я. В. Калинин, С. А. Устинов, Д. В. Шкутан

ЗАДАЧИ ПОИСКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ МАШИН*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

В статье сформулированы актуальные задачи поиска энергетически эффективных алгоритмов движения шагающих роботов с двигателями различных типов, в том числе электрических, гидравлически и двигателей внутреннего сгорания. Обсуждаются пути их решения при наложении различных условий и ограничений. Представлены результаты численного исследования полученных алгоритмов.

Ключевые слова: алгоритмы управления, цикловой движитель, ортогональный движитель, шагающая машина, энергетическая эффективность, вариационные задачи.

Ya. V. Kalinin, S. A. Ustinov, D. V. Schkutan

PROBLEMS OF SEARCH OF ENERGETICALLY EFFECTIVE ALGORITHMS OF WALKING MACHINES MOVEMENT

Volgograd State Technical University

In article actual problems searching of energetically effective movement algorithms of walking robots with engines of various types, including electric, hydraulically and internal combustion engines are formulated. Ways of their decision are discussed when imposing various conditions and restrictions. Presents the results of numerical investigations obtained algorithms.

Keywords: control algorithm, cycle mover, orthogonal mover, walking machine, energy efficiency, variation tasks.

Альтернативные движители для транспортных средств и в первую очередь транспортно-технологических комплексов ведутся со времени появления колеса. Открытые в XIX веке гусеничный и шагающий движители устойчиво заняли свои ниши, причем исследования и разработки в области шагающих движителей и машин на их основе ведутся во всех развитых странах мира. При этом в силу сложности, принципиальной неуравновешенности и низкой энергоэффективности шагающих движителей и их механизмов внедрение шагающих машин и роботов испытывает известные трудности [1, 2]. Несмотря на то, что количество известных образцов машин и роботов измеряется несколькими сотнями, большинство из них представлены лабораторными макетами, не предназначенными для работы в реальных условиях. Всего несколько разработок достигли уровня, при котором их практическое использование уже становится возможным. Среди таких разработок можно назвать машины Plustech (Финляндия), Dante, ASV и BigDog (США), Asimo (Япония), «Кубань», «Восьминог» (Россия) (рис. 1) [3] и новый шагающий робот «Ортоног» (рис. 2), созданный на кафедре "Теоретическая механика" ВолгГТУ совместно с ОАО "ЦКБ "Титан".

Рис. 1. Шагающая машина «Восьминог»

Разработки шагающих машин и роботов также затруднены сложностями практической реализации оптимальных по какому-либо критерию алгоритмов движения. В первую очередь это связано со сложностью взаимосвязей составляющих движения шагающего робота со многими приводами, а также с отсутствием теории оптимального движения шагающих аппаратов. Для применения в различных условиях и выполнения широкого спектра задач, которые могут быть поставлены для шагающих машин и роботов, требуется достижение целого ряда важных параметров движения: энергоэффективность, проходимость и преодоление препят-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ № 12-01-31398 мол_а

ствий, маневренность, ограничение максимальных усилий в приводах, комфортабельность движения (ограничение максимальных ускорений корпуса), безударность постановки опор на грунт в заранее определенных местах и др.

Шагающие роботы с цикловыми движителями достаточно подробно исследованы [1, 2, 3, 4], поставленные задачи энергетической эффективности позволили создать целое направление исследований, в котором получены положительные результаты, теперь эти задачи требуют дальнейшего развития и уточнения: например, развития постановок от однокритериальной оптимизации к многокритериальной, учитывающий не только энергетическую эффективность, но и, например, усилия в приводах, максимальные усилия в шарнирах и звеньях; расширение на прочие типы приводных двигателей, в том числе гидравлические и двигатели внутреннего сгорания.

Так как развитию и более широкому применению шагающих машин препятствует на данный момент несколько факторов, ведущая роль среди которых принадлежит недостаточной энергетической эффективности привода шагания. Проблема увеличения скорости передвижения шагающих машин влечет за собой увеличение необходимой для передвижения мощности двигателя в приводе курсового движения шагающих машин, пиковые значения которой пропорциональны кубу скорости [5]. Такие задачи повышения энергетической эффективности движения за счет изменения законов движения предлагается на базе вариационных методов, когда по поставленному критерию оптимальности находятся требуемые законы перемещения корпуса шагающего робота и движителей.

Для шагающих машин с цикловыми движителями, движущихся без остановки корпуса машины в процессе движения, правомерна постановка задачи определения такого закона изменения относительной горизонтальной скорости опорной точки механизма шагания, при котором мощность, приводного двигателя курсового движения все время движения, будет постоянна и минимальна [1, 6].

При этом в результате решения вариационной задачи получается уравнение, описывающее закономерности изменения кинетической энергии в механической системе корпус робота-переносимый шагающий движитель:

$$\dot{T} + QV_{корпуса} = QV_{ср}, \qquad (1)$$

где T - кинетическая энергия системы, Q - постоянная сила сопротивления движению V - скорость корпуса при движении и средняя скорость движения робота соответственно.

Шагающие роботы с ортогональными движителями являются достаточно новыми и еще мало исследованы. Однако, такие движители перспективны для применения в наземных и подводных транспортно-технологических комплексах, а также для исследования поверхности других планет, они не копируют природу, а создают принципиально другой способ работы элементов движителя между собой. Предложенные профессором Н.В. Умновым относительно недавно ортогональные движители имеют воплощение в нескольких образцах шагающих роботов и макетов и являются базой для перспективных исследований. Набор задач, стоящих перед исследователями ортогональных движителей и роботов на их основе огромен: задачи энергетической эффективности, задачи разработки оптимальных алгоритмов движения, причем под оптимальностью может пониматься очень широкий спектр критериев: максимальные скорости, энергетическая эффективность, минимальные усилия в приводах, условия переступания через препятствия либо условия постановки опор только в определенных зонах и многие другие. Также возможна различная комбинация предложенных критериев.

Подходы и методы решения поставленной задачи основываются на применении положений теоретической механики, мехатроники и робототехники, теории механизмов и машин, математического моделирования, теории оптимизации и теории оптимального управления.

Рис. 2. Шагающий робот "Ортоног"

Основными возможными задачами в таком исследовании шагающих роботов с ортогональными движителями являются:

- исследование работы системы взаимосвязанных приводов курсового движения шагающих роботов;

- разработка критерия оптимальности на основе постановки изопериметрических вариационных задач;

- разработка методов определения потерь энергии в приводах, усилий, комфортабельности, входящих в критерий оптимальности движения шагающих роботов;

- разработка методов определения компромисса между противоречивыми требованиями, накладываемых на работу приводов курсового движения с формированием комплексного критерия оптимальности движения шагающих роботов;

- разработка методов построения оптимальных алгоритмов движения шагающих роботов и их движителей;

- экспериментальная проверка полученных результатов.

Подобные задачи ранее ставились и были решены для шагающей машины с одним управляемым приводом курсового движения («Восьминог», ВолгГТУ). Однако, в общем случае, для шагающих движителей с несколькими управляемыми степенями свободы такая задача ранее не ставилась и не решалась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.

2. *Брискин, Е.С.* Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов, В.В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2013. – № 6. – С. 159–166.

3. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями : монография / Е.С. Брискин [и др.]; под ред. Е.С. Брискина.—М.: Машиностроение, 2009. —192 с.

4. *Брискин, Е.С.* Энергетическая эффективность цикловых механизмов робототехнических систем / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, В.В. Чернышев // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (часть 2). – С. 69–71.

5. *Лапшин, В.В.* Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия АН СССР. МТТ. № 1.— 1993.— С.38–43.

6. *Калинин, Я.В.* Оценка энергетической эффективности шагающей машин с цикловыми движителями / Я.В. Калинин // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 12. – С. 40–44.

УДК 004

В. А. Камаев, А. И. Крыжановский, И. Ю. Никляев, П. С. Пыхтин

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ГУСЕНИЧНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ RRT

Волгоградский государственный технический университет

pavel.pykhtin@gmail.com

В работе описывается модифицированная модель динамики для гусеничного движетеля, а также предложена схема расчета движения с использованием описанной модели для применения ее в алгоритмах семейства RRT.

Ключевые слова: планирование движения, поиск пути, мобильные роботы, RRT, гусеничный движитель.

V. A. Kamaev, A. I. Kryzhanovsky, I. U. Niklyaev, P. S. Pykhtin

PATH PLANNING FOR A MOBILE ROBOT WITH A CATERPILLAR DRIVE TO BE USED WITH RRT ALGORITHM.

Volgograd State Technical University

This article describes modified dynamics model of differential drive and efficient approach to path planning task which utilize benefits of either dynamics and kinematics-only models.

Keywords: Motion planning, math planning, mobile robots, RRT, caterpillar drive.

Введение

Одной из ключевых задач при разработке автономных мобильных роботов является реализация подсистемы управления движением. Данная подсистема отвечает за расчет последовательности состояний (конфигураций) робота, удовлетворяющих всем накладываемым на него ограничениям (отсутствие столкновений с пре-

пятствиями, уравнения кинематики и динамики робота и т. д.), которая бы позволила последовательно перевести робота из начального состояния в целевое.

Эта последовательность может быть задана в явном виде, описывая состояние отдельных узлов робота (координаты робота, углы поворота манипуляторов и т. п.), так и косвенно через последовательность управляющих воздействий.

Основными проблемами, возникающими при решении данной задачи, являются большая размерность пространства конфигураций, вычислительная сложность поиска пересечения объектов в пространстве конфигураций, построение траекторий, удовлетворяющих ограничениям динамики и кинематики.

Постановка задачи

Целью данной работы являлась разработка системы планирования движения для гусеничного мобильного робота. В ее рамках были выделены следующие задачи:

- разработать модель мобильного робота;
- адаптировать модель мобильного робота для использования в алгоритме планирования;
- реализовать подсистему планирования для разработанной модели.

Рассматриваемая модель робота имеет малые габариты (относительно размеров препятствий), что позволяет не учитывать геометрию робота при проверке столкновений с препятствиями, считая его точкой. Для этого карта препятствий дополнительно обрабатывается. Каждое препятствие увеличивается на радиус окружности с центром в точке центра масс и описанной вокруг робота.

Гусеничный привод робота приводится в действие двумя двигателями постоянного тока. Двигатели соединены с ведущим колесом соответствующей гусеницы через редуктор. Управление производится путем изменения напряжения подводимого к двигателям. Таким образом, управляющее воздействие описывается двумя значениями U_1 и U_2, соответствующими напряжениям на правом и левом двигателях.

Результатом работы системы планирования движения является траектория движения робота, а также последовательность управляющих воздействий, которые позволят двигаться по данной траектории. Таким образом, модель робота должна включать в себя как кинематические, так и динамические ограничения.

В качестве алгоритма планирования был выбран алгоритм RRT, так как он имеет более высокую производительность по отношению к PRM алгоритмам при одиночных запросах, а также, в отличие PRM алгоритмов позволяет учитывать на этапе построения дорожной карты динамические ограничения.

Модель

В литературе достаточно хорошо освещена кинематика дифференциального привода для движения на плоскости, описывающая поведение гусеничной платформы. Она описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \qquad (1)$$

где x, y – декартовы координаты робота; θ – угол поворота робота относительно оси X; v – линейная скорость; ω – угловая скорость.

Данная модель может быть применена для планирования с последующей корректировкой, однако, требования, предъявляемые к подсистеме корректировки оказываются весьма высокими, так как она должна сглаживать все недочеты планирования. При этом возрастает вероятность возникновения коллизий с препятствиями. Выходом может стать дополнение модели кинематической модели уравнениями динамики.

За основу в данной работе взяты следующие уравнения, описывающие динамику гусеничной платформы, приводимой в действие двумя двигателями постоянного тока:

$$\begin{aligned} m\frac{dv}{dt} &= \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) - \mu_X mg \\ J\frac{d\omega}{dt} &= \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) - \mu_Y \frac{mgl}{3} \\ L\frac{dI_i}{dt} &= -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d \cdot \omega\right) + U_i,\ i = 1,2, \end{aligned} \qquad (2)$$

где n – передаточное соотношение редуктора; d – расстояние между гусеницами; r – радиус ведущего катка гусеницы; μ_X – коэфициент продольного трения; μ_Y – коэффициент поперечного трения; J – момент инерции относительно вертикальной оси; L – индуктивность обмотки двигателя; c_e – постоянная ЭДС двигателя; c – постоянная момента двигателя; l – длина гусеницы; R – сопротивление обмотки двигателя; I_i –

токи в обмотке двигателей; U_i – напряжения, подводимые к двигателям платформы.

Численное решение

Данные уравнения описывают случай движения с положительными угловой и линейной скоростями. Для того чтобы расширить эти уравнения на другие случаи движения, введем дополнительные множители k_v и k_ω. Уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}
&m\frac{dv}{dt} = \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) - k_v \mu_X mg \\
&J\frac{d\omega}{dt} = \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) - k_\omega \mu_Y \frac{mgl}{3} \\
&L\frac{dI_i}{dt} = -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d\cdot\omega\right) + U_i,\ i = 1,2 \\
&k_v = \operatorname{sgn}(v) \\
&k_\omega = \operatorname{sgn}(\omega)
\end{aligned} \tag{3}$$

Численное решение этих уравнений оказывается неустойчивым в случае если скорости (угловая или линейная) оказываются близкими к 0, тяга двигателей направлена против сил трения, и усилие, развиваемое двигателями, меньше сил трения. При этом возникает ситуация, когда на интервале интегрирования направление сил трения успевает измениться вследствие изменения направления движения под действием самих сил трения.

Чтобы обойти эту проблему, нами было предложено использовать для описанного случая упрощенную модель. В этом случае получаем:

$$\begin{aligned}
&F_{mp} = -k_v \mu_X mg \\
&F_m = \frac{cn}{r}(I_1 + I_2) \\
&M_m = \frac{cnd}{r}(I_2 - I_1) \\
&M_{mp} = -k_\omega \mu_Y \frac{mg}{3} \\
&m\frac{dv}{dt} = \begin{cases} F_T + F_{TP} \ \textit{при}\ |F_T| \ge |F_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(F_T) \ne \operatorname{sgn}(F_{TP}) \\ -C_v \ \textit{при}\ |F_T| < |F_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(F_T) = \operatorname{sgn}(F_{TP}) \end{cases} \\
&J\frac{d\omega}{dt} = \begin{cases} M_T + M_{TP} \ \textit{при}\ |M_T| \ge |M_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(M_T) \ne \operatorname{sgn}(M_{TP}) \\ -C_\omega \ \textit{при}\ |M_T| < |M_{TP}| \ \textit{или}\ \operatorname{sgn}(M_T) = \operatorname{sgn}(M_{TP}) \end{cases} \\
&L\frac{dI_i}{dt} = -RI_i - \frac{c_e n}{r}\left(v + (-1)^i d\cdot\omega\right) + U_i,\ i = 1,2 \\
&k_v = \operatorname{sgn}(v) \\
&k_\omega = \operatorname{sgn}(\omega)
\end{aligned} \tag{4}$$

Данная упрощенная модель позволяет найти решение в случае, когда решение полной системы неустойчиво; в остальных случаях получаемое решение соответствует решению полной версии уравнений (3).

Применение к RRT

Алгоритм RRT хорошо зарекомендовал себя при решении задач планирования движения. Этот алгоритм позволяет построить дорожную карту, равномерно покрывающую исследуемую

область. Он включает в себя следующие шаги:

1. Выбрать конфигурацию C_n.

2. Найти в дереве T конфигурацию C_i, ближайшую к C_n.

3. Построить путь $P_{i,n}$ от C_i к C_n.

4. Проверить на наличие коллизий путь $P_{i,n}$.

5. Если коллизии не были найдены, добавить C_n и $P_{i,n}$ в дерево T.

6. Если C_n не является целевой конфигурацией, перейти к шагу 1.

Решая описанные ранее уравнения кинематики и динамики, мы можем получить траекторию движения робота. Полученная траектория может быть использована для проверки коллизий. Наиболее простым, с точки зрения вычислительной сложности, является расчет траектории на основе одних лишь уравнений кинематики.

Очевидно, что полученные таким образом траектории будут отличаться от реального поведения объекта. Возникающая при этом ошибка будет расти по мере удаления от начальной точки, что может привести к планированию некорректных путей, которые будут недоступны для реального объекта. На рисунке представлены деревья путей сгенерированные по уравнениям кинематики и уравнениям динамики для одинаковых управляющих воздействий. В ряде случаев возникает ситуация, когда управляющие воздействия, рассчитанные на основе траектории движения, предсказанной кинематической моделью, приводят к столкновению после применения динамических ограничений.

Решением этой проблемы может служить дополнение кинематической модели уравнениями динамики. При наличии достаточно точной модели динамики вероятность коллизий при движении по проложенному пути существенно снижается. В тоже расчет дополненной модели требует больших вычислительных ресурсов.

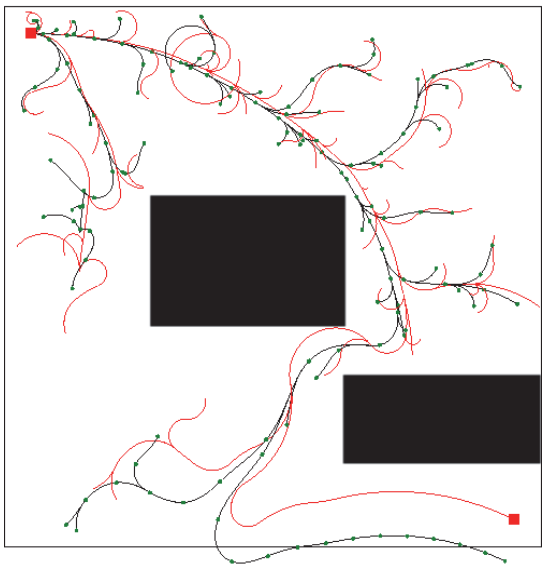
Одним из этапов построения траектории является поиск управляющих воздействий, которые, будучи примененными, позволят достигнуть выбранной на данном шаге конфигурации C_n из исходной конфигурации C_i. Они могут быть найдены минимизацией функции ошибки между полученной конечной конфигурацией C_n' и выбранной C_n, что предполагает многократный расчет траектории. Зачастую это нереализуемо на практике, особенно в случае мобильного робота, когда накладываются жесткие ограничения на энергопотребление, габариты и вес компонентов.

Обойти это ограничение можно, используя для поиска значений управляющих напряжений уравнения для установившегося режима. В этом случае в процессе оптимизации участвуют только уравнения кинематики, что существенно снижает вычислительную сложность задачи.

В качестве функции ошибки была выбрана следующая функция:

$$E(\omega, v) = \left| C_n - K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right) \right|, \qquad (5)$$

где $K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right)$ – функция, описывающая кинематику системы в установившемся режиме.



Траектория движения, рассчитанная с учетом кинематических (красная линия) и кинодинамических (черная) ограничений

Данная функция ошибки имеет большое количество локальных минимумов, что осложняет ее численную минимизацию. Однако, в рассматриваемом случае движения с постоянными линейной и угловой скоростями оптимальная траектория представляет собой дугу окружности. Локальные минимумы образуются при полном обороте по этой окружности. Для того чтобы избежать этого немного изменим ее вид:

$$E(\omega, v) = \frac{\left| C_n - K_K\left(C_i, \tau, \omega, v\right) \right|}{\left| C_n - C_i \right|} + \tau \frac{|\omega|}{\pi}, \qquad (6)$$

где τ – интервал времени, на котором происходит движение. Первое слагаемое принимает значения от 0 до 1. Второе слагаемое превышает значение 1 для всех решений, полученных при повороте более чем на 180 градусов.

Минимизируя данную функцию ошибки, получаем значения скоростей. Далее мы можем использовать эти значения в уравнениях динамики в установившемся режиме.

Найденные таким образом значения управляющих воздействий могут быть использованы для численного интегрирования исходной модели и нахождения описываемого ею пути от C_i к C'_n. Итоговая конфигурация C'_n, полученная таким образом, будет отличаться от исходной конфигурации C_n, однако, алгоритм RRT не требует детерминированного выбора новых конфигураций и допускает случайный выбор.

Для того чтобы оценить эффективность предложенного метода расчета, был проведен ряд экспериментов. Для сравнения были взяты реализации метода расчета траектории на основе уравнений кинематики (управляющие воздействия и траектория движения робота рассчитываются по уравнениям кинематики модели) и метода расчета на основе уравнений динамики (управляющее воздействие и траектория движения находятся путем решения уравнений динамики модели).

Усредненные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение среднего значения времени, затрачиваемого на поиск пути различными алгоритмами

Метод расчета	Время расчета, мс
Расчет на базе уравнений кинематики	0,15
Расчет на базе уравнений динамики	536,15
Предложенный метод расчета	25,78

Как видно из представленных результатов, предложенный метод расчета существенно уступает в производительности расчету траектории на основе только лишь уравнений кинематики. Однако, он существенно превосходит по тому же показателю метод расчета с использованием уравнений динамики. При этом предложенный метод обладает главным преимуществом расчета на основе уравнений динамики – генерируемые траектории более точно описывают движение моделируемого объекта, что позволяет избежать планирования путей, которые не могут быть реализованы на практике.

Также нами были проведены эксперименты для сравнения эффективности описанных методов. Результаты, представленные в табл. 2, говорят о том, что способ расчета траектории не влияет на число итераций поиска.

Таблица 2

Сравнение среднего количества итераций, необходимого для нахождения пути при использовании различных алгоритмов

Метод расчета	Среднее количество итераций
Расчет на базе уравнений кинематики	2541,6
Предложенный метод расчета	2548,6

Выводы

В данной статье описана дополненная модель динамики гусеничной платформы, которая может быть использована для всех случаев движения без продольного проскальзывания гусениц. Был проведен ряд вычислительных экспериментов с целью рассмотрения поведения модели в характерных ситуациях, в ходе которых были получены результаты непротиворечащие поведению реального объекта.

Предложенный в данной статье метод расчета траектории показал более высокую производительность по отношению к классическому методу расчета, использующему уравнения динамики системы. Вычислительная сложность описываемого метода оказалась выше таковой для метода расчета с использованием уравнений кинематики. Однако, было продемонстрировано, что траектории движения, описываемые кинематической моделью, могут не соответствовать реальным траекториям, получаемым с учетом динамики системы. Что может приводить к генерации некорректных путей, содержащих коллизии с препятствиями.

В дальнейшем предполагается сравнение поведения модели с поведением моделируемого объекта, а также ее апробация в задаче поиска пути мобильным роботом на гусеничной платформе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кабанов А.А.* Моделирование и управление движением гусеничного мобильного робота // Управление в технических, эргатехнических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС-2012. С. 740

2. *Матяш С.П.* Теория трактора и автомобиля: Краткий курс лекций / С.П. Матяш, П.И. Федюнин, С.П. Сальников. – Новосибирск: НГАУ, 2010. – 83 с.

3. *Михайлов, В.К.* Принцип построения алгоритма управления состоянием линейных инерционных объектов / В. К. Михайлов, И.А. Плешаков // Известия Волгоград-

ского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.14). – С. 36-41.

4. *Americo C.* Human-Automation Collaborative RRT for UAV Mission Path Planning [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/ papers/ americoThesis.pdf

5. *Bruce J.* Real-Time Randomized Path Planning for Robot Navigation [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: http://www.cs.cmu.edu/~mmv/papers/02iros-rrt.pdf

6. *Lambert A.* Path Planning using a Dynamic Vehicle Model [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: http://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/reading/rosssiddpresentation.pdf

УДК 621.865.8

М. М. Князьков, Е. А. Семенов

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ*

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),
Россия, 119526, г. Москва, пр. Вернадского 101-1, тел. (495) 433-77-66,
IPM_LabRobotics@mail.ru

Рассматриваются моменты и силы возникающие при движении инспекционной робототехнической системы по вертикальной поверхности. Рассмотрена структурная схема и принцип работы робототехнической системы вертикального перемещения.

Инспекционная робототехническая система состоит из модулей построенных на базе транспортного робота вертикального перемещения, технологической платформы, на которой установлено измерительное и инспекционное оборудование и подсистемы управления движением и измерениями. Настоящий технологический комплекс является одним из основных компонентов проекта по созданию комплексной системы диагностики, суть которой заключается в комплексном подходе к инспектированию и освидетельствованию объектов.

Комплексная система диагностики объединяет целый ряд разно ориентированных программно-технических средств, в том числе: систему передвижения технологического оборудования по поверхности объекта исследования, управление различными типами измерений, сохранение полученной информации и доступ к ней программ для работы с информацией, совместимость протоколов доступа программ, управление программами обработки, доступ к полученной отчетной информации и наконец, хранение информации и отчетов в формате удобном для последующего использования.

Ключевые слова: инспекционные робототехнические системы, диагностика, роботы вертикального перемещения, программное управление.

M. M. Knyazkov, E. A. Semenov

DIAGNOSTIC ROBOTIC COMPLEX OF VERTICAL MOVEMENT

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

The moments and forces arising in the motion of an inspection robotic system on a vertical surface are considered. The structural schematic and the principle of work of the robotic system for vertical motion are discussed.

The inspection robotic system consists of modules constructed on the basis of a wall-climbing transport robot and a technological platform on which both the measuring inspection equipment and subsystems for motion and measurement control are mounted. The technological complex under consideration is one of the basic components of the project on the creation of a complex diagnostic system, the essential distinctive feature of which consists in the complex approach to the inspection of objects.

The complex inspection system combines a number of variously oriented hardware and software components that provide the motion of the technological equipment along the surfaces of the object to be inspected, the control of various types of measurements, saving of the primary information and access of the processing programs to it, the compatibility of the access protocols, the control of the processing programs, the access to the report and, finally, the storage of the information and reports in a format convenient for the subsequent use.

Keywords: inspection robotic system, wall-climbing robot, programmed control.

1. Структурная схема робототехнической системы и принцип работы

Структура робототехнической системы проектировалась на принципах открытой модульности. В зависимости от решаемых технологических задач, его структура может изменяться при сохранении принципа модульного подхода к построению структуры в целом [1-3].

Инфраструктура робототехнической системы включает следующие базовые модули (рис. 1):

* Работа выполнена при финансовой поддержке Грантов РФФИ № 12-08-00374-а и №11-01-92002-ННС_а.

транспортный (5,6), технологический (4,7) и управляющий (3), а также сервисные подсистемы: коммуникационную, энергопитания (1,2) и безопасной эксплуатации (8).

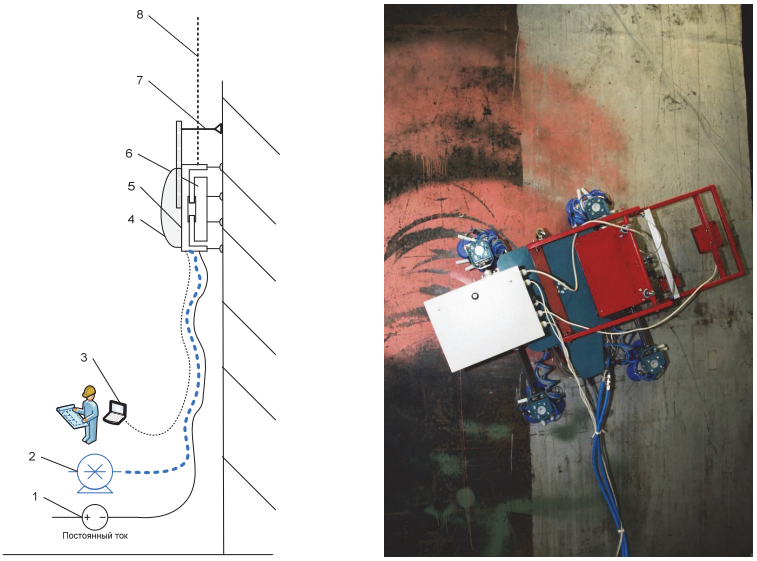


Рис. 1. Компоненты модульной структуры робототехнической системы

Назначение компонент инспекционной робототехнической системы:

• **Транспортный модуль** обеспечивает сцепление и движение робота по поверхности перемещения. Система приводов транспортного модуля осуществляет движение платформ, подъем – опускание схватов, фиксацию схватов на поверхности перемещения во время движения робота и выполнения технологических операций.

• **Технологический модуль** обеспечивает работу измерительных процедур, синхронизацию измерений с движением транспортного модуля, а также организует необходимый контакт и траекторию движения измерительного оборудования относительно поверхности перемещения.

• **Консоль управления** представляет собой набор операторских пультов для управления движением и выполнением технологических операций.

Принцип работы:

Операционный процесс начинается с установки робототехнической системы в начальную позицию на поверхности перемещения, для этого робототехническая система поднимается и прижимается к поверхности. На электропневматическую подсистему подается электропитание и воздух, что обеспечивает сцепление робототехнической системы с поверхностью. После проверки состояния сцепления, робототехническая система готова к выполнению команд оператора. Оператор с консоли дает команду на начало движения и выводит робототехническую систему в рабочую зоны на поверхности объекта, далее может дать команду на выполнение измерений или продолжить маневр.

Для окончания работы, робототехническую систему перемещают в начальную позицию и прекращают подачу воздуха. Робототехническая система теряет сцепление с поверхностью и после отключения питания готов к транспортировке.

2. Алгоритм работы робототехнического комплекса

Технологическое оборудование входит в состав технологического модуля и крепится на верхней части транспортного модуля. Технологический модуль состоит из двух основных узлов: электромонтажного шкафа и пантографов с датчиками измерительной подсистемы.

Рабочее давление пневмоцилиндров составляет от 2,5 до 10бар, усилие в режиме втягивание/выдвижение до 500н. Продвижение измерительного датчика по поверхности объекта обеспечивает линейный пневмопривод. Использование линейного пневмопривода позволяет получить непрерывные линейные, до 30 см, измерения участка поверхности, в месте проведения измерений.

На пантографе устанавливаются датчики измерительного оборудования, фотокамеры для проведения визуального контроля поверхности. На рис. 3 показаны установленные на пантографе датчик структуроскопа и толщиномера на линейном приводе.

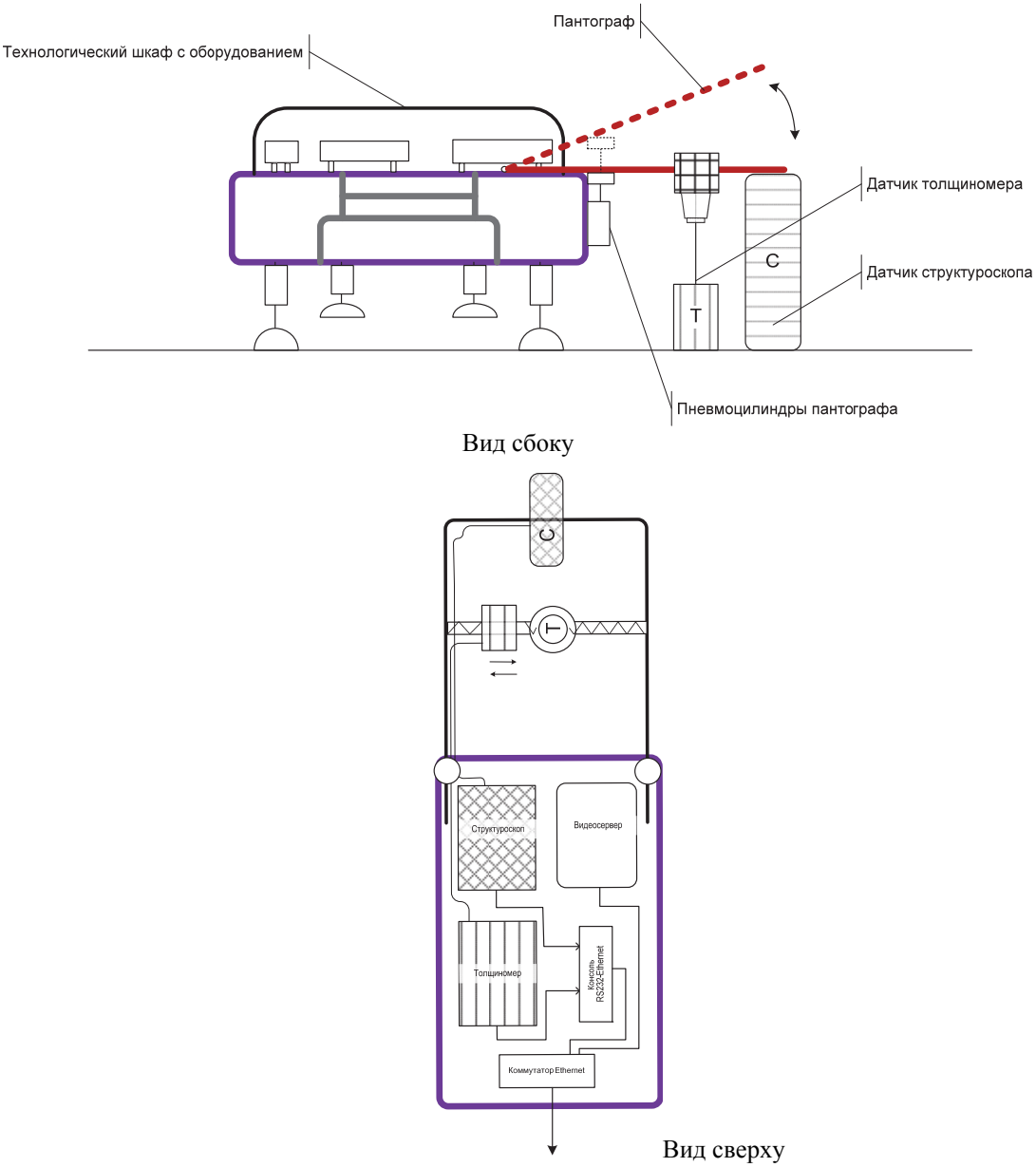


Рис. 2. Размещение технологического оборудования на робототехнической системе.

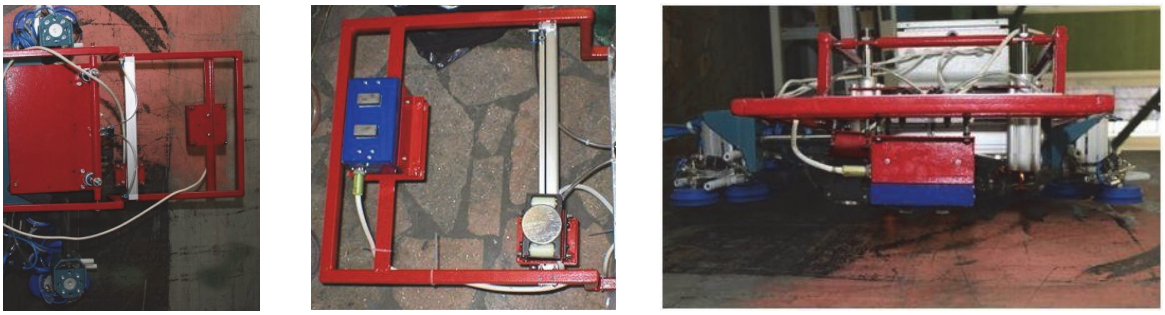


Рис. 3. Размещение датчиков измерительного оборудования (толщиномер, структуроскоп) на пантографе

Исходным положением для выполнения измерений у робототехнического комплекса соответствует положение, когда обе его платформы имеют сцепление с поверхностью объекта. В этом положении пантограф с измерительным оборудованием прижимает датчики измерительного оборудования к поверхности для выполнения измерений.

Алгоритм операций следующий:

1) Пантограф опущен. Датчик толщиномера и структуроскопа прижаты к поверхности объекта. Дается команда на начало измерений толщины и коэрцитивной силы.

2) Толщиномер двигается по линейному приводу и проводит измерения на линии 30 см. Операционный цикл для выполнения измерения структуроскопом 6-8 сек. Для выполнения всех измерений отводится 10с.

3) Окончание процедуры измерений. Пантограф поднимается. Датчики отрываются от поверхности объекта.

4) Датчик толщиномер отводится в исходное положение. Готовность к выполнению следующей команды.

3. Моменты и силы действующие при движении роботтехнической системы вертикального перемещения

На робот действуют следующие силы:

1. Силы F_i, посредством которых каждый из захватов обеспечивает прижим к поверхности

$$F_i = (P_0 - P_i) \cdot S_i = \Delta P_i S_i$$

$$i = 1,2,\ldots,n$$

Здесь P_0 – атмосферное давление окружающей среды, P_i - давление в вакуумной камере каждой ступни ноги, S_i - эффективная площадь, ΔP_i – перепад давлений.

2. Внешние силы R_i такие, как вес робота, реакции от технологического оборудования и веса кабелей, реакции от внешних сил – силы ветра, силы вибраций, внешних ударов и т.п.

3. Нормальные силы реакций N_i к поверхности, приложенные к каждой i-й стопе и направленные вдоль оси z, i=1,2,…,n.

4. Тангенциальные силы реакций, включающие силы сухого трения и контактные силы. Контактные силы возникают как результат взаимодействия шипов подкладки стопы с поверхностью. Силы сухого трения и контактные силы давления на каждую i-ю стопу робота равны

$$T_i = T_{Ti} + T_{ki},$$

где $i=1,2,\ldots,n$.

Контактные силы давления T_{ki} лежат в плоскости Oyz и равны $T_{ki} = K_T(\Delta PS_i)$, где K_T – экспериментально полученный коэффициент, зависящий от конфигурации шипов, площади взаимодействия с поверхностью и материалов шипа и поверхности.

Силы трения T_{Ti} тоже лежат в плоскости Oyz и вычисляются по закону Кулона.

$$T_{Ti} = fN_i,$$

где N_i – нормальные реакции.

Главный момент всех внешних сил R относительно точки O обозначаем через M_0, а момент всех сил реакций через M_i. Условия равновесия робота в результате действия всех приложенных сил и моментов могут быть записаны в векторной форме:

$$R + \sum_{i=1}^{n} [(N_i - F_i) + T_i] = 0$$

$$M_0 + \sum_{i=1}^{n} [r_i (N_i - F_i) + \sum h_i R] = 0$$

Заключение

Внедрение комплексной системы диагностики при помощи робототехнического комплекса позволит обеспечить предприятия современными информационными диагностическими системами и выведет на новый уровень состояние технической эксплуатации объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук* «Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям», М: Наука, 2001, 359с.

2. *В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, В. Н. Соловцов, Л. Ф. Фомин* «Анализ управления многозвенными мобильными роботами, перемещающимися в пространстве», Препринт ИПМех РАН, №732, М., 2003, 35с.

3. *Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Чащухин В. Г.* «Основные направления и перспективы развития роботов вертикального перемещения» материалы XX международной научно-технической конференции Экстремальная робототехника, нано-, микро- и макророботы, стр. 41-44, 28 сент.- 3 октября Дивноморск 2010, Россия.

УДК 629.1

В. В. Кореновский, Н. Г. Морозов*, Э. Е. Сильвестров*

МЕТОДЫ СИНТЕЗА МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ДВИЖИТЕЛЕЙ И РУЛЕВЫХ УСТРОЙСТВ ШАГАЮЩИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
***Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН**
vkorenovskii@mail.ru

Кратко описан метод синтеза, позволяющий получать множество решений задач синтеза сложных механизмов со многими параметрами синтеза. Этот метод использовался как для определения начальных значений параметров синтеза, так и для окончательного решения задачи. Даются примеры решений задач синтеза для ряда механизмов движителей и рулевых устройств шагающих машин.

Ключевые слова: традиционные методы синтеза механизмов, специальные методы синтеза, целевая функция, параметры синтеза, особая точка, псевдоособая точка, численные методы решения задач синтеза механизмов.

V. V. Korenovsky, N. G. Morozov*, E. E. Silvestrov*

METHODS OF SYNTHESIS OF MULTILINK MECHANISMS OF PROPELLERS AND STEERING DEVICES OF WALKING VEHICLES

Moscow State Technical University (MAMI)
***Ingineering science institute of A. A. Blagonravova of the Russian Academy of Sciences**

The synthesis method, allowing to receive a set of solutions of problems of synthesis of difficult mechanisms with many parameters of synthesis is briefly described. This method was used as for determination of initial values of parameters of synthesis and for final decision of a task. Examples of solutions of problems of synthesis for a number of mechanisms of propellers and steering devices of walking cars are given.

Keywords: traditional method of synthesis the mechanisms, special methods of synthesis, criterion function, synthesis parameters, special point, pseudo-special point, numerical methods of the solution of problems of synthesis of mechanisms.

В [1] приводятся различные подходы к синтезу механизмов движителей шагающих транспортных средств. Обычно, для этих целей, выбирают многозвенные плоские или пространственные рычажные механизмы, так как только они обеспечивают траекторию опорной точки движителя с заданными характеристиками: прямолинейность и равномерность перемещения опорной точки по опорной траектории, а также необходимость соблюдения условия, чтобы опорная часть траектории по отношению к точке подвески движителя была бы внешней. Сложная структурная схема такого механизма порождала большое количество параметров синтеза. Чаще всего при геометрическом синтезе параметрами синтеза были длины звеньев. Из-за большого количества звеньев выражение для целевой функции (функции неувязки значений расчетной траектории от действительных значений) становилось громоздким. Решение задачи синтеза и выбор оптимальных значений параметров все более усложнялись.

Все традиционные методы синтеза основываются на математической теории оптимизации, где целевая функция считается квадратичной. В этом случае, взяв частные производные целевой функции по параметрам синтеза и приравняв их к нулю, получаем систему линейных уравнений. При решении такой системы уравнений получаем значения параметров синтеза при минимальном значении целевой функции. При квадратичной целевой функции, получаемый в результате решения минимум, является единичным (глобальным).

В действительных реальных условиях из-за сложности механизмов целевая функция получается значительно сложнее в виде многочленов высоких степеней. Поэтому получаем значительное количество локальных минимумов. Следовательно, возникает вопрос о количестве локальных минимумов и нахождении глобального минимума.

В ИМАШ РАН и на кафедре ТММ МГМУ «МАМИ» разработан и предложен метод определения начальных приближений параметров в задачах синтеза механизмов. Он позволяет определять множество так называемых псевдоособых точек (в отличие от особых точек, в псевдоособых точках не все частные производные равны нулю). Таким образом, определяются начальные приближенные значения для параметров синтеза. Необходимо отметить, что эти значения параметров являются реальными.

В основе этого метода [2] находится предположение, что уравнение целевой функции можно представить в виде n-мерной поверхно-

сти, по которой скатывается некая «тяжелая» точка. Движение этой точки отслеживается при помощи соответствующего программного обеспечения, тем самым можно получить координаты этой точки в процессе ее движения и определения параметров синтеза в каждой псевдоособой точке. На рис. 1, 2 и 3 показаны

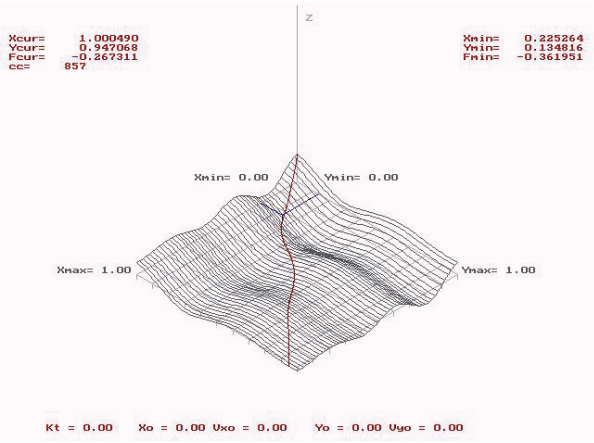


Рис. 1. Коэффициент трения 0

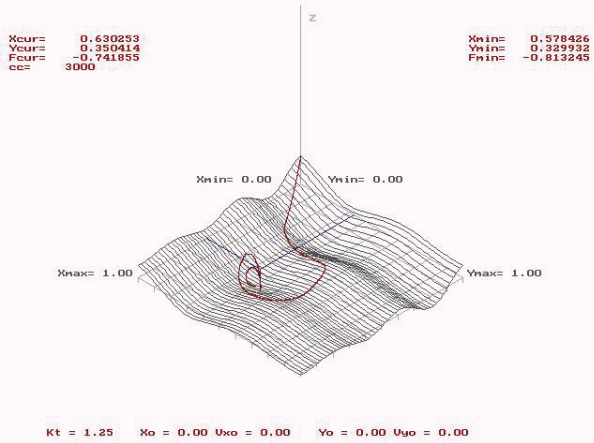


Рис. 2. Коэффициент трения 1.25

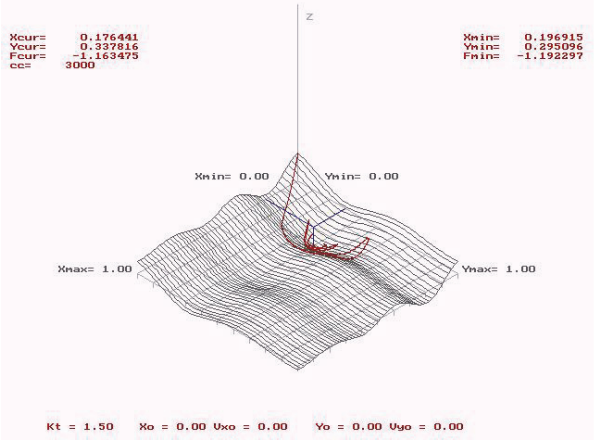


Рис. 3. Коэффициент трения 1.5

траектории движения материальной точки и поиск псевдоособых точек в результате скатывания ее с одного и того же места с различными коэффициентами трения.

Из приведенных рисунков видно, что скатывание «тяжелой» точки проходило по направлению, примерно соответствующему направлению антиградиента. Если менять силу трения в точке касания с поверхностью, можно получить различные варианты траекторий движения, что является достоинством данного метода при поиске начальных приближений.

Движение «тяжелой» точки по поверхности, имитирующей целевую функцию в задачах синтеза, проводилось путем решения системы дифференциальных уравнений Лагранжа первого рода. В упрощенном варианте эта система уравнений выглядит так:

$$\frac{dp_i}{dt} = v_i,$$

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial f(p_i)}{\partial p_i}, \qquad i = 1,...n.$$

Здесь первое уравнение системы является производной параметра синтеза по времени, а второе уравнение определяет производную по времени от скорости изменения параметра, равную частной производной целевой функции по параметру синтеза. Индекс i показывает номер параметра. Знак минус нужен для организации движения «тяжелой» точки по направлению антиградиента. Компьютерное решение данной системы уравнений позволяет получать начальные значения параметров синтеза, скорости изменения параметров синтеза.

При синтезе механизмов движителей для шагающих машин был оптимизирован сложный механизм 4 класса, у которого было 20 параметров синтеза [3]. Здесь необходимо отметить, что решение таких задач возможно только при применении предложенного метода синтеза.

При синтезе движителей шагающих устройств ставилась задача повышения точности, а также прямолинейности траектории опорной точки механизма. Из-за требований по высокой точности воспроизведения траектории на опорной части, а также из-за большого числа варьируемых параметров решение задачи синтеза было выполнено в два этапа. Структурная схема механизма делилась на две подцепи, задающую и выходную. Опорную точку механизма G перемещали по желаемой траектории и определяли координаты точки C. При этом точка C имела некую замкнутую траекторию, которую

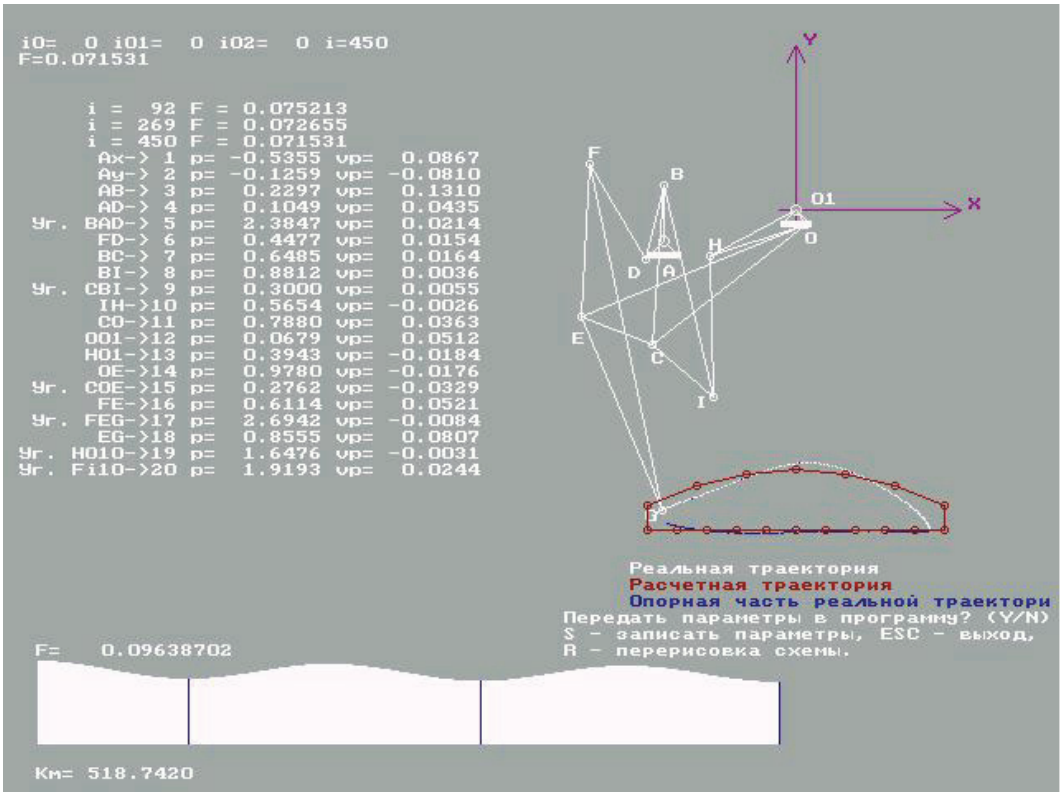


Рис. 4. Предварительный этап синтеза механизма 4 класса

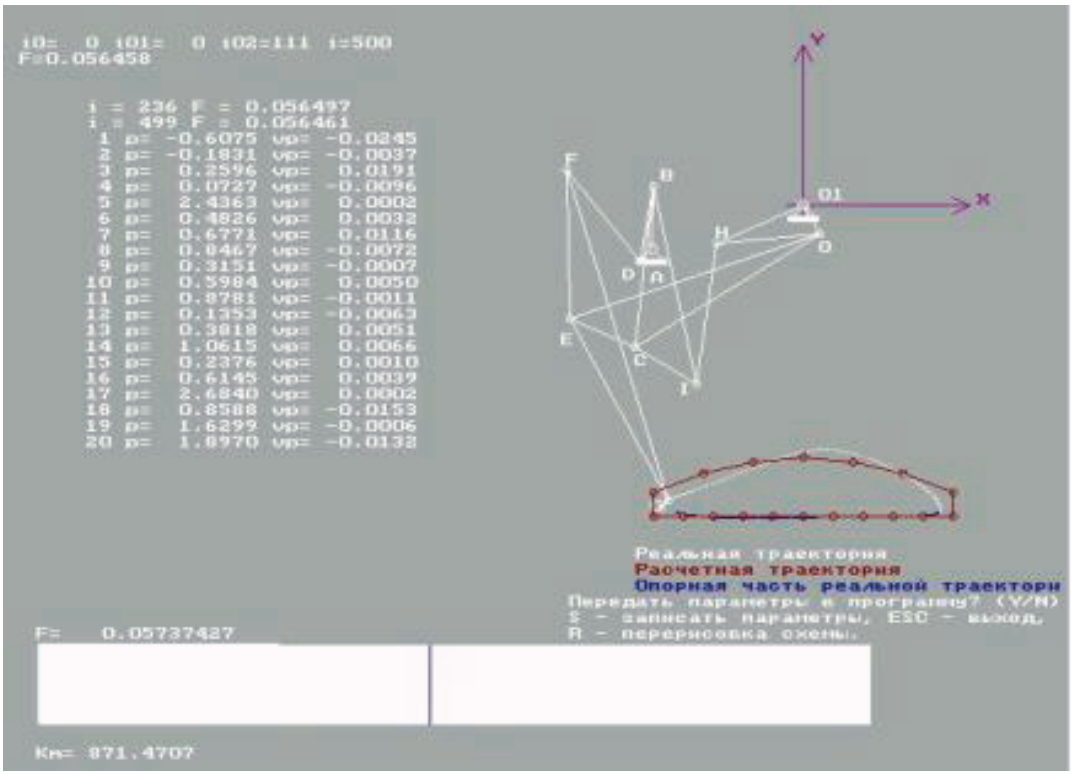


Рис. 5. Финальный этап синтеза механизма 4 класса

и должен реализовывать задающий механизм. Уменьшение объема вычислений происходит из-за уменьшения числа параметров в задающем механизме. Анализ траекторий всевозможных схем задающей подцепи показал, что они имеют характерную, «серповидную» фор-

му. Наиболее подходящим механизмом для задающей подцепи, был выбран зубчато-рычажный механизм, который имел широкое применение в конструкции лесопильной рамы [4], а его модификация использовалась для механизма движителя шагающей машины [5], изображенного на рис. 6. При таком подходе к решению задачи синтеза были получены хорошие результаты по точности воспроизведения опорной части траектории. Отклонение по вертикали на опорной части траектории составляла всего 0.07 %.

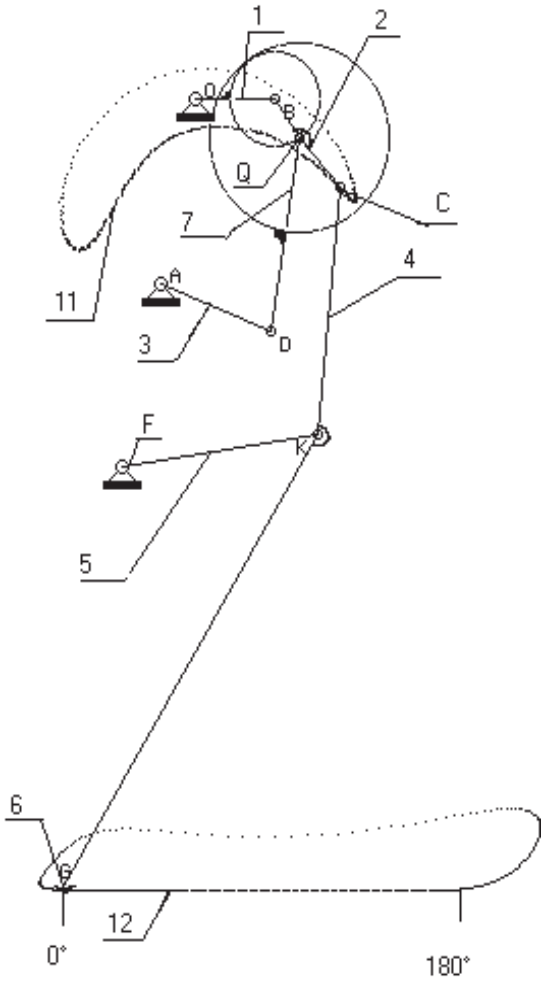


Рис. 6. Схема зубчато-рычажного механизма, используемого в качестве движителя ШМ

При синтезе рулевых механизмов использовались известные схемы, применяемые на транспортных колесных машинах. Задача проектирования рулевых механизмов для шагающих машин является более сложной, т.к. приходится применять специальные электронные схемы для определения скоростей относительного движения ног по разным бортам шагающей машины (эту задачу в транспортных машинах выполняют автомобильные дифференциалы), а также управлять углами отклонения направляющих движителей от продольной оси корпуса шагающей машины. В кинематически - точном повороте шагающих машин очень важно знать относительное положение каждой опорной ноги в системе координат, связанной с корпусом шагающей машины.

В качестве прототипов рулевых механизмов использовались рулевые трапеции Жанто. Рассматривались четырех-, шести- и восьмизвенные рулевые трапеции. Опытным путем установлено, что трапеции с большим количеством параметров синтеза могут иметь большую точность в воспроизводстве закона движения. Установлено, что точность работы шестизвенной рулевой трапеции примерно в 2 раза выше точности работы четырехзвенной трапеции, а точность работы восьмизвенной – примерно в 2 раза выше шестизвенной [7].

В данной статье рассмотрены только шестизвенные рулевые трапеции. Рис. 7 и 8 показывают результаты синтеза рулевой трапеции: предварительный этап синтеза и финишный. Информация, выводимая на экран, включает текущее значение целевой функции, таблицу значений параметров синтеза и скоростей изменения параметров в текущей псевдоособой точке, график целевой функции, проецированный на монитор. На графике целевой функции представлены также координаты псевдоособых точек. В правой верхней части экрана выводится окно с графиками эталонной и реальной функций, а также выводится значение суммарного отклонения.

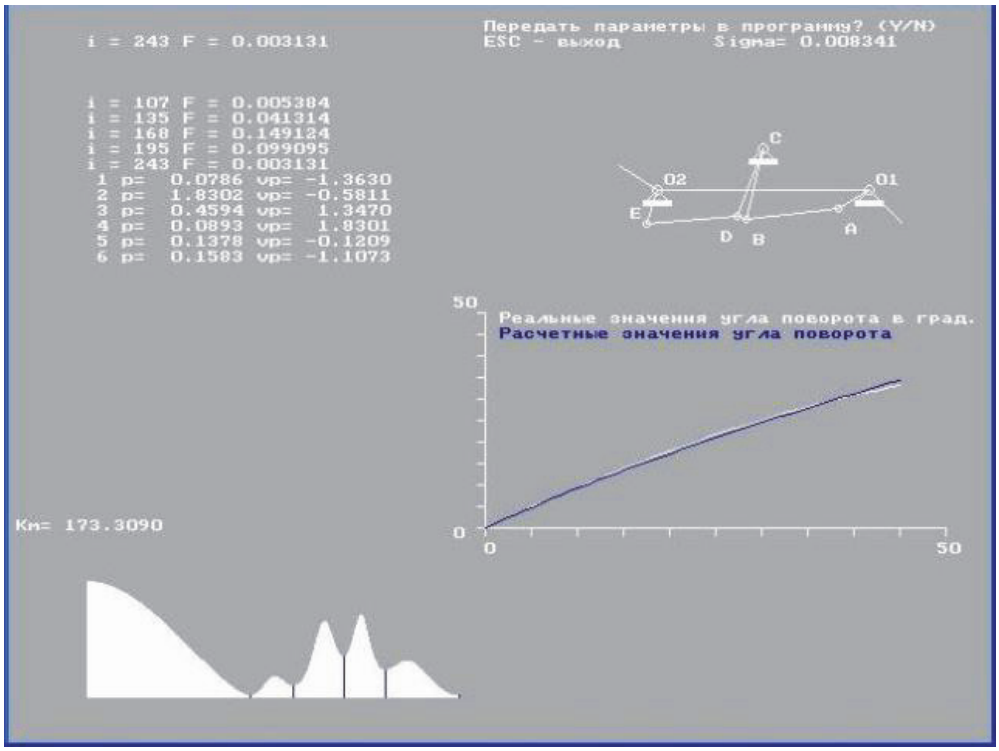


Рис. 7. Первый этап синтеза рулевого рулевого механизма

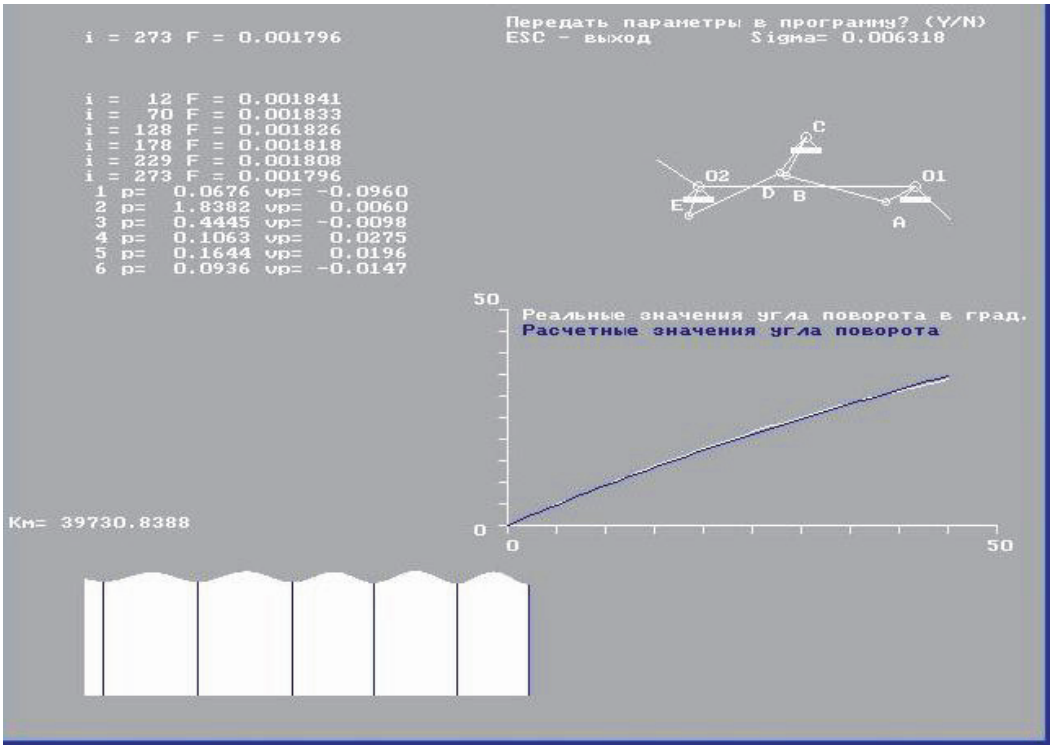


Рис. 8. Финальный этап синтеза рулевого механизма

Заключение

Разработаны новые методы синтеза механизмов, которые нашли широкое применение при решении задач синтеза механизмов движителей шагающих машин, а также при синтезе рулевых устройств транспортных машин. В отличие от традиционных, классических методов, где получается только одно решение поставленной задачи, здесь получается множество решений, причем все решения задачи синтеза

получаются с действительными значениями корней многочлена высокой степени (выражения для целевой функции). Эти решения удобно показывать графически, используя метод проекции перемещения «тяжелой» точки на плоскость, а значение целевой функции позывалось в виде вертикальной координаты. Разработанное программное обеспечение позволяет вести поиск минимума как по направлению антиградиента, так и в любом другом направлении. Для этого необходимо в выбранной псевдоособой точке обнулить скорости изменения параметров синтеза и запустить движение точки вниз, по новому направлению антиградиента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е., Морозов Н.Г.* Особенности синтеза шестизвенных направляющих механизмов движителей шагающих машин. // Проблемы механики современных машин. Т. 1, Улан-Удэ; Изд-во ВСГТУ, 2000.

2. *Кореновский В.В.* Метод определения начальных приближений в задачах синтеза плоских рычажных механизмов. В кн.: Проблемы механики современных машин. Материалы международной конференции Т.1, Улан-Удэ; Изд-во ВСГТУ, 2000 г., стр. 273-278..

3. *Кореновский В.В., Морозов Н.Г.* Синтез механизмов высоких классов. В кн.: Международная конференция по теории механизмов и механике машин. Сб. докладов. Краснодар, 2006 г., стр. 44-46.

4. Патент РФ № 2329887. Лесопильная рама// Морозов Н.Г. и др., 2008.

5. Патент РФ № 2402450. Бюллетень № 30. 2010 г. Рычажный прямолинейно-направляющий механизм // Морозов Н.Г., Умнов Н.В., Кореновский В.В.

6. *Кореновский В.В., Хоборков С.В.* Синтез рулевого устройства для транспортных шагающих машин. В кн.: Проблемы механики современных машин. Материалы 2-ой международной конференции. Том 3. Из-во ВСГТУ, Улан-Удэ, 2003, стр. 3-7.

7. *Кореновский В.В., Сильвестров Э.Е., Умнов Н.В.* Синтез рулевых шестизвенных механизмов. Автомобильная промышленность, 2012 г., № 5. с. 18-20.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард, В. Е. Павловский

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВОРОТНО-ЦИКЛОВОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ*

Волгоградский государственный технический университет
Институт прикладной математики им. Келдыша РАН
Alex-Leonard@yandex.ru, vlpavl@mail.ru

Рассматривается построение системы управления для шагающего движителя, который представляет собой сдвоенные цикловые механизмы шагания. Предлагается способ организации обратной связи.

Ключевые слова: цикловой движитель с направляющей, система управления шагающего движителя.

A. V. Leonard, V. E. Pavlovky

DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR CYCLE - TURNING WALKING MOVER

Volgograd State Technical University
Keldysh Institute of Applied Mathematics

The design of control system for walking mover, which is a dual cycle walking mechanisms, has been considered. The way of organizing feedback has been proposed.

Keywords: cycle walking propeller with directing, control system of walking mover.

С целью снижения энергетических затрат шагающей машины «Восьминог» разработан движитель, реализующий прямолинейную опорную фазу (рис. 1) [1-6].

На рис. 1: 1 – поддерживающая рама, 2 – движитель. Данный движитель представляет собой сдвоенные механизмы шагания с криволинейными направляющими. Корпус движителя способен поворачиваться относительно рамы. Для осуществления энергетически эффективного перемещения шагающей машины вдоль прямой линии необходимо, что бы фаза опоры одного механизма равнялась фазе переноса другого по времени, а курсовая скорость машины была постоянной. Решена задача согласованного управления энергетически эффективным перемещением шагающей машины [7]. В результате проведенного теоретического исследования установлено, что движитель должен быть оснащен системой управления, задающей и отслеживающей согласованные движения механизмов шагания.

* Работа поддержана РФФИ (проект № 13-01-90710 мол_рф_нр, 12-08-31375, 12-01-31398)

За основу системы управления цикло – поворотного шагающего движителя [8] принимается структурно – функциональная схема, представленная на рис. 2.

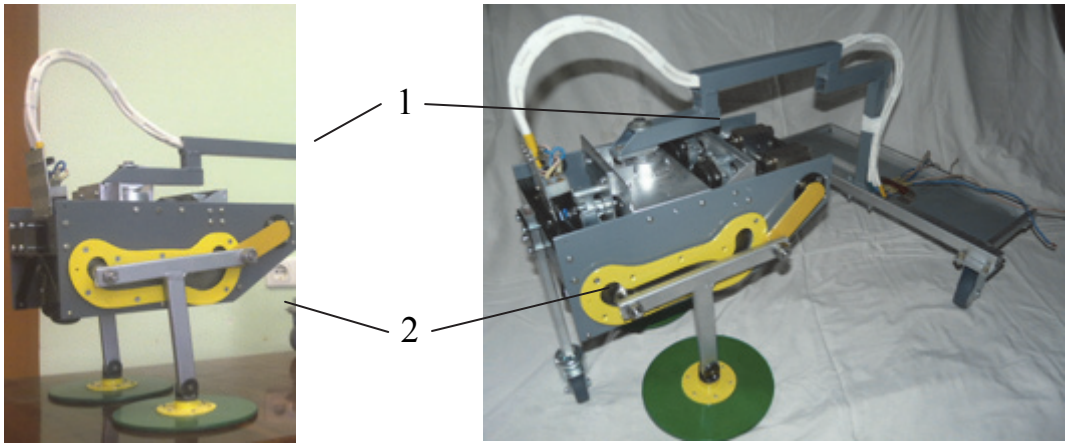


Рис. 1. Физическая модель движителя

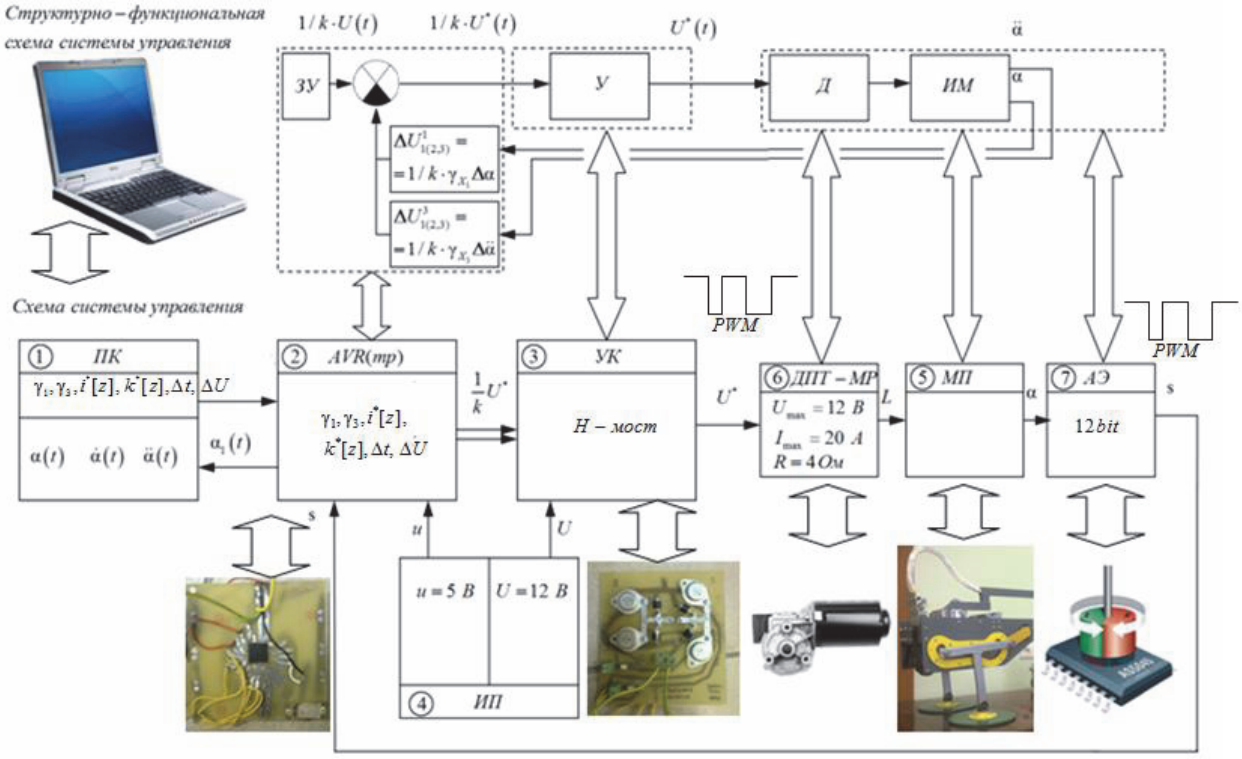


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления

В качестве верхнего уровня принятия решений может использоваться как персональный компьютер, так и быстродействующий микропроцессор (например, AT91SAM9X25 с тактовой частотой 400 МГц типа ARM), взаимодействующий с ПК. В случае использования операционной системы (ОС) реального времени ПК способен практически напрямую регулировать усилители – приводы движителя (двигатели постоянного тока). В текущей научно - исследовательской работе осуществляется построение системы управления, когда ПК (с обычной ОС) реализует предварительный расчет управляющих параметров и формирует из них набор данных для передачи на нижний уровень (рис. 3).

В существующей версии авторской программы (язык С++), при помощи которой производится ввод данных об объекте управления, можно задать параметры механизмов шагания, механические характеристики привода, напряжение питания и режим перемещения движите-

ля. В результате расчета формируются массивы данных $i^{*}_{1(2)}[t]$ - уровни напряжений. Графически управляющие напряжения представляют собой ступенчатые кривые (рис. 4).

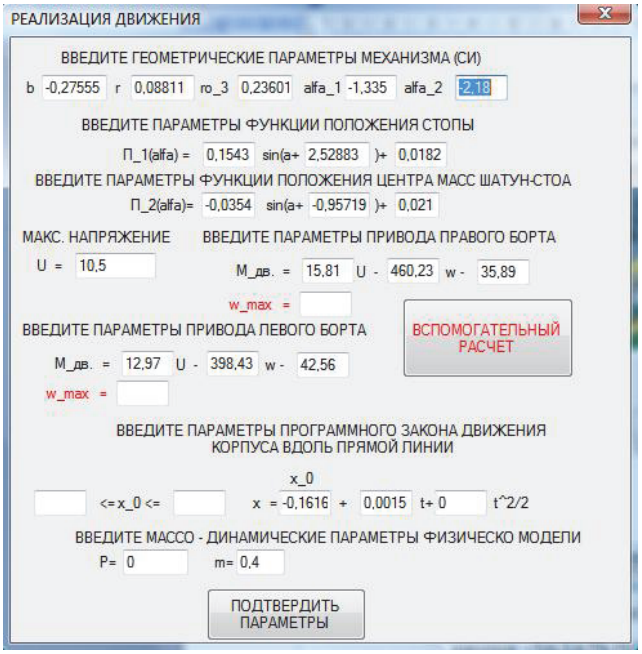


Рис. 3. Окно ввода параметров физической модели и режима движения

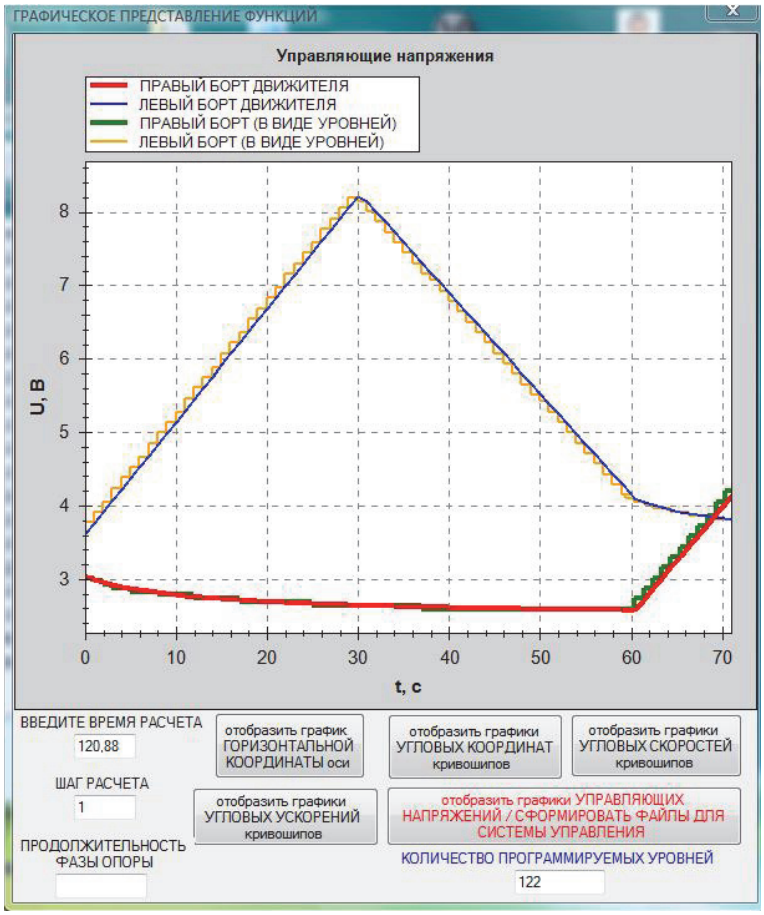


Рис. 4. Окно отображения теоретических характеристик движения физической модели / формирования массивов программных уровней напряжений

Нижний уровень принятия решений – микроконтроллер (Atmega2560 с тактовой частотой 8 – 16 МГц). Задача контроллера формировать последовательность уровней i управляющих напряжений $(U = i\Delta U)$ через усилитель с заданным временным интервалом Δt на основе набора данных математической модели ПК и данных, принимаемых от угловых датчиков привода движителя. В качестве усилителей используются Н – мостовые схемы на биполярных транзисторах (рис. 5).

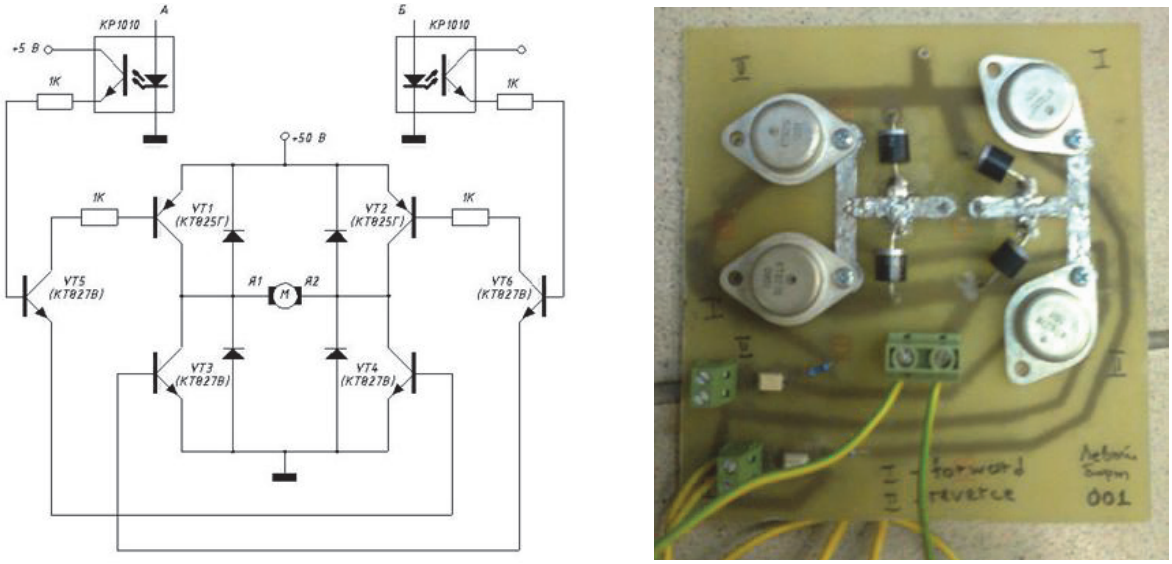


Рис. 5. Н – мостовая схема усилителя на биполярных транзисторах

Предлагается организовать прием данных от абсолютного углового энкодера (12 – битный датчик AS5045 с тактовой частотой 1 МГц) посредством PWM - сигнала. Программным способом производится подсчет количества k микросекунд посылки PWM - сигнала высокого логического уровня. В этом случае число k пропорционально измеренному угловому значению α. Согласно решенной задаче об управлении напряжение, генерируемое системой управления, U определяется суммой трех слагаемых:

$$U = U^* + U_{\Delta\alpha} + U_{\Delta\ddot{\alpha}},$$

где U^* – значение программного напряжения, полученного из уравнений динамики, $U_{\Delta\alpha}$ – корректировочное значение напряжения, которое обусловлено рассогласованием действительного значения угла поворота кривошипа и его программного значения, $U_{\Delta\ddot{\alpha}}$ — корректировочное значение напряжения, которое обусловлено ошибкой углового ускорения.

$$U = U^* + \gamma_1(\alpha - \alpha^*) + \gamma_3(\ddot{\alpha} - \ddot{\alpha}^*). \qquad (1)$$

γ_1, γ_3 – коэффициенты обратных связей, удовлетворяющие условиям асимптотической устойчивости. Учитывая линейную связь между параметрами α и k, между U и i, аналитическое выражение управляющего напряжения (1) с обратными связями по угловой координате и ускорению можно представить в виде целочисленного выражения, определяющего величину уровня напряжения i с временным шагом Δt и интервалом между соседними уровнями ΔU:

$$i = i^* + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_1}{\Delta U 4096}\left(k_0 - \lceil k^*_0 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_3}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k_2^* \rceil - 2\left[k_1 - \lceil k_1^* \rceil\right] + k_0 - \lceil k_0^* \rceil\right)\right\rceil.$$

Где параметры с индексом «ноль» – значения для текущего момента времени, параметры с индексом «один» – значения через промежуток времени Δt, параметры с индексом «два» – значения через промежуток времени $2\Delta t$.

Рис. 6. Временная схема выполнения алгоритма расчета управляющего уровня *i* по обратной связи

При этом в начале запуска системы, по мере поступления данных, подключается сначала обратная связь по угловой координате, а затем – по ускорению (рис. 6):

$$i_0 = i^*_0 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_0 - \lceil k^*_0 \rceil\right)\right\rceil; \quad i_1 = i^*_1 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_1 - \lceil k^*_1 \rceil\right)\right\rceil;$$

$$i_2 = i^*_2 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k^*_2 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_3}}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_2 - \lceil k_2{}^* \rceil - 2\left[k_1 - \lceil k_1{}^* \rceil\right] + k_0 - \lceil k_0{}^* \rceil\right)\right\rceil;$$

$$i_3 = i^*_3 + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_1}}{\Delta U 4096}\left(k_3 - \lceil k^*_3 \rceil\right)\right\rceil + \left\lceil \frac{2\pi\gamma_{X_3}}{\Delta t^2 \Delta U 4096}\left(k_3 - \lceil k_3{}^* \rceil - 2\left[k_2 - \lceil k_2{}^* \rceil\right] + k_1 - \lceil k_1{}^* \rceil\right)\right\rceil;$$

Анализ временных затрат на выполнение программы управления показал, что время приема элементарной посылки PWM – сигнала от датчика и ее перекодировки составляет порядка 8 мс, а расчет управляющих уровней будет происходить за 1,1 мс. Максимальное угловое ускорение кривошипа для перемещения движителя со скоростью 7 мм/с, составляет $\varepsilon = 0{,}03$ рад/с^2. Тогда, если принять эту величину постоянной на протяжении $t = 20$ мс, то $\delta\alpha \approx \varepsilon t^2/2 \approx 2{,}1 \cdot 10^{-6}$, град. Время работы шагающего механизма в опорной фазе $\tau = 26{,}37$ с. В этом случае возможная суммарная ошибка угла поворота кривошипа (обусловленная перемещением машины на один шаг, длина которого 170 мм) составит: $\Delta\alpha \approx \tau/t \cdot \delta\alpha \approx 0{,}27$ град, что соответствует $\Delta x_{\max} \approx 2{,}25$ мм и $\Delta y_{\max} \approx 0{,}15$ мм (максимальная горизонтальная и вертикальная ошибки перемещения стопы). Полученные величины гипотетических ошибок являются вполне приемлемыми для реализации движения физической модели вдоль прямой линии.

Серия предварительных экспериментов по реализации энергетически эффективного режима перемещения физической модели подтвердила теоретические выводы о необходимости наличия обратных связей в системе управления. Предложенный способ организации обратных связей позволит сформировать устойчивое энергетически эффективное перемещение представленного движителя.

В дальнейшем выполняется модификация системы управления аппарата на основе модулей микроконтроллерной системы управления РОБОКОН-1 [9-10] (рис. 7).

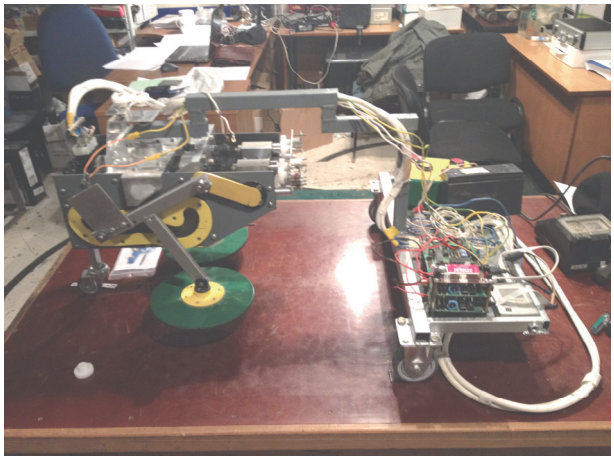


Рис. 7. Движитель «Циклон» с системой управления РОБОКОН-1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Леонард А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 10. С. 18-22

2. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Леонард А.В., Брискин Е.С.; ВолгГТУ. – 2011;

3. *Брискин, Е.С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Брискин Е.С., Леонард А.В., Малолетов А.В. // Теория механизмов и машин. - 2011. - Т. 9, № 1. - С. 14-24;

4. *Леонард, А.В*. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 81-85;

5. Пат. 2063354 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.

6. Пат. 2063353 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е. С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., Чернышев В.В.

7. *Брискин, Е.С.* Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, А.В. Леонард // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2013. - № 6. - С. 131-138;

8. *Леонард, А.В.* Построение системы управления для физической модели цикло - поворотного движителя / Леонард А.В. // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. – С 325-326.

9. *В.Е.Павловский, В.В.Павловский.* Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, ISSN 2071-2898 (печатная версия), М., 2012, №86. – 32 с.

10. *В.Е.Павловский, В.В.Павловский*. Масштабируемая система управления роботами РОБОКОН-1. // Информационно-измерительные и управляющие систем. Издательство "Радиотехника". - 2013. - Т.11. - №4. - С.80-92.

УДК 62-5, 681.5, 004.94

А. Д. Мохов[1], Е. Г. Громов[1], В. А. Серов[2], К. Б. Мироненко[2]

ПРОГРАММА СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ ШАГАЮЩЕГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ДВИЖИТЕЛЯ*

[1]Волгоградский государственный технический университет
[2]ОАО «Центральное конструкторское бюро «Титан»
alexander.mokhov@gmail.com, cdb@cdbtitan.ru, dixvgd@gmail.com

В статье описывается способ синтеза управления движениями шагающего движителя на основе решения обратной задачи. Подход основан на формировании команд системы управления в процессе решения обратной задачи в режиме реального времени. Предложен способ интегрирования математического ядра в состав системы управления. Представлен способ задания математической модели для обратной задачи динамики шагающей машины с ортогональным движителем. Приведены результаты численного моделирования, а также сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: робототехника, математическое моделирование, шагающие роботы, метод обратной задачи.

A. D. Mokhov[1], E. G. Gromov[1], V. A. Serov[2], K. B. Mironenko[2]

THE PROGRAM OF SYNTHESIS OF MOTION CONTROL OF WALKING ORTHOGONAL DRIVER*

[1]Volgograd State Technical University
[2]Central Design Bureau «Titan»

The way of synthesis of controlling for the movements of legged mover on the basis of the solution of the inverse problem is described in the article. The approach is based on the generation of the commands for the controlling system during the solution of the inverse problem in real-time mode. The way of integration of the mathematical core in the controlling system and the way of definition of mathematical model for the inverse problem of dynamics of a legged machine with orthogonal mover are presented. Both the results of numerical modeling and the comparison of the results of computer-simulated and experimental data are shown.

Keywords: robotics, walking robots, control system, mathematic modelling, inverse problem.

Растущая сложность современных роботов ставит новые проблемы с точки зрения организации системы управления движениями. Развитие элементной базы позволяет создавать робототехнические системы, обладающие десятками и сотнями степеней свободы, при этом системы управления могут работать с частотами в сотни герц [8].

Управление шагающим роботом можно разделить на тактический и исполнительный уровни [3]. На тактическом уровне определяются траектории и цели движения. Задачи генерации управляющих сигналов, обеспечивающих требуемое движение, решаются на исполнительном уровне.

В данной статье рассматривается синтез управляющих сигналов на исполнительном уровне. Для решения этой задачи предлагается использовать метод обратной задачи, который

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00955).

сводится к определению законов движения звеньев управляемой системы по заданным кинематическим параметрам движения некоторых характерных точек [6].

На тактическом уровне определятся траектория движения корпуса робота, параметры этой траектории могут меняться с помощью пульта управления, траектории движения стоп задаются с помощью специальных алгоритмов.

Математическая модель и программное движение

Шагающий движитель представляет собой кинематическую цепь, элементы которой соединены между собой посредством кинематических пар. В шагающем движителе можно выделить следующие основные элементы: корпус робота, шагающие движители, состоящие из ног и стоп.

Представление математической модели шагающего робота основано на уравнениях Лагранжа первого рода. Уравнения динамики механической системы в этом случае слагаются из уравнений свободного движения тел и уравнений связей от кинематических пар. Кроме кинематических пар, связи между телами могут задаваться силами от упруго-демпфирующих элементов, соединяющих тела.

Уравнения движения при таком подходе записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p = f\left(\dot{x}, x, t\right) + u\left(t\right) \\ D\ddot{x} = h\left(\dot{x}, x\right) \end{cases}, \qquad (1)$$

где x – вектор обобщенных координат всей системы размерностью n, M – матрица инерции, $f\left(\dot{x}, x, t\right)$ – вектор внешних сил, $u\left(t\right)$ – вектор управляющих сил, D – матрица переменных коэффициентов уравнений связей от кинематических пар размерностью $k \times n$, k – число связей, $h\left(\dot{x}, x\right)$ – вектор правых частей уравнений связей, p – вектор множителей Лагранжа [4]. Синтез алгоритмов управления сводится к определению управляющих функций $u\left(t\right)$, обеспечивающих движение по траекториям $w\left(t\right)$. Действие управляющих сил в уравнениях движения (1) можно заменить уравнениями связей, тогда уравнения (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p - D_w{}^T p_w = f\left(\dot{x}, x, t\right) \\ D\ddot{x} = h\left(\dot{x}, x\right) \\ D_w\ddot{x} = \ddot{w}\left(t\right) \end{cases}, \qquad (2)$$

где D_w – матрица переменных коэффициентов уравнений связей точек, для которых заданно программное движение, $w\left(t\right)$ – функция, описывающая программные траектории заданных точек, p_w – вектор множителей Лагранжа, соответствующий связям с программными траекториями.

Программное движение складывается из двух движений:

$$w\left(t\right) = w_b\left(t\right) + w_f\left(t\right), \qquad (3)$$

где $w_b\left(t\right)$ – траектория движения точек корпуса, $w_f\left(t\right)$ – траектория движения точек шагающих движителей.

Управление роботом на тактическом уровне сводится к изменению функции $w_b\left(t\right)$, а на исполнительном определяются функциями $w_f\left(t\right)$.

Алгоритм задания движения стопы шагающего движителя

Алгоритм задает функцию $w_f\left(t\right)$, что обеспечивает движение точки стопы по П-образной траектории, в зависимости от параметров: длина шага, высота подъема стопы, поперечное расстояние между точкой опоры и кузовом, вертикальное расстояние между точкой опоры и кузовом, продольное расстояние между точкой опоры и кузовом, минимальный период шага, координаты точки крепления ноги в системе корпуса. В зависимости от скорости и направления движения точки крепления шагающего движителя выбирается направление и расстояние продольного перемещения точки стопы. Максимальная длина шага зависит от параметра шага – максимального смещения точки шагающего движителя относительно точки на корпусе.

Это обеспечивает автономное управление шагающим движителем и применимо к шагающему движителю произвольной структуры.

Система управления

На рис. 1 приведена схема интеграции математического ядра в систему управления [7].

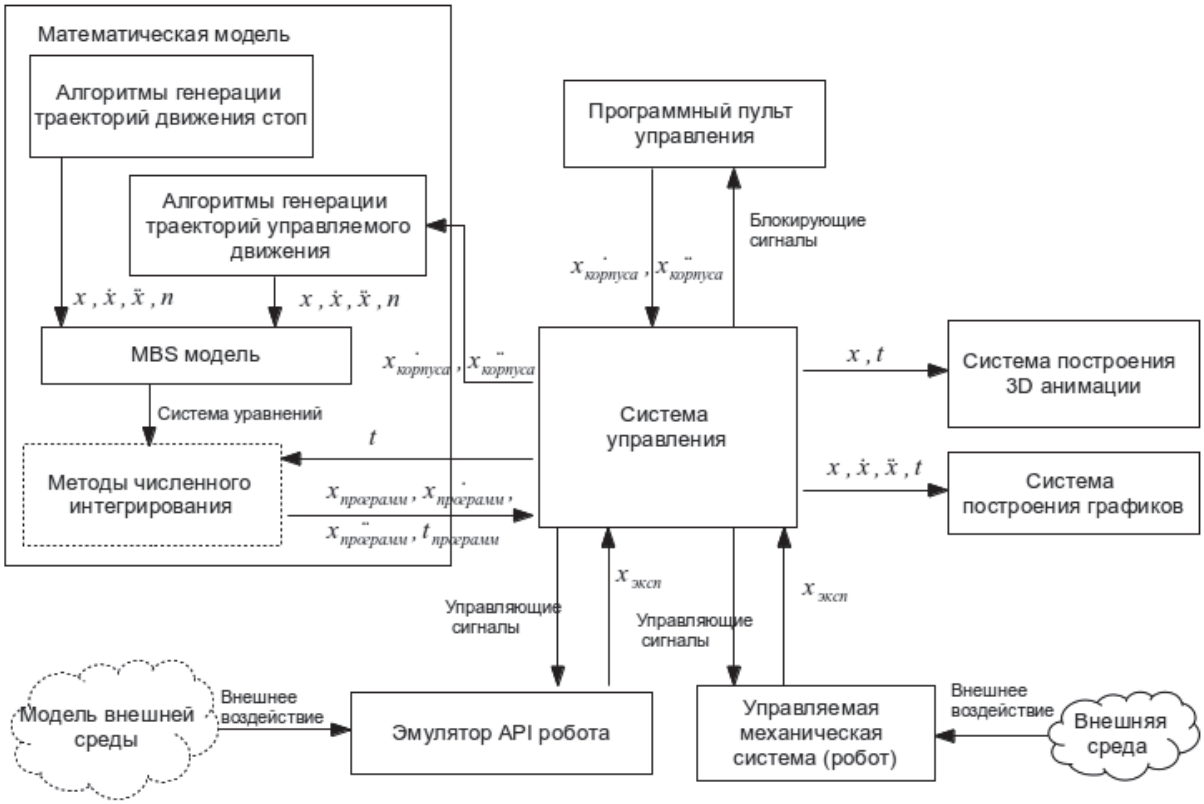


Рис. 1. Схема системы управления

Математическое ядро обеспечивает генерацию и расчет траекторий движения точек системы. Результатом решения математической модели являются относительные перемещения в приводах движителей, соответствующие заданному перемещению корпуса робота. Перемещения корпуса робота определяются через параметры траектории движения трех характерных точек корпуса. Так как управление осуществляется через изменение параметров математической модели, полезно видеть различия программного движения и аппаратного движения. Для этого в системе предусмотрен интерфейс вывода этих данный в виде трехмерной модели или графиков.

Система управления выполняет генерацию управляющих сигналов на основе данных, получаемых от сенсоров приводов, и результатов численного моделирования (решения обратной задачи динамики). В системе управления реализован ПИД регулятор, позволяющий генерировать управляющие сигналы для исполнительных устройств на основе отклонения между программными и измеренными значениями относительных перемещений и скоростей приводов. Математическая модель, используемая для решения обратной задачи, модифицируется для обеспечения ее решения в режиме реального времени путем увеличения минимальных инерционных коэффициентов.

Эксперименты

Апробация предложенного метода проводилась на роботе со сдвоенным ортогонально поворотным движителем, разработанным на кафедре «Теоретическая механика» Волгоградского государственного технического университета [1]. Робот представляет собой основание, на котором закреплено 4 поворотных опоры, оснащенных 4 поступательными приводами, 2 из которых обеспечивают движение стопы в горизонтальном и 2 в вертикальном направлении. Таким образом, робот содержит 20 приводов. На рис. 2 приведена расчетная схема и изображение робота «Ортоног».

Для описанной конструкции была построена математическая модель в системе ФРУНД. Модель содержит 21 тело и более 20 соединительных элементов. В модель добавлены средства, позволяющие задавать величины и направления ускорения трех характерных точек корпуса.

Движения корпуса задается оператором через программный пульт управления. Движение

стоп задается с помощью специальной подпрограммы. Приведенная схема описывается системой из 370 дифференциально-алгебраических уравнений.

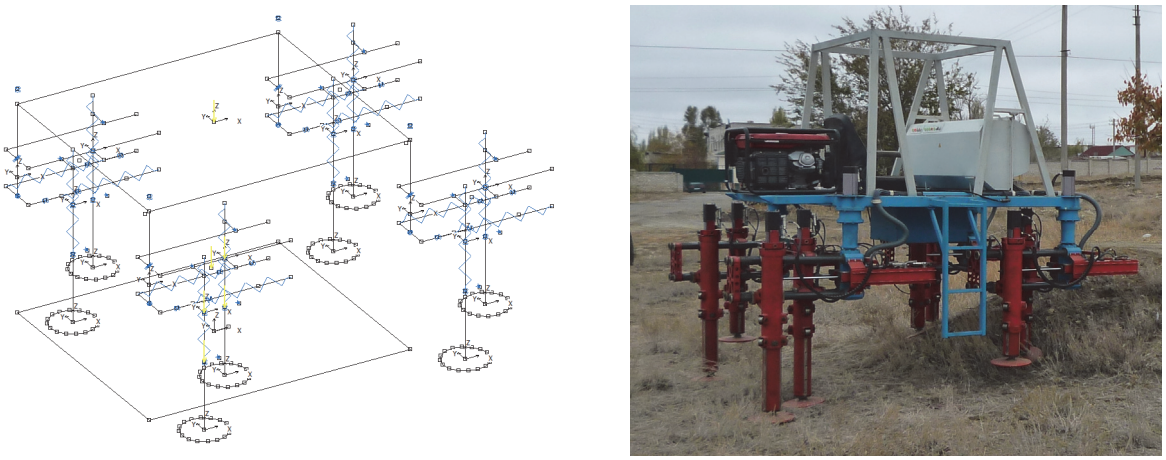


Рис. 2. Схема робота «Ортоног»

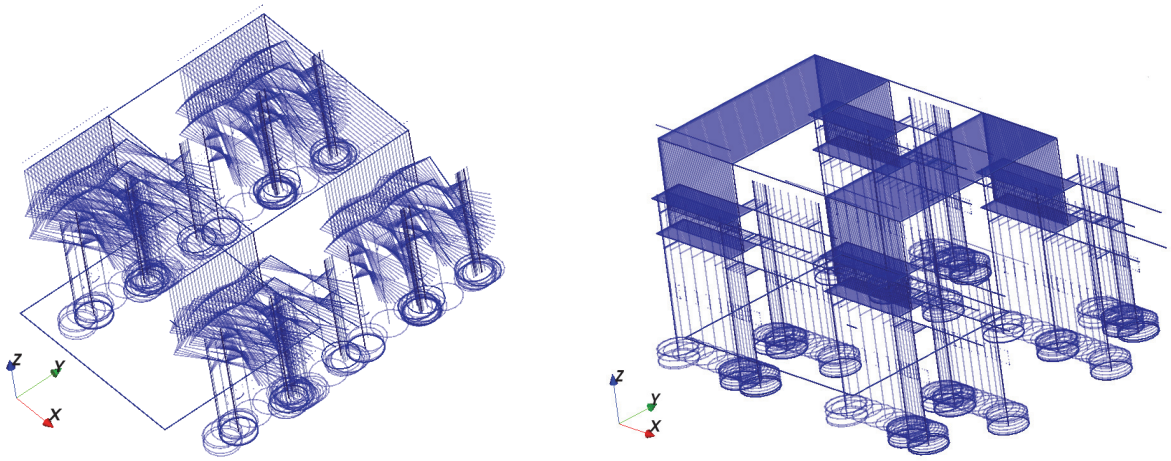


Рис. 3. След программного движения

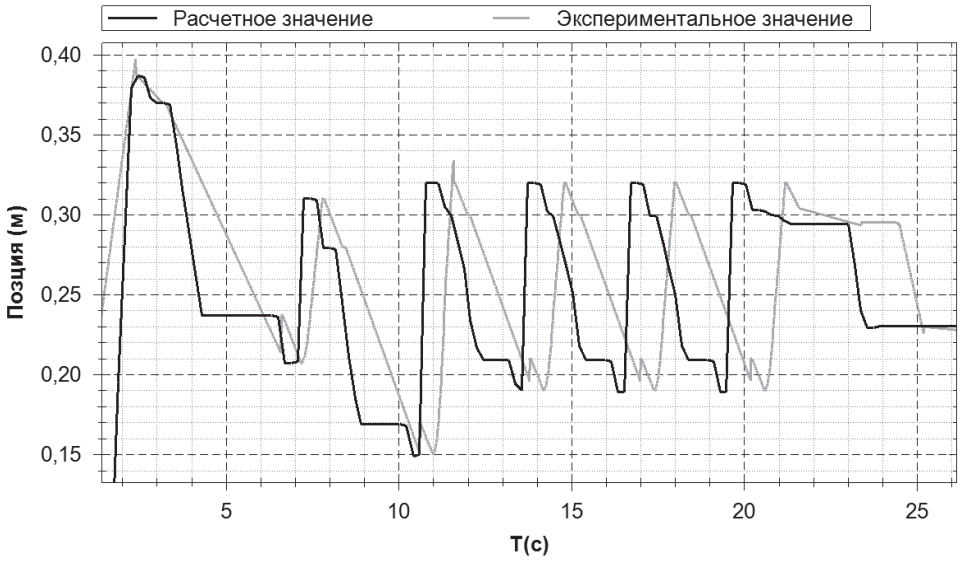


Рис. 4. График относительных перемещений горизонтального привода

Представленная модель позволяет генерировать управление для произвольного движения корпуса робота – на рис. 3 показаны варианты продольного и поперечного перемещения.

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные графики относительного перемещения продольного привода одного из сдвоенных ортогональных поворотных движителей. Смещение графиков относительно друг друга обусловлены большими временными задержками в системе передачи команд.

Выводы

Рассматриваемый метод и его реализация позволяет синтезировать теоретические параметры управления движением механических систем произвольной структуры. Формат команд управления определяется интерфейсом приводов и для каждого типа приводов формируется отдельно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брискин, Е.С.А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов,* Об управлении поворотом шагающих машин со сдвоенными движителями /Е.С. Брискин,А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // УТЭОСС Санкт-Петербург. – 2012. – с. 698-701.

2. *Бурдаков, С.Ф.* Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко. – М.: Высшая школа, 1986.

3. *Вукобратович, М.* Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами : Пер. с англ. / М. Вукобратович, Н. Кирчански, Д. Стокич, А. С. Ющенко [и др.]. – М. : Мир, 1989 . – 376 с. : ил. – Предм.указ.: с. 374. – ISBN 5-03-000540-4.

4. *Горобцов, А*. С.Синтезпараметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. –№6. – 2004/

5. *Ержуков, В.В.* Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры / Л.А.Рыбак, В.В. Ержуков.–М :Физматлит, 2011.

6. *Крутько, П. Д.*Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций : учеб.пособие для вузов / П. Д.Крутько.– М. : Машиностроение, 2004. – 573 с. –Библиогр.: с. 560-573. – ISBN 5-217-03215-4.

7. *Hodgins, Jessica K.* Animation of dynamic legged locomotion / Marc H. Raibert, Jessica K. Hodgins // ACM SIGGRAPH Computer Graphics Homepage. – Vol. 25,№4. – July 1991. –p. 349-358.

8. *Vukobratovic, M.* Robot-environment dynamic interaction survey and future trends / M.Vukobratovic //Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2010. – № 49. – p. 329-342.

УДК 531.1

В. Е. Павловский[1,2], *А. Ю. Шамин*[2]

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-БУЕРА

[1]**Институт прикладной математики им М. В. Келдыша РАН, Москва**
[2]**Механико-математический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва**
vlpavl@mail.ru, Shamin_AY@mail.ru

Работа посвящена построению теоретической модели движения трехколесного робота-буера с парусом и исследованию задачи оптимального быстродействия в управлении им. В работе выписываются уравнения движения в лаконичной форме, а также системы уравнений, составляющих принцип максимума Понтрягина. Численно решена задача быстродействия при некоторых углах направления ветра и различной длине выноса переднего колеса.

Ключевые слова: робот-буер, оптимальное управление, быстродействие.

V. E. Pavlovsky, A. Yu. Shamin

THE DYNAMIC MODEL AND OPTIMAL CONTROL OF THE MOTION OF THE ROBOT-YACHT

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow
Mechanics-mathematical faculty of the Moscow State University of M. V. Lomonosov, Moscow

This work is devoted to the construction of the theoretical model of motion three-wheeled robot with a sail and a study of the problem of optimal performance. We write the equations of motion and the system of equations, the Pontryagin maximum principle. Numerically solved the problem of optimal control in some angles of the wind direction and lengths of a suspension bracket of a front wheel.

Keywords: robot-yacht, optimal control, control quickness.

1. Введение. Уравнения движения

В данной работе рассматривается робот-буер – трехколесная тележка с закрепленным на ней парусом. Управление роботом осуществляется парусом и рулевым колесом, которое может быть передним или задним. Подобные

аппараты являются новым, экологически чистым, видом транспорта и могут представлять интерес для организации специальных перевозок, например, на больших открытых пространствах, где имеется доступ к свободному ветру. Такие пространства имеются, к примеру, в степных регионах.

Теоретико-механическая модель робота-буера представлена на рис. 1. Она детально описана ниже. Модель обобщает предложенную в [5] схему.

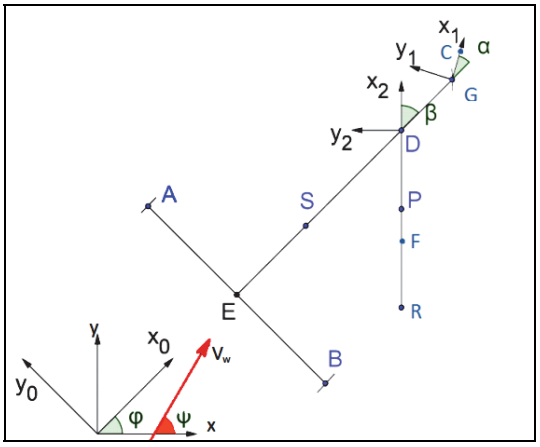


Рис. 1. Механическая модель

1.1. Модель механической системы

Буер движется по горизонтальной плоскости. Колеса A, B, C катятся без проскальзывания. Переднее колесо C вынесено вперед на поворотной вилке GC. Точка E является пересечением оси вращения задних колес и продольной оси симметрии буера. Центр масс тележки находится на оси симметрии в точке S, причем $ES = s$. Мачта буера также расположена на оси симметрии и удалена от точки E на расстояние $ED = d$. Парус является плоским прямоугольником, обозначен DFP, где F - центр масс паруса, $DF = l$. Расстояния до задних колес $EA = EB = a$. Ось вилки G расположена на оси симметрии тележки, причем $EG = c$. Длина вилки $GC = n$, ее центр масс находится в точке U, где $GU = u$. Радиусы задних колес R_k, а переднего R_c.

Движение буера рассматривается в неподвижной системе координат Oxy. Ведем подвижную систему координат Ex_0y_0, жестко связанную с корпусом буера. Ее центром будет служить точка E, ось Ex_0 направим вдоль оси симметрии, а ось Ey_0 перпендикулярно ей. Таким образом, положение этой системы определяется координатами (x, y) точки E, а также углом φ между положительными направлениями осей Ox и Ex_0. Углы α и β задают повороты соответственно рулевого колеса и паруса относительно корпуса буера. Введем еще одну подвижную систему координат Cx_1y_1, связанную с центром масс переднего колеса, причем ось Cx_1 всегда направлена по вилке. В этой системе координат поворот переднего колеса вокруг оси Cy_1 задается углом ψ_C, а повороты задних колес A и B относительно оси Ey_0 - соответственно углами ψ_A, ψ_B.

Таким образом, положение буера в неподвижной системе координат задается восемью координатами: $x, y, \varphi, \psi_A, \psi_B, \psi_C, \alpha, \beta$.

На систему наложены связи, а именно: скорости тех точек колес A, B, C, которые соприкасаются с горизонтальной плоскостью, равны нулю. Таким образом, приходим к системе уравнений кинематических связей:

$$\begin{cases} \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi - a\dot{\varphi} - R_k\dot{\psi}_A = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi + a\dot{\varphi} - R_k\dot{\psi}_B = 0, \\ \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi - (\dot{\varphi}+\dot{\alpha})n\sin\alpha = \dot{\psi}_C R_C\cos\omega, \\ \dot{\varphi}c + (\dot{\varphi}+\dot{\alpha})n\cos\alpha = \dot{\psi}_C R_C\sin\alpha. \end{cases} \quad (1)$$

Так как связи (1), наложенные на механическую систему, являются неголономными (это легко проверяется), то для вывода уравнений движения необходимо пользоваться соответствующими методами. В данном случае воспользуемся уравнениями движения в лаконичной форме [1]. Замкнутая система уравнений будет состоять из 8 выражений обобщенных скоростей через псевдоскорости, которые введены ниже (уравнения (2)), 8 выражений для обобщенных импульсов и 3 уравнений на псевдоскорости. В качестве псевдоскоростей выберем V (проекция скорости точки E на продольную ось буера), Ω (угловая скорость $\Omega = \dot{\alpha}$), ω (угловая скорость $\omega = \dot{\beta}$).

Первая группа уравнений имеет вид (2):

$$
\begin{aligned}
&\dot{x} = V\cos\varphi,\\
&\dot{x} = V\sin\varphi,\\
&\dot{\varphi} = \frac{V\sin\varphi - \Omega n}{n + \cos\alpha},\\
&\dot{\alpha} = \Omega,\\
&\dot{\beta} = \omega,\\
&\dot{\psi}_A = \frac{V(n + c\cos\alpha - a\sin\alpha) + an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)},\\
&\dot{\psi}_B = \frac{V(n + c\cos\alpha + a\sin\alpha) - an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)},\\
&\dot{\psi}_C = \frac{V(c + n\cos\alpha) - cn\Omega\sin\alpha}{R_c(n + c\cos\alpha)}.
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Вычисляя обобщенные импульсы и используя их в схеме составления уравнений движения [1], исключаем их из уравнений, затем дополняем систему (2) тремя уравнениями на псевдоскорости V, Ω, ω.

Эти уравнения имеют вид (3):

$$
\begin{aligned}
&\left(M + 2\frac{J_k^{\,y}}{R_k^{\,2}} + \left(2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + J\right)\frac{\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2md\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{2m\sin\alpha\sin\beta}{n + c\cos\alpha} + \frac{J_c^{\,y}(c + n\cos\alpha)^2}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2}\right)\dot{V} +\\
&\left(\left(J_2 - J_c^{\,y}\frac{n^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{c\sin\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2n\sin\alpha(m_1c\cos\alpha - md\cos\beta)}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\dot{\Omega} +\\
&\left(\frac{(J_1 - md\cos\beta)\sin\alpha}{n + c\cos\alpha} + m\sin\beta\right)\dot{\omega} + \left(\frac{2m\sin\alpha\cos\beta}{n + c\cos\alpha} + \frac{2md\sin^2\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\omega +\\
&\left(\frac{2md(c + n\cos\alpha)\sin\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{\left(J + \frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}(c^2 - n^2)}{R_c^{\,2}} - 3m_1n\right)(c + n\cos\alpha)\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3}\right)\Omega V +\\
&\left(\frac{m(c^2 + n^2)\cos\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{mcn\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{nc(m_1\sin\alpha - m\sin\beta)\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{m_1c^2\cos\alpha\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3}\right)\Omega V +\\
&\left(-\frac{\left(J + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)ns\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{J_c^{\,y}c^2n^2\sin^2\alpha\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{2cnmd\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{cnm\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)\Omega^2 +\\
&\left(-\frac{2m_1c^2n\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{J_c^{\,y}c^2n\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{J_c^{\,y}cn^2\cos^2\alpha}{R_c^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{3m_1cn\sin^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{m_1c}{n + c\cos\alpha}\right)\Omega^2 -\\
&\left(\frac{2dnm\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{mn\cos\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\Omega\omega + \left(m\cos\beta + \frac{dm\sin\alpha\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\omega^2 = Q_V,\\
&\left(\left(J_2 - J_c^{\,y}\frac{n^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{c\sin\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2n\sin\alpha(m_1c\cos\alpha - md\cos\beta)}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\sin\beta}{n + c\cos\alpha}\right)\dot{V} +\\
&\left(\left(J - J_2 + 2\frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}}\right)\frac{n^2}{(n + c\cos\alpha)^2} - \left(\frac{J_c^{\,y}c^2}{R_c^{\,2}} + 2m_1n - J_2\right)\frac{c^2\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{2mdn^2\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)\dot{\Omega} +\\
&\frac{n(md\cos\beta - J_1)}{n + c\cos\alpha}\dot{\omega} + \frac{m_1n\sin\alpha(c + n\cos\alpha)}{(n + c\cos\alpha)^2}V^2 +\\
&\left(-\frac{\left(J + \frac{J_k^{\,y}a^2}{R_k^{\,2}} + \frac{J_c^{\,y}(c^2 - n^2)}{R_c^{\,2}} - 3m_1n\right)nc^2\sin\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} + \frac{2cnm\sin^2\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{Jn\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{m_1c^2\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega +\\
&\left(-\frac{2m_1cn\cos^2\alpha}{(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{m_1c\cos^2\alpha}{n + c\cos\alpha} - \frac{2m_1c^2n\sin^2\alpha\cos\alpha}{(n + c\cos\alpha)^3} - \frac{2J_k^{\,y}a^2n\cos\alpha}{R_k^{\,2}(n + c\cos\alpha)^2} + \frac{2mdn\cos\alpha\cos\beta}{(n + c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega +\\
&\frac{J_2\cos\alpha(c^2 + n^2 + 2nc\cos\alpha)}{(n + c\cos\alpha)^3}V\Omega + \left(-\frac{2mdn\sin\alpha\sin\beta}{(n + c\cos\alpha)^2} - \frac{mn\cos\beta}{n + c\cos\alpha}\right)V\omega +
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

$$\left(\frac{m_1 cn\sin\alpha}{n+c\cos\alpha}+\frac{Jcn^2\sin\alpha}{(n+c\cos\alpha)^3}+\frac{2m_1c^2n^2\sin\alpha\cos\alpha}{(n+c\cos\alpha)^3}-\frac{2mdcn^2\sin\alpha\cos\beta}{(n+c\cos\alpha)^3}-\frac{J_2cn\sin\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}\right)\Omega^2+$$

$$\left(-\frac{m_1c^2n\sin\alpha\cos\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{J_c^{\,y}c^2n^2\sin\alpha\cos\alpha}{R_c^{\,2}(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{2J_k^{\,y}a^2n^2c\sin\alpha}{R_k^{\,2}(n+c\cos\alpha)^3}+\frac{m_1n^2c\sin^2\alpha}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{J_c^{\,y}c^3n^2\sin^3\alpha}{R_c^{\,2}(n+c\cos\alpha)^3}\right)\Omega^2+$$

$$\frac{2mdn^2\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}\Omega\omega-\frac{mdn\sin\beta}{n+c\cos\alpha}\omega^2=Q_\Omega,$$

$$\left(m\sin\beta+(J_1-md\cos\beta)\frac{\sin\alpha}{n+c\cos\alpha}\right)\dot V+\frac{n(md\cos\beta-J_1)}{n+c\cos\alpha}\dot\Omega+J_1\omega-\left(\frac{md\sin^2\alpha\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{m\sin\alpha\cos\beta}{n+c\cos\alpha}\right)V^2+$$

$$\left(\frac{mn\cos\beta}{n+c\cos\alpha}+\frac{(J_1-md\cos\beta)(c+n\cos\beta)}{(n+c\cos\alpha)^2}+\frac{2mdn\sin\alpha\sin\beta}{(n+c\cos\alpha)^2}\right)V\Omega=Q_\omega.$$

Совокупность (2) и (3) является полной системой динамических уравнений движения. Для ее замыкания необходимо вычислить обобщенные силы.

1.2. Обобщенные силы. Замыкание системы уравнений движения

Для окончательного замыкания системы необходимо определить силы и моменты сил, которые действуют в системе, а затем найти обобщенные силы Q_V, Q_Ω, Q_ω.

1.2.1. Аэродинамические силы

Для описания аэродинамического воздействия на аппарат воспользуемся квазистатическим представлением [2,3]. Будем считать, что аэродинамическая сила приложена в центре давления паруса F_S.

Искомую аэродинамическую силу разложим на 2 составляющие: силу лобового сопротивления $\vec S$ и подъемную силу $\vec P$. Сила лобового сопротивления $\vec S$ сонаправлена с вектором относительной (вымпельной) скорости ветра $\vec V_r$, и ее значение равно $S=\frac{\rho S_s}{2}s(\gamma)V_r^2$, где S_s - площадь паруса, γ -угол атаки, т.е. угол между плоскостью паруса и вектором вымпельной скорости, $s(\gamma)$ -аэродинамический коэффициент, зависящий от угла атаки.

Подъемная сила $\vec P$ перпендикулярна вымпельной скорости, а ее направление зависит от угла атаки: если $\gamma>0$, то $\vec S$ и $\vec P$ составляют правую пару осей, если $\gamma<0$, то левую. Ее значение равно $S=\frac{\rho S_s}{2}p(\gamma)V_r^2$, здесь $p(\gamma)$ -аэродинамический коэффициент для подъемной силы. Коэффициент $s(\gamma)$ неотрицателен, что характеризует сопротивляемость среды, функция $p(\gamma)$ - нечетна в силу того, что направление подъемной силы изменяется на противоположное при смене знака угла атаки.

Несмотря на то, что поле скоростей ветра в неподвижной системе координат однородно, поле вымпельных скоростей около паруса таким свойством не обладает, так как каждая точка паруса может иметь разную скорость и по модулю и по направлению. Отсюда следует, что центр давления F зависит от распределения вымпельных скоростей.

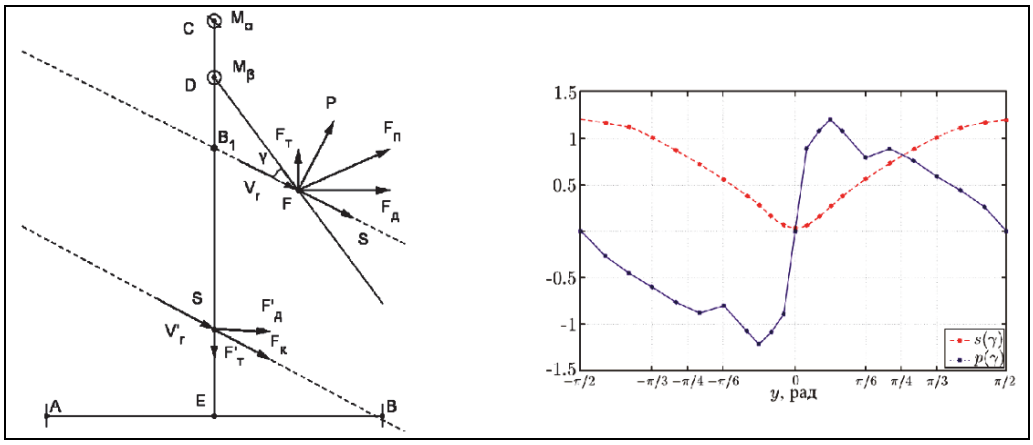


Рис. 2. Аэродинамические силы и коэффициенты

Аэродинамические силы можно далее разложить по осям системы координат Ex_0y_0, связанной с буером, на силу тяги $\vec{F}_m$ и силу дрейфа $\vec{F}_d$ (рис. 2).

Для произвольной точки W на парусе, удаленной от мачты на расстояние μ, вымпельная скорость ветра равна:

$$\vec{V}_{Wr} = \vec{V}_\omega - \vec{V}_w =$$
$$\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right)\vec{x}_0 +$$
$$\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right)\vec{y}_0 .$$

Сила тяги:

$$\vec{F}_m = \frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\vec{V}_{wr} + p(\gamma)\left[\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}\right]), \vec{x}_0)\, d\mu\, \vec{x}_0 =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right) -$$
$$p(\gamma)\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right))\ d\mu\, \vec{x}_0$$

Сила дрейфа:

$$\vec{F}_d = \frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\vec{V}_{wr} + p(\gamma)\left[\vec{z}_0 \times \vec{V}_{wr}\right]), \vec{x}_0)\, d\mu\, \vec{y}_0 =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l V_{wr}((s(\gamma)\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right) +$$
$$p(\gamma)\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right))\, d\mu\, \vec{y}_0 \quad ,$$

где угол атаки γ есть угол между вымпельной скоростью и парусом.

Чтобы найти центр давления, найдем момент аэродинамических сил:

$$\vec{M}_D = \int_0^l -\mu\left[(\cos\beta\,\vec{x}_0 + \sin\beta\,\vec{y}_0) \times \vec{F}(\mu)\right] d\mu =$$
$$\frac{\rho\lambda l}{2}\int_0^l \mu V_{wr}(\left(V_\omega \cos(\psi-\varphi) - V - \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\sin\beta\right)(s(\gamma)\sin\beta - p(\gamma)\cos\beta) -$$
$$\left(V_\omega \sin(\psi-\varphi) - d\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \mu\left(\frac{V\sin\alpha - \Omega n}{n + c\cos\alpha} + \omega\right)\cos\beta\right)(s(\gamma)\sin\beta - p(\gamma)\cos\beta))\, d\mu\, \vec{z}_0$$

Тогда расстояние f центра давления от центра мачты будет:

$$f = \frac{\left\|\vec{M}_D\right\|}{\left\|\vec{F}_m\right\|\sin\beta - \left\|\vec{F}_d\right\|\cos\beta}.$$

Заметим, что силы тяги и дрейфа действуют и на парус, и на корпус аппарата. Последние будем обозначать штрихами.

1.2.2. Управляющие моменты и обобщенные силы

Помимо аэродинамических сил, в системе действуют управляющие моменты $\bar{M}_\alpha$ и $\bar{M}_\beta$, которые приложены соответственно к вилке переднего колеса и парусу в точках G и D. При таком определении сил, действующих в системе, обобщенные силы выражаются следующим образом:

$$Q_V = F_m' + F_m' + \frac{\sin\alpha}{n + c\cos\alpha}(F_d d + F_d' s) + \frac{f\sin\alpha}{n + c\cos\alpha}(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta),$$

$$Q_\Omega = \frac{n}{n + c\cos\alpha}(F_d d + F_d' s) - \frac{f\, n}{n + c\cos\alpha}(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta) + M_\alpha,$$

$$Q_\omega = f(F_m \sin\beta - F_d \cos\beta) + M_\beta.$$

Так получаем замкнутую систему уравнений движения робота-буера.

2. Задача оптимального быстродействия

2.1. Задача с ограничениями

Задача оптимального управления ставится в постановках: с ограничением на траекторию и без ограничений, ограничение в первом случае заключается в том, что точка E может двигаться только по оси абсцисс Ox.

Формализованная задача оптимального быстродействия при наличии ограничений выглядит следующим образом (I - функционал задачи):

$$I = \int_0^T dt = T \to \min$$

$$\begin{cases} \dot V = f_1(V, \Omega, \omega, x, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta) \\ \dot\Omega = 0 \\ \dot\omega = f_3(V, \Omega, \omega, x, \alpha, \beta, M_\alpha, M_\beta) \\ \dot x = V \\ \dot y = 0 \\ \dot\varphi = 0 \\ \dot\alpha = 0 \\ \dot\beta = \omega \\ \dot\psi_A = \dfrac{V}{R_k}, \quad \dot\psi_B = \dfrac{V}{R_k}, \quad \dot\psi_C = \dfrac{V}{R_c} \end{cases}$$

$$V(0) = 0,\ \Omega(0) = 0,\ \omega(0) = 0,\ x(0) = -r_0,\ y(0) = 0,\ \alpha(0) = 0,\ \beta(0) = 0,$$
$$\psi_A(0) = 0,\ \psi_B(0) = 0,\ \psi_C(0) = 0,\ x(T) = 0,\ y(T) = 0,$$
$$\| M_\alpha \| < M_1,\ \| M_\beta \| < M_2.$$

2.2. Задача без ограничений

Здесь формализованная задача имеет вид:

$$I = \int_0^T dt = T \to \min$$

$$
\begin{cases}
\dot{V} = f_1(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{\Omega} = f_1(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{\omega} = f_3(V,\Omega,\omega,x,y,\alpha,\beta,M_\alpha,M_\beta) \\
\dot{x} = V\cos\alpha \\
\dot{y} = V\sin\alpha \\
\dot{\varphi} = \dfrac{V\sin\varphi - \Omega n}{n + c\cos\alpha} \\
\dot{\alpha} = \Omega \\
\dot{\beta} = \omega \\
\dot{\psi}_A = \dfrac{V(n + c\cos\alpha - a\sin\alpha) + an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)}, \quad \dot{\psi}_B = \dfrac{V(n + c\cos\alpha + a\sin\alpha) - an\Omega}{R_k(n + c\cos\alpha)}, \\
\dot{\psi}_C = \dfrac{V(c + n\cos\alpha) - cn\Omega\sin\alpha}{R_c(n + c\cos\alpha)}
\end{cases}
$$

$$
V(0) = 0,\ \Omega(0) = 0,\ \omega(0) = 0,\ x(0) = -r_0,\ y(0) = 0,\ \alpha(0) = 0,\ \beta(0) = 0,
$$

$$
\psi_A(0) = 0,\ \psi_B(0) = 0,\ \psi_C(0) = 0,\ x(T) = 0,\ y(T) = 0,
$$

$$
\|M_\alpha\| < M_1,\ \|M_\beta\| < M_2 .
$$

Управление осуществляется моментами $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$.

Для численного решения используется принцип максимума Понтрягина. Составляется система сопряженных уравнений, и выписываются необходимые условия оптимальности. Краевые условия находятся из условий трансверсальности. Далее полученная система интегрируется численно методом Рунге-Кутта 4 порядка с динамическим выбором шага. Для определения необходимых начальных условий используется вычислительный метод пристрелки.

2.3. Результаты численного интегрирования

Сначала была решена задача оптимального управления при движении по прямой. Затем решались задачи для движения по произвольной, но оптимальной, траектории.

В результате численного эксперимента были получены управляющие моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$. Рассматривалось также поведение управляющих углов α, β. Результаты расчетов приведены ниже на графиках.

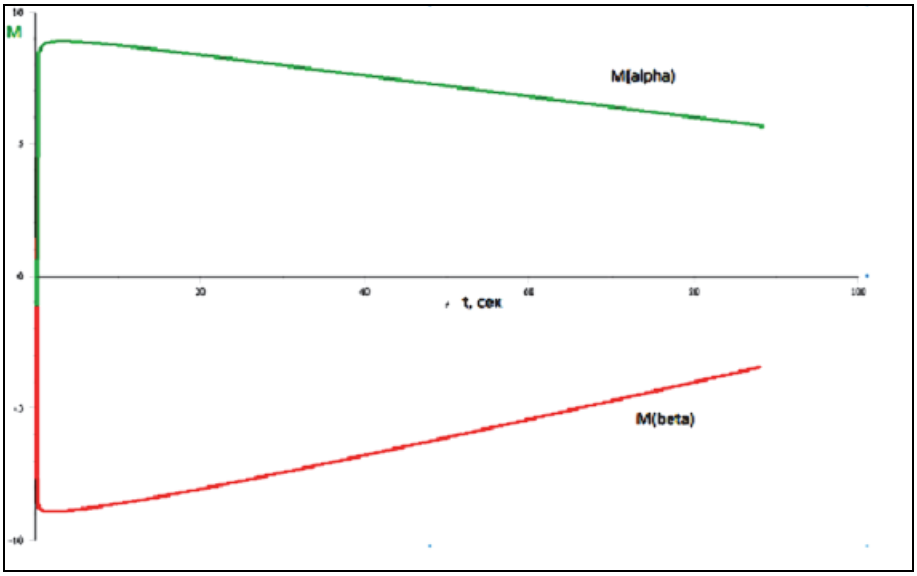


Рис. 3. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при угле ветра $\psi = 0$, движение по прямой

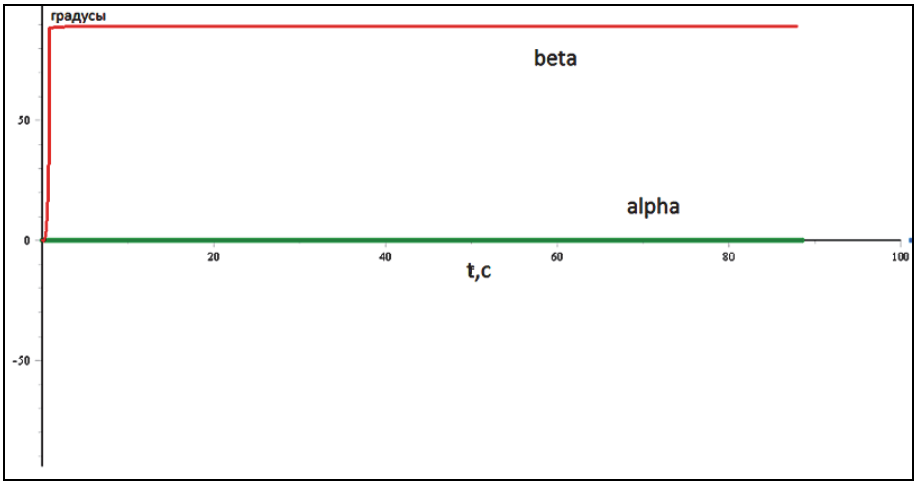


Рис.4. Углы α, β при $\psi = 0$, движение по прямой

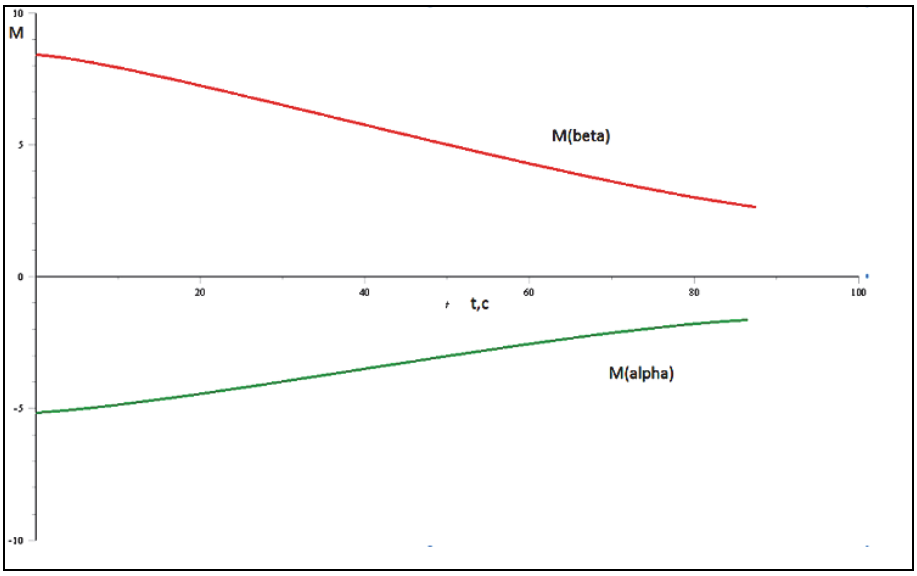


Рис.5. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при $\psi = \frac{\pi}{3}$, движение по прямой

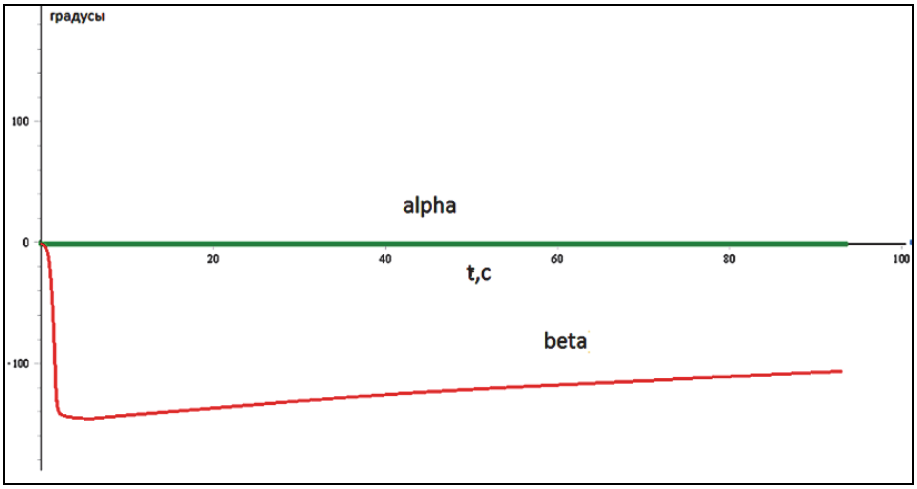


Рис.6. Углы α, β при $\psi = \frac{\pi}{3}$, движение по прямой

После этого были получены решения оптимального управления без ограничений на траекторию. Были получены следующие результаты при угле ветра $\psi = \pi/3$.

Также исследовалась зависимость траектории движения от величины выноса переднего колеса. Результаты экспериментов приведены на рис. 9.

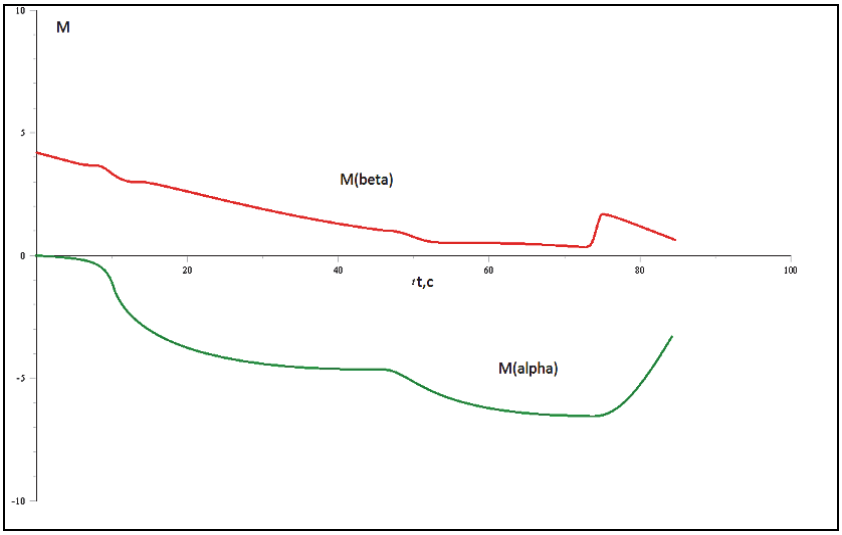


Рис. 7. Моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$ при $\psi = \pi/3$, движение без ограничений

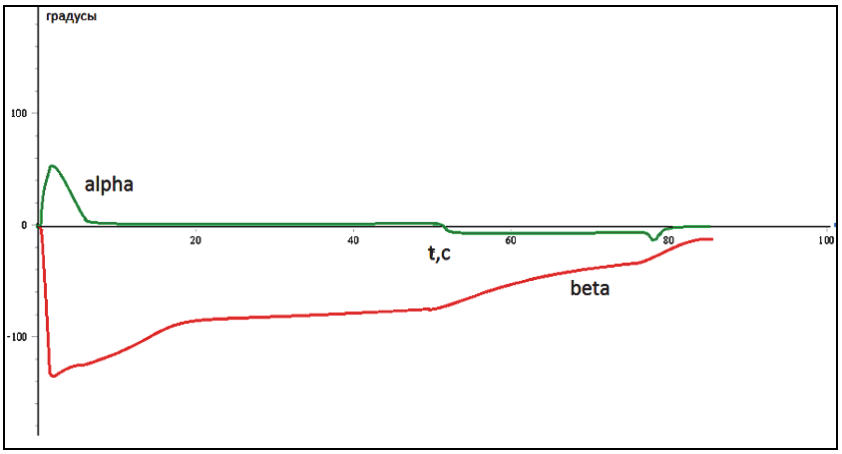


Рис. 8. Углы α, β при $\psi = \pi/3$, движение без ограничений

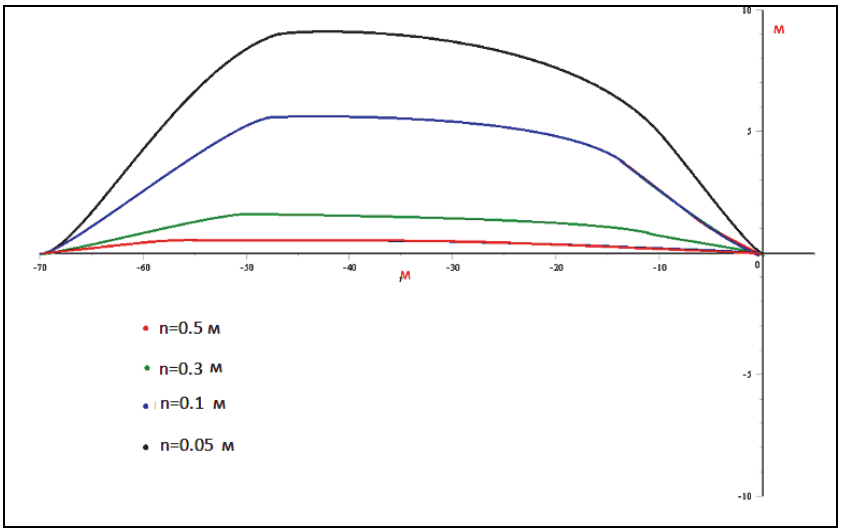


Рис. 9. Траектории при различной длине выноса

Как следует из представленного графика, по мере увеличения длины выноса переднего колеса траектории «прижимаются» к оси Ox, причем значения функционала времени растут с увеличением выноса подвески колеса.

В следующей таблице приведены результаты экспериментов при различных направлениях выноса переднего колеса в начальный момент времени. Вынос колеса назад соответствует условию $\alpha(0) = \pi$.

Результаты экспериментов при различном выносе колеса и направлениях ветра

Направление ветра ψ	Время прибытия по прямой при выносе вперед, секунд	Время прибытия по прямой при выносе назад, секунд	Время прибытия без ограничений при выносе вперед, секунд	Время прибытия без ограничений при выносе назад, секунд
0	71.2	71.2	71.2	71.2
$\pi/8$	74.2	74.2	72.8	73.3
$\pi/6$	80.9	80.9	75.8	76.7
$\pi/5$	85.1	85.1	78.3	80.4
$\pi/4$	88.5	88.5	80.5	83.9
$\pi/3$	92.3	92.3	81.3	84.1

3. Заключение

В данной работе разработана теоретико-механическая модель роботизированного буера с выносом переднего колеса. Она может применяться при синтезе управления буером в реальных условиях.

Построено оптимальное управление буером при фиксированных значениях модуля скорости ветра и его направлениях $\psi = 0, \psi = \pi/3$ при движении по прямой и при движении без ограничений на траекторию, для этого численно были найдены управляющие моменты $\vec{M}_\alpha, \vec{M}_\beta$, тем самым для этих значений решена задача оптимального быстродействия. Таким образом, подтверждены правила выставления паруса в морской навигации [4] и результаты работы [5].

Были проведены эксперименты с различными длинами выноса переднего колеса в результате которых можно сделать вывод, что при увеличении длины выноса значение достигаемого функционала времени увеличивается. Так были проведены эксперименты с различным направлением выноса (вперед/назад) и получено, что при прочих остальных идентичных условиях задачи, значения функционалов времени, которые достигаются при выносе вперед, меньше, чем при выносе назад (81,3 сек. при выносе вперед и 84,1 сек. при выносе назад). Тем самым обосновывается факт, что существующие модели радиоуправляемых буеров, предназначенные для гонок [6], имеют вынос переднего колеса, направленный вперед.

В продолжение работы выполняется разработка макета управляемого робота-буера. На нем будет проверена созданная модель управления этим объектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Татаринов Я. В.* Уравнения классической механики в новой форме // Вестник МГУ. Сер. Матем. Механ., 2003, №3, с.67-76.

2. *Локшин Б. Я., Привалов В.А., Самсонов В.А.* Введение в задачу о движении точки и тела в сопротивляющейся среде. М.: МГУ, 1992. 75 с.

3. *Жуковский Н.Е.* Теоретические основы воздухоплавания: Ч.2// Полное собрание сочинений: Лекции: Вып.2. А.П.Котельников, В.С. Пышнов, В.А.Семенов (ред.);-ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. М.-Л.:Оборонгиз, 1939. 206 с.

4. *Леонтьев Е.П.* Школа Яхтенного капитана. М.: Физкультура и спорт, 1983. 245 с.

5. *Павловский В.Е., Глазкова Л.В., Панченко А.В.* Динамика, моделирование и управление колесным робобуером // Нелинейная динамика, 2012, т.8, №4, с.679-687.

6. Электронный ресурс: http://www.modellandyachts.com/

УДК 531.1

А. В. Панченко

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНОГИМ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ С МНОГОЗВЕННЫМ КОРПУСОМ

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
PanchenkoAV@vap.ru

В работе описан кинематический алгоритм управления многоногим шагающим аппаратом с многозвенным корпусом. Проведена верификация алгоритма управления на примере модели трехзвенного корпуса.
Ключевые слова: шестиногий аппарат, ломающийся корпус, управление, шагающий аппарат.

A. V. Panchenko

KINEMATIC CONTROL ALGORITHM FOR MULTILEGGED WALKING ROBOT WITH ARTICULATED BODY

Lomonosov Moscow State University

In this paper kinematical control algorithm for multilegged robot with articulated body is described. Control algorithm was verified on two six legged robot models: three segment body.
Keywords: hexapod, articulated body, control, walking robot.

Многозвенные корпуса шагающих аппаратов обладают рядом преимуществ. Рассмотрим классическую ситуацию: преодоление аппаратом с жестким корпусом препятствия типа «расщелина». Соотношения размеров аппарата и размеров препятствия могут быть таковы, что робот в какой-то момент не дотянется до опорной поверхности и зацепится корпусом за опорную поверхность, либо не сможет иметь достаточной опоры под ногами, чтобы переместить корпус. На рис. 1 схематически изображен случай застревания аппарата при преодолении препятствия типа расщелина.

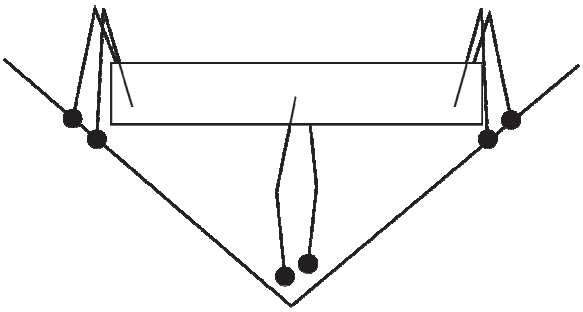


Рис. 1. Препятствие типа расщелина

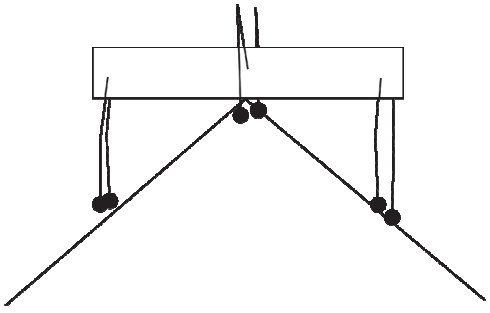


Рис. 2. Препятствие типа камень

Аналогичная ситуация возникает при преодолении препятствий типа камень. Корпус аппарата цепляется своей средней частью за камень, а передние или задние ноги не дотягиваются до опорной поверхности.

Аппарат с дополнительными шарнирами в корпусе способен адаптироваться к препятствию за счет внутренних степеней свободы корпуса. При изменении геометрии корпуса происходит смещение точек крепления ног.

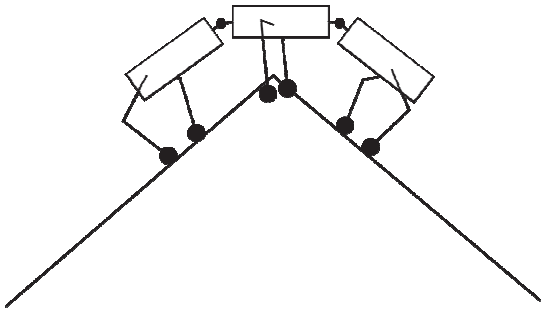


Рис. 3. Аппарат с трехзвенным корпусом

Добавление внутренних подвижностей в корпусе аппарата усложняет управление. В данной работе будет показан общий подход к построению управления корпусом аппарата. Дополнительно требуется, чтобы движение аппарата являлось кинематически точным, т. е. ноги, находящиеся в опорной фазе не должны проскальзывать во время движения аппарата.

Рассмотрим структуру аппарата с шестью ногами и трехзвенным корпусом. Звенья корпуса последовательно соединены в цепочку, к каждому звену корпуса присоединена пара ног (рис. 4).

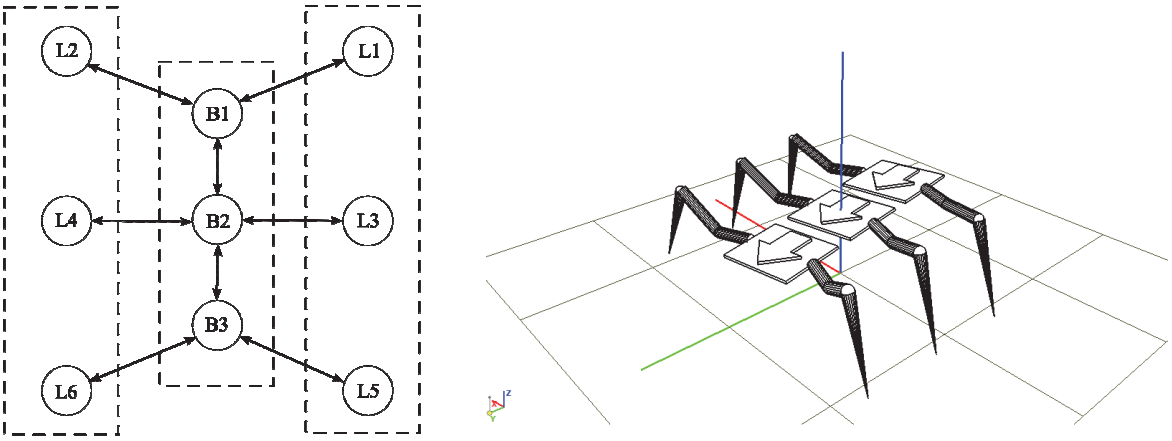


Рис. 4. Структура аппарата с трехзвенным корпусом

Структура аппарата представлена в виде дерева. Вершины дерева соответствуют функциональным сегментам аппарата. Сегменты B1, B2, B3 соответствуют сегментам корпуса (Body). Вершины L1 – L6 соответствуют ногам аппарата (Legs). Ребра дерева соответствуют механическим шарнирам. Каждому ребру между звеньями дерева соответствует закон перехода между системами координат связанных с соответствующими сегментами.

В общем случае, если в корпусе аппарата есть замкнутые кинематические цепи, то структура аппарата задается в виде графа. Для каждого графа можно построить минимальное остовное дерево. В данной статье не будет рассматриваться вопрос исследования условий совместности системы с замкнутыми кинематическими схемами.

Пусть корень дерева – вершина B2, соответствующая среднему звену корпуса. Звено, соответствующее корню дерева, назовем главным. Для главного звена заданы преобразования сдвига и поворота. Сдвиг задается в системе координат (СК) главного звена при помощи вектора сдвига $\mathbf{P} = (p_1,p_2,p_3)$, поворот главного звена задается в углах Крылова и записывается в виде матрицы поворота $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{\gamma}\mathbf{A}^{\theta}\mathbf{A}^{\psi}$. Требуется выполнить преобразования сдвига и поворота так, чтобы после преобразования абсолютные координаты стоп опорных ног не изменились.

Пусть текущее положение стопы для 1-ой ноги задается вектором $\boldsymbol{\rho}_1$ и известны текущие координаты шарниров корпуса. Найдем выражение положения стопы $\boldsymbol{\rho}_1$ в СК главного звена B2. Для выражения координат 1-ой стопы требуется выполнить переход от вершины L1 к корню B2. При последовательном переходе по ребрам пути от L1 к B2 требуется последовательно совершать преобразования над вектором $\boldsymbol{\rho}_1$, соответствующие проходимым ребрам. В зависимости от направления прохода ребра выполняется прямое или обратное преобразование. Координаты стопы 1-ой ноги в СК главного звена:

$$(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)$$

Символ ○ над стрелкой преобразования означает, что при выполнении преобразования координат используются нулевые значения шарнирных координат корпуса. В СК главного звена заданы преобразования сдвига и поворота, для координат стопы требуется выполнить обратные преобразования:

$$\mathbf{A}^T[(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)-\mathbf{P}]$$

После преобразований главного звена требуется выразить новые координаты стопы в исходной системе координат ноги L1. Для этого выполняется переход от корня дерева B2 к звену L1 с выполнением обратных преобразований:

$$(B2 \xrightarrow{\bullet} B1 \xrightarrow{\bullet} L1)^*A^T[(L1 \xrightarrow{\circ} B1 \xrightarrow{\circ} B2)^*(\boldsymbol{\rho}_1)-\mathbf{P}]$$

Символ ● над стрелкой преобразования означает, что при выполнении преобразования координат используются текущие значения шарнирных координат корпуса. Для остальных ног аппарата строятся аналогичные цепочки преобразований координат стоп.

Описанный алгоритм преобразования координат подходит для общих случаев структуры

шагающих аппаратов. В частности, аппарат с жестким корпусом имеет структуру:

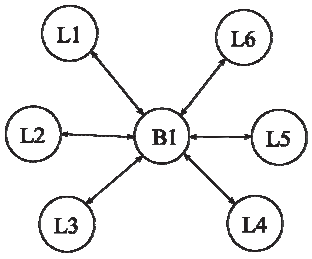


Рис. 5. Шестиногий аппарат с жестким корпусом

Корпус аппарат состоит из одного звена B1, оно всегда будет главным. Преобразования координат стоп ног L1,…, L6 будут выполняться по схожим формулам, т.к. структура ветвей (L1,B1), …, (L6,B1) единообразна.

Структура аппарата может быть произвольной. Ниже приведен пример аппарата со случайным структурным деревом (рис. 6).

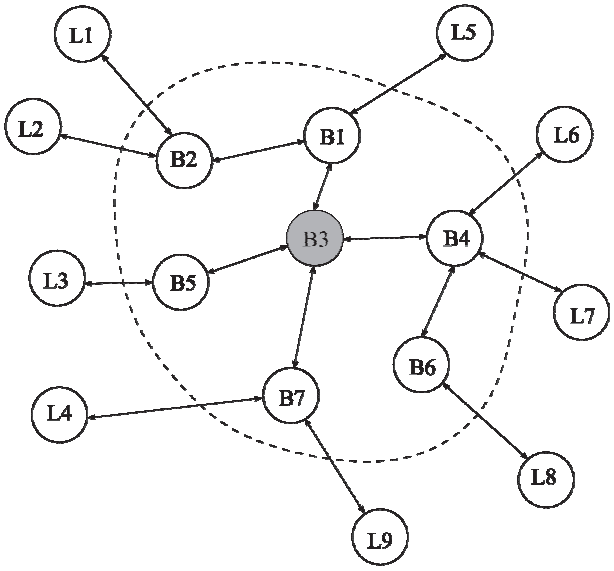


Рис. 6. Пример произвольного аппарата с многозвенным корпусом

Аппарат состоит из семизвенного корпуса и девяти ног. Есть сегменты корпуса, к которым присоединены две ноги – B2, B4,B7, есть сегменты с одной ногой – B1, B5, B6, есть сегменты без присоединенных ног – B3. В качестве главного звена – корня структурного дерева, может быть выбран произвольный сегмент корпуса.

Структурное представление шагающего аппарата в виде дерева позволяет автоматизировать анализ шагающих аппаратов. По заданному структурному дереву можно в автоматическом режиме синтезировать алгоритм управления корпусом в терминах задания программного движения для главного звена и задания законов изменения шарнирных координат корпуса. В представленной работе не решается задача управления избыточными степенями свободы в корпусе, предполагается, что закон изменения шарнирных координат корпуса известен.

Верификация алгоритма преобразования координат стопы выполняется при помощи программного комплекса «Универсальный Механизм» (ПК УМ). В терминах данной программы механическая система описывается как система твердых тел соединенных различными шарнирами. При помощи файла управления модели программируются все преобразования координат для конкретной модели аппарата в зависимости от заданного программного движения аппарата.

Алгоритм управления корпусом верифицировался на модели аппарата с трехзвенным корпусом. Корпус аппарата состоит из трех одинаковых звеньев, соединенных между собой цилиндрическими вращательными шарнирами. Оси вращения лежат в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 7.

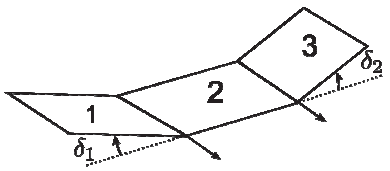


Рис. 7. Кинематическая схема трехзвенного корпуса

Ноги имеют так называемую инсектоморфную схему. Для каждого сегмента заданы все динамические параметры, такие как тензор инерции, масса и положение центра масс. Модель контакта ноги с опорной поверхностью точечная. Математическая модель контакта соответствует модели кулоновского трения в режиме скольжения. В режиме сцепления используется модель упругого сцепления [6].

Ключевым проверочным параметром правильности построенного алгоритма является отсутствие проскальзывания в точках контакта ног с опорной поверхностью. Другими словами, в результате работы алгоритма управления корпусом, абсолютное положение ног аппарата не должно изменяться.

Пусть заданы углы Крылова:

$$(\psi\ ,\ \theta\ ,\ \gamma)\ (t) = (0.1\ \sin(2\ t)\ ,\ 0.05\sin(3\ t)\ ,\ 0.25\sin(6\ t))$$

Внутренние шарнирные координаты корпуса постоянные и равны нулю. Смещение главного звена отсутствует. Все ноги аппарата находятся в опорной фазе.

После интегрирования уравнений движения получаем:

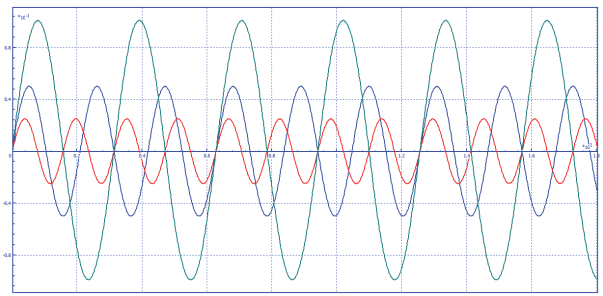


Рис. 8. Углы ориентации главного звена

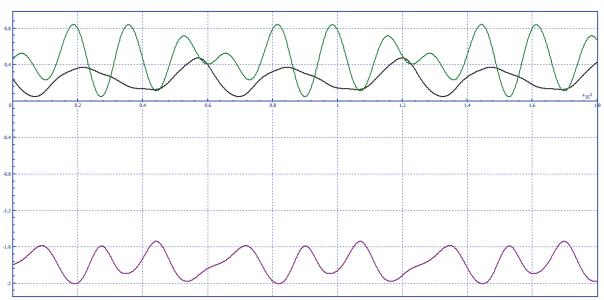
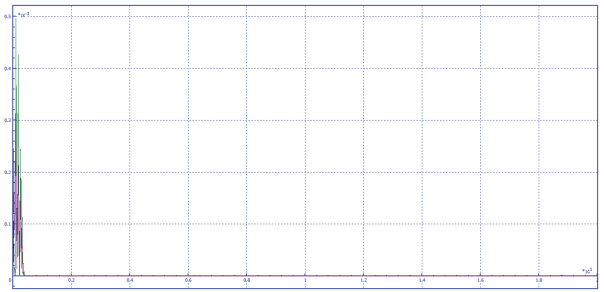


Рис. 9. Шарнирные углы ноги L1

Возмущения скорости в начале графика связанны с перераспределением опорных реакций в начальный момент времени и моделью серво управления в шарнирах модели.

График модуля скорости стопы L1 равен нулю:



Построенный алгоритм управления корпусом дополняет алгоритм управления движением аппарата из [1]. Алгоритм управления корпусом может быть получен автоматически по структурному дереву аппарата. Условие совместности структурного дерева аппарата – непротиворечивости конструкции корпуса требует в дальнейшем подробного изучения, корректной и полной формулировки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *В.Е. Павловский, А.В. Панченко*. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота. М.: Изд-во «Новые технологии», №11, 2012. Стр. 23-28.

2. *Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев*. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984.

3. *Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, Е.И. Кугушев, В.С. Ярошевский*. Система построения движений шагающего аппарата «Модель Т3». Ордена Ленина Институт прикладной математики АН СССР, препринт №7 за 1977 год.

4. *В.В. Лапшин*. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

5. Видеоролики моделей http://www.youtube.com/user/SurferMGU

6. Универсальный Механизм http://www.umlab.ru

УДК 004.94

А. Б. Рогудеев, В. В. Сомов, В. М. Константинов, А. О. Пивоваров, А. В. Малолетов

ВЫДЕЛЕНИЕ И ПОДСЧЕТ ИЗБЫТОЧНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛЕЙ В AUTODESK INVENTOR*

Волгоградский государственный технический университет
rogudeevml@yandex.ru, alexbeer8891@mail.ru, vassuv@yandex.ru

Рассматривается задача автоматизации процесса анализа избыточных связей в моделях механических систем, построенных в Autodesk Inventor.

Ключевые слова: моделирование, механизм, избыточная связь, кинематическая пара, Autodesk Inventor

A. B. Rogudeev, V. V. Somov, V. M. Konstantinov, A. O. Pivovarov, A. V. Maloletov

DETERMINATION AND COUNT OF EXCESS BONDS IN BUILDING MODELS IN AUTODESK INVENTOR

Volgograd State Technical University

The problem of automation of the analysis of excess bonds in models of mechanical systems built into Autodesk Inventor is discussed.

Keywords: modeling, mechanism, excess bond, kinematic pair, Autodesk Inventor

---

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-01144-а, № 13-01-97057- р_поволжье_а.

Введение

Избыточными или пассивными связями в механизмах называют связи, не оказывающие влияния на характер движения механизма в целом [1]. Пассивные связи часто используются в различных механизмах [2, 3] для перераспределения нагрузок внутри механизма, повышения плавности хода, уравновешивания и других целей. В то же время, избыточные связи приводят к статически неопределимым конструкциям и, как следствие, к повышению нагрузок, увеличению потерь на трение, повышению износа, более высоким требованиям к точности изготовления деталей [4]. Поэтому при проектировании механизмов необходимо учитывать наличие в них пассивных связей, как одного из факторов влияющих на долговечность машины [5]. Разрабатываются также способы проектирования механизмов без избыточных связей [6].

Для проверки механизма на наличие в нем избыточных связей обычно используется структурная формула Малышева [1]:

$$q = w - 6n + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1, \qquad (1)$$

где q – число избыточных связей; n – число подвижных звеньев; w – реальная подвижность механизма; p_i – количество кинематических пар i-го класса.

В работе решается задача автоматизации процесса анализа избыточных связей в моделях механических систем, построенных в Autodesk Inventor. При этом предполагается, что реальная подвижность механизма известна.

1. Особенности построения модели механизма в Autodesk Inventor

Autodesk Inventor является системой трехмерного твердотельного и поверхностного проектирования. Для создания модели механизма в этой системе, необходимо:

1) создать детали, из которых состоит механизм;

2) создать сборку механизма, в которую будут включены все необходимые детали;

3) в сборке задать зависимости между деталями.

Для задания связей между деталями в Autodesk Inventor существуют сборочные зависимости, задающие позиционирование компонентов сборки друг относительно друга. При наложении зависимостей удаляются степени свободы и ограничивается возможность перемещения деталей.

Однако, имеющиеся виды зависимостей не вполне соответствуют общепринятой в механике классификации кинематических пар, что часто приводит к необходимости использования нескольких зависимостей для моделирования одной кинематической пары. Некоторые зависимости предназначены для задания связи между перемещениями тел, и не востребованы для моделирования кинематических пар.

В Autodesk Inventor реализованы следующие виды зависимостей [7]:

1. Зависимость **«совмещение/заподлицо»** обеспечивает совмещение плоских граней, прямых линий или точек компонентов. Возможна любая комбинация совмещаемых элементов: плоскость-плоскость, плоскость-линия, плоскость-точка, линия-линия, линия-точка и точка-точка. Сами компоненты при этом могут располагаться напротив или заподлицо друг с другом.

2. Зависимость **«угол»** служит для позиционирования ребер или плоских граней двух компонентов под заданным углом.

3. Зависимость **«касательность»** служит для позиционирования плоскостей, сплайнов, а также цилиндрических, сферических и конических поверхностей по касательной друг к другу. Касание может быть как с внутренней, так и с внешней стороны кривой.

4. Зависимость **«вставка»** служит для позиционирования плоских граней цилиндрических конструктивных элементов перпендикулярно оси цилиндра.

5. Зависимость **«вращение-вращение»** задает вращение одной детали относительно другой с рассчитанным передаточным числом.

6. Зависимость **«вращение-поступательное движение»** служит для моделирования вращения одной детали в зависимости от поступательного движения другой детали.

Из них, для моделирования кинематических пар используются «вставка», обеспечивающая пять ограничений на стенени свободы, и «совмещение/заподлицо», дающее от одной до четырех ограничений при выборе различных частей взаимодействующих тел (табл. 1). Здесь и далее используются сокращения: символом «П» обозначается ограничение на поступательную степень свободы, «В» – ограничение на вращательную степень свободы. Цифры перед символами «П» и «В» означают количество соответствующих ограничений.

Таблица 1

Соотношение между зависимостью и накладываемыми ограничениями

Зависимость			Ограничения на степени свободы	Количество ограничений
Тип зависимости	Выбранная часть первого объекта	Выбранная часть второго объекта		
Совмещение/заподлицо	Плоскость	Плоскость	1 П + 2 В	3
	Плоскость	Линия	1 П + 1 В	2
	Плоскость	Точка	1 П	1
	Линия	Линия	2 П + 2 В	4
	Линия	Точка	2 П	2
	Точка	Точка	3 П	3
Вставка	Любой	Любой	3 П + 2 В	5

2. Моделирование кинематических пар в Autodesk Inventor

Одному и тому же классу соответствуют различные кинематические пары, задающие различные ограничения на степени свободы тел. Кинематическая пара может быть по разному технически реализована, и различным образом смоделирована в Autodesk Inventor. В табл. 2 приведены все возможные варианты моделирования кинематических пар с помощью зависимостей «Совмещение/заподлицо» и «Вставка». Для зависимостей «Совмещение/заподлицо» используются сокращения: П-Т – Плоскость-Точка, П-Л – Плоскость-Линия, П-П – Плоскость-Плоскость, Л-Л – Линия-Линия, Л-Т – Линия-Точка, Т-Т – Точка-Точка. В тех случаях, когда кинематическая пара имеет широко используемое название, оно приведено в последнем столбце таблицы.

Таблица 2

Соотношения между кинематической парой и зависимостями в Autodesk Inventor

Кинематическая пара		Зависимости, оделирующие пару	Название кинематической пары
Класс кинематической пары	Ограничения на степени свободы		
1	1 П	П-Т	Шар-плоскость
2	2 П	2 П-Т	Шар-цилиндр
		Л-Т	
	1 П + 1 В	П-Л	
3	1 П + 2 В	П-П	Плоскостная
		2 П-Л	
	2 П + 1 В	2 П-Л	
		П-Л + П-Т	
	3 П	3 П-Т	Сферическая
		Т-Т	
4	1 П + 3 В	3 П-Л	
	2 П + 2 В	2 П-Л	Цилиндрическая
		П-П + П-Т	
		Л-Л	
	3 П + 1 В	3 П-Л	Сферическая с пальцем
		2 П-Л + П-Т	
		П-Л + 2 П-Т	

Окончание табл. 2

Кинематическая пара		Зависимости, оделирующие пару	Название кинематической пары
Класс кинематической пары	Ограничения на степени свободы		
5	2 П + 3 В	2 П–П	Скользящая заделка
		П–П + П–Л	
		П–П + 2 П–Т	
		П–П + П–Т + Л–Л	
		П–П + П–Т + Л–Т	
		П–П + Л–Л	
		П–Л + Л–Л	
	3 П + 2 В	П-П + 2 П–Т	Вращательная
		П–П + Л–Л	
		П–П + Л–Т	
		П–П + Т–Т	
		П–Л + Л–Л	
		2 П–Л + Л–Т	
		2 П–Л + Т–Т	
		П–Т + Л–Л	
		Л–Л + Л–Т	
		Л–Л + Т–Т	
		Вставка	

3. Алгоритм подсчета количества избыточных связей и его программная реализация

Программа анализа избыточных связей в модели механизма разработана на языке C# с использованием API Autodesk Inventor. Для корректной работы программы Autodesk Inventor должен быть запущен, и анализируемая модель должны быть в нем открыта. Используемые классы, атрибуты и методы приведены в табл. 3.

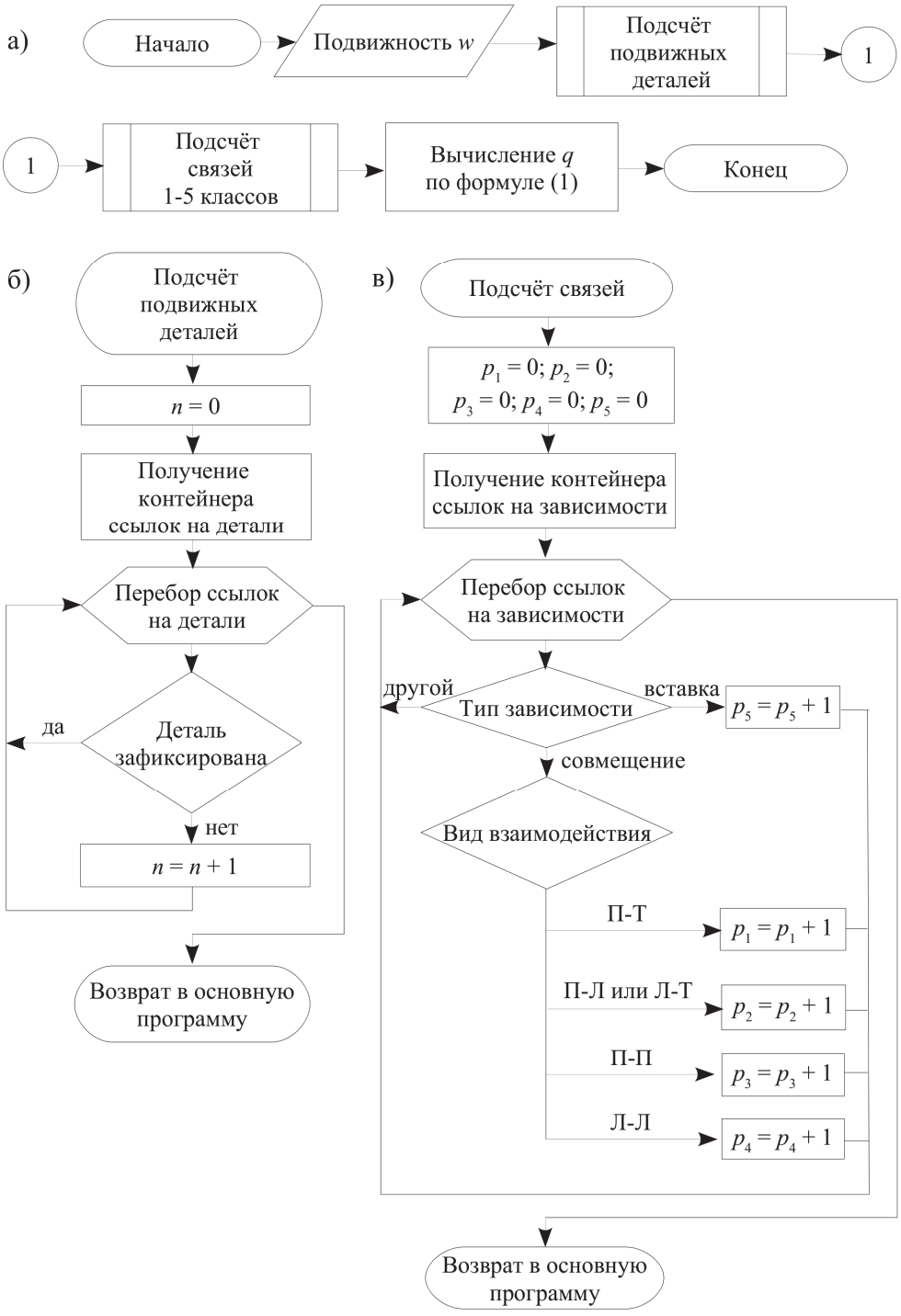
Таблица 3

Описание классов пространства имен Inventor

Описание	Тип данных	Код для получения объекта
Ссылка на открытое приложение	Application	System.Runtime.InteropServices.Marshal.GetActiveObject ("Inventor.Application")
Ссылка на открытый документ	AssemblyDocument	Application.ActiveDocument
Объект класса AssemblyComponentDefinition	AssemblyComponent Definition	AssemblyDocument.ComponentDefinition
Контейнер ссылок на детали	ComponentOccurrences	AssemblyComponentDefinition. Occurences
Ссылка на деталь	ComponentOccurrence	AssemblyComponentDefinition. Occurences[]
Фиксированность детали	bool	ComponentOccurrence.grounded
Контейнер ссылок на зависимости	AssemblyConstraints	AssemblyComponentDefinition. Constraints
Ссылка на зависимость	AssemblyConstraint	AssemblyComponentDefinition. Constraints[]
Тип зависимости (перечисление)	ObjectTypeEnum	AssemblyConstraint.Type
Выбранная часть первой детали при наложении зависимости	dynamic	AssemblyConstraint.EntityOne
Выбранная часть второй детали при наложении зависимости	dynamic	AssemblyConstraint.EntityTwo

Алгоритм работы программы приведен на рисунке *а* и состоит из последовательности действий: указание реальной подвижности механизма w, анализа модели на количество подвижных деталей n и количество связей различных классов p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, вычисления числа пассивных связей по формуле (1).

Подсчет количества подвижных деталей (рисунок *б*) в свою очередь заключается в переборе всех деталей механизма и проверке их на свойство «Фиксированность детали». А подсчет количества связей различных классов (рисунок *в*) осуществляется путем перебора всех зависимостей, в рамках которого анализируется тип каждой зависимости и для зависимости типа «Совмещение/заподлицо» анализируется также вид взаимодействия.



Блок-схемы алгоритма анализа модели механизма на избыточные связи

Заключение

Разработанный алгоритм и реализованная на его основе программа позволяют автоматизировать анализ механических систем на избыточные связи и могут быть востребованы инженерами, проектирующими механизмы и узлы машин с использованием программной системы Autodesk Inventor.

Поскольку анализу подвергается не сама механическая система, а ее модель, то и результат работы программы следует трактовать не как количество избыточных связей в механизме, а как количество избыточных связей в модели. Если при моделировании будут наложены зависимости дублирующие друг друга, то в модели появятся пассивные связи, отсутствующие в реальном механизме. А так как в кинематике избыточные связи себя никак не проявляют, то дублирующие зависимости могут остаться незамеченными. Поэтому для анализа модели на избыточные связи необходимо накладывать только те зависимости, которые соответствуют кинематическим парам моделируемого механизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Артоболевский, И. И.* Теория механизмов и машин. - М.: Наука, 1988. - 640 с.

2. *Чернышев, В. В*. Многофункциональный механизм поворота для транспортно-технологических шагающих машин / В.В.Чернышев, А.В.Малолетов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2001. № 1. С. 48.

3. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А.В.Леонард, А.В.Малолетов // Теория механизмов и машин. 2011. Т. 9. № 17. С. 14-24.

4. *Иосилевич, Г. Б.* Детали машин. - М.: Машиностроение, 1988. - 368 с.

5. *Пивоваров, А. О*. Повышение долговечности планетарного механизма поворота : монография / А.О. Пивоваров, Вл.П. Шевчук. - Saarbrucken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. - 105 с.

6. *Пивоваров, А. О.* Разработка конструкции планетарной передачи без избыточных связей / А.О. Пивоваров // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 6 (ч. 3). - С. 556-560.

7. Autodesk WikiHelp. Inventor 2012 [Электронный ресурс] / Autodesk WikiHelp. - [2013]. - Режим доступа: http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/rus/2012

УДК 621

А. И. Смелягин, И. В. Юхневич

ПОДВИЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Кубанский государственный технологический университет

asmelyagin@yandex.ru

В работе анализируются и исследуются наиболее распространенные в промышленности и быту мобильные транспортные устройства. Найдены структурные формулы основных транспортных средств и определена их подвижность.

Ключевые слова: транспортные средства, устройства, тележки, мобильные роботы, структурные схемы и формулы, кинематические пары, подвижность.

A. I. Smelyagin, I. V. Yukhnevich

MOBILITY VEHICLES

Kuban State University of Technology

This paper analyzes and explores the most common in industry and everyday life mobile transport device. Found major structural formulas of vehicles and picked their mobility.

Keywords: vehicles, devices, carts, mobile robots, block diagrams and formulas, kinematic pairs, mobility.

Транспортные устройства широко применяются в технике. На их базе созданы автомобили, мобильные роботы и манипуляторы, велосипеды, вагоны и тому подобные устройства, передвигающиеся как по дороге, так и по рельсам. Структурные схемы простейших бесповоротных транспортных тележек представлены на рис. 1.

На рис. 1, *а* показано транспортное средство, применяемое в велосипедах, самокатах других подобных устройствах. Эта устройство имеет плохую вертикальную устойчивость. Поэтому на практике чаще применяют не его, а тележки:

• с разнесенным задним (передним) колесом (рис. 1, *б*), точнее с разнесенной [1] высшей кинематической парой C (C');

• с широким задним (передним) колесом (рис. 1, *в*);

• с разнесенной вращательной кинематической парой D (D') (рис. 1, *в*);

• с разнесенными передним и задним колесами (рис. 1, *г*) или парами B (B') и C (C').

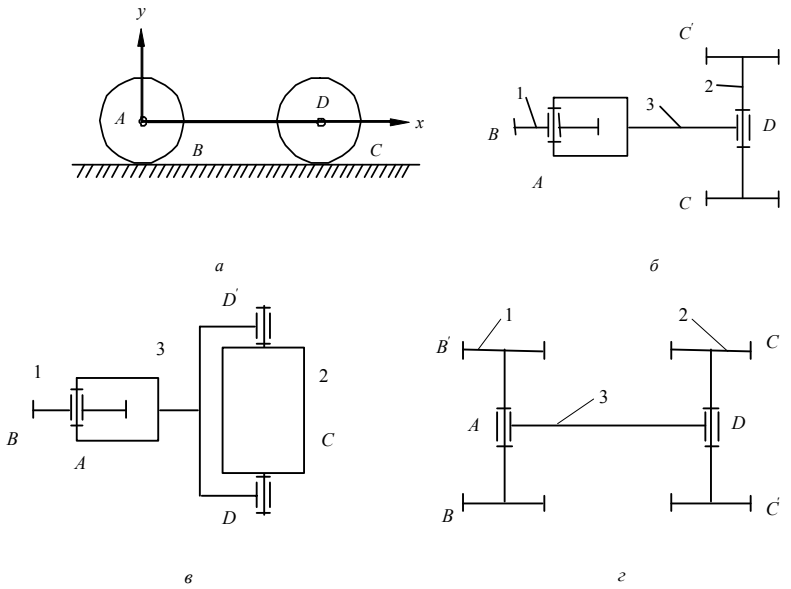


Рис. 1 Двухколесные транспортные тележки:
1, 2 – опорные колеса; 3 – рама; A, D (D′) – низшие вращательные кинематические пары;
B (B′), C (C′) – высшие цилиндр – плоскость кинематические пары

Все эти конструкции эквивалентны друг другу. Это обусловлено тем, что разнесение кинематических пар не влияет на их число и не отражается на структуре устройства.

У всех тележек (рис. 1) высшие кинематические пары есть не что иное, как кинематическая пара цилиндр – плоскость. Значит, эти пары одноподвижные и допускают только одно перемещение вдоль оси x. Все вращательные кинематические пары исследуемых транспортных тележек имеют параллельные оси и вращаются вокруг оси z.

Значит, двухколесные бесповоротные транспортные тележки существуют в двухмерном (М=2) двухподвижном (П=2) пространстве. В соответствии с [1] подвижность этих тележек определится по формуле

$$W = 2n - p_1.$$

Все тележки (рис. 1) имеют три (n=3) подвижных звена и четыре (p_1=4) одноподвижные кинематические пары. Тогда их подвижность определится:

$$W = 2 \cdot 3 - 4 = 2.$$

Одна подвижность нужна для перемещения тележки по дороге (рельсу), а вторая подвижность является избыточной или так называемой местной подвижностью опорного колеса.

Известно [1], что местные подвижности не влияют на работу основного механизма и, поэтому, нет необходимости их устранять. Если эту подвижность все-таки надо устранить, то опорное колесо можно заменить, например, кинематической парой плоскость-плоскость (лыжей) (см., например, рис. 3).

Недостатком транспортной тележки с лыжей является то, что в кинематической паре плоскость-плоскость возникает большое трение скольжения, поэтому они применяются довольно редко.

При передвижении транспортных средств (рис. 1) по рельсам их колеса снабжаются ребордами, которые не дают тележкам перемещаться в поперечном направлении. Реборды в данном случае ни как не влияют на определение подвижности, так как поперечное перемещение в таких тележках и так не реализуется.

При установке транспортных тележек (рис. 1) на зубчатые рельсы, их колеса так же выполняются зубчатыми. В этом случае в таких тележках возникает передача зубчатое колесо – рейка. Поэтому рассмотрим, определение подвижности пары зубчатое колесо – рейка.

Передача зубчатое колесо – рейка состоит из двух ($n = 2$) подвижных звеньев – колеса и рейки, которые при соединении между собой образуют высшую кинематическую пару.

В этой передаче, как и в передачах с зубчатыми колесами, существует взаимозависимость вращательного движения зубчатого колеса и поступательного рейки. Покажем это.

Передаточное отношение для передачи зубчатое колесо – рейка может быть определено следующим образом:

$$i = \omega / V;$$

$$i = \omega / (\omega R) = 1 / R,$$

где ω - угловая скорость колеса; V – линейная скорость оси симметрии колеса; R – радиус зубчатого колеса.

Из формулы передаточного отношения видно, что вращательное движение зубчатого колеса и поступательное движение рейки являются взаимозависимыми, значит, при определении подвижности пространства, в котором существует исследуемый механизм, надо учитывать только одно из этих движений.

Анализ движений в кинематических парах тележек (рис. 1) показывает, что в них соответственно реализуются вращательное движение вокруг оси z и поступательное перемещение вдоль оси x.

В кинематических парах В(С) в зависимости от профиля и наклона зубьев, как было установлено в [1], могут реализоваться следующие движения:

эвольвентная прямозубая – два поступательных вдоль осей X и Y;

эвольвентная косозубая – три поступательных вдоль осей X, Y и Z;

круговинтовая (Новикова) – одно поступательное вдоль оси Z;

с торцевыми зубьями – два поступательных вдоль осей X и Y.

В зависимости от профиля и наклона зубьев передача зубчатое колесо – рейка будет существовать соответственно в двух, трех и четырехподвижном пространствах. А значит, для каждого из пространств будет своя структурная формула для определения подвижности [1]. Однако подвижность, определяемая по любой из формул, всегда будет равна 1. Следовательно, подвижность транспортных тележек выполненных по рис. 1 будет определяться, так же как и при круглых колесах.

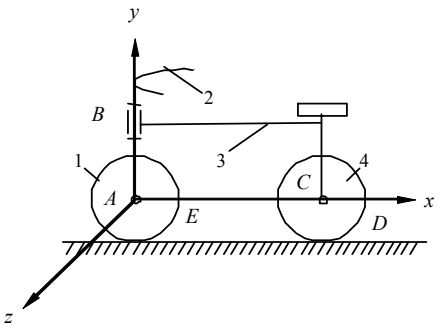


Рис. 2. Поворотная транспортная тележка:
1, *4* – опорные колеса; *2* – руль; *3* – рама; *A*, *B*, *C* – низшие вращательные пары; *E*, *D* – высшие кинематические пары цилиндр – плоскость

Для изменения направления движения транспортные тележки делаются поворотными (рис. 2) и снабжаются рулем.

Из рис. 2. видно, что исследуемая тележка отличается от предыдущей (рис. 1) тем, что в нее введены кинематическая пара B и дополнительное подвижное звено *2*, которое может вращаться вокруг оси y. Эти нововведения превратили высшие кинематические пары E и D в двухподвижные. Действительно, элементы кинематической пары E движутся поступательно вдоль оси x и вращаются вокруг оси y

Итак, в данной тележке реализуются следующие независимые движения: x, y, φ_z, φ_y, т. е. она существует в трехмерном (М=3) четырехподвижном (П=4) пространстве.

В соответствии с [1] подвижность этой тележки определится по формуле

$$W = 4n - 3p_1 - 2p_2 - p_3.$$

Тележка имеет четыре (n=4) подвижных звена, три (p_1=3) одноподвижные вращательные кинематические пары A, B, C и две двухподвижные (p_2=2) кинематические пары D, E цилиндр – плоскость.

Следовательно, подвижность этой тележки определится:

$$W = 4 \cdot 4 - 3 \cdot 3 - 2 \cdot 2 = 3.$$

Одна подвижность в этой тележке необходима для приведения ее в движение, другая - обеспечивает поворот, а третья является местной подвижностью опорного колеса.

Местную подвижность можно устранить, если одно из опорных колес, например переднее, заменить кинематической парой плоскость-плоскость (лыжей) (рис. 3).

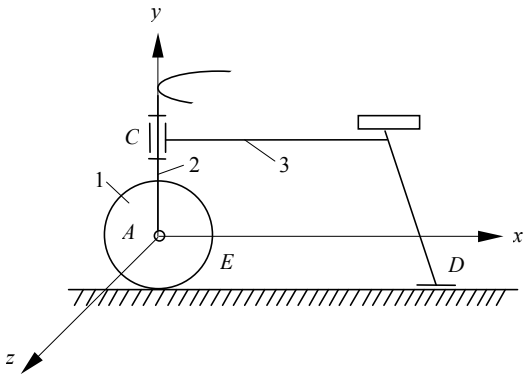


Рис. 3. Двухопорная транспортная тележка с кинематической парой плоскость – плоскость:
1, 2, 3 – подвижные звенья; *A, C* –одноподвижные низшие вращательные кинематические пары; *E, D* – двухподвижные высшие кинематические пары

Транспортная тележка (рис. 3) существует в том же четырехподвижном пространстве, что и предыдущая, но имеет три подвижных звена (n=3), две одноподвижные (p_1=2) и две двухподвижные (p_2=2) кинематические пары.

Подвижность двухопорной транспортной тележки с кинематической парой плоскость – плоскость определится:

$$W = 4 \cdot 3 - 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 2.$$

Эти подвижности необходимы для реализации основного движения и изменения направления перемещения. Недостатком транспортной тележки такой конструкции является то, что в кинематической паре D возникает большое трение скольжения, поэтому они применяются довольно редко.

Итак, определены структурные формулы и подвижности основных транспортных средств. Установлено, что транспортные тележки с колесами могут иметь избыточные (местные) подвижности, которые не влияют на основную работу устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смелягин А.И.* Структура механизмов и машин. – М.; Высшая школа, 2006.

2. *Смелягин А.И. Юхневич И.В.* Подвижность транспортных средств. // Материалы Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2013» ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 301…302.

УДК 629.369

В. В. Чернышев, В. А. Шурыгин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ПОДВОДНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА С ГРУНТОМ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Рассматриваются результаты моделирования динамики взаимодействия шагающего движителя с подводным грунтом с низкой несущей способностью. Выясняется влияние на динамику машины плывунных свойств грунта и компрессионного эффекта при смене стоп. Показано, что в подводных условиях шагающие машины существенно превосходят по проходимости традиционные транспортные средства.

Ключевые слова: шагающий движитель, аппараты передвигающиеся по дну, взаимодействие с грунтом, динамическое моделирование.

V. V. Chernyshev, V. A. Shurygin

SIMULATION OF DYNAMICS OF INTERACTION UNDERWATER PROPULSION WALKING APPARATUS WITH THE SOIL WITH LOW BEARING CAPACITY

Volgograd State Technical University

The article considers the results of the dynamic simulation of interaction of the walking propulsion with underwater soil with low bearing capacity. It turns out the influence on the dynamics of machines sinking ground properties of the soil and compression effect when changing feets. It is shown that the passability of walking machines in underwater environments far superior passability of traditional vehicles.

Keywords: walking propulsion, vehicles moving across the bottom, interaction with the soil, dynamic modelling.

Практика подводно-технических работ ставит ряд задач, связанных с проведением грунтовых работ. Эти работы требуют значительных тяговых усилий на рабочий инструмент (ковши, подборщики, отвалы и др.). В качестве средств передвижения по дну уже используются машины с движителями гусеничного типа. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и пересеченностью поверхности дна, делают малопригодными традиционные типы движителей. Для подводных условий более подходят шагающие движители, отличающиеся исключительно высокой грунтовой и профильной проходимостью [1-3].

В работе рассматриваются результаты математического моделирования динамики взаимодействия шагающего движителя со слабонесущими водонасыщенными грунтами с учетом их некоторых специфических особенностей. В частности выясняется влияние на динамику шагающей машины плывунных свойств грунта (плывун – насыщенный водой грунт, разжижающийся при механическом воздействии на

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекта № 13-08-01144-а).

него) и компрессионного эффекта при смене ног (при смене ног из-за разрежения под стопой имеет место сила, препятствующая отрыву стопы от грунта).

Основная сложность математического моделирования процесса взаимодействия шагающего движителя с реальным грунтом состоит в достоверном аналитическом описании процесса реализации тягового усилия и динамики смены стоп. Кроме многообразия грунтов с различными физико-механическими свойствами и конструкции стопы, в рассматриваемом случае также необходимо учитывать скорость нагружения грунта и виброударные процессы, возникающие при смене стоп. По этой причине модели грунта, используемые для традиционных колесных и гусеничных машин малопригодны. Кроме того, в отличие от традиционных транспортных средств, нет возможности рассматривать динамику взаимодействия шагающего движителя с опорной поверхностью без учета динамики всей шагающей машины, совершающей пространственные колебания [4], вызванные самим шагающим способом передвижения.

При моделировании шагающая машина рассматривается в виде системы тел – корпуса и невесомых шагающих движителей (ног). В качестве расчетной, принимается двуногая схема с вертикальным поступательным движением корпуса (рис. 1). Рассматривается случай статически устойчивых машин. Влиянием курсового движения на динамику изменения опорных реакций пренебрегалось, что соответствует ходьбе с малой скоростью.

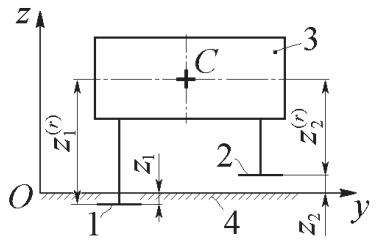


Рис. 1. Расчетная схема:
1, 2 – стопы; 3 – корпус; 4 – грунт

Вертикальное положение стоп определяется переносным движением корпуса машины и их относительным движением по отношению к корпусу

$$z_i = z - z_i^{(r)}, \qquad (1)$$

где $z = z(t)$ – закон вертикального движения корпуса; $z_i^{(r)} = z_i^{(r)}(t)$ – закон вертикального перемещения стоп в относительном движении ($i = 1, 2$).

Движение корпуса машины происходит под действием создаваемых движителями кинематических возмущений, характер которых определяется относительным движением опорных точек механизмов шагания в фазе опоры на грунт. Моделировались режимы с периодическим движением ног. Зависимости $z_i^{(r)}(t)$ в интервале $(0, T)$, где $T = 2\pi/\omega$ – период цикла, ω – частота шагания, аппроксимировались тригонометрическим полиномом. Учитывалось, что при числе механизмов шагания в движителе равном 2, как правило, наиболее существенны члены 2-й гармоники [5].

При математическом описании грунтов используется вязкоупругопластичная модель с различными соотношениями вязких и упругих свойств. Большинство слабонесущих грунтов под действием движителя разрушаются, поэтому в модели учитывалась необратимость пластических деформаций. Для учета сил сопротивления при взаимодействии стопы с грунтом вводится сила F_i, пропорциональная деформации грунта и сила вязкого трения R_i, пропорциональная скорости деформации

$$F_i = \begin{cases} c_z z_i U_i & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ k_{Cz} c_z z_i U_i & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \qquad (2)$$

$$R_i = \begin{cases} \mu_z \dot{z}_i U_i & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ 0 & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}, \qquad (3)$$

где c_z – жесткость грунта в нормальном направлении; μ_z – коэффициент вязкого сопротивления; $k_{Cz} = z_{i\max} / (z_{i\max} - h)$ – коэффициент, характеризующий увеличение жесткости грунта вследствие его пластической деформации; $z_{i\max}$ – максимальная деформация грунта; h – глубина следовой дорожки; U_i – единичная функция, описывающая состояние i-той ноги, принимающая лишь два значения: 1 в фазе опоры и 0 при переносе.

При исследовании компрессионного эффекта к силам F_i и R_i также добавлялась сила Q_i, действующая на стопу при отрыве от грунта. Природа этой силы пока недостаточно изучена. Очевидно, что она зависит от площади и физического состояния опорной поверхности. Практика показывает, что компрессионная сила существенно зависит от скорости стопы. Предполагается, что с увеличением глубины компрессионная сила будет возрастать из-за роста

давления внешней среды. При моделировании принималось, что сила Q пропорциональна степенной зависимости скорости отрыва стопы от грунта, также считалось, что сила действует только при обратном ходе стопы и только в зоне упругих деформаций грунта

$$Q_i = \begin{cases} 0 & при \quad \dot{z}_i \le 0 \\ \alpha\, Sp \left| z_i^{\beta} \right| U_i & при \quad \dot{z}_i > 0 \end{cases}. \qquad (4)$$

где α и β – коэффициенты, определяемые физическим состоянием опорной поверхности стопы и гидрофильными свойствами грунта; S – площадь стопы; p – давление внешней среды.

Уравнение поступательного движения корпуса вдоль оси Oz имеет вид

$$m\ddot{z} = N_1 + N_2 - G, \qquad (5)$$

где m и G – масса и отрицательная плавучесть шагающего аппарата, соответственно; $N_i = F_i + R_i + Q_i$ – нормальные реакции грунта под стопами.

Уравнения (1)–(5) образуют систему, определяющую вертикальное движение корпуса и стоп шагающей машины, а также опорные нормальные реакции грунта. Система уравнений решалась численно. При моделировании варьировалась вязкоупругие характеристики грунта, скорость его нагружения и коэффициенты, характеризующие компрессионный эффект. Были получены законы движения стоп $z_i(t)$ и центра масс корпуса $z(t)$, а также зависимости $N_i(t)$ нормальных реакций грунта. Полученные временные характеристики представлялись в функции от фазы шага $\varphi = \omega t$.

Моделирование показало, что характер колебаний в системе в зависимости от типа грунта и скорости нагружения существенно меняется [6]. На упругих грунтах, после смены стоп, наблюдаются затухающие малые колебания стопы на грунте. На вязкоупругих грунтах имеют место более существенные колебания стопы на грунте, которые происходят с частотой

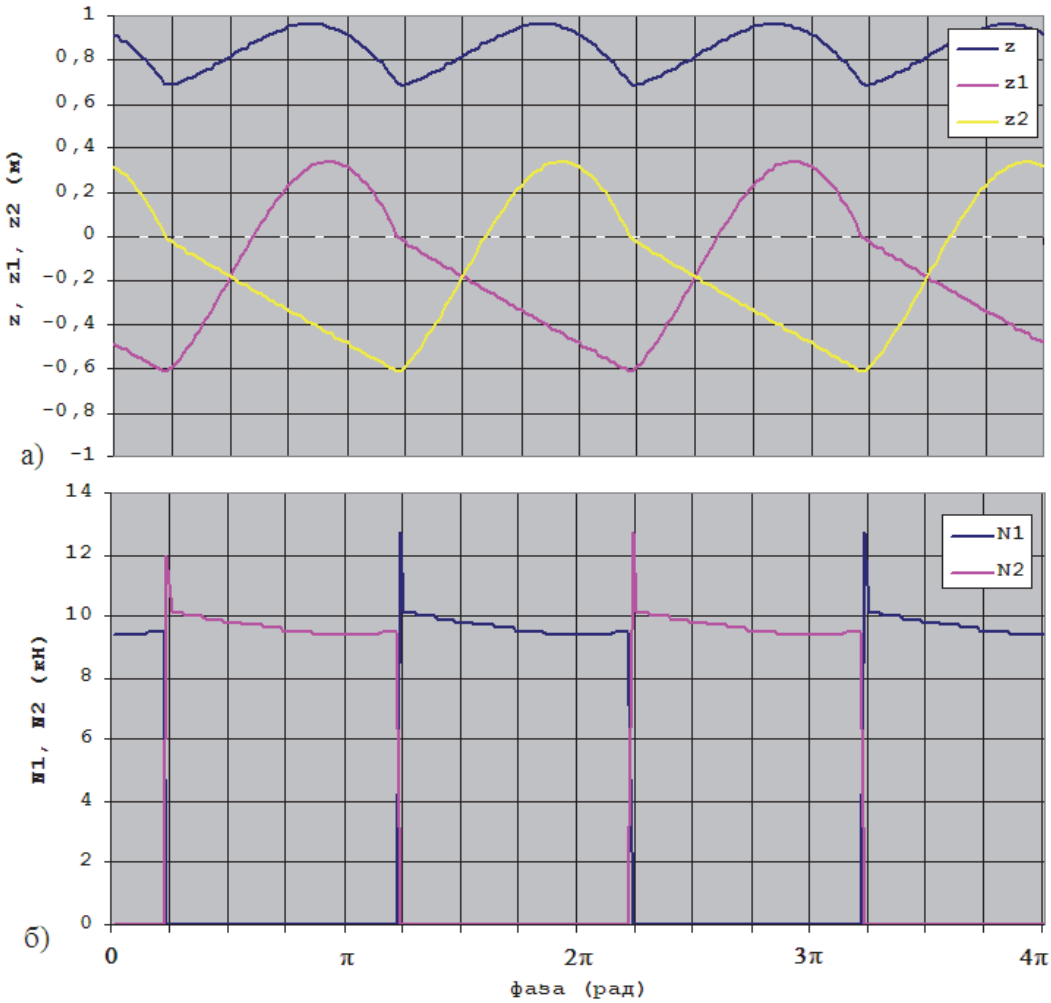


Рис. 2. Вертикальные перемещения стоп (кривые 1, 2) и центра масс (кривая 3) шагающего аппарата (а) и нормальные реакции грунта (б) для вязкого грунта с нулевой жесткостью (c_z=0; μ_z=100 кН·с/м)

того же порядка, что и частота шагания. На вязких грунтах стопа в течение полуцикла (шага) погружается в грунт, после смены стоп процесс повторяется с нулевого уровня. Во всех случаях имел место рост максимальных значений опорных реакций, в сравнении со статическими. При увеличении скорости нагружения значения опорных реакций возрастают.

Для водонасыщенных грунтов, как показывает анализ их реологических свойств, наблюдается промежуточный вариант между вторым и третьим рассмотренным случаем. На рис. 2, *а* и 3, *а* представлены зависимости $z(\varphi)$, $z_1(\varphi)$ и $z_2(\varphi)$ для шагающего аппарата массой 1000 кг при частоте шагания $\omega = 1$ рад/с, характерные для наиболее тяжелых случаев движения. В первом случае грунт имеет нулевую жесткость (плывун), во втором – имеет место большая компрессионная сила. Характер изменения опорных реакций для тех же грунтов показан на рис. 2, *б* и 3, *б*.

На плывунных грунтах (рис. 2) стопы шагающего аппарата постепенно, в течение полуцикла (шага), погружаются в грунт. При смене стоп происходит кратковременный рост опорных реакций. После переступания, если высота шага больше глубины погружения стопы, процесс повторяется с нулевого уровня. Это позволяет организовать курсовое движение шагающей машины без потери грунтовой проходимости даже на грунтах с нулевой жесткостью. У гусеничных и колесных машин, в случае грунта малой жесткости, движитель погружается в грунт вплоть до посадки днищем на грунт и полной потери грунтовой проходимости.

При больших значениях компрессионной силы (рис. 3) происходит значительный рост опорных реакций. Это приводит на слабых грунтах к увеличению глубины колеи и требует существенных дополнительных энергозатрат на прессование грунта. Вместе с тем, при достаточно большой высоте шага, курсовое движение возможно и в этом случае.

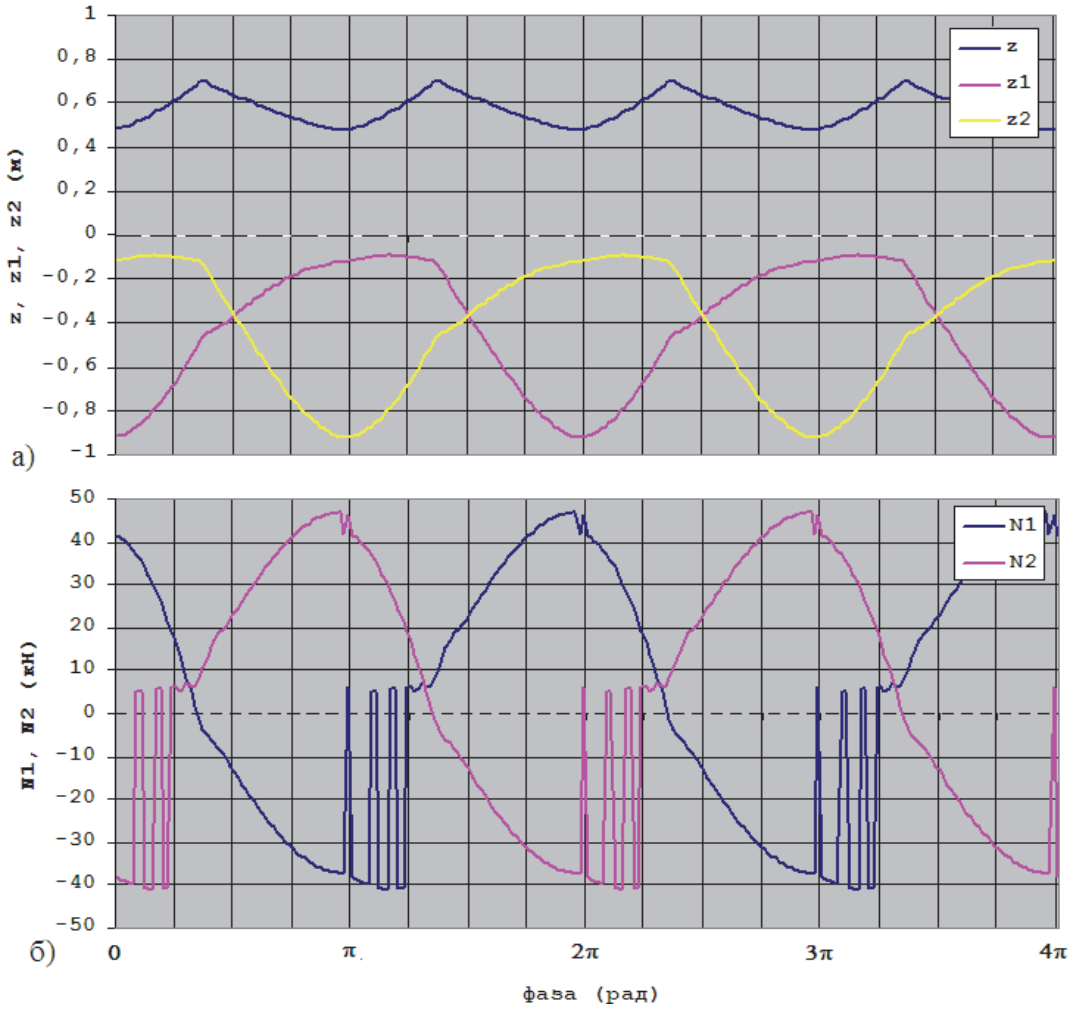


Рис. 3. Вертикальные перемещения стоп (кривые 1, 2) и центра масс (кривая 3) шагающего аппарата (а) и нормальные реакции грунта (б) для вязкоупругого грунта (c_z=50 кН/м; k_{Cz}=2; μ_z=10 кН·с/м) в случае большой компрессионной силы (Q_{max}/G=5)

Таким образом, на слабонесущих подводных грунтах, из-за динамичности процесса ходьбы, шагающие машины обладают в сравнении с колесными и гусеничными более высокими тягово-сцепными свойствами и проходимостью. Математическое описание процессов, происходящих при взаимодействии шагающего движителя с подводным грунтом, позволяет решить проблему проектирования основных узлов и систем подводных шагающих робототехнических систем, предназначенных для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернышев, В.В.* Исследование тягово-сцепных свойств шагающих машин на подводных грунтах с низкой несущей способностью // Технические проблемы освоения мирового океана: матер. V Всерос. науч.-техн. конф. / Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2013. – С. 177-181.

2. *Брискин, Е.С.* Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е.С. Брискин, В. В. Чернышев, В.В. Жога, А.В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. 2011. – № 9. – С. 27-31.

3. *Чернышев, В.В.* Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти / В.В. Чернышев // Безопасность жизнедеятельности. 2003. – №5. – С. 28-30.

4. Чернышев, В.В. Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твердых тел с упругодиссипативными связями / В.В. Чернышев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 9: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 11. – С. 32-35.

5. Чернышев, В.В. Пассивное подрессоривание в мобильных робототехнических системах с цикловыми механизмами шагания / В.В. Чернышев // Известия вузов. Машиностроение. 2003. – №1. – С. 31-39.

6. *Брискин, Е.С.* Моделирование динамики смены стоп шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Искусственный интеллект. 2009. – № 3. – С. 293-299.

УДК 62-503.5

С. Ф. Яцун, Л. Ю. Волкова, А. В. Ворочаев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАЗГОНА ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО ПРЫГАЮЩЕГО АППАРАТА

Юго-Западный государственный университет

teormeh@inbox.ru, mila180888@yandex.ru, sasha-vorochaev@yandex.ru

В работе предложена методика реализации прыжка четырехзвенным прыгающим аппаратом, разработана математическая модель его движения во время одного прыжка, исследованы режимы разгона устройства в зависимости от параметров робота и свойств среды.

Ключевые слова: прыгающий аппарат, позиционирование, разгон, отрыв, полет, приземление.

S. F. Jatsun, L. Yu. Volkova, A. V. Vorochaev

INVESTIGATION OF ACCELERATION MODES OF THE FOUR-LINK JUMPING DEVICE

South-West State University

The technique of realization of the jump four-link jumping device is offered, a mathematical model of its motion during a jump is developed, regimes of acceleration device depending on the parameters of the robot and the properties of the environment is investigated.

Keywords: jumping device, positioning, acceleration, lift-off, flight, landing.

Введение

Аппараты, перемещающиеся с отрывом от поверхности, также называемые прыгающими, являются особым классом устройств, имеющим свою терминологию. Под прыжком будем понимать быстрое, резкое перемещение тела, вызванное отталкиванием от точки опоры. Прыгающие устройства представляют собой многозвенные механизмы, отрыв от поверхности которых происходит за счет относительных движений звеньев [1-5]. Наиболее важными видами движения объектов во время прыжка являются: позиционирование, разгон, полет и приземление. Позиционирование представляет собой изменение положения звеньев друг относительно друга и относительно препятствия при нахождении объекта на поверхности. Разгон заключается в практически мгновенном приобретении аппаратом скорости, отрывающей его от поверхности. Полет характеризуется движением с отрывом от поверхности, а приземление заключается во взаимодействии устройства с поверхностью после полета.

Работа посвящена исследованию динамических режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата.

Описание объекта исследования

В работе представлен аппарат, который состоит из прыжкового и колесных модулей, как показано на рис. 1.

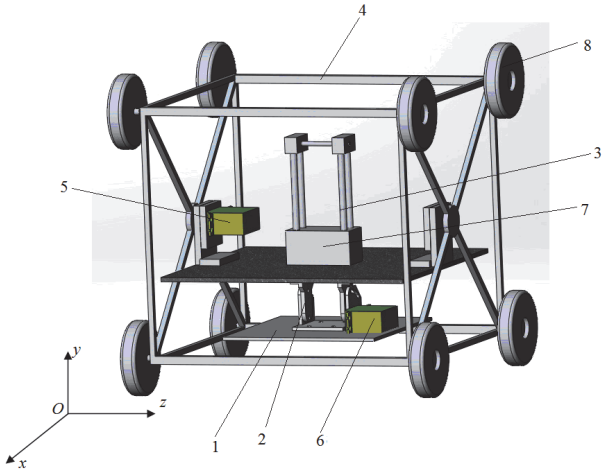


Рис. 1. Трехмерная модель прыгающего аппарата

Прыжковый модуль образован звеньями 1–4, причем звено 1 является стопой, звенья 2 и 3 образуют ногу, а звено 4 представляет собой корпус. На звеньях 4 и 2 установлены приводы вращательного движения 5 и 6 соответственно, которые обеспечивают поворот звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. На звене 2 также закреплен привод поступательного движения 7, позволяющий звеньям 2 и 3 перемещаться друг относительно друга. Корпус представляет собой каркас в форме параллелепипеда, в вершинах которого установлены колесные модули 8, каждый из которых состоит из колеса и привода, обеспечивающего вращение колеса или его стопорение. Движение объекта по достаточно ровной поверхности происходит за счет колес, а для преодоления препятствий используется прыжковый модуль [6-8].

Методика реализации прыжка

Для описания методики реализации прыжка введем абсолютную неподвижную систему координат *Oxyz*. Прыжок устройства осуществляется в вертикальной плоскости *Oxy* и представляет собой последовательность семи этапов *k*=1-7, характеризующихся определенными видами движения звеньев (рис. 2) [9].

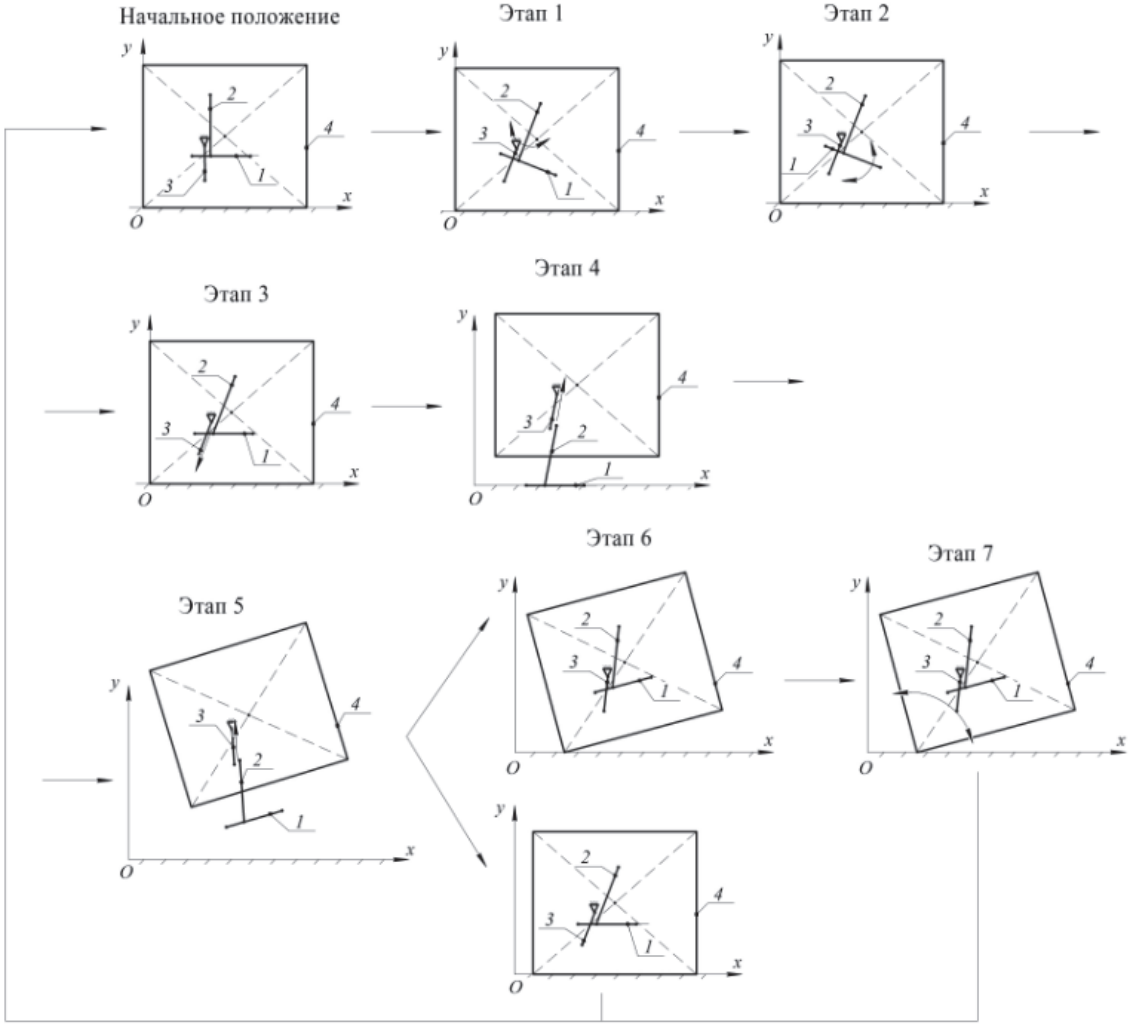


Рис. 2. Методика реализации прыжка

Во время этапов 1 – 3 происходит позиционирование объекта для совершения прыжка, при этом корпус робота взаимодействует с поверхностью, а разгонный модуль, состоящий из звеньев 1–3, меняет свое положение относительно корпуса для реализации прыжка под требуемым углом к горизонту.

На этапе 1 звенья 1, 2 и 3 поворачиваются внутри корпуса таким образом, чтобы звено 2 расположилось под требуемым углом к горизонту. Второй этап характеризуется поворотом звена 1 до тех пор, пока оно не станет параллельным стороне корпуса, точки которой взаимодействуют с поверхностью. Во время третьего этапа звенья 1 и 2 выдвигаются из корпуса до взаимодействия звена 1 с поверхностью. Четвертый этап соответствует разгону устройства, во время которого звено 1 находится на поверхности, а звенья 3 и 4 приобретают скорость, достаточную для отрыва робота от поверхности. Этап 5 описывается движением робота с отрывом от поверхности, при этом наблюдается втягивание звеньев 1 и 2 в корпус, а этапы 6 и 7 – приземлением объекта на корпус и его позиционированием до тех пор, пока корпус не займет устойчивого положения на поверхности. Причем, этап 7 может наблюдаться только в том случае, если аппарат неустойчив при приземлении, в противном случае после этапа 6 объект готов к реализации следующего прыжка.

При выбранных кинематической схеме и методике прыжка для позиционирования объекта применяются пары вращательного движения, что позволяет разгонному модулю точно позиционироваться относительно поверхности, а для разгона и отрыва от поверхности – пара поступательного движения, за счет чего устройству не сообщается дополнительная угловая скорость в момент отрыва от поверхности, что, в свою очередь, обеспечивает минимизацию нежелательного вращения аппарата во время полета. Приземление устройства на корпус позволяет избежать ударных нагрузок на звенья стопы и ноги, следовательно, данные звенья могут изготавливаться достаточно легкими по сравнению с корпусом и втягиваться в последний во время полета тем же приводом, посредством которого осуществляется разгон. Важной особенностью является то, что за счет вращательной пары, соединяющей звенья ноги и корпуса, объект может позиционироваться для реализации следующего прыжка независимо от того, на какую сторону корпуса произойдет приземление.

Математическая модель движения прыгающего аппарата

Для разработки математической модели прыгающего аппарата рассмотрим схему, показанную на рис. 3.

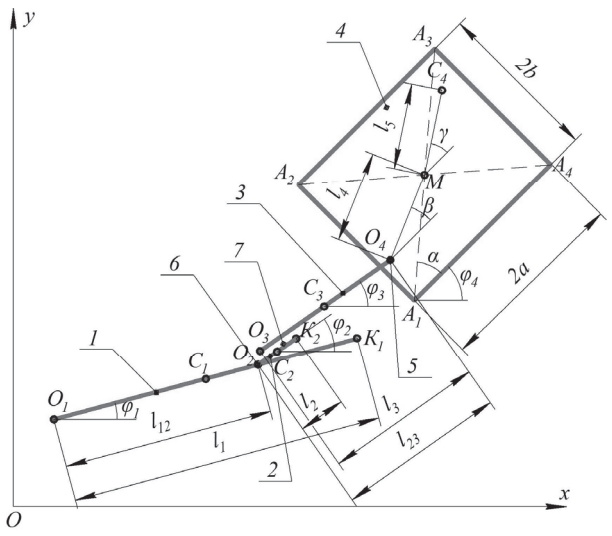


Рис. 3. Схема четырехзвенного прыгающего аппарата

Будем считать, что все звенья устройства являются абсолютно твердыми телами, причем звенья 1 – 3 представляют собой стержни длинами l_i, i=1 – 3, а звено 4 – прямоугольник $A_1A_2A_3A_4$ размерами 2ax2b, причем $b = atg\alpha$. Массы m_i, i=1-3, звеньев сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i. Центр масс корпуса (звено 4) находится в точке C_4, смещенной относительно центра симметрии прямоугольника (точки M) на расстояние l_5 под углом γ. Длина ноги определяется расстоянием l_{23} между точками O_2 и O_4, положение последней в корпусе задается расстоянием l_4 и углом β.

Движение каждого звена аппарата описывается тремя обобщенными координатами $x_{Ci}, y_{Ci}, \varphi_i$, i=1-4, где x_{Ci}, y_{Ci} - координаты центра масс звена, φ_i - угол наклона звена к положительному направлению горизонтальной оси, для корпуса угол φ_4 представляет собой угол, под которым сторона корпуса A_1A_4 наклонена к оси Ox. Таким образом, общее число координат, определяющих положение робота, равно W=12. В то же время на механизм наложены связи двух типов:

1. постоянно действующие стационарные связи s, определяемые геометрическими соотношениями, вытекающими из кинематической схемы робота;

2. периодически возникающие стационарные неудерживающие связи l, обусловленные последовательностью этапов прыжка и взаимодействием с опорной поверхностью.

Таким образом, число степеней свободы определяется по формуле

$$n = W - s - l. \quad (1)$$

К постоянно действующим относятся связи, определяемые из кинематической схемы аппарата, их число равно s=7. Первые 6 связей описывают соотношения между проекциями положений центров масс звеньев 2 – 4 и теми же величинами первого звена, а седьмая связь обусловлена тем, что звенья 2 и 3 представляют собой поступательную пару.

Размерность n вектора q обобщенных координат является переменной и варьируется в диапазоне n=0–5. В общем виде вектор обобщенных координат можно записать следующим образом

$$\overline{q} = \left(q_1 \ldots q_n\right)^T. \quad (2)$$

Во время реализации одного прыжка устройство может взаимодействовать с поверхностью звеном 1 или 4 или двигаться с отрывом от поверхности, что было рассмотрено ранее. Это приводит к тому, что на этапе 4, когда с поверхностью контактирует звено 1, для описания положения устройства в системе $Oxyz$ без учета периодически действующих связей l используется вектор обобщенных координат

$$\overline{q} = \left(x_{C1} \quad y_{C1} \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_4\right)^T. \quad (3)$$

На тех этапах прыжка, когда на поверхности находится корпус робота или наблюдается полет объекта, для задания его положения также при отсутствии связей l используются обобщенные координаты x_{C4}, y_{C4} центра масс четвертого звена и углы φ_1, φ_2, φ_4 поворота звеньев 1, 2 и 4, вектор q принимает следующий вид

$$\overline{q} = \left(x_{C4} \quad y_{C4} \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_4\right)^T. \quad (4)$$

Для удобства анализа систему дифференциальных уравнений движения прыгающего аппарата можно представить в матричной форме

$$A_{km}(g)\ddot{g} + B_{km}(g)D(\dot{g})\dot{g} + C_{km}(g)\dot{g}_6\dot{g}_8 = Q_{km}, \quad (5)$$

где k =1-7 – номер этапа, m=1-4 – номер подэтапа.

При этом вместо вектора q обобщенных координат введем обобщенную матрицу-столбец g, представляющую собой матрицу восьми координат, при помощи которых можно описать движение объекта на любом этапе прыжка: g_1=x_{C1}, g_2=y_{C1}, g_3=x_{C4}, g_4=y_{C4} – координаты центров масс звеньев 1 и 4 в абсолютной системе, g_5=φ_1, g_6=φ_2 и g_7=φ_4 – углы поворота соответствующих звеньев, g_8=l_{23} – длина ноги устройства. Матрица g может быть записана следующим образом:

$$g = \left(g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad g_4 \quad g_5 \quad g_6 \quad g_7 \quad g_8\right)^T. \quad (6)$$

Матрицы $A_{km}(g)$, $B_{km}(g)$, $C_{km}(g)$, Q_{km} определяются на каждом подэтапе m всех этапов k движения робота в соответствии с разработанной методикой реализации прыжка.

В соответствии с предложенной методикой прыжка взаимодействие аппарата с поверхностью может происходить звеном 1 или 4, при этом возникают силы трения и нормальной реакции. Положим, что прыжок устройства осуществляется с горизонтальной шероховатой абсолютно твердой поверхности, совпадающей с осью Ox.

Примем допущение, что в случае если звено 1 или 4 лежит на поверхности, то в двух точках опоры будут возникать нормальные реакции, а сила трения только в одной из них (в противном случае задача становится статически неопределимой). При точечном контакте звена с поверхностью эта точка представляет собой центр приведения сил трения и нормальной реакции. Возникающая сила трения описывается моделью Кулона [10]. При нахождении одного из звеньев 1 или 4 на поверхности возможны несколько вариантов движения объекта:

1. Звено неподвижно лежит на поверхности и взаимодействует с ней в двух точках.

2. Звено взаимодействует с поверхностью в двух точках и перемещается вдоль оси Ox.

3. Звено контактирует с поверхностью в одной точке, которая неподвижна.

4. Звено взаимодействует с поверхностью в одной точке, которая движется вдоль оси Ox.

В качестве объекта моделирования рассматривается прыгающий аппарат, масса корпуса которого сосредоточена в центре симметрии прямоугольника (l_5=0) и существенно больше массы остальных звеньев $m_4 / m_{i=1-3} = 7$. Задачей моделирования является исследование динамических режимов разгона и выявление области параметров объекта, при которых прыжок происходит без проскальзывания и опрокидывания перед отрывом от поверхности.

Режимы разгона аппарата при закреплении ноги в центре масс корпуса

По приведенным на рис. 4 графикам можно выделить две области: 1 – звено 1 неподвижно находится на поверхности, 2 – звено 1 скользит по поверхности, взаимодействуя с ней в двух точках. Причем видно, что при всех значениях коэффициента трения есть область, в которой независимо от угла φ_2^0 и ускорения $\ddot{l}_{23}^4$, с которым звенья 3 и 4 разгоняются до отрыва от поверхности, звено 1 будет перемещаться по поверхности, причем с ростом коэффициента трения эта область сужается. Затем, по мере увеличения φ_2^0 уменьшается значение $\ddot{l}_{23}^4$, определяющее границу между областями 1 и 2, это означает, что при меньшем ускорении во время четвертого этапа возможен прыжок без проскальзывания во время разгона.

Данный вид диаграмм объясняется тем, что при малых ускорениях разгона значения силы, разгоняющей звенья 3 и 4, и силы тяжести звеньев 3 и 4 имеют одинаковый порядок, влияние силы тяжести существенно и приводит к уменьшению угла, под которым действует суммарная сила, складывающаяся из разгоняющей силы и сил тяжести, что, в свою очередь, обусловливает увеличение горизонтальной проекции общей силы, а, значит, и силы трения в точке O_2. С ростом угла φ_2^0 угол действия общей силы увеличивается, что позволяет при меньшем ускорении $\ddot{l}_{23}^4$ звену 1 оставаться неподвижным на поверхности. При угле φ_2^0=1,265 независимо от значений f и $\ddot{l}_{23}^4$ звено 1 всегда будет неподвижно.

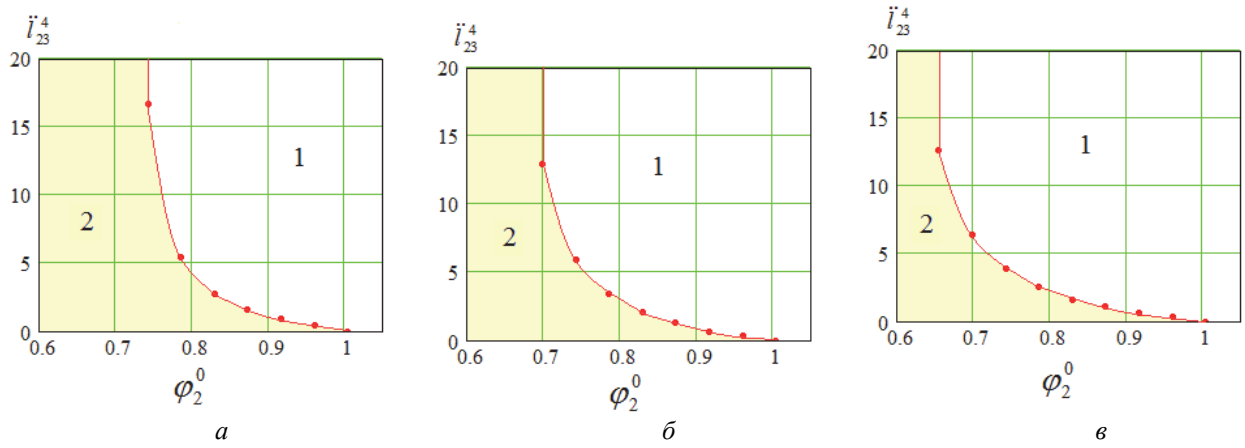


Рис. 4. Диаграммы режимов разгона аппарата при закреплении ноги в центре масс корпуса, две точки контакта с поверхностью:
1 – без проскальзывания, 2 – с проскальзыванием, а – f=0,7, б – f=0,8, в – f=0,9

Также установлено, что с увеличением расстояния l_{23}^0, на котором осуществляется разгон, и соотношения масс звеньев $m_4 / m_{i=1-3}$, область значений φ_2^0 и $\ddot{l}_{23}^4$, при которых наблюдается проскальзывание, возрастает.

Режимы разгона аппарата при закреплении ноги вне центра масс корпуса

Рассмотрим случай, когда точка O_4 закрепления ноги в корпусе аппарата не совпадает с центром симметрии последнего, ее положение определяется расстоянием l_4 и углом β. Результаты моделирования приведены на рис. 5, где выделены следующие области: 1 – область, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью в двух точках без проскальзывания, 2 – область, в которой при двух точках контакта звена 1 с поверхностью наблюдается проскальзывание, 3 – область, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью в одной точке без проскальзывания, 4 – область, в которой наблюдается проскальзывание точки, в которой звено 1 взаимодействует с поверхностью.

По диаграммам рис. 5, *а* видно, что при малом коэффициенте трения существуют две области, в которых взаимодействие звена 1 с поверхностью происходит в одной или двух точках с проскальзыванием. Причем, опрокидывание звена 1 наблюдается при углах $\varphi_2^0 < \beta < (\varphi_2^0 + \pi)$, когда линия действия силы F_{23} проходит через звено 1 между точками O_1 и K_1 вне центра масс корпуса, граница между областями 2 и 4 представляет собой параболу, выпуклость которой

направлена вниз, абсцисса вершины параболы равна $\varphi_2^0+\pi/2$. При большем коэффициенте трения проскальзывания звена 1 по поверхности при одной точке контакта не происходит, область 4 сменяется областью 3, граница которой остается неизменной при вариации коэффициента трения, кроме этой области еще существуют 1 и 2, область 1 отделяет области 2 и 3 (рис. 5, *б–д*). Граница между зонами 1 и 2 представляет собой кривую, выпуклость которой направлена вниз, минимум функции наблюдается при $\beta=\varphi_2^0+\pi/2$. В отличие от границы между областями 1 и 3, данная граница изменяется с ростом коэффициента трения: расширяется диапазон значений угла β и уменьшаются значения ускорения $\ddot{l}_{23}^4$, при которых разгон аппарата будет происходить без проскальзывания и опрокидывания.

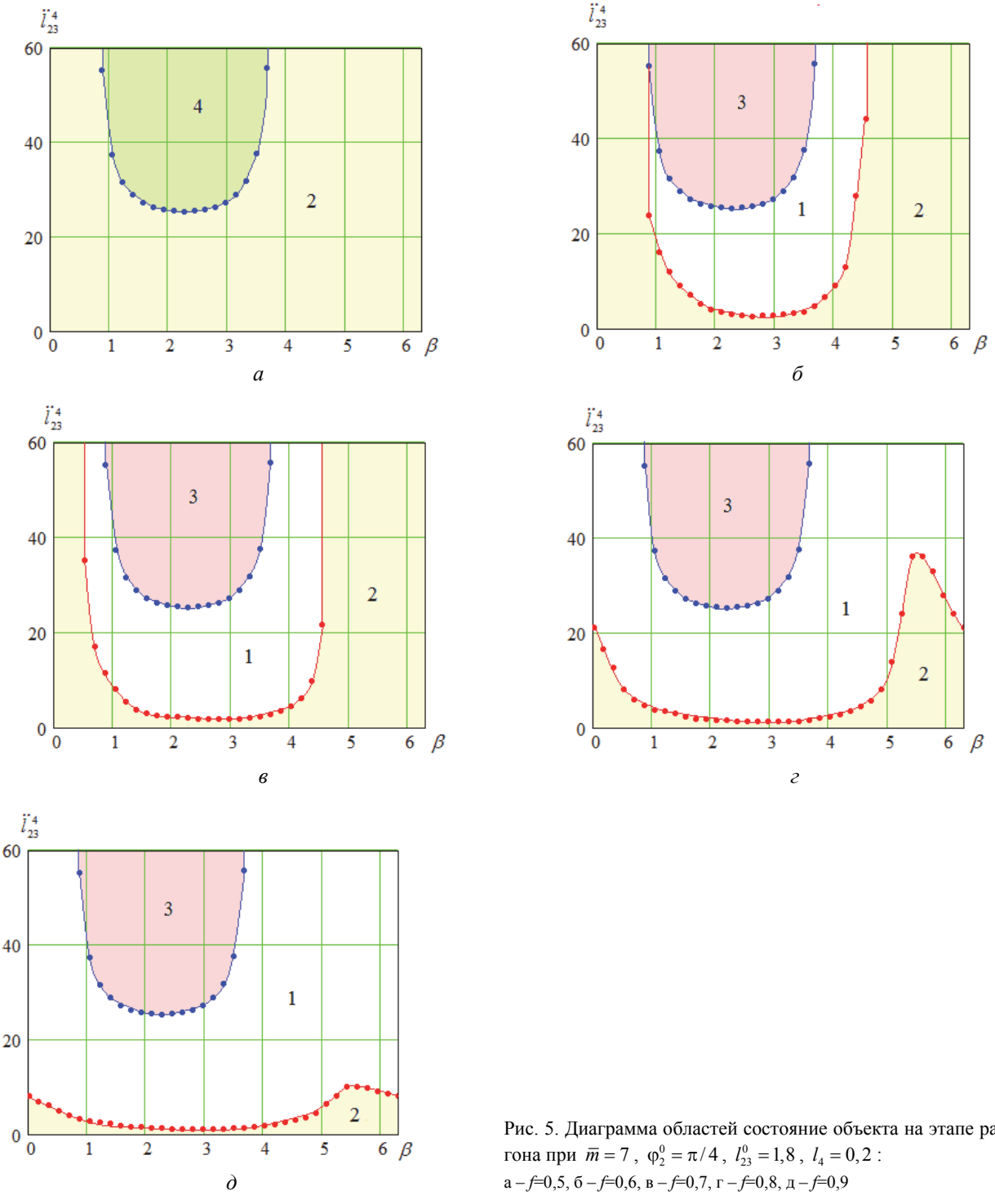


Рис. 5. Диаграмма областей состояние объекта на этапе разгона при $\bar{m}=7$, $\varphi_2^0=\pi/4$, $l_{23}^0=1{,}8$, $l_4=0{,}2$:
а – *f*=0,5, б – *f*=0,6, в – *f*=0,7, г – *f*=0,8, д – *f*=0,9

При f=0,8 – 0,9 во всем диапазоне β=0 – 2π существуют такие значения ускорения $\ddot{l}_{23}^{4}$, при которых объект будет находиться в области 1, причем у границы между областями 1 и 2 появляется максимум при $\beta=\varphi_2^0+3\pi/2$, когда линия действия разгоняющей силы наиболее удалена от центра масс корпуса и проходит вне звена 1, ускорения $\ddot{l}_{23}^{4}$, при которых осуществляется переход из зоны с проскальзыванием в зону без проскальзывания, наибольшие.

С увеличением угла φ_2^0, отношения $m_4 / m_{i=1-3}$, расстояния l_4 наблюдается сужение области, в которой разгон происходит без проскальзывания и опрокидывания.

Выводы

В работе предложена методика реализации прыжка мобильным четырехзвенным аппаратом, выделены этапы прыжка и условия перехода из одного этапа в другой. Разработаны математическая модель движения аппарата во время реализации прыжка и модель взаимодействия с поверхностью, позволившие исследовать режимы разгона устройства.

Выявлено, что при закреплении звена 3 в центре масс корпуса, совмещенном с центром симметрии последнего, разгон прыгающего робота может происходить в двух режимах: с проскальзыванием и без него. Причем, область разгона без проскальзывания, ограниченная углом наклона звеньев ноги к поверхности и развиваемым на этапе разгона ускорением, расширяется с ростом коэффициента трения, отношения массы корпуса к массе других звеньев и уменьшением наибольшего значения длины ноги.

Для внецентренного закрепления звена 3 в корпусе выявлены четыре динамических режима разгона аппарата: разгон с проскальзыванием и без него при взаимодействии звена 1 с поверхностью в одной или двух точках, обусловленные массогабаритными параметрами робота, свойствами поверхности и параметрами этапов позиционирования и разгона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Carl´esi, N.* Nonlinear Model Predictive Running Control of Kangaroo Robot: a One-Leg Planar Underactuated Hopping Robot [Text] / N. Carl´esi, A. Chemori // Intelligent Robots and Systems: Proc. of the IEEE/RSJ International Conference. – Taiwan, 2010. - P. 3634-3639.

2. *Dubowsky, S.* Hopping mobility concept for search and rescue robots [Text] / S. Dubowsky, S. Kesner, J. Plante, P. Boston // Journal of Industrial Robot. - 2008. - Vol. 35. - N. 3. - P. 238-245.

3. *Hutter, M.* Planar Hopping with a Robotic Leg [Text] / M. Hutter, D. Remy, R Siegwart. - Eidgen□ssische Technische Hochschule Zurich, 2011. – 92 p.

4. *Hyon, S.* Development of a biologically inspired hopping robot—Kenken [Text] / S. Hyon, T. Mita // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Stanford, 2002. - P. 3984–3991.

5. *Kovac, M.* Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics [Text]: Ph.D. dissertation / Mirco Kovac. - Ecole Polytechnique F´ed´erale de Lausanne, 2010. – 194 p.

6. *Яцун, С.Ф.* Прыгающий робот – перспективное транспортное средство [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: материалы Международной научно-практической конференции. - Волгоград, 2013. – С. 291-292.

7. *Яцун, С.Ф.* Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Изв. РАН. ТиСУ. - 2013. - № 4. - С. 137–149.

8. *Волкова, Л.Ю.* Изучение влияния положения точки закрепления ноги прыгающего робота в корпусе на характер движения устройства [Текст] // Л.Ю. Волкова, С.Ф. Яцун // Нелинейная динамика. - 2013. - Т. 9. - № 2. - С. 327–342.

9. *Яцун, С.Ф.* Моделирование прыжка четырехзвенного робота [Текст] / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, В.В. Серебровский, Л.Ю. Волкова // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 10. - С. 308-315.

10. *Болотник, Н. Н.* Динамика управляемых движений вибрационных систем [Текст] / Н. Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман, С.Ф. Яцун // Изв. РАН.ТиСУ. - 2006. - №5. - С. 157–167.