

**Тарнопольская Татьяна Ивановна,**

*к.т.н., доцент;*

**Никитаев Игорь Владимирович,**

*к.т.н., доцент;*

**Желтухин Павел Евгеньевич,**

*бакалавр, направление подготовки «23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»;*

**Прытов Евгений Андреевич,**

*бакалавр, направление подготовки «23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»;*

**Симонов Денис Евгеньевич,**

*бакалавр, направление подготовки «23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»;*

*ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,*

*г. Нижний Новгород, Россия*

## **ПОДБОР УПРАВЛЯЮЩИХ МОМЕНТОВ СЕРВО- И ПНЕВМОПРИВОДОВ С ЦЕЛЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ ПЛОСКИМИ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ**

**Аннотация.** Данная статья посвящена проблеме компьютерного моделирования движений под действием различных алгоритмов управления. Кинематическая составляющая создания механической модели робота базируется на построении дифференциальных уравнений движения звеньев манипулятора по методу графов, а динамическая составляющая – согласно принципу Даламбера. Проведён предварительный подбор гидропривода, обеспечивающего управляющие моменты, полученные в результате расчёта.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, компьютерное моделирование, кинематическая модель робота, метод графов, принцип Даламбера, дифференциальные уравнения движения, обобщённые координаты.

Автоматизация процессов производства при помощи производственных роботов невообразима без гидравлических, пневматических и сервоприводов. Приводы разных систем позволяют вывести управление мехатронными

компонентами на новый технический уровень, поэтому их подробное изучение становится всё более актуальным в процессе подготовки специалистов.

Современное производство с каждым днём усовершенствуется за счёт введения новых технологий и разделения производственного процесса на отдельные участки. Такие дискретные элементы производства с лёгкостью могут быть автоматизированы и усовершенствованы с использованием робототехнических систем. Данный подход позволяет не только усовершенствовать весь производственный процесс, но и сделать существующее производство более гибким. Разделение производственной линии на подсистемы дает возможность для универсализации и оптимизации производства, упрощения его ремонта и обслуживания.

Сфера роботизации производства с применением гидравлических систем управления и сервоприводов позволяет минимизировать человеческий фактор на производстве и повысить показатели конкурентоспособности выпускаемого продукта. Это достигается за счет автоматизации рутинных процессов, на которых больше всего появляется вероятность совершения ошибок.

Кинематический анализ манипуляторов является начальным этапом решения более сложных задач, связанных с исследованием динамики и синтезом управления роботов. Для этого обоснованно выбираются критерии качества с различным уровнем детализации.

Большое разнообразие конструкций и схем роботов-манипуляторов создают сложность при их математическом описании, а это, в свою очередь, придаёт особую актуальность проблеме компьютерного моделирования движений (имитационное моделирование) под действием различных алгоритмов управления. Такое моделирование является мощным средством выявления эффективности рассматриваемых схем (подбора массово-геометрических характеристик) и правильности алгоритма управлений. Решение вопросов, возникающих на этапе проектирования роботов, в условиях

априорной неполной информации о внешних воздействиях и самом манипуляторе.

Простейшие величины, описывающие поведение звеньев манипулятора – это координаты сочленений звеньев (кинематических пар), тогда как перемещения в сочленениях – обобщенными координатами (углами поворота). К ним добавляются скорости и ускорения угловые и линейные, в зависимости от вида движения звеньев. Изменение положения рабочего органа (захвата), рассматривается в отдельных уравнениях движения. Управление кинематической моделью манипулятора производится изменением обобщенных координат.

Манипуляционные возможности робота зависят от числа степеней свободы, размеров рабочей зоны, размера плоскости или пространства обобщенных координат. Задаётся круг операций, выполняемый манипулятором, в которых ограничивается пространство рабочей зоны, задаются траектории движения захвата или последовательность ближайших точек, через которые он должен проходить. Все перечисленные параметры позволяют создать кинематическую модель робота. Механическая модель того же манипулятора описывается системой дифференциальных уравнений 2-го порядка (вывод через уравнения Лагранжа 2-го рода), с учётом массово-инерционных характеристик звеньев и переносимого захватом груза. Либо приближённый расчёт проводится согласно принципу Даламбера.

В первом приближении принимаем манипулятор механизмом с абсолютно жёсткими звеньями и упругими связями, которые моделируют упругие свойства приводов.

Управляющие моменты плоских роботов-манипуляторов с двумя степенями свободы подбираются на основе динамического расчета схемы, представленной на рис. 1:

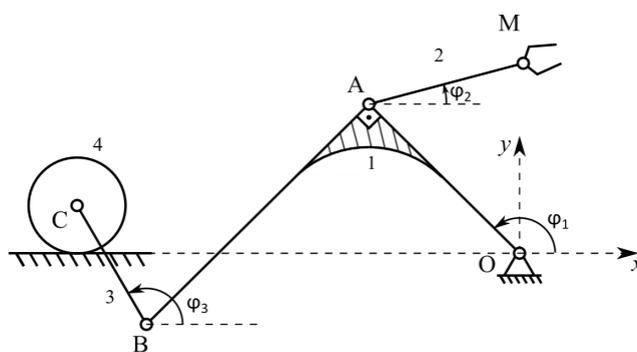


Рисунок 1 – Схема плоского робота-манипулятора

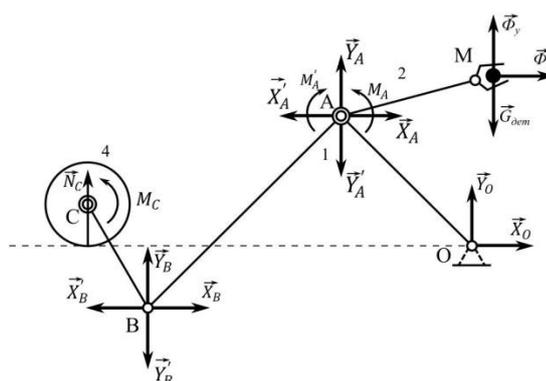


Рисунок 2 – Схема для кинетостатического расчёта

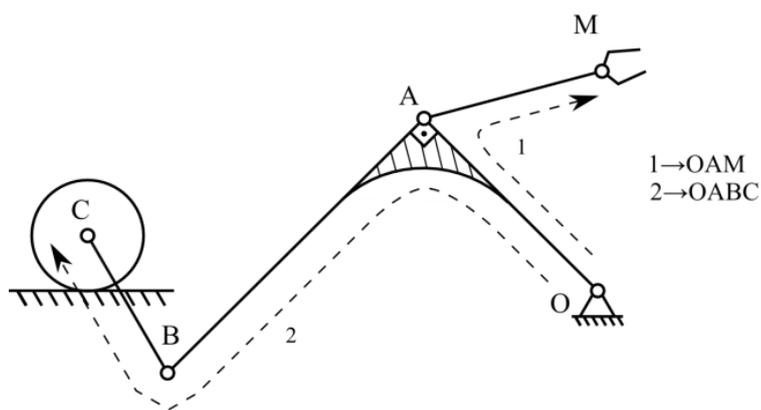
Предварительный расчет моментов  $M_{AZ}, M_{Cz}$  проводится по принципу Даламбера (рис. 2) [3]. При этом манипулятор освобождается от связей (вводятся их реакции) и разбивается на звенья.

Обобщёнными координатами, однозначно определяющими положение звеньев в каждый момент времени, являются углы наклона звеньев к горизонту –  $\varphi_i$  [рад] (рис. 1). Их производные по времени – это обобщённые угловые скорости  $\dot{\varphi}_i$  [рад/с] и ускорения  $\ddot{\varphi}_i$  [рад/с<sup>2</sup>].

Кинематическая составляющая создания механической модели робота базируется на построении дифференциальных уравнений движения звеньев манипулятора с наложением уравнений внешних связей (рис. 2):

- в неподвижном цилиндрическом шарнире  $O$  –  $v_{Ox} = 0, v_{Oy} = 0$ ,
- в колесе  $4$ , катящемся по горизонтальной поверхности (точка  $C$ ) –  $v_{Cy} = 0$ .

Согласно с кинематическими графами манипулятора (рис. 3) для точек  $M$  и  $C$  (1) получаем векторные уравнения их скоростей (2):



$$\begin{matrix} 1 & 2 \\ O \rightarrow A \rightarrow M; \\ \varphi_1 & \varphi_2 \end{matrix} \quad (1)$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 3 \\ O \rightarrow A \rightarrow B \xrightarrow{\pi} C \\ \varphi_1 & \varphi_1 + \frac{\pi}{2} & \varphi_3 \end{matrix}$$

Рисунок 3 – Схема кинематических графов

$$\begin{aligned} \vec{v}_M &= \vec{v}_O + \vec{\omega}_1 \times \vec{OA} + \vec{\omega}_2 \times \vec{AM}; \\ \vec{v}_C &= \vec{v}_O + \vec{\omega}_1 \times \vec{OA} + \vec{\omega}_1 \times \vec{AB} + \vec{\omega}_3 \times \vec{BC}. \end{aligned} \quad (2)$$

В проекциях на декартовы оси координат векторные уравнения (2) примут вид:

$$\begin{cases} v_{Mx} = v_{Ox} - \omega_{1z}R_1 \sin\varphi_1 - \omega_{2z}R_2 \sin\varphi_2; \\ v_{My} = v_{Oy} + \omega_{1z}R_1 \cos\varphi_1 + \omega_{2z}R_2 \cos\varphi_2; \\ v_{Cx} = v_{Ox} - \omega_{1z}R_1 \sin\varphi_1 - \omega_{1z}R_4 \sin(\varphi_1 + \frac{\pi}{2}) - \omega_{3z}R_3 \sin\varphi_3; \\ v_{Cy} = v_{Oy} + \omega_{1z}R_1 \cos\varphi_1 + \omega_{1z}R_4 \cos(\varphi_1 + \frac{\pi}{2}) + \omega_{3z}R_3 \cos\varphi_3. \end{cases} \quad (3)$$

При наложении связей  $v_{Ox} = 0, v_{Oy} = 0, v_{Cy} = 0$ , получаем систему четырёх нелинейных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} v_{Mx} &= -\omega_{1z}R_1 \sin\varphi_1 - \omega_{2z}R_2 \sin\varphi_2; \\ v_{My} &= \omega_{1z}R_1 \cos\varphi_1 + \omega_{2z}R_2 \cos\varphi_2; \\ v_{Cx} &= -\omega_{1z}R_1 \sin\varphi_1 - \omega_{1z}R_4 \cos\varphi_1 - \omega_{3z}R_3 \sin\varphi_3; \\ 0 &= \omega_{1z}R_1 \cos\varphi_1 - \omega_{1z}R_4 \sin\varphi_1 + \omega_{3z}R_3 \cos\varphi_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Искомыми кинематическими характеристиками при решении системы (4) будут угловые скорости звеньев  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  и  $v_{Cx}$  горизонтальная проекция скорости центра колеса **C**, через заданные проекции скорости захвата (точки **M**) и геометрические параметры звеньев.

Дополним систему нелинейных уравнений (4) производными по времени от углов поворота  $\omega_{1z} = \dot{\varphi}_1, \omega_{2z} = \dot{\varphi}_2, \omega_{3z} = \dot{\varphi}_3, v_{Cx} = \dot{x}_C$  и начальными условиями, которые определяют начальную конфигурацию механизма:

$$x_C(0) = x_{C_0}, \varphi_1(0) = \varphi_{1_0}, \varphi_2(0) = \varphi_{2_0}, \varphi_3(0) = \varphi_{3_0}.$$

Разрешим систему уравнений (4) относительно угловых скоростей звеньев  $\omega_1 = \dot{\varphi}_1$ ,  $\omega_2 = \dot{\varphi}_2$  и  $\omega_3 = \dot{\varphi}_3$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varphi}_1 = \frac{v_{Mx} \cos \varphi_2 + v_{My} \sin \varphi_2}{R_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}; \\ \dot{\varphi}_2 = \frac{v_{Mx} \cos \varphi_1 + v_{My} \sin \varphi_1}{R_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}; \\ \dot{\varphi}_3 = \frac{(v_{Mx} + v_{My} \operatorname{tg} \varphi_2)(R_4 \operatorname{tg} \varphi_1 - R_1)}{R_1 R_3 (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1) \cos \varphi_3}; \\ v_{Cx} = \frac{(v_{Mx} + v_{My} \operatorname{tg} \varphi_2)(R_4 \operatorname{tg} \varphi_1 - R_1)}{R_1 R_3 (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1) \cos \varphi_3}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Следующий этап – кинестатический расчёт схемы манипулятора (рис. 2), где активными силами являются: вес груза, переносимого захватом,  $\vec{G}_{\text{тяж}}$  и силы инерции в той же точке. Искомыми параметрами будут внутренние моменты управления в точках  $A$  и  $C$ .

К точке  $M$  захвата условно прикладываем силы инерции:  $\vec{\Phi}_x = -m_{\text{гр}} \vec{a}_x$  и  $\vec{\Phi}_y = -m_{\text{гр}} \vec{a}_y$ , которые определены для заданного вида движения груза. В уточнённой модели манипулятора к центрам тяжести каждого звена дополнительно прикладываются инерционные силы и моменты:

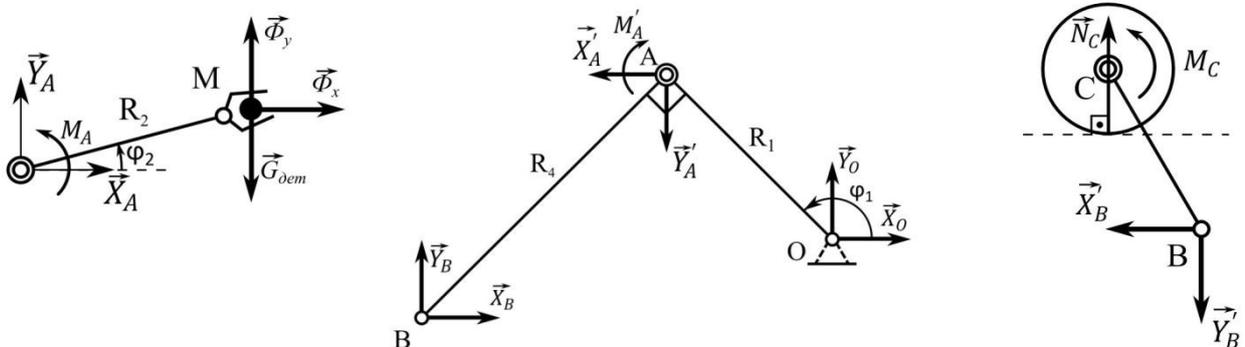
$$\vec{\Phi}_{xi} = -m_i \vec{a}_{Cxi}; \quad \vec{\Phi}_{yi} = -m_i \vec{a}_{Cyi}; \quad M_{Ci} = -J_i \varepsilon_i, \text{ где}$$

$m_i$  – массовые параметры звеньев [кг],

$J_i$  – инерционные параметры звеньев [кг · м<sup>2</sup>];

$\vec{a}_{Cxi}$ ,  $\vec{a}_{Cyi}$  – ускорения центров тяжести каждого из звеньев,

[м/с<sup>2</sup>];  $\varepsilon_i$  – угловые ускорения каждого звена [рад/с<sup>2</sup>].



а) схема сил для захвата

б) схема сил для ведущего звена

в) схема сил для 3-го звена

Рисунок 4 – Схема сил при разбиении на звенья в кинестатическом расчёте

Составляем уравнения квазиравновесия для каждого звена манипулятора в отдельности и получаем систему девяти уравнений, которую решаем относительно девяти неизвестных. Из них нас интересуют только моменты:

$$M_A = \Phi_x R_2 \sin \varphi_2 + (G_d - \Phi_y) R_2 \cos \varphi_2 \\ = m [v_M p \sin pt \cdot R_2 \sin \varphi_2 + (g + v_M p \cos pt) R_2 \cos \varphi_2];$$

$$M_C \\ = mR_3 \cos \varphi_3 \frac{v_M p [\sin pt (R_1 \sin \varphi_1 + R_2 \sin \varphi_2) + \cos pt (R_1 \cos \varphi_1 + R_2 \cos \varphi_2)] + g(R_1 \cos \varphi_1 + R_2 \cos \varphi_2)}{R_1 \cos \varphi_1 - R_4 \sin \varphi_1}.$$

В результате управляющие моменты  $M_A, M_C$  являются функцией обобщённых координат в виде углов поворота, полученных при интегрировании системы (5) и времени с учётом линейных размеров и скорости захвата:

$$M_A = M_{Az}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, t), M_C = M_{Cz}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, t).$$

В статическом расчёте манипулятор (см. рис. 2) характеризуется следующими массово-геометрическими характеристиками: масса звеньев  $m_1=4$  кг,  $m_2=2$  кг,  $m_3=1$  кг, длины однородных стержней  $R_1=2$  м,  $R_4=4$  м,  $R_2=R_3=1$  м и масса груза, переносимого захватным устройством –  $m_4=0,5-10$  кг.

Интегрирование полученной системы уравнений в MATCAD при заданных начальных условиях позволяет вычислить управляющие моменты  $M_{Az}(t)$  и  $M_{Cz}(t)$  как функции времени.

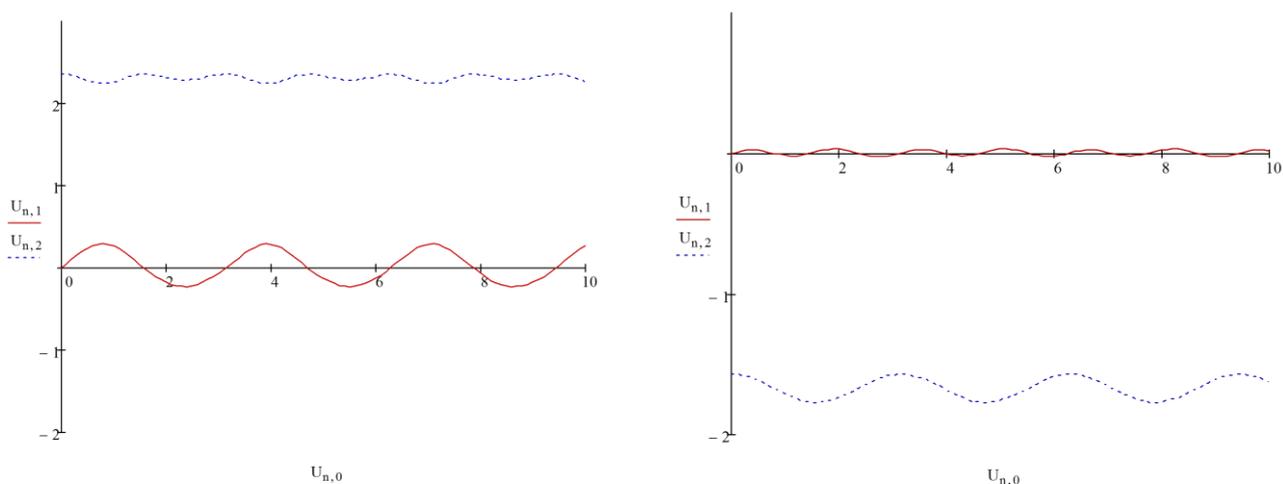


Рисунок 5 – График изменения управляющих моментов в зависимости от времени:  $M_A - U_{n1}$ ;  $M_C - U_{n2}$

Работа управляющих моментов, которая должна быть создана приводами, вычисляется формуле:

$$A(M_A) = M_A(\varphi_1 - \varphi_2); A(M_C) = M_C \cdot \varphi_3.$$

Тогда как мощность этих моментов при повороте на заданные углы рассчитывается следующим образом:

$$N(M_A) = M_A(\omega_1 - \omega_2); N(M_C) = M_C \cdot \omega_3.$$

Стандартный коэффициент запаса в приводах принимается  $k = 1,1-1,4$ .

Заключительным этапом работы является подбор привода, обеспечивающего полученные в результате расчётов моменты. В данной модификации манипуляторов предлагается использовать гидро- и сервоприводы, каждый из которых обладает своими преимуществами.

Гидравлические приводы обладают быстроедействием, малой инерционностью, высокой энергоёмкостью и достаточной жёсткостью статической нагрузочной характеристики из-за несжимаемости рабочего элемента. А также КПД на 30% выше, чем у пневматических систем, несмотря на незначительные потери рабочей жидкости в местах соединения.

Сервоприводы с управлением через отрицательную обратную связь позволяют точно управлять параметрами движения с помощью датчиков, наличие которых позволяет точно задавать углы поворота (с точностью до угловых минут), скорости вращения, ускорения.

Стремление максимально использовать и объединить достоинства различных типов приводов, а также уравновесить их недостатки приводит к использованию в узлах соединения комбинированных систем. У сервоприводов гидроэлектромеханического типа движение формируется системой поршень-цилиндр и быстроедействие на порядок выше по сравнению с электромеханическими, механическими приводами. Подробный расчёт и подбор гидроцилиндров и сервоприводов будет приведён в следующей статье по данной тематике.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов А.А., Кудрявцев С.А., Москвичев А.А. Основы робототехники: учебное пособие / А.А. Иванов и др. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Алексеева, 2011. – 200 с.
2. Корендяев А.И. Теоретические основы робототехники: учебное пособие / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
3. Новожилов И.В., Зацепин М.Ф. Типовые расчёты по теоретической механике на базе ЭВМ: учебное пособие для ВТУЗОВ. – М.: Высш. шк., 1986. – 136 с.
4. Крылов А.В., Прокопенко Н.М., Тарнопольская Т.И. Постановка задачи об управляемости манипулятора. Инновационные тенденции строительства: теоретические и прикладные аспекты: Материалы II Всероссийской студенческой научно-практической конференции – Н. Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2014. – С. 18-22.
5. Зозуля Е.Я., Смольков А.А., Крылов А.В., Тарнопольская Т.И. Кинематический и статический расчет двух- и трёхстепенных плоских манипуляторов: Труды 17-го международного научно-промышленного форума «Великие реки-2015». – 5 с.