

D. M. MARCHENKO, V. F. RAZON

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF THE SLIDES GAPS AND SPRING SUSPENSION DEFLECTION SETTINGS FOR PASSENGER CAR BOGIES

The design of the stand for regulation of the slides gaps and spring suspension deflection of the passenger car bogies is presented in the paper. The metal construction dimensioning and loading mechanism were performed, the finite element analysis of stress-strain state was done.

Получено 28.10.2012

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

УДК 519.673

Р. А. МИРЗАЕВ, Н. А. СМИРНОВ

*Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА С ЗАМКНУТЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ

Проводится исследование кинематики и динамики манипулятора с параллельной структурой (дельта-механизм). Создана симуляционная модель системы управления манипулятора, включающая ПИД-регулятор для управления двигателями. Получены зависимости перемещений звеньев от времени при различных коэффициентах ПИД-регулятора, а также коэффициенты для оптимального переходного процесса.

Применение механизмов с параллельной структурой эффективно при механической обработке изделий сложной формы (например, штампов, пресс-форм, лопаток турбин и т. д.), когда требуется перемещение инструмента по пяти-шести обобщенным координатам. В отличие от традиционных манипуляторов, структуры с параллельной кинематикой содержат замкнутые кинематические цепи и воспринимают нагрузку как пространственные фермы [1]. Их звенья работают на растяжение и сжатие, что обеспечивает жесткость всей конструкции и, как следствие, повышение точности позиционирования схвата [2]. В работе [3] рассматриваются математические и имитационные модели кинематики и динамики некоторых параллельных механизмов, а также задача оптимизации их формы и размеров.

Недостатки манипуляторов с параллельной структурой заключаются в том, что они требуют использования большого количества приводов и более сложных систем управления, имеют меньший размер рабочей области и большую стоимость, сложны в проектировании. Данные недостатки не яв-

ляются препятствием для распространения параллельных манипуляторов в тех областях, где требуется точное позиционирование, высокие нагрузки и высокая маневренность [3].

Применение механизмов параллельной структуры невозможно без решения прямой и обратной задач кинематики манипуляторов, которые представляют значительную сложность по сравнению с аналогичными задачами для традиционных манипуляторов. Иногда аналитическое решение не может быть найдено [2].

Трехмерное моделирование. Дельта-механизм – устройство параллельной структуры, включающее основание, верхнюю платформу, на движение которой накладывают ограничения три кинематические цепи, каждая из которых включает поворотный шарнир (рисунок 1). Кинематические цепи присоединяются к основанию поворотным шарниром, приводимым в движение сервоприводом. Верхняя платформа связана с кинематическими цепями сферическими шарнирами. Основание и поворотная платформа представляют собой равносторонние треугольники.

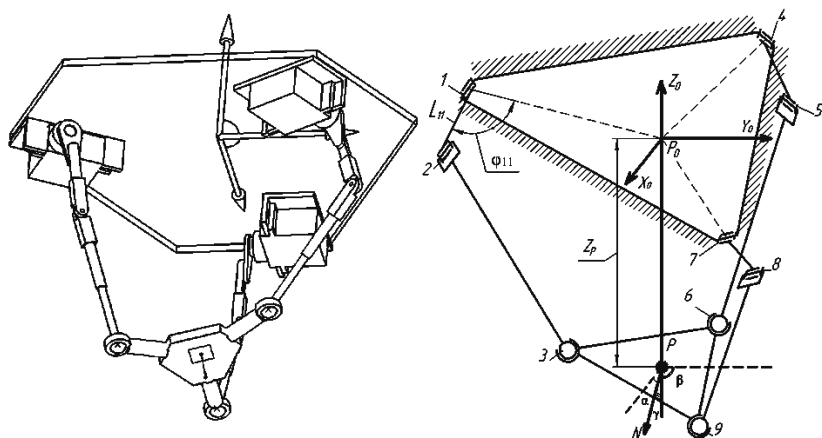


Рисунок 1 – Трехмерная модель и схема дельта-механизма

Для моделирования кинематически сложных механизмов рационально использовать систему автоматизированного проектирования САПР, поскольку в ней заложены эффективные алгоритмы моделирования движения механизмов с устройствами параллельной кинематики [4]. Созданная трехмерная модель использована для проверки решения прямой задачи кинематики. Также с ее помощью найдены крайние положения и рабочая зона манипулятора.

Число степеней свободы рассматриваемого дельта-механизма (см. рисунок 1), вычисленное по формуле Чебышева-Малышева, равно трем [4]. Устройство имеет две вращательные степени свободы и одну поступательную.

За обобщенные координаты поворотной платформы приняты два угла α и β , а также высота полюса схвата Z_p . Третий угол наклона плоскости поворотной платформы (γ) не включен в обобщенные координаты, поскольку он выражается через углы α и β и высоту. Отметим, что при использовании устройств параллельной кинематики для ориентации антенн, телескопов космической техники главными параметрами являются углы наклона выходного звена относительно координат основания α и β .

После определения степеней подвижности механизма, при помощи компьютерного моделирования решена задача нахождения крайних положений выходного звена. Определены максимальные углы наклона платформы в базовой системе координат α и β , а также высота полюса схвата Z_p . Также найдена зависимость между максимальными углами наклона и высотой полюса схвата.

При помощи экспериментов с моделью определена область рабочей зоны манипулятора – конус с эллиптическим основанием. При максимальной высоте Z_p , поворот платформы невозможен. Рабочая зона ограничена максимальными углами поворота вращательных шарниров, максимальными углами поворота сферических шарниров, длинами звеньев.

Симуляционное моделирование. В работе [3], рассматривающей особенности динамики манипуляторов параллельной структуры и переходные процессы, применен программный комплекс MatLab/Simulink, рассчитывающий параметры управления приводами механизмов.

Аналогичный подход использован для решения задач кинематики и динамики дельта механизма. Для моделирования динамических систем использовано расширение SimMechanics, входящее в пакет прикладных программ MatLab [5]. Разработана математическая модель устройства параллельной структуры. Создана блок-схема дельта механизма (рисунок 2), в которой BASE1 – выходное звено, L – звенья, Spherical – шаровая опора, Revolute – цилиндрический шарнир, Joint actuator – привод вращения, Subsystem – подсистема управления приводом (рисунок 3), Body sensor – датчик перемещений, скоростей, ускорения, Body Actuator – привод линейных перемещений, имитирующий возмущающие воздействия, Step – функция, описывающая ступенчатое возмущающее воздействие на систему.

К выходному звену верхней платформы BASE1 помимо блока внешних воздействий (Body Actuator) подсоединен датчик (Body Sensor). К датчику подсоединен экран вывода результатов Score.

Было поставлено две группы расчетных экспериментов. Первая группа – моделирование процесса перехода из одного положения в другое посредством изменения угла наклона звена L_{11} с 0 до -30° . Вторая группа экспериментов – нахождение реакции системы на внешние возмущающие воздействия (силы по осям XYZ базовой системы координат). Статическое воздействие задано элементом Constant, динамическое – функцией Step.

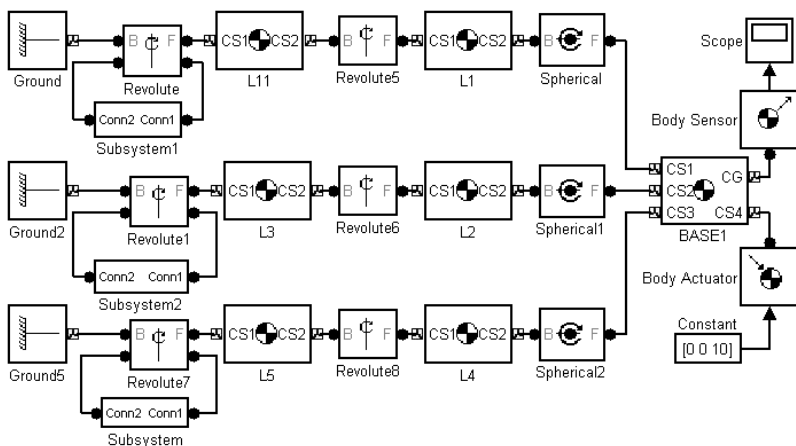


Рисунок 2 – Блок-схема симуляционной модели манипулятора

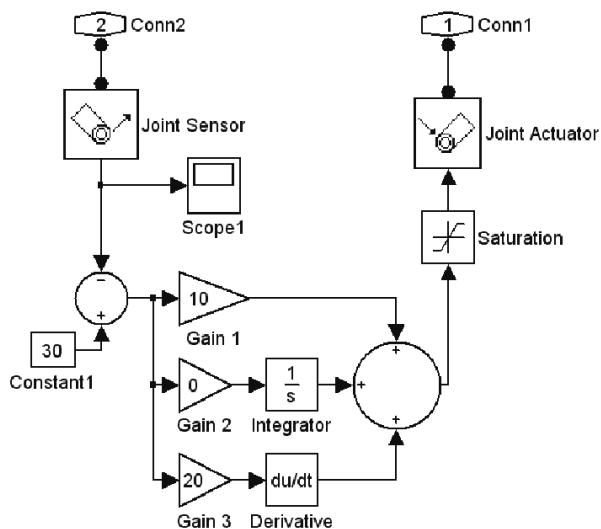


Рисунок 3 – Подсистема управления приводом – ПИД-регулятор

Для обрабатывающих станков важно отсутствие перерегулирования при перемещениях, иначе неизбежен брак. При управлении устройствами параллельной кинематики нельзя допускать перерегулирования еще и потому, что в замкнутых кинематических цепях допустимые положения звеньев в одной цепи зависят от положения звеньев другой. Поэтому в каждый момент времени положения приводов должны иметь определенные значения, получен-

ные в результате решения обратной задачи кинематики манипулятора. В противном случае произойдет быстрый износ или разрушение конструкции манипулятора. С целью сокращения времени переходного процесса, а также отсутствия перерегулирования управление приводами реализовано при помощи пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов, обозначенных на рисунке 2 подсистемой Subsystem. На схеме регулятора (рисунок 3) Gain 1, 2, 3 – пропорциональный, интегрирующий, дифференцирующий коэффициенты ПИД-регулятора. В регулятор поступают данные о текущем положении звена (через Joint Sensor) и данные о требуемом положении (задается элементом Constant1). Разница между этими значениями подвергается математической обработке. После этого корректирующее воздействие подается на двигатель (Joint Actuator).

После создания блок схемы модели дельта-механизма и задания движения доступна его визуализация, при помощи которой можно проверить правильность построения устройства.

При помощи элемента Scope получены графики переходного процесса: изменения положения, скорости, ускорения по трем осям. На рисунках 4, 5 представлены зависимости угла наклона звена L_{11} от времени при различных коэффициентах регулятора. При этом управление происходит одним двигателем из трех.

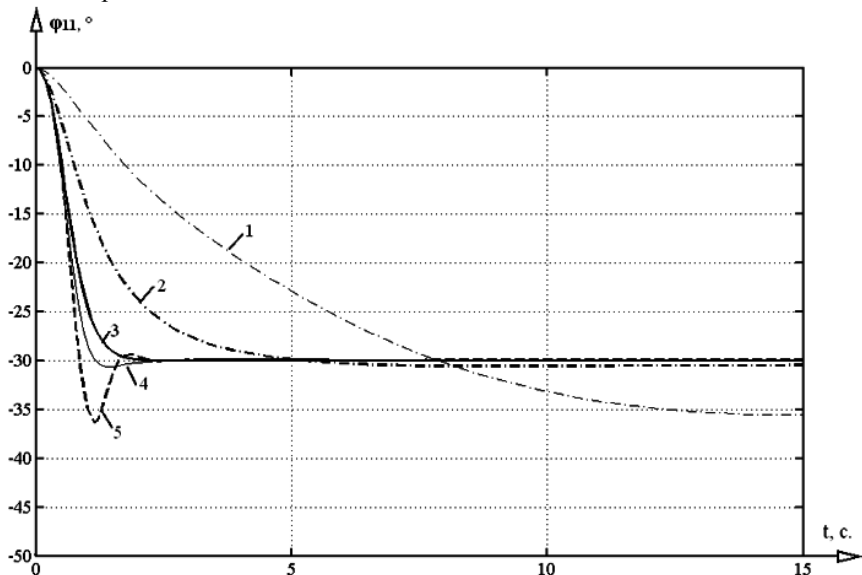


Рисунок 4 – Графики переходного процесса: зависимость угла наклона звена L_{11} от времени при различных коэффициентах пропорциональной составляющей: 1 – $K_p = 5$, 2 – $K_p = 10$, 3 – $K_p = 30$, 4 – $K_p = 50$, 5 – $K_p = 200$. На всех графиках дифференциальный и интегральный коэффициенты постоянны: $K_d = 40$, $K_i = 1$

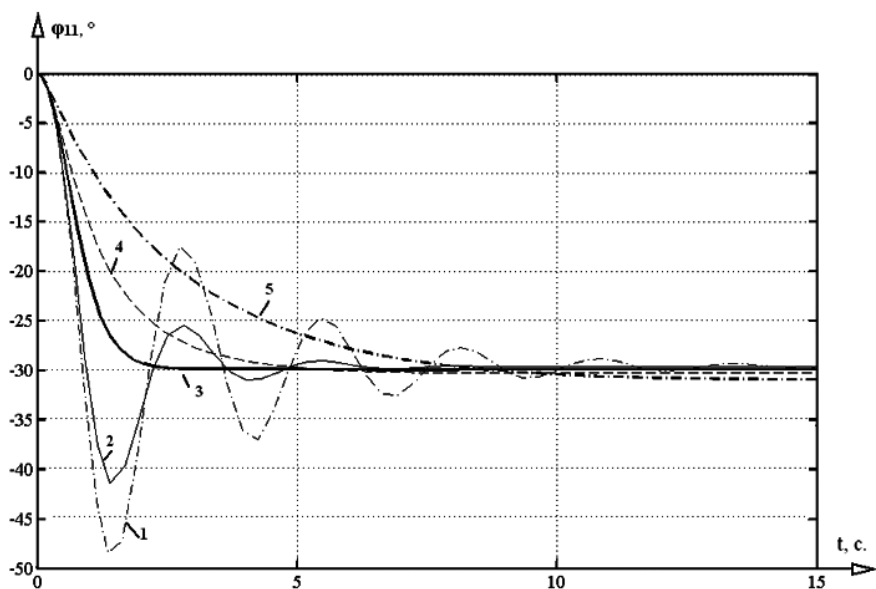


Рисунок 5 – Графики переходного процесса при различных значениях дифференциального коэффициента: 1 – $K_d = 5$, 2 – $K_d = 10$, 3 – $K_d = 30$, 4 – $K_d = 50$, 5 – $K_d = 100$.
 На всех графиках пропорциональный и интегральный коэффициенты постоянны:
 $K_{II} = 40, K_{II} = 1$

Пропорциональный коэффициент регулятора определяет тангенс угла наклона кривой переходного процесса к оси t . При малых коэффициентах пропорциональной составляющей переходный процесс очень долгий (кривая 1 на рисунке 4). Если пропорциональный коэффициент оптимальный и другие коэффициенты также удачно подобраны, то время переходного процесса минимальное, а перерегулирование отсутствует (кривая 3 на рисунке 4). Если пропорциональный коэффициент значительно превышает дифференциальный, то скорость процесса большая, но неизбежно перерегулирование (кривая 5 на рисунке 4).

Полученные графики переходного процесса при различных коэффициентах интегрального звена показали, что при коэффициенте, равном нулю, существует некоторая статическая ошибка. При больших коэффициентах интегрального звена наблюдается перерегулирование и неустойчивость. Поэтому в исследовании коэффициент интегрального звена выбран равным единице. Также получены графики переходного процесса – зависимости угла φ_{11} от времени для различных коэффициентов дифференциальной составляющей (см. рисунок 5).

Как видно из этого рисунка, при малом дифференциальном коэффициенте наблюдается перерегулирование, а колебания затухают медленно (кривая 1). Оптимальный дифференциальный коэффициент обеспечивает минимальное время переходного процесса при отсутствии перерегулирования (кривая 3). При большом дифференциальном коэффициенте процесс происходит медленно, также наблюдается перерегулирование (кривая 5).

Для определения оптимального пропорционального и дифференциального коэффициента проведен ряд экспериментов с математической моделью, по результатам которых получены таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Зависимость времени переходного процесса (в секундах) от пропорционального (K_n) и дифференциального (K_d) коэффициента

K_d	K_n										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	25	14	16	15	14	13	×	×	×	×	×
10	50	11	8	7	7	6	8	10	7	7	10
20	60	25	15	5	6	6	6	5	4	3	5
30	80	28	30	5	3	2	5	5	3	2	3
40	120	55	50	40	5	5	4	3	2	2	2
50	150	60	60	55	40	5	5	4	6	3	2
60	160	70	60	65	50	10	6	6	5	4	3
70	180	100	60	70	70	30	6	6	6	4	4
80	200	105	65	72	70	60	50	6	6	5	5
90	200	110	67	73	70	65	50	6	6	6	7
100	200	120	70	75	70	70	60	60	12	6	10

× – переходный процесс в автоколебаниях.

Таблица 2 – Наличие перерегулирования в переходном процессе

K_d	K_n										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
50	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
60	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
70	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
80	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
90	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
100	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

0 – перерегулирование отсутствует.
1 – перерегулирование присутствует.

При малых коэффициентах пропорциональной составляющей относительно дифференциальной переходный процесс имеет слишком большую длительность. При большом пропорциональном и малом дифференциальном коэффициентах процесс происходит быстро, но с перерегулированием.

На основе таблиц 1 и 2 можно сделать вывод, что для недопущения перерегулирования пропорциональный и дифференциальный коэффициенты должны быть близкими друг к другу по значениям, а также быть большими тридцати.

Результаты. В ходе работы проведено трехмерное и симуляционное моделирование кинематики и динамики дельта-механизма.

При помощи трехмерного моделирования проведен анализ кинематики дельта-механизма, результатами которого стали графики зависимости перемещения, скорости, ускорения звеньев от времени. Также с помощью трехмерной модели дельта-механизма найдены крайние положения и рабочая зона манипулятора.

В результате симуляционного моделирования найдены и проанализированы параметры регулирования привода (время и тип переходного процесса, величина перерегулирования), получены коэффициенты ПИД-регулятора, обеспечивающие наиболее быстрый переходный процесс при отсутствии перерегулирования.

Разработанная методика анализа может быть использована при проектировании аналогичных манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение / Ю. В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
- 2 Глазунов, В. А. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры / В. А. Глазунов, А. Ш. Колисков, А. Ф. Крайнев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Наука, 2008. – Вып. 2. – С. 100–110.
- 3 Волкоморов, С. В. Моделирование и оптимизация некоторых параллельных механизмов / С. В. Волкоморов, Ю. Т. Каганов, А. П. Карпенко // Информационные технологии. – М.: Новые технологии, 2010. – Вып. 5. – С. 1–32.
- 4 Мирзаев, Р. А. Расчет параметров движения приводов механизма параллельной структуры / Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов, А. Н. Смирнов // Вестник СибГАУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 62–64.
- 5 Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – М.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
- 6 Мирзаев, Р. А. Разработка системы управления для механизмов параллельной кинематики / Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем. – Железногорск: ИСС, 2011. – С. 258–260.

R. A. MIRZAEV, N. A. SMIRNOV

CONTROL OF THE DRIVES FOR SPATIAL MECHANISM WITH CLOSED KINEMATIC CHAINS

Kinematics and dynamics analysis for the manipulator with parallel structure (delta-mechanism) is presented in this paper. The mathematical model of the manipulator control system was created. The model includes the PID-regulator to control the motors. There were obtained the graphics of parts moving for various coefficients of PID-controller and coefficients for optimal transition process.

Получено 23.04.2013

ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013

УДК 531.4

А. И. МУШТАРИ

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия*

РАВНОВЕСИЕ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ НА ШЕРОХОВОЙ ПЛОСКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СИЛЫ

Решена задача о равновесии круглой пластины на горизонтальной шероховатой плоскости. Рассмотрен общий случай, когда к пластине прикладывается плоская система сил с равнодействующей, линия действия которой произвольна. Полученная система уравнений решается численно.

Общие подходы к изучению равновесия твердых тел под действием сил сухого трения подробно изложены в [1]. Одна из частных задач, а именно, о равновесии стержня на шероховатой плоскости, изучалась в [2]. Практический интерес представляет другая частная задача – о равновесии пластины в случае, если линия действия равнодействующей силы не проходит через центр пластины. Отметим, что эта задача ранее предлагалась на компьютерном конкурсе Всероссийской олимпиады по теоретической механике, где её никто не смог решить.

Рассмотрим задачу в следующей постановке. Однородная пластина в форме круглого диска лежит на шероховатой горизонтальной плоскости, причем коэффициент сухого трения f (рисунок 1). Пусть приложенные к диску внешние силы имеют равнодействующую, лежащую в плоскости диска и равную по величине $Q = kP$, где P – вес диска, k – некоторый коэффи-