

УДК 621.865.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА*

В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов

Получены кинематические зависимости, позволяющие находить положения центра масс схвата мобильного манипулятора-трипода в пределах зоны обслуживания. Определены геометрические характеристики рабочей зоны манипулятора-трипода. Разработан алгоритм перемещения схвата и построена рабочая зона его перемещения. Предложены теоретические зависимости для определения зоны обслуживания при условии исключения попадания механизма в мертвое положение.

Ключевые слова: манипулятор параллельной структуры, кинематический анализ, зона обслуживания.

Введение

Современное сельскохозяйственное производство характеризуется большим разнообразием технологических операций, что обуславливает разработку и создание широкой номенклатуры средств механизации.

Наращивание энергетических мощностей и развитие сельскохозяйственных машин позволяет механизировать основные процессы в растениеводстве, но оставляет ручной труд при выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Следует также учитывать сезонность проведения работ, в результате чего существенная доля мобильных агрегатов длительное время не используется, снижая экономические показатели предприятия.

Зарубежный опыт развития сельского хозяйства показывает принципиальную возможность роботизации целого ряда технологических процессов в сельском хозяйстве, где присутствует большая доля монотонного ручного труда. В промышленно развитых странах ведутся интенсивные работы по созданию различных робототехнических систем для механизации трудоемких операций.

Поэтому проведение теоретических исследований и опытно-конструкторских работ, позволяющих создавать машины, повышающие производительность труда, является актуальной задачей.

Целью данной работы явилось определение траекторий перемещения рабочего устройства, образующих зону обслуживания манипулятора-трипода, с учетом поворота опорного основания. Кроме того, для сравнения кинематических характеристик стрелового манипулятора и манипулятора-трипода предложены зависимости, определяющие углы поворотов в пространстве характерного звена переменной длины пространственного механизма.

Кинематика манипулятора-трипода

Основным исполнительным устройством робота или иного технического средства, выполняющего погрузочно-разгрузочные и другие технологические операции, является манипулятор. Одна из его главных характеристик, обеспечивающих экономическую эффективность, – это отношение массы груза к собственной

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 13-08-00387 и № 12-08-00301-а.

массе конструкции. Традиционные стреловые манипуляторы имеют разомкнутую кинематическую цепь, включающую в себя механизмы поворота и изменения вылета стрелы, которые обладают существенной металлоемкостью. Снижения собственной массы манипулятора без ухудшения прочностных характеристик можно достичь, используя пространственные структуры, в частности l -координатные механизмы, получившие в настоящее время достаточно широкое распространение [1–5].

На рисунке 1 представлен l -координатный манипулятор, образованный тремя стержнями в виде силовых гидроцилиндров, концы которых с одной стороны соединены специальным сферическим шарниром, а с другой – располагаются на опорном основании. На сферическом шарнире может устанавливаться пассивное или активное грузозахватное устройство либо иной рабочий орган для выполнения технологических операций. Такое расположение гидроцилиндров с соединяющим их сферическим шарниром представляет собой пространственную структуру в виде треугольной пирамиды, не имеющей избыточных связей. Для этого механизма соблюдается условие статической определимости, состоящее в том, что в одной точке могут пересекаться не более трех стержней [6]. Кроме того, для данной схемы характерны высокая степень унификации и возможность агрегатно-модульного построения.

Опорное основание способно поворачиваться с помощью гидроцилиндра, что расширяет эксплуатационные показатели манипулятора. Конструкция манипулятора обеспечивает четыре степени подвижности рабочего устройства, что позволяет выполнять максимальное количество технологических операций [7]. Манипулятор может устанавливаться на любом

транспортном средстве, например на колесном самоходном шасси (см. рис. 1).

Одним из основных технических показателей погрузочного манипулятора является рабочее пространство, охватывающее возможные траектории перемещения сферического шарнира с грузозахватным устройством.

Решение прямой задачи кинематики о положениях манипулятора позволяет найти геометрические характеристики рабочего пространства при конструктивных ограничениях на обобщенные координаты [8]:

$$L_{i \min} < L_i < L_{i \max}, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

где L – длина гидроцилиндра; i – его порядковый номер.

Для определения траектории перемещения центра масс сферического шарнира с грузозахватным устройством (точка M , рис. 2) выбраны две системы координат: неподвижная $OXYZ$, связанная с транспортным средством, на котором расположен манипулятор, и подвижная $O_1X_1Y_1Z_1$, связанная с поворотным опорным основанием манипулятора.

Уравнения связи между координатами точки M , длинами цилиндров и координатами точек их крепления в подвижной системе координат имеют вид [9]

$$\begin{cases} X_{1M}^2 + Y_{1M}^2 + (Z_{1M} - Z_{1A})^2 = L_1^2; \\ (X_{1M} - X_B)^2 + Y_{1M}^2 + Z_{1M}^2 = L_2^2; \\ (X_{1M} - X_C)^2 + Y_{1M}^2 + Z_{1M}^2 = L_3^2, \end{cases} \quad (1)$$

где X_{1M} , Y_{1M} , Z_{1M} – координаты точки M в подвижной системе координат; L_1 , L_2 , L_3 – текущие значения длин звеньев манипулятора; $X_B = -X_C$; Z_{1A} – постоянные координаты точек крепления звеньев манипулятора.

Решая систему (1), получим зависимости координат точки $M(X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M})$ от длин



Рис. 1. Манипулятор-трипод на самоходном шасси Т-16М

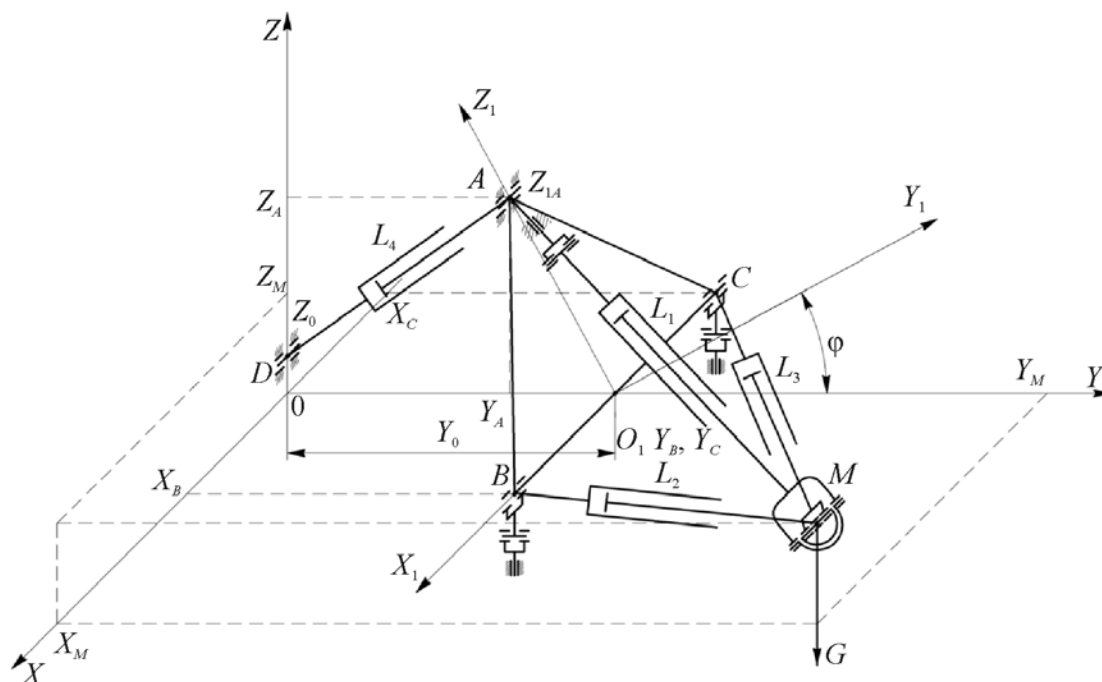


Рис. 2. Расчетная схема манипулятора-трипода:

A, B, C, D – шарнирные опоры гидроцилиндров; L_1, L_2, L_3 – длины гидроцилиндров, образующих пространственный механизм; L_4 – длина гидроцилиндра поворота опорного основания;

G – сила тяжести перемещаемого груза; φ – угол поворота опорного основания; X_M, Y_M, Z_M – проекции сферического шарнира M на неподвижные оси координат; $Y_A, Z_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C$ – проекции шарнирных опор гидроцилиндров на неподвижные оси координат; Y_0 – координата, определяющая центр подвижной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ относительно неподвижной $OXYZ$

звеньев L_1, L_2, L_3 и координат точек крепления основания манипулятора:

$$\begin{cases} X_{1M} = \frac{L_3^2 - L_2^2}{4X_B}; \\ Y_{1M} = \left[L_1^2 - \frac{(L_3^2 - L_2^2)^2}{16X_B^2} - \frac{(-L_1^2 + 0,5L_2^2 + 0,5L_3^2 - X_B^2 - Z_{1A}^2)^2}{4Z_{1A}^2} \right]^{\frac{1}{2}}; \\ Z_{1M} = \frac{-L_1^2 + 0,5L_2^2 + 0,5L_3^2 - X_B^2 + Z_{1A}^2}{2Z_{1A}}. \end{cases} \quad (2)$$

Переход от подвижной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ к неподвижной $OXYZ$ определяется зависимостями [10]

$$\begin{cases} X_M = X_0 + \alpha_{11}X_{1M} + \alpha_{21}Y_{1M} + \alpha_{31}Z_{1M}; \\ Y_M = Y_0 + \alpha_{12}X_{1M} + \alpha_{22}Y_{1M} + \alpha_{32}Z_{1M}; \\ Z_M = Z_0 + \alpha_{13}X_{1M} + \alpha_{23}Y_{1M} + \alpha_{33}Z_{1M}, \end{cases} \quad (3)$$

где X_M, Y_M, Z_M – координаты точки M в неподвижной системе координат; X_0, Y_0, Z_0 – проекции вектора, определяющего положение начала подвижной системы координат в неподвижной системе координат; α_{sk} – проекция единичного вектора $\vec{i}_{1s}$ подвижной системы координат на направление единичного вектора $\vec{i}_k$ неподвижной системы координат, которая определяется скалярным произведением

$$\alpha_{sk} = \vec{i}_{1s} \cdot \vec{i}_k, \quad s, k = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Для расчетной схемы (см. рис. 2)

$$X_0 = 0; Y_0 = Y_0; Z_0 = 0;$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix} \quad \text{– матрица направляющих косинусов.}$$

Тогда выражения (2) для координат точки M в неподвижной системе координат принимают вид

$$\begin{cases} X_M = \frac{L_3^2 - L_2^2}{4X_B}, \\ Y_M = Y_0 + \left(L_1^2 - \frac{(L_3^2 - L_2^2)^2}{16X_B^2} - \frac{(A - X_B^2 - Z_{1A}^2)^2}{4Z_{1A}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \cos\varphi - \left(\frac{A - X_B^2 + Z_{1A}^2}{2Z_{1A}} \right) \cdot \sin\varphi; \\ Z_M = \left(L_1^2 - \frac{(L_3^2 - L_2^2)^2}{16X_B^2} - \frac{(A - X_B^2 - Z_{1A}^2)^2}{4Z_{1A}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \sin\varphi + \left(\frac{A - X_B^2 + Z_{1A}^2}{2Z_{1A}} \right) \cdot \cos\varphi, \end{cases} \quad (5)$$

где $A = -L_1^2 + 0,5L_2^2 + 0,5L_3^2$.

Полученные зависимости полностью определяют теоретическую область перемещений точки M в пространстве, т. е. рабочую зону обслуживания манипулятора.

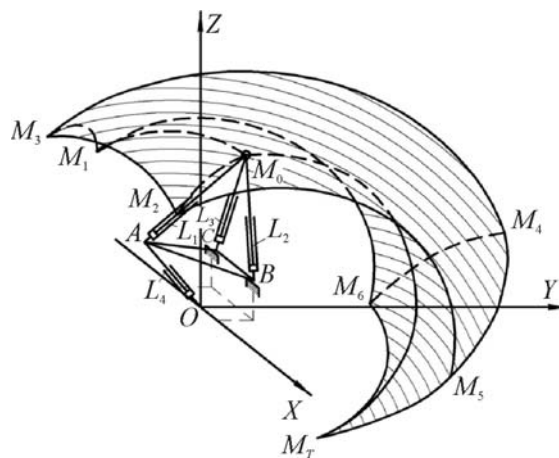


Рис. 3. Рабочая зона манипулятора-трипода:
пределы изменения размеров исполнительных
звеньев манипулятора –
 $1300 \leq L_{1,2,3} \leq 930$ (мм), $630 \leq L_4 \leq 950$ (мм)

Таблица

Построение траекторий, формирующих зону обслуживания

Кривая	Интервалы изменения длин гидроцилиндров	Кривая	Интервалы изменения длин гидроцилиндров
M_0M_1	$L_{1\min} = \text{const}$ $L_{2\min} \rightarrow L_{2\max}$ $L_{3\min} = \text{const}$ $L_{4\min} = \text{const}$	M_1M_6	$L_{1\min} = \text{const}$ $L_{2\max} = \text{const}$ $L_{3\min} = \text{const}$ $L_{4\min} \rightarrow L_{4\max}$
M_0M_2	$L_{1\min} = \text{const}$ $L_{2\min} = \text{const}$ $L_{3\min} \rightarrow L_{3\max}$ $L_{4\min} = \text{const}$	M_2M_5	$L_{1\min} = \text{const}$ $L_{2\min} = \text{const}$ $L_{3\max} = \text{const}$ $L_{4\min} \rightarrow L_{4\max}$
M_1M_3	$L_{1\min} \rightarrow L_{1\max}$ $L_{2\max} = \text{const}$ $L_{3\min} \rightarrow L_{3\max}$ $L_{4\min} = \text{const}$	M_4M_5	$L_{1\max} = \text{const}$ $L_{2\max} \rightarrow L_{2\min}$ $L_{3\max} = \text{const}$ $L_{4\max} = \text{const}$
M_2M_3	$L_{1\min} \rightarrow L_{1\max}$ $L_{2\min} \rightarrow L_{2\max}$ $L_{3\max} = \text{const}$ $L_{4\min} = \text{const}$	M_4M_6	$L_{1\max} = \text{const}$ $L_{2\max} = \text{const}$ $L_{3\max} \rightarrow L_{3\min}$ $L_{4\max} = \text{const}$
M_3M_4	$L_{1\max} = \text{const}$ $L_{2\max} = \text{const}$ $L_{3\max} = \text{const}$ $L_{4\min} \rightarrow L_{4\max}$	M_6M_7	$L_{1\max} = \text{const}$ $L_{2\max} \rightarrow L_{2\min}$ $L_{3\min} = \text{const}$ $L_{4\max} = \text{const}$
M_0M_7	$L_{1\min} \rightarrow L_{1\max}$ $L_{2\min} = \text{const}$ $L_{3\min} = \text{const}$ $L_{4\min} \rightarrow L_{4\max}$	M_5M_7	$L_{1\max} = \text{const}$ $L_{2\min} = \text{const}$ $L_{3\max} \rightarrow L_{3\min}$ $L_{4\max} = \text{const}$

Построение зоны обслуживания

Траектории точек перемещения захвата образуют шесть сферических поверхностей (рис. 3) с центрами вращения в точках O, A, B, C . При пересечении этих поверхностей образуется фигура $M_0 \dots M_7$. Точки M_n ($n = 0, 1, \dots, 7$) характеризуют крайние положения схвата манипулятора, где происходит комбинация движений штоков гидроцилиндров пространственного механизма.

Пределы поворота звеньев в шарнирах продиктованы условиями выполняемого технологического процесса и ограничены конструктивными особенностями шарниров и опорного основания. Шарниры A, B, C (см. рис. 2) обеспечивают поворот корпусов гидроцилиндров относительно собственных осей, параллельных осям $O_1 Y_1$ и $O_1 X_1$ подвижной системы координат, на 360° и $\pm 135^\circ$ соответственно.

Расширение рабочей зоны может быть получено за счет увеличения угла поворота опорного основания, а также перемещения транспортного средства. В таблице показан порядок получения кривых перемещения точки M_0 , сочетание которых формирует зону обслуживания. Начальное положение точки M_0 при этом соответствует минимальным значениям длин гидроцилиндров.

Ориентация верхнего гидроцилиндра звена манипулятора-трипода

Для удобства оценки кинематических параметров манипулятора-трипода и сравнения их с кинематическими параметрами традиционных манипуляторов целесообразно полученные значения координат точки M выразить через углы поворота верхнего цилиндра L_1 (см. рис. 1), который можно считать грузонесущей стрелой, имеющей переменную длину. Кинематические характеристики стреловых манипуляторов характеризуются углами поворота грузонесущей стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Обозначим углы поворота этой стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно через ψ и θ и изобразим верхний цилиндр L_1 в виде отрезка AM в системе координат $OXYZ$ (рис. 4). Рассматриваемый отрезок имеет переменную длину и может занимать различные положения в пространстве в зависимости от сочетания длин L_1, L_2, L_3, L_4 . Точка A движется по окружности, расположенной в плоскости ZOY , а точка M со-

вершает сложное движение, представляющее собой сумму переносного вращательного движения вместе с рамой ABC в той же плоскости и относительного пространственного движения в любом направлении в рабочей зоне обслуживания. Из рисунка 4 видно, что искомые углы ψ и θ можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}\psi &= \arcsin \frac{Z_M - Z_A}{L_1}; \\ \theta &= \arctg \frac{-X_M}{Y_M - Y_A}.\end{aligned}\quad (6)$$

Подставив значения X_M, Y_M, Z_M в уравнения (6) и проведя соответствующие преобразования, получим

$$\begin{aligned}\psi &= \arcsin \left[\left(L_1^2 - \frac{(L_3^2 - L_2^2)^2}{16X_B^2} - \frac{(A - X_B^2 - Z_{1A}^2)^2}{4Z_{1A}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \right. \\ &\quad \times \sin \varphi + \left(\frac{A - X_B^2 + Z_{1A}^2}{2Z_{1A}} \right) \times \\ &\quad \times \cos \varphi - Z_{1A} \cdot \cos \varphi \left. \right] / L_1; \\ \theta &= \arctg \left(-\frac{L_3^2 - L_2^2}{4X_B} \right) / \\ &\quad / \left(L_1^2 - \frac{(L_3^2 - L_2^2)^2}{16X_B^2} - \frac{(A - X_B^2 - Z_{1A}^2)^2}{4Z_{1A}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ &\quad \times \cos \varphi - \left(\frac{A - X_B^2 + Z_{1A}^2}{2Z_{1A}} \right) \cdot \sin \varphi + Z_{1A} \cdot \sin \varphi.\end{aligned}$$

По этим формулам можно определить углы поворота гидроцилиндра L_1 как аналога грузонесущей стрелы. Например, если угол пово-

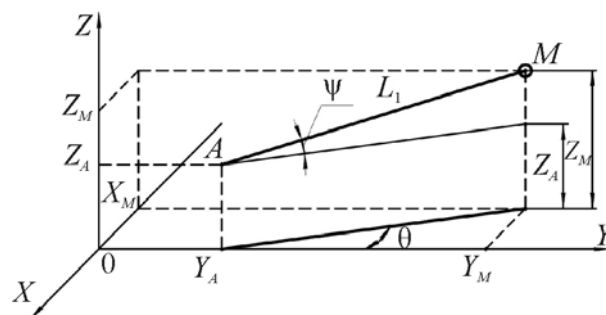


Рис. 4. Определение углов поворота гидроцилиндра L_1

рота гидроцилиндра L_1 по горизонту $\theta = 50^\circ$ и угол поворота по горизонту грузонесущей стрелы традиционного манипулятора также равен 50° , то их характеристики можно считать одинаковыми.

Заключение

Получены зависимости, позволяющие определить положение грузозахватного устройства относительно опорного основания и транспортного средства, на котором расположен манипулятор-трипод. Зависимости исключают неоднозначность положения I -координатного механизма или попадания его в мертвое положение, возникающее в случае, когда входящие в них подкоренные выражения имеют отрицательные значения.

Рассмотрено построение кривых перемещения грузозахватного устройства, совокупность которых образует зону обслуживания манипулятора. В манипуляторе-трипode верхний гидроцилиндр рассматривается как аналог грузонесущей стрелы манипулятора с разомкнутой кинематической связью. Для сравнительной оценки обеих схем манипуляторов найдены зависимости, определяющие положение этого гидроцилиндра в пространстве.

Список литературы

1. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
2. Бушуев В.В., Подзоров П.В. Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой // СТИН. 2004. № 4. С. 3–10.
3. Глазунов В.А., Дугин Е.Б., Кистанов В.А., Ву Нгок Бик. Оптимизация параметров механизмов параллельной структуры на основе моделирования рабочего пространства // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 6. С. 12–16.
4. Глазунов В.А., Новикова Н.Н., Рашоян Г.В., Нгуен Минь Тхань. Оптимизация параметров механизма параллельной структуры для агрессивных сред при учете особых положений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 2. С. 102–109.
5. Ширинкин М.А. Структурный анализ пространственных механизмов параллельной структуры с четырьмя и шестью степенями свободы // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 2. С. 17–21.
6. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов : изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.
7. Герасун В.М., Рогачев А.Ф., Несмиянов И.А. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических цепях манипуляторов // Труды XXI Международной науч.-техн. конференции «Экстремальная робототехника». СПб.: Политехника-сервис, 2010. С. 169–172.
8. Герасун В.М., Пындак В.И., Несмиянов И.А. и др. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 44. 24 с.
9. Герасун В.М., Жога В.В., Несмиянов И.А. и др. Кинематическое исследование манипулятора-трипода // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной науч.-практ. конференции. СПб.: 2012. С. 251–258.
10. Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А., Слоущ А.В. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 560 с.
11. Корендесев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. и др. Манипуляционные системы роботов / Под общ. ред. А.И. Корендесева. – М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.
12. Герасун В.М., Несмиянов И.А. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 24–28.

Материал поступил в редакцию 17.04.13.

ГЕРАСУН

Владимир Морисович

E-mail: gerasun@ro.ru

Тел.: (8442) 41-18-49

Доктор технических наук, профессор кафедры «Механика» Волгоградского государственного аграрного университета. Сфера научных интересов – динамика машин, синтез механизмов, системы управления. Автор более 130 публикаций.

ЖОГА

Виктор Викторович

E-mail: dtm@vstu.ru

Тел.: (8442) 24-80-99

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» Волгоградского государственного технического университета. Сфера научных интересов – динамика и управление движением шагающих аппаратов, системы управления манипуляторами, мобильные роботы, алгоритмы управления и стабилизации, энергетическая эффективность машин. Автор более 185 публикаций.

НЕСМИЯНОВ

Иван Алексеевич

E-mail:

ivan_nesmiyanov@mail.ru,

nesmiyanov@ro.ru

Тел.: (8442) 41-12-39

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Механика» Волгоградского государственного аграрного университета. Сфера научных интересов – манипуляторы, синтез программных движений, эргатические системы. Автор более 120 публикаций.

ВОРОБЬЕВА

Наталья Сергеевна

E-mail: vorobva@inbox.ru

Тел.: (8442) 41-18-49

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика» Волгоградского государственного аграрного университета. Сфера научных интересов – кинематика машин, синтез механизмов, оптимальное движение, системы управления. Автор более 40 публикаций.

ДЯШКИН-ТИТОВ

Виктор Владимирович

E-mail: c_43.52.00@mail.ru

Тел.: (8442) 41-18-49

Аспирант кафедры «Механика» Волгоградского государственного аграрного университета. Сфера научных интересов – манипуляторы, синтез программных движений, кинематика машин, оптимальное движение. Автор более 20 публикаций.