

# Машиностроение и машиноведение

УДК 621.865.8+62-503.5

doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-3-14

## Методы управления манипуляторами на базе трипода при выполнении технологических операций

**Н.С. Воробьева**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»

## Methods of Manipulators Controlling Based on a Tripod When Performing Technological Operations

**N.S. Vorobyeva**

Volgograd State Agricultural University

Манипуляторы параллельно-последовательной (гибридной) структуры нашли широкое применение в различных отраслях экономики, что позволяет учесть недостатки и совместить достоинства манипуляционных систем параллельной и последовательной структур. Исследования технологических процессов показали, что их можно выполнять с помощью манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, особенности которых до конца не изучены. При этом важное значение имеет выбор системы и алгоритмов управления, зависящих от особенностей технологических операций. Управление манипулятором является комплексной задачей, включающей в себя позиционирование рабочего органа, планирование и синтез траекторий, перемещение рабочего органа по заданной траектории. Каждый технологический процесс можно описать набором специальных траекторий, которые можно заранее внести в базу моделей управления. На примере конкретных технологических операций формализованы траектории рабочего органа, с помощью методик кинематического и динамического синтезов разработаны аналитические алгоритмы его перемещения по этим траекториям. Теоретические исследования апробированы на экспериментальном образце манипулятора гибридной структуры с актуаторами SKF САНВ-21. Ошибка позиционирования составляла не более 2 %, а отклонение фактических перемещений от заданных при наличии полезной нагрузки на захватном устройстве не превышало 5 %.

**Ключевые слова:** манипуляторы на базе трипода, параллельно-последовательная структура, управляемое захватное устройство, методы управления

Parallel-serial (hybrid) structure manipulators are widely used in various sectors of the economy, which makes it possible to take into account the disadvantages and combine the advantages of manipulation systems of parallel and serial structures. Studies of technological processes have shown that they can be performed using manipulators of a parallel-serial structure based on a tripod, the features of which are not fully understood. Whereas it is important to choose a control system and control algorithms that depend on the characteristics of technological operations performed. Manipulator controlling is a complex task that includes positioning of the effector, planning and synthesis of trajectories, setting and mov-

ing the effector along a given trajectory. Each technological process can be described by a set of special trajectories, which can be entered in advance into the database of control models. The article formalizes the trajectories of the effector on the example of specific technological operations. Using the techniques of kinematic and dynamic synthesis, analytical algorithms for its movement along these trajectories have been developed. Theoretical studies were tested on the experimental sample of a hybrid structure manipulator with SKF САНВ-21 actuators. The experiments showed that positioning errors did not exceed 2%, and the deviation of the actual movements from the specified ones in the presence of a payload on the gripper did not exceed 5 %.

**Keywords:** manipulators based on a tripod, parallel-serial structure, controlled capture, control methods

Для решения проблем автоматизации промышленности, сельскохозяйственного и перерабатывающего производств применяют манипуляционные роботы. Основными конструкциями таких роботов являются последовательная и параллельная кинематические архитектуры, которые имеют как достоинства, так и недостатки [1–3].

В связи с этим эффективно использовать манипуляторы параллельно-последовательной (гибридной) структуры, сочетающие в себе достоинства двух структур: повышенные показатели по грузоподъемности, точности, быстродействию, а также достижения в области достаточно большой протяженности [4, 5].

Ученые Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, занимавшиеся исследованиями параллельных и параллельно-последовательных структурных схем, получили значительные результаты в этой области. Разработана полная классификация этих механизмов, созданы методы их анализа и синтеза, исследованы их динамические свойства. Все это нашло отражение в работах А.Ф. Крайнева, В.А. Глазунова, В.М. Базрова, А.И. Корендяева, Г.В. Рашояна, Б.Л. Саламандры, Ю.А. Семенова, Л.И. Тывеса, С.В. Хейло, Г.С. Филиппова и др. [5–8]. Вместе с тем проблемы проектирования и расчета параметров, моделирования кинематики и динамики манипуляторов подобной структуры окончательно не сформированы.

Цель статьи — разработка методов синтеза программных движений гибридных манипуляторов на базе трипода с использованием аналитических алгоритмов управления, обеспечивающих выполнение конкретного технологического процесса.

Рассмотрим особенности управления манипуляторами параллельно-последовательной структуры на примере технологических операций, применяемых в сельском хозяйстве. Так

как сельское хозяйство характеризуется разнообразием работ, использование узкоспециализированной техники не всегда экономически оправдано.

Перспективным развитием сельскохозяйственной техники является создание многофункциональных агрегатов на основе базовых конструкций, вследствие чего представляется эффективным использовать в различных технологических процессах манипуляторы параллельно-последовательной структуры на базе трипода.

Специалисты Волгоградского государственного аграрного университета много лет исследуют такие механизмы. Разработаны, запатентованы и изготовлены экспериментальные образцы манипуляционных механизмов на базе трипода с тремя–шестью степенями свободы характерной токи  $M$  рабочего органа (РО) и разными видами движения основания  $ABC$ :

- с неподвижным (рис. 1, *a*) — манипулятор-трипод промышленного назначения (патент РФ 26511781);
- с вращательным (рис. 1, *б*) — манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры (патент РФ 2616493);
- с плоскопараллельным (рис. 1, *в*) — робот-погрузчик сеток с овощами (патент РФ 22247);
- со сложным (рис. 1, *г*) — аварийно-спасательная машина (патент РФ 2476372).

Эти технические решения можно использовать для погрузочно-разгрузочных работ пакезированных грузов; перемещения легких штучных грузов с одного конвейера на другой или с конвейера в контейнер (бункер); для сбора, фертигации и опрыскивания плодов; сортировки плодов овощей и фруктов; чеканки плодовых деревьев и кустарников при условии применения сменного РО и для работы в экстремальных условиях.

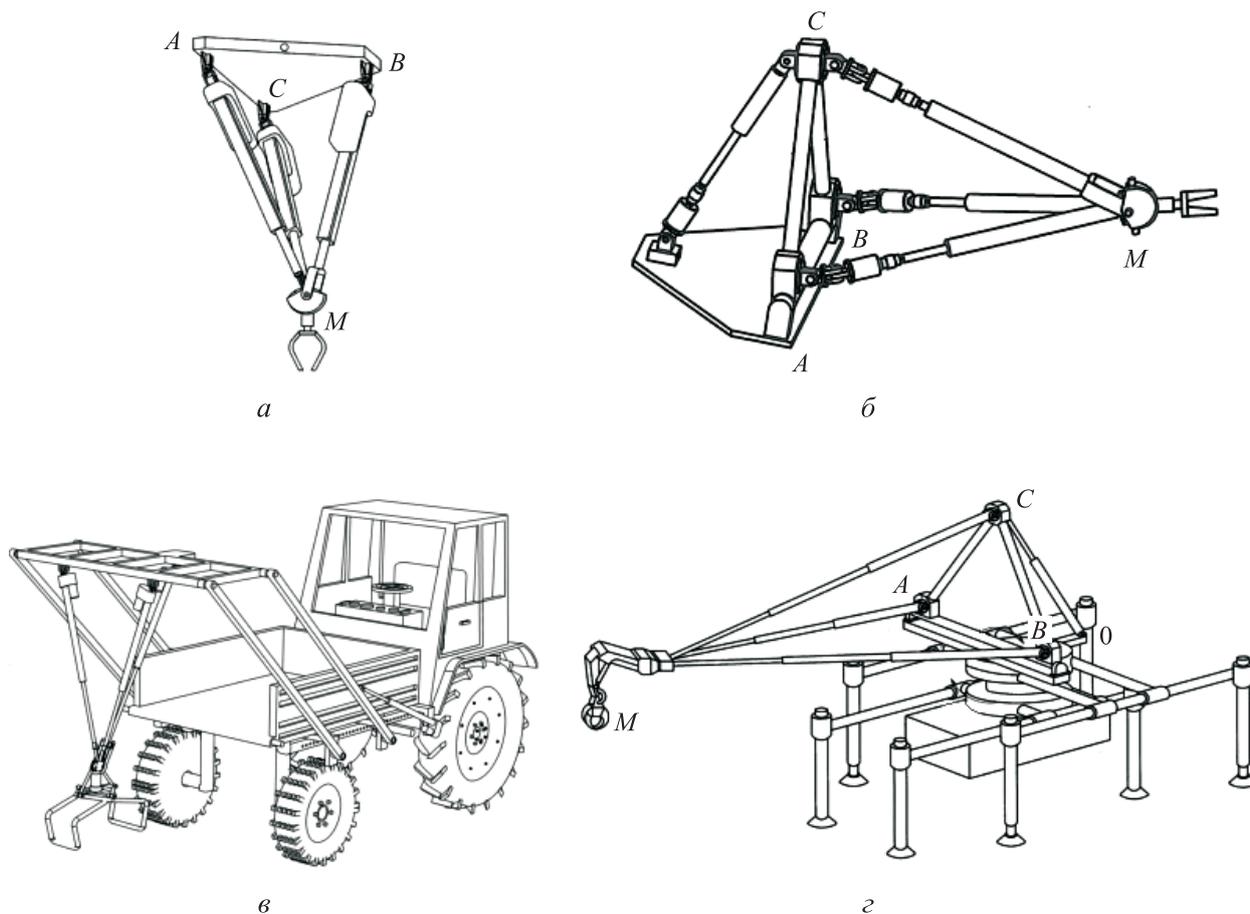


Рис. 1. Схемы манипуляционных механизмов на базе трипода с неподвижным (а), вращательным (б), плоскопараллельным (в) и сложным движением основания (г)

Важным этапом разработки роботов-манипуляторов является выбор системы и методов управления, которые зависят от особенностей технологических операций. Траектория РО служит одним из задающих воздействий для управления приводами манипуляционного механизма.

Технологические процессы в сельскохозяйственном производстве имеют свои особенности и зачастую протекают в недетерминированных условиях. Например, начальная и конечная точки позиционирования РО манипулятора не всегда являются постоянными. В зависимости от технологического процесса движение РО может происходить по прямой или кусочно-линейной траектории, дуге окружности, параболе или комбинированной траектории, состоящей из нескольких участков.

Схема обрезки винограда, где в качестве манипулятора для робота-чеканщика применен манипулятор-трипод с трехступенным управляемым захватным устройством (см. рис. 1, а) приведена на рис. 2, а. Схема обрезки лоз с од-

ной стороны шпалеры изображена на рис. 2, б, где в точках 1 и 2 происходит срез лоз куста винограда.

Комбинированные траектории можно разбить на несколько элементарных участков и при их описании использовать простые функции, а каждый технологический процесс описать набором специальных траекторий, которые можно записать в базу моделей управления. Аналитические алгоритмы управления рассмотрим на примере манипуляционного механизма с наклонным основанием (см. рис. 1, б).

Манипулятор-трипод с захватным устройством (рис. 3) состоит из трех исполнительных звеньев в виде электрических актуаторов с линейными приводами. С одного конца звенья  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  закреплены на поворотном треугольном основании-платформе ABC, с другого соединены в точке M и смонтированы на сферическом шарнире с пятью степенями подвижности.

Так как звено  $l_4$  с помощью линейного актуатора может изменять свою длину, угол поворота  $\varphi$  основания ABC также имеет переменные

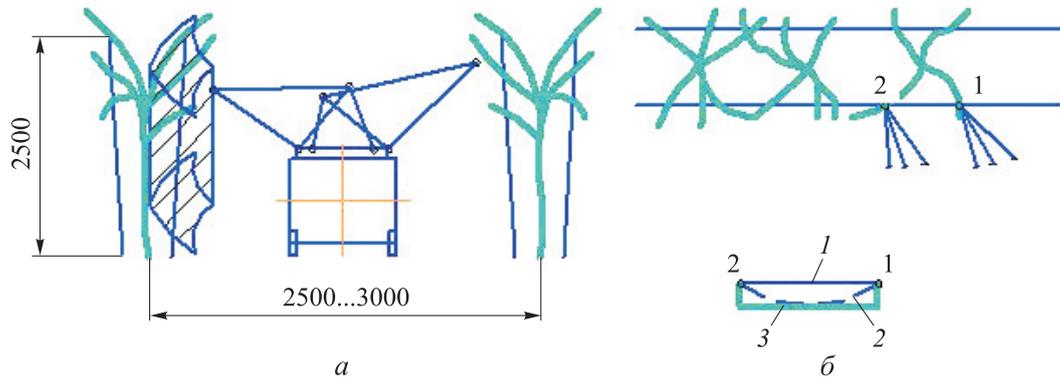


Рис. 2. Схемы обрезки винограда манипулятором-триподом с трехстепенным управляемым хватным устройством (а) и обрезки лоз с одной стороны шпалеры (б):  
1, 2, 3 — перемещение РО по прямой, изогнутой в виде параболы и ломаной кривой соответственно

значения. Манипулятор-трипод дополнен управляемым хватным устройством с тремя степенями свободы, которое прикреплено к шарниру и состоит из трех последовательно расположенных между собой шарниров с вращательными кинематическими парами пятого класса.

Манипуляционная схема с наклонным основанием и дополнительно установленным за-

хватным устройством позволяют увеличить параметры манипулятивности и расширить угол сервиса [9].

В результате манипулятор-трипод с хватным устройством представляет собой пространственный механизм параллельно-последовательной структуры и имеет семь степеней подвижности. Обобщенными координатами манипулятора-трипода являются следующие

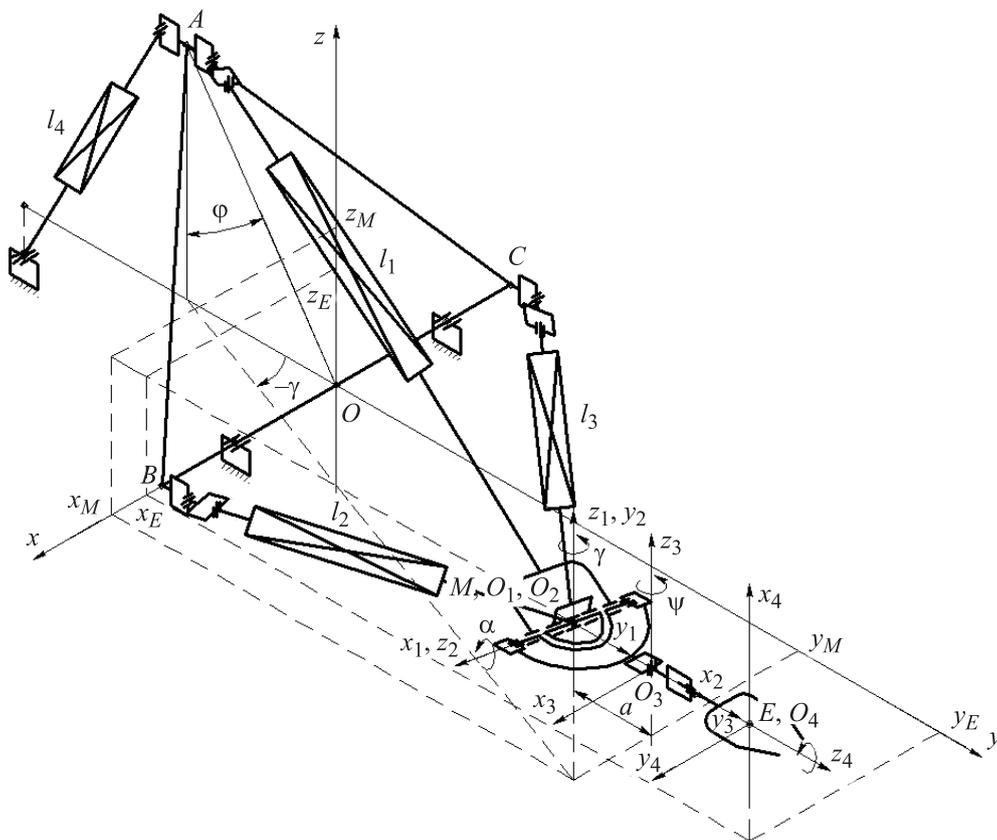


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора-трипода с хватным устройством

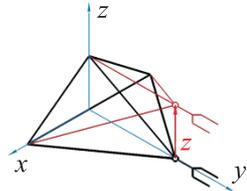
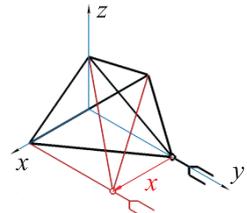
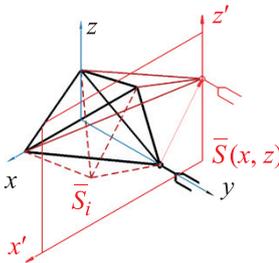
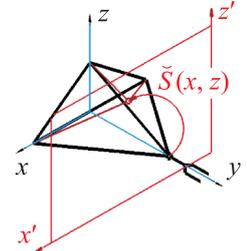
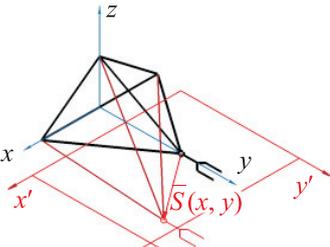
параметры в функции времени  $t$ : длины исполнительных звеньев руки  $l_k(t)$ ,  $k = 1, 2, 3$ ; угол  $\varphi(t)$  наклона поворотного основания; углы относительных поворотов  $\alpha(t)$ ,  $\psi(t)$  звеньев захватного устройства и угол поворота кисти  $\beta(t)$ . Значения углов определяют параметры манипулятивности манипулятора-трипода (см. рис. 3).

Для определения пространственного положения захвата манипулятора введены пять

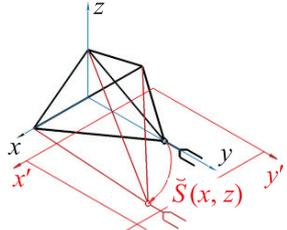
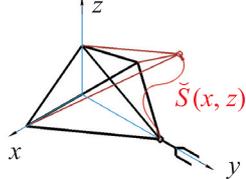
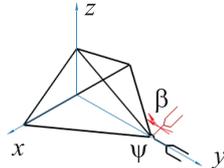
систем координат: абсолютная  $Oxyz$ , связанная с неподвижным основанием, и подвижные  $O_i x_i y_i z_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), соответствующие каждому звену манипулятора (см. рис. 3).

Большинство технологических операций, в том числе в сельском хозяйстве, можно выполнить с помощью конкретных перемещений РО с параметрами обобщенных координат манипуляторов, указанных в таблице.

**Основные перемещения РО манипулятора**

Описание перемещения РО	Схема перемещения РО
Перемещение РО из исходного положения в положение начала выполнения технологического процесса	-
Вертикальное поступательное прямолинейное движение РО вдоль оси $z$ с не вращающимся захватным устройством: $\alpha = \text{const}$ , $\psi = \text{const}$ , $\beta = 0$ или $\beta(t)$ , $x_E = \text{const}$ , $x_M = \text{const}$ , $y_E = \text{const}$ , $y_M = \text{const}$ , $q_5 = z_M(t)$	
Горизонтальное поступательное прямолинейное движение РО вдоль оси $x$ с не вращающимся захватным устройством: $\psi(t) = -\gamma(t)$ , $\alpha = \text{const}$ , $\beta = 0$ или $\beta(t)$ , $x_E = \text{const}$ , $y_E(t)$ , $z_E = \text{const}$ , $x_M = \text{const}$ , $y_M(t)$ , $z_M = \text{const}$	
Прямолинейное движение РО $\bar{S}(x, z)$ под углом в вертикальной плоскости $x'z'$ при неизменной конфигурации манипулятора	
Движение РО по заданной траектории $\check{S}(x, z)$ в вертикальной плоскости $x'z'$ при неизменной конфигурации манипулятора	
Прямолинейное движение РО $\bar{S}(x, y)$ под углом в горизонтальной плоскости $x'y'$ при неизменной конфигурации манипулятора	

## Окончание таблицы

Описание перемещения РО	Схема перемещения РО
Движение РО по заданной траектории $\tilde{S}(x, y)$ в горизонтальной плоскости $x'y'$ при неизменной конфигурации манипулятора	
Движение РО по произвольной заданной траектории $\tilde{S}(x, y, z)$ при неизменной конфигурации манипулятора с тремя управляемыми степенями свободы	
Ориентация в пространстве манипулятора при неподвижной точке крепления РО к манипулятору последовательной структуры	
Замена РО	-

Программные перемещения роботизированного параллельно-последовательного манипулятора с захватным устройством можно разбить на два этапа. На первом реализуются перемещения манипулятора-трипода при его позиционировании. От системы управления не требуется отработки какой-либо траектории РО манипулятора и обеспечения законов перемещения его приводных звеньев во времени, она должна гарантировать подход РО к объекту манипулирования с заданной ориентацией. Параметры манипулятора постоянны и известны, полезная нагрузка отсутствует.

На втором этапе перемещения манипулятора-трипода определяются непосредственной реализацией заданной технологической операцией. Система управления должна обеспечивать желаемые скорости и ускорения РО вдоль заданной программной траектории при изменяющихся параметрах полезной нагрузки.

На первом этапе необходимо решить задачу позиционирования манипулятора-трипода: определить обобщенные координаты  $l_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ),  $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $\psi$  и  $\beta$  при заданном программном положении РО. Положение РО определяется конечными координатами  $(x_E, y_E, z_E)$  характерной точки  $E$  захватного устройства в абсолютной системе координат  $Oxyz$  и направляющих коси-

нусов  $\alpha_{pq}$  подвижной системы координат  $O_4x_4y_4z_4$  относительно абсолютной  $Oxyz$  (см. рис. 3).

Для этого необходимо решить прямую задачу для трипода — определить декартовы координаты точки  $M(x_M, y_M, z_M)$  в абсолютной системе координат  $Oxyz$  — и обратную задачу для захватного устройства — найти обобщенные координаты углов  $\alpha$ ,  $\psi$  и  $\beta$ . Решение этой задачи носит оптимизационный характер [9].

На втором этапе следует определить законы изменения обобщенных координат манипуляционного механизма, удовлетворяющие заданным граничным условиям. Возможно несколько вариантов решения задачи методами кинематического и динамического синтезов.

Один из тривиальных способов решения этой задачи — выбор для каждой обобщенной координаты известного закона изменения ускорения: прямоугольного, линейного, синусоидального, полиномиального и др. Такой способ решения задачи управления можно использовать, если на траектории РО нет препятствий, так как траектория характерной точки  $M$  заранее неизвестна.

Закон изменения обобщенных координат определим в постановке слабого терминального управления. Считаем, что для каждого исполнительного звена известны контуры управле-

ния, замкнутые по обобщенным координатам  $l_k(t)$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ .

В этом случае решение задачи сводится к нахождению законов формирования задающих воздействий  $l_k(t)$  для исполнительных приводов, обеспечивающих перемещение РО в заданное положение. Требования по точности управления предъявляются только к конечной точке, не накладывая ограничений на траекторию характерной точки, которая заранее неизвестна.

Принимаем, что на траектории РО отклонения от конечного состояния исполнительных звеньев

$$\Delta l_k(t) = l_k^0 - l_k(t)$$

изменяются по дифференциальному уравнению

$$\Delta \ddot{l}_k(t) + a_{k1} \dot{\Delta l}_k(t) + a_{k2} \Delta \dot{l}_k(t) + a_{k3} \Delta l_k(t) = 0, \quad (1)$$

где  $l_k^0$  — конечное значение обобщенных координат исполнительных звеньев;  $a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}$  — постоянные положительные числа.

Уравнение (1) позволяет определить законы движения РО без скачков ускорений в начальной и конечной точках траектории [10]. Закон изменения длин звеньев от времени является программным:

$$\ddot{l}_k^*(t) = -a_{k1} \dot{l}_k(t) - a_{k2} \dot{l}_k(t) + a_{k3} [l_k^0 - l_k(t)]. \quad (2)$$

Обратная связь в контурах управления приводными двигателями осуществляется по переменным  $l_k(t)$ ,  $\dot{l}_k(t)$  и  $\ddot{l}_k(t)$ . Значения этих переменных используют при вычислении выражений, входящих в состав формулы (2). Законы формирования стабилизации углов  $\psi(t)$  и  $\alpha(t)$  формируются по такой же методике, угол  $\beta$  не изменяется.

Чтобы реализовать конкретные технологические процессы, необходимо перемещать РО манипулятора-трипода по заданной программной траектории с заданной ориентацией РО. На этом этапе траекторию исполнительного звена привода заменяют набором специальных траекторий (сплайнов), в связи с чем рассмотрены два метода кинематического синтеза, основанных на дискретизации траектории.

Определение законов изменения длин актуаторов и углов звеньев захватного устройства осуществляется следующим образом: заданную траекторию точки  $E$  разбивают на  $n$  участков, определяют конфигурацию манипулятора в каждой точке, т. е. находят значения обобщенных координат  $l_k(t_i)$ ,  $\alpha(t_i)$  и  $\psi(t_i)$ .

При использовании первого метода кинематического синтеза необходимо решить две подзадачи: рассчитать коэффициенты сплайна и провести аппроксимацию значений функции в заданные моменты времени [11]. Чтобы выполнялись требования по границам, необходимо проинтерполировать полиномами четвертого порядка первый и последний отрезки траектории:

$$\theta_i(\tau) = A_{i4}\tau^4 + A_{i3}\tau^3 + A_{i2}\tau^2 + A_{i1}\tau + A_{i0}, \quad (3)$$

где  $\theta_i(\tau)$  — обобщенная координата манипулятора-трипода, представляющая собой функцию времени  $\tau$  на  $i$ -м участке изменения функции;  $\tau$  — безразмерное время,  $\tau = t/T_i$  ( $T_i$  — время перемещения на  $i$ -м участке),  $1 \geq \tau \geq 0$ ;  $A_{i4}, \dots, A_{i0}$  — коэффициенты полинома.

Для промежуточного участка закона изменения  $\theta_i(\tau)$  на  $i$ -м участке изменения функции получаем полином третьего порядка

$$\theta_i(\tau) = +A_{i3}\tau^3 + A_{i2}\tau^2 + A_{i1}\tau + A_{i0}. \quad (4)$$

С помощью полиномов третьего (3) и четвертого (4) порядка выводим функцию времени изменения длин и углов исполнительных звеньев.

При использовании второго метода кинематического синтеза аналитических зависимостей законов изменения исполнительных звеньев от времени полученные значения обобщенных координат манипулятора-трипода  $l_k(t_i)$ ,  $\alpha(t_i)$ ,  $\psi(t_i)$  аппроксимируют полиномом степени  $m$  на множестве значений  $l_{ki}(t_i)$  в интервале времени от  $t_1 = \Delta t$  до  $t_{n-1} = (n-1)\Delta t$ :

$$Q_k(t) = A_{0k} + A_{1k}t + A_{2k}t^2 + \dots + A_{mk}t^m, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  — шаг приращения времени;  $A_{mk}$  — постоянные коэффициенты полиномов, определяемые из условия минимума функции в виде квадратичного отклонения [12]

$$\delta = \sum_{i=1}^{n-1} [Q_k(t_i) - l_{ki}(t_i)]^2. \quad (6)$$

Чтобы удовлетворить граничным условиям по положению, скорости и ускорению захватного устройства, в интервалах времени от  $t_0 = 0$  до  $t_1 = \Delta t$  и от  $t_{n-1} = (n-1)\Delta t$  до  $t_n = n\Delta t$  искомую функцию перемещения исполнительного звена интерполируем полиномами пятого порядка

$$\begin{aligned}
 P_k(t) &= B_{5k}t^5 + B_{4k}t^4 + B_{3k}t^3 + B_{2k}t^2 + B_{1k}t + B_{0k} \\
 &\text{при } \Delta t \geq t \geq 0; \\
 H_k(t) &= C_{5k}t^5 + C_{4k}t^4 + C_{3k}t^3 + C_{2k}t^2 + C_{1k}t + C_{0k} \\
 &\text{при } t_n \geq t \geq t_{n-1},
 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B_{5k}, \dots, B_{0k}, C_{5k}, \dots, C_{0k}$  — коэффициенты полиномов.

Для первого отрезка подставляем значения  $t = 0, t_1 = \Delta t$  и для последнего отрезка —  $t_{n-1} = (n-1)\Delta t, t_n = n\Delta t$  на левом и правом концах соответственно. Из системы полученных уравнений находим коэффициенты полиномов (7).

Таким образом, полиномы (4) и (7) полностью определяют аналитические законы изменения длин исполнительных цилиндров непрерывными функциями времени

$$l_k(t) = \begin{cases} P_k(t) & \text{при } 1 \geq t \geq 0; \\ Q_k(t) & \text{при } 11 \geq t \geq 1; \\ H_k(t) & \text{при } 12 \geq t \geq 11, \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

Первый метод, основанный на сплайновой интерполяции, лучше использовать при малом количестве заданных точек и необходимости получить достаточно быстро подходящий вариант. Но в этом случае на интерполяционной кривой изменения дуговой координаты появляются локальные экстремумы. При таком способе затруднительно разработать систему управления с обратной связью по скорости. Увеличение числа узловых точек не позволяет обеспечить монотонное изменение скорости.

Кинематический метод синтеза аналитических зависимостей законов изменения исполнительных звеньев от времени интерполяционными полиномами крайних участков траектории и аппроксимацией промежуточных позволяет сформировать задающий сигнал для каждого звена манипулятора-трипода и спроектировать системы управления — программную и позиционную с обратными связями по положению и скорости, — обеспечивающие отслеживание программных траекторий.

Метод динамического синтеза законов перемещения звеньев используют для определения законов формирования управляющих сил  $F_k(t)$  и моментов  $T_\psi(t), T_\alpha(t), T_\beta(t)$ , обеспечивающих перемещение РО в заданное положение за заданное время по программной траектории. Для решения этой задачи составляют

математическую модель динамики движения манипуляционного механизма.

Обобщенными координатами являются параметры, которые описывают конфигурацию манипулятора-трипода и состояние трехзвенового захватного устройства:  $q_1 = \varphi, q_2 = \gamma, q_3 = x_M, q_4 = y_M, q_5 = z_M, q_6 = \alpha, q_7 = \psi, q_8 = \beta$ . При этом число независимых обобщенных координат равно семи (см. рис. 3).

Динамическая характеристика привода, состоящего из двигателя постоянного тока, необратимого редуктора и шариковинтовой передачи, имеет вид

$$\mu \dot{F}_i + F_i = ru_i - s \dot{l}_i,$$

где  $\mu$  — электромагнитная постоянная времени;  $F_i$  — усилие на штоке исполнительного звена;  $r, s$  — коэффициенты, зависящие от параметров двигателя и механической передачи;  $u_i$  — управляющее напряжение;  $\dot{l}_i$  — скорость штока исполнительного звена.

Характеристики приводов поворота звеньев захватного устройства имеют подобный вид.

Кинетическая энергия системы, зависящая от стационарных связей в виде квадратичной формы обобщенных скоростей, определяется как

$$T = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{18} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{28} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{81} & A_{82} & \dots & A_{88} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{q}_1^2 & \dot{q}_1 \dot{q}_2 & \dots & \dot{q}_1 \dot{q}_8 \\ \dot{q}_2 \dot{q}_1 & \dot{q}_2^2 & \dots & \dot{q}_2 \dot{q}_8 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \dot{q}_8 \dot{q}_1 & \dot{q}_8 \dot{q}_2 & \dots & \dot{q}_8^2 \end{vmatrix},$$

где  $A_{sk} = A_{ks}$  — коэффициенты матрицы, зависящие от обобщенных координат,  $s = 1, 2, \dots, 8, k = 1, 2, \dots, 8$  [13].

Потенциальная энергия системы

$$\begin{aligned}
 П(q_k) &= m_A g |OA| \cos \varphi + (M + m_W) g z_M + \\
 &+ [m_2 l_{c2} + (m_3 + m_4 + m_W) a + \\
 &+ (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) \cos \psi] g \sin \alpha,
 \end{aligned}$$

где  $m_A$  — приведенная масса поворотного основания  $ABC$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $M$  — приведенная масса манипулятора;  $m_W$  — масса переносимого груза;  $m_2, m_3$  и  $m_4$  — массы звеньев захвата;  $l_{c2}, l_{c3}, l_{c4}$  и  $l_W$  — расстояние до центра масс звеньев захвата и груза соответственно.

Движение манипулятора параллельно-последовательной структуры описывается уравне-

ниями Лагранжа второго рода с неопределенными множителями

$$\sum_{k=1}^8 A_{sk} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^8 \sum_{m=1}^8 [k, m, s] \dot{q}_k \dot{q}_m = Q_s + \lambda \frac{\partial f(q_s)}{\partial q_s} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s}, \quad s = 1, 2, \dots, 8. \quad (8)$$

Здесь  $Q_s$  — обобщенная сила;  $\lambda$  — множитель Лагранжа;  $\partial \Pi / \partial q_s$  — обобщенная сила потенциальных активных сил;  $[k, m, s]$  — символы Кристоффеля первого рода,

$$[k, m, s] = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial A_{ks}}{\partial q_m} + \frac{\partial A_{ms}}{\partial q_k} - \frac{\partial A_{km}}{\partial q_s} \right),$$

где частные производные вычисляются с помощью программы символьной математики.

Используя уравнения Лагранжа второго рода (8) с голономными связями [13, 14], получают восемь дифференциальных уравнений, описывающих динамику движения манипулятора-трипода вместе с захватным устройством [15]. Решая эти уравнения при известных законах перемещения захватного устройства, находят движущие силы  $F_k(t)$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$  и моменты  $T_\psi(t)$ ,  $T_\alpha(t)$ ,  $T_\beta(t)$ , обеспечивающие выполнение необходимого программного движения для выполнения технологического процесса. Результаты расчетов используются для выбора приводных электродвигателей, а также служат исходными данными для проектирования системы управления.

Предложенные метод и алгоритмы управления апробированы на экспериментальном об-



Рис. 4. Внешний вид экспериментального образца манипулятора-трипода с актуаторами SKF САНВ-21

разе манипулятора-трипода с актуаторами SKF САНВ-21 и управляемым захватным устройством (рис. 4). При этом ошибка позиционирования составляла не более 2 %, а отклонение фактических перемещений от заданных при наличии полезной нагрузки на захватном устройстве не превышало 5 %.

При экспериментальном моделировании использованы те же начальные условия и конфигурация исследуемого манипулятора-трипода, что и при численном исследовании. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей длин и управляющих напряжений звеньев манипулятора-трипода от времени (рис. 5, а, б) проведено при движении захватного устройства из начальной точки с координатами  $x_{e0} = -77$  мм,  $y_{e0} = 1129$  мм,  $z_{e0} = 650$  мм в конечную точку  $x_{ek} = 168$  мм,  $y_{ek} = 1371$  мм,  $z_{ek} = -167$  мм.

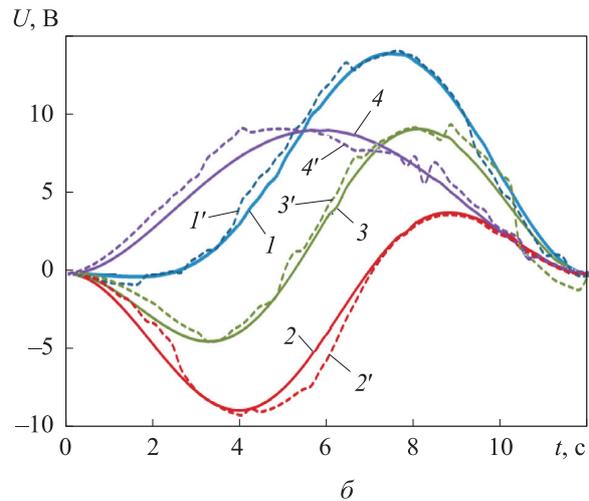
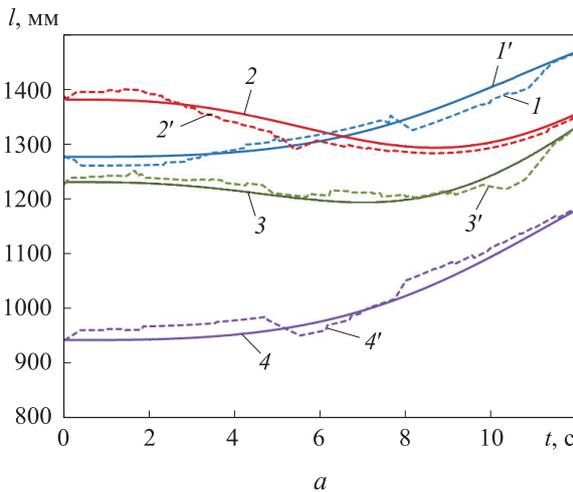


Рис. 5. Расчетные (1–4) и экспериментальные (1’–4’) зависимости длин  $l$  (а) и управляющих напряжений  $U$  (б) первого (1, 1’), второго (2, 2’), третьего (3, 3’) и четвертого (4, 4’) звеньев манипулятора-трипода от времени  $t$

Как видно из рис. 5, а и б, максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

## Выводы

1. Для управления манипуляторами параллельно-последовательной структуры на основе трипода предложены методы кинематического и динамического синтезов.

2. Кинематические методы синтеза аналитических зависимостей законов изменения исполнительных звеньев от времени позволяют сформировать задающий сигнал для каждого

звена манипулятора-трипода и спроектировать позиционно-траекторную систему управления с обратными связями по положению и скорости, позволяющую отслеживать программные траектории.

3. Метод динамического синтеза законов перемещения звеньев дает возможность определить движущие силы и моменты, необходимые для реализации заданных программных движений РО и вычисления усилий в кинематических парах. При известных управляющих усилиях уравнения динамики позволяют синтезировать необходимые параметры системы управления с обратными связями и минимизировать динамические ошибки при отработке программных движений.

## Литература

- [1] Бушуев В.В., Хольшев И.Г. *Механизмы параллельной структуры в машиностроении*. СТИН, 2001, № 1, с. 3–8.
- [2] Merlet J.P. *Parallel Robots*. Norwell, Kluwer Acad. Publ., 2000. 372 p.
- [3] Филиппов Г.С. Кинематический анализ механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 8, с. 18–24, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-8-18-24>
- [4] Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. *Sens. Transducers*, 2014, vol. 169, no. 4, pp. 186–192.
- [5] Glazunov V., Filippov G., Rashoyan G., Gavrulina L., Shalyukhin K., Skvortsov S. Analysis of mechanisms with parallel-serial structure 5-DOF and extended working area. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 232, pp. 3–12, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_1)
- [6] Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. *Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ*. Москва, МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. 153 с.
- [7] Antonov A., Fomin A., Glazunov V., Kiselev S., Carbone G. Inverse and forward kinematics and workspace analysis of a novel 5-dof (3t2r) parallel-serial (hybrid) manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, vol. 18 (2), doi: <https://doi.org/10.1177/1729881421992963>
- [8] Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Петраков А.А. и др. Разработка новых механизмов для современных робототехнических систем, предназначенных для технологических, медицинских, аддитивных и диагностических устройств. В: *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018, с. 131–143.
- [9] Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Несмиянов И.А. и др. *Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством*. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2016, т. 17, № 8, с. 525–530, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.17.525-530>
- [10] Воробьева Н.С. Стабилизация пространственного положения манипулятора параллельно-последовательной структуры. *Известия ВолгГТУ*, 2021, № 9, с. 17–21. URL: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-9-256-17-21>
- [11] Vorob'eva N.S., Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V. Program displacement tracing of executive devices by the manipulator drives of parallel-sequential structures. *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 305–316, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230719020187>
- [12] Vorob'eva N.S., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A. et al. Kinematic synthesis of programmed motions of drivers of a manipulator-tripod with a three-degree gripper. In: *Advances in mechanical engineering*. Springer, 2019, pp. 73–82, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2_7)

- [13] Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В., Жога В.В., Несмиянов И.А. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода. *Машиностроение и инженерное образование*, 2017, № 3, с. 32–41.
- [14] Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V. et al. Walking mobile robot with manipulator-tripod. In: *Advances on theory and practice of robots and manipulators*. Springer, 2014, pp. 463–471, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_52)
- [15] Воробьева Н.С., Жога В.В., Жога Л.В. Динамический синтез алгоритмов управления манипулятором параллельно-последовательной структуры. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2020, т. 21, № 12, с. 706–715. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.21.706-715>

## References

- [1] Bushuev V.V., Khol'shev I.G. Mechanisms of parallel structure in machine building. *STIN*, 2001, no. 1, pp. 3–8. (In Russ.).
- [2] Merlet J.P. *Parallel Robots*. Norwell, Kluwer Acad. Publ., 2000. 372 p.
- [3] Filippov G.S. Kinematic analysis of a parallel-sequential structure mechanism with five degrees of freedom. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 8, pp. 18–24, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-8-18-24> (in Russ.).
- [4] Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. *Sens. Transducers*, 2014, vol. 169, no. 4, pp. 186–192.
- [5] Glazunov V., Filippov G., Rashoyan G., Gavrilina L., Shalyukhin K., Skvortsov S. Analysis of mechanisms with parallel-serial structure 5-DOF and extended working area. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 232, pp. 3–12, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_1)
- [6] Kheylo S.V., Glazunov V.A., Palochkin S.V. *Manipulyatsionnye mekhanizmy parallel'noy struktury. Strukturnyy sintez. Kinematicheskiy i silovoy analiz* [Handling mechanisms of parallel structure. Structure synthesis. Kinematic and force analysis]. Moscow, MGТУ im. A.N. Kosygina Publ., 2011. 153 p. (In Russ.).
- [7] Antonov A., Fomin A., Glazunov V., Kiselev S., Carbone G. Inverse and forward kinematics and workspace analysis of a novel 5-dof (3t2r) parallel-serial (hybrid) manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, vol. 18 (2), doi: <https://doi.org/10.1177/1729881421992963>
- [8] Glazunov V.A., Filippov G.S., Petrakov A.A. et al. Razrabotka novykh mekhanizmov dlya sovremennykh robototekhnicheskikh sistem, prednaznachennykh dlya tekhnologicheskikh, meditsinskikh, additivnykh i diagnosticheskikh ustroystv [Development of new mechanisms for modern technological, medical, additive and diagnostic devices]. V: *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [In: New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018, pp. 131–143. (In Russ.).
- [9] Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Nesmiyanov I.A. et al. Manipulator of a parallel-series structure with a controlled gripper positioning task. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2016, vol. 17, no. 8, pp. 525–530, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.17.525-530> (in Russ.).
- [10] Vorob'yeva N.S. Stabilization of the spatial position of the manipulator of a parallel-sequential structure. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2021, no. 9, pp. 17–21. URL: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-9-256-17-21> (in Russ.).
- [11] Vorob'yeva N.S., Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V. Program displacement tracing of executive devices by the manipulator drives of parallel-sequential structures. *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 305–316, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230719020187>
- [12] Vorob'yeva N.S., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A. et al. Kinematic synthesis of programmed motions of drivers of a manipulator-tripod with a three-degree gripper. In: *Advances in mechanical engineering*. Springer, 2019, pp. 73–82, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2_7)
- [13] Vorob'yeva N.S., Dyashkin-Titov V.V., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A. The dynamics of the parallel-serial manipulator based on the tripod. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obra-*

*zovaniye* [Mechanical Engineering and Engineering Education], 2017, no. 3, pp. 32–41 (in Russ.).

- [14] Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V. et al. Walking mobile robot with manipulator-tripod. In: *Advances on theory and practice of robots and manipulators*. Springer, 2014, pp. 463–471, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_52)
- [15] Vorob'yeva N.S., Zhoga V.V., Zhoga L.V. Dynamic synthesis of parallel-sequential structure manipulator control algorithms. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2020, vol. 21, no. 12, pp. 706–715. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.21.706-715> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.12.2021

## Информация об авторе

**ВОРОБЬЕВА** Наталья Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Механика». ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Волгоградская обл., Волгоград, Российская Федерация, пр. Университетский, д. 26, e-mail: [vgxa@mail.ru](mailto:vgxa@mail.ru)).

## Information about the author

**VOROB'eva** Natalya Sergeevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agricultural University» (400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26, e-mail: [vgxa@mail.ru](mailto:vgxa@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воробьева Н.С. Методы управления манипуляторами на базе трипода при выполнении технологических операций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 3, с. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-3-14

### Please cite this article in English as:

Vorobyeva N.S. Methods of Manipulators Controlling Based on a Tripod When Performing Technological Operations. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 3, pp. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-3-14



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник материалов III Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых «Наука, технологии и бизнес»

В сборник вошли тезисы докладов и сообщений на английском и русском языках, сделанные на III Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, состоявшейся 27–28 апреля 2021 г.

Обсуждаются вопросы, связанные с научными исследованиями, проектно-конструкторскими и методическими разработками, экспериментальными работами в области биомедицинских и машиностроительных технологий, радиоэлектроники и лазерной техники, специального машиностроения, робототехники и автоматики, информатики, систем управления, инженерного бизнеса и менеджмента, а также прикладной лингвистики.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@baumanpress.ru](mailto:press@baumanpress.ru); <https://bmstu.press>