



Заболотный К. С.

Сирченко А. А.

Жупиев А. Л.

*Государственное
высшее учебное
заведение**«Национальный горный
университет»*

Zabolotnyi K. S.

Sirchenko A. A.

Zhupiev A. L.

*State Higher Educational
Institution «National
Mining University»*

УДК 622.289.23+ 531.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА МАНИПУЛЯТОРА ТОННЕЛЬНОГО УКЛАДЧИКА

Для описания динамики трехзвенного рычажного манипулятора тоннельного укладчика использованы уравнения Лагранжа второго рода. В качестве обобщенных координат выбраны относительные углы поворотов звеньев манипуляторов. Решена прямая задача динамики манипулятора. Получены выражения управляющих моментов для основных типов движения манипуляторов. С погрешностью 7,2 %, при помощи моделирования движения в SOLIDWORKS Motion построены траектории движения. Выбраны законы управления позволяющие минимизировать рабочее время, затрачиваемое на монтаж элементов обделки.

Ключевые слова: укладчик, обделка, манипулятор, прямая задача динамики, уравнения Лагранжа.

Введение. Опыт проектирования и постройки перегонных тоннелей метрополитена, в странах постсоветского пространства (СНГ), предполагает их сооружение из постоянной строительной конструкции – обделки.

Обделка является важнейшим элементом тоннеля, воспринимающая давление окружающих горных пород и обеспечивающая сохранение размеров и формы тоннеля. Обделка также препятствует проникновению воды, нефтепродуктов и прочего из окружающего массива и наоборот – в него.

Существующие машины для монтажа обделки – тоннельные укладчики (ТУ), обладают низкой производительностью, причиной которой может быть ручное управление приводами, главного исполнительного органа – двух манипуляторов, что замедляет выполнение технологических операций. Поэтому повышение производительности при сооружении перегонных тоннелей метрополитенов является актуальной технической проблемой.

Основной функцией исполнительного органа с двумя манипуляторами (ИОДМ) является захват и транспортировка элемента обделки к месту его крепления. Также он позволяет осуществлять укладку одновременно сразу двух элементов обделки. Однако это преимущество можно эффективно реализовать

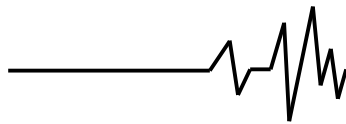
путем тщательного исследования выполняемых операций и нахождения законов управления движением манипуляторами [1] ИОДМ ТУ, что является актуальной научной задачей.

Основная часть работы. Рассмотрим манипулятор ТУ, который состоит из трех подвижных звеньев 4, 6, 9 и одного неподвижного 3, для возможности обеспечения монтажа тоннельной обделки (блоки, тьюбинги) согласно различных технологий укладки. Приводом каждого манипулятора являются силовые гидроцилиндры 5, 7, 10 соединяющие звенья и перемещающие каждое из них относительно друг друга.

Поставим задачу – найти законы изменения моментов относительных поворотов звеньев необходимых для монтажа тоннельной обделки.

В данной работе дифференциальные уравнения динамики механизма строятся на основе уравнений Лагранжа второго рода [2], в которых для выражения кинетической и потенциальной энергии использованы геометрические соотношения, показанные на рис.2.

Прежде всего проведем анализ правого манипулятора ИОДМ, используя расчетную схему (рис.1), где подвижные звенья обозначены позициями от 1 до 3. Аналогичный подход применяется к расчету левого манипулятора [3].



Введем обозначения: O_m – положение оси тоннеля; (O_m, ρ, λ) – полярная система координат, связанная с осью тоннеля; ρ – расстояние между точками O_m и O_2 ; λ – абсолютный угол поворота между осью x и $\overline{O_m O_2}$; O_0 – положение оси вращения манипулятора; O_i – положение оси вращения i -го звена относительно $i-1$ -го звена, здесь и далее $i = 1, 2, 3$; L_i – длина i -го звена; C_i – положение центра тяжести i -го звена с координатами ξ_1, η_i ; a, b – горизонтальное и вертикальное смещение оси манипулятора от оси тоннеля; r_i, α_i – радиальная координата и полярный угол центра тяжести i -го звена в полярной системе координат, связанной с осью вращения i -го звена; M_i – крутящий момент i -го звена относительно $i-1$ -го звена; q_i – угол поворота i -го звена относительно $i-1$ -го звена; φ_i – угол поворота i -го звена в неподвижной системе координат (O_0, x, y) ; P_i – вес i -го звена; m_i – масса i -го звена; α – угол $\angle O_2, O_0, O_1$; β – угол $\angle O_0, O_1, O_2$; γ – угол $\angle O_1, O_2, O_0$; s – расстояние между O_0 и O_2 ; ψ – угол между осью x и O_0, O_2 .

Кинетическая энергия манипулятора складывается из кинетических энергий каждого i -го звена

$$T = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{m_i \cdot V_i^2}{2} + \frac{I_i \cdot \dot{\varphi}_i^2}{2} \right), \quad (1)$$

где V_i – скорость центра масс i -го звена, I_i – момент инерции относительно оси вращения i -го звена,

Потенциальная энергия каждого i -го звена

$$\Pi = \sum_{i=1}^3 (P_i \cdot \eta_i - M_i \cdot q_i). \quad (2)$$

Введем обобщенные координаты q_i [4], соответствующие относительным углам поворота звеньев

$$\varphi_1 = q_1;$$

$$\varphi_2 = q_1 + q_2;$$

$$\varphi_3 = q_1 + q_2 + q_3.$$

Для описания динамики манипулятора воспользуемся уравнениями Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3$;

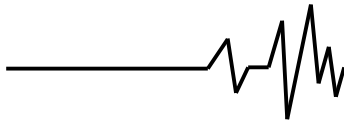
Подставляя (1) и (2) в (3) получим выражения для управляющих крутящих моментов M_i

$$M_1 = \ddot{q}_1 A_{11} + \ddot{q}_2 A_{12} + \ddot{q}_3 A_{13} + \dot{q}_1 \dot{q}_2 A_{11,2} + q_1 q_3 A_{11,3} + \dot{q}_2^2 A_{12,2} + \dot{q}_2 \dot{q}_3 (A_{12,3} + A_{13,2}) + \dot{q}_3^2 A_{13,3} + g \{ m_1 R_1 \cos(q_1 + \beta_1) + m_2 [L_1 \cos q_1 + R_2 \cos(q_1 + q_2 + \beta_2)] + m_3 [L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) + R_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + \beta_3)] \};$$

$$M_2 = \ddot{q}_1 A_{12} + \ddot{q}_2 A_{22} + \ddot{q}_3 A_{23} + \dot{q}_1 \dot{q}_2 A_{12,2} + \dot{q}_2 \dot{q}_3 A_{22,3} + \dot{q}_3^2 A_{23,3} - \frac{\dot{q}_1^2}{2} A_{11,2} - \dot{q}_1 \dot{q}_2 A_{12,2} - \dot{q}_1 \dot{q}_3 A_{13,2} + g \{ m_2 R_2 \cos(q_1 + q_2 + \beta_2) + m_3 [L_2 \cos(q_1 + q_2) + R_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + \beta_3)] \};$$

$$M_3 = \ddot{q}_1 A_{13} + \ddot{q}_2 A_{23} + \ddot{q}_3 A_{33} + \dot{q}_1 \dot{q}_2 A_{13,2} + \dot{q}_1 \dot{q}_3 A_{13,3} + \dot{q}_2 \dot{q}_3 A_{13,2} - \frac{\dot{q}_1^2}{2} A_{11,3} - \dot{q}_1 \dot{q}_2 A_{12,3} - q_1 q_3 A_{13,3} - \frac{\dot{q}_2^2}{2} A_{22,3} - \dot{q}_2 \dot{q}_3 A_{23,3} + g \{ m_3 R_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + \beta_3) \},$$

где



$$A_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + m_1 R_1^2 + m_2 [L_1^2 + 2L_1 R_2 \cos(q_2 + \bar{\alpha}_2) + R_2^2] +$$

$$+ m_3 [L_1^2 + L_2^2 + L_1 L_2 \cos q_2 + R_3^2 + 2L_1 R_3 \cos(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_2) + 2L_2 R_3 \cos(q_2 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{11,2} = -2m_2 L_1 R_2 \sin(q_2 + \bar{\alpha}_2) - m_3 [2L_1 L_2 \sin q_2 + 2L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_2)];$$

(здесь и ниже применяются обозначения для частных производных коэффициентов A_{ij}

$$A_{ij,k} \equiv \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_k};$$

$$A_{11,3} = -m_3 [2L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_2) + 2L_2 R_3 \sin(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{12} = I_2 + I_3 + m_2 [L_1 R_2 \cos(q_2 + \bar{\alpha}_2) + R_2^2] + m_3 [L_2^2 + L_1 L_2 \cos q_2 + R_3^2 +$$

$$+ L_1 R_3 \cos(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3) + 2L_2 R_3 \cos(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{12,2} = -m_2 L_1 R_2 \sin(q_2 + \bar{\alpha}_2) - m_3 [L_1 L_2 \sin q_2 + L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{12,3} = -m_3 [L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3) + 2L_2 R_3 \sin(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{13} = I_3 + m_3 [R_3^2 + L_1 R_3 \cos(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3) + L_2 R_3 \cos(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{13,2} = -m_3 L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3);$$

$$A_{13,3} = -m_3 [L_1 R_3 \sin(q_2 + q_3 + \bar{\alpha}_3) + L_2 R_3 \sin(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{22} = I_2 + I_3 + m_2 R_2^2 + m_3 [L_2^2 + R_3^2 + 2L_2 R_3 \cos(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{22,2} = 0;$$

$$A_{22,3} = -2m_3 L_2 R_3 \sin(q_3 + \bar{\alpha}_3);$$

$$A_{23} = I_3 + m_3 [R_3^2 + L_2 R_3 \cos(q_3 + \bar{\alpha}_3)];$$

$$A_{23,2} = 0;$$

$$A_{23,3} = -m_3 L_2 R_3 \sin(q_3 + \bar{\alpha}_3);$$

$$A_{33} = I_3 + m_3 R_3^2; A_{33,2} = 0; A_{33,3} = 0;$$

При укладке блоков можно выделить два типа движения: поступательное по радиусу $r \equiv r(t)$; $L = \text{const}$ и вращательное вокруг оси тоннеля $L \equiv L(t)$; $r = \text{const}$ (рис.2).

Для перехода от полярной системы координат $O_m r \lambda$ к декартовой системе $xO_0 y$

$$x_2 = a + r \cos \lambda;$$

$$y_2 = b + r \sin \lambda.$$

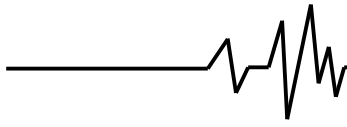
Найдем выражение для законов изменения обобщенных координат $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$.

Из треугольника $\angle O_0, O_1, O_2$ следует, что $S = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$,

$$\alpha = \arccos \frac{L_1^2 + L_2^2 - S^2}{2L_1 L_2},$$

$$\bar{\alpha} = \arccos \left[\frac{S^2 + L_1^2 - L_2^2}{2SL_1} \right],$$

$$\beta = \arctg \left(\frac{y_2}{x_2} \right).$$



Тогда с учетом, что третье звено всегда направлено по радиусу тоннеля выражение для зависимостей обобщенных координат от времени примет вид

$$q_1(t) = \Pi(t) + \Gamma(t);$$

$$q_2(t) = \nu(t) - \rho;$$

$$q_3(t) = \lambda(t) - q_1(t) - q_2(t).$$

Тестирование полученных законов управляющих моментов в SOLIDWORKS Motion.

В качестве примера рассмотрим характерную задачу подъема блока, поворота манипулятора и установку блока в кольцо обделки.

Для конструкции укладчика разработанного в НГУ (Национальном горном университете) справедливы следующие значения геометрических и инерционных параметров звеньев механизма:

$$m_1 = 602,3 \text{ кг},$$

$$m_2 = 397,6 \text{ кг},$$

$$m_3 = 73,2 \text{ кг};$$

$$I_1 = 431,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_2 = 323,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_3 = 1,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$L_1 = 1590 \text{ м}; L_2 = 1770 \text{ м}; L_3 = 270 \text{ м}.$$

Моменты M_i , действующие в сочленениях O_i , где $i = 1, 2, 3$, задавались в виде выражений, полученных из решения прямой задачи динамики для предельного ускорения $a = 0,1g$ (рис. 3).

Задавались значения трех радиусов $R_1 = 2500 \text{ мм}, R_2 = 2100 \text{ мм},$

$R_3 = 2700 \text{ мм}$ и угол поворота $\alpha = 60^\circ$, определяющие траекторию, по которой должна перемещаться точка соединения второго и третьего звена. Также учитывался собственный вес конструкции G .

В результате расчета, по заданным моментам, получена траектории точки соединения второго и третьего звена и блока.

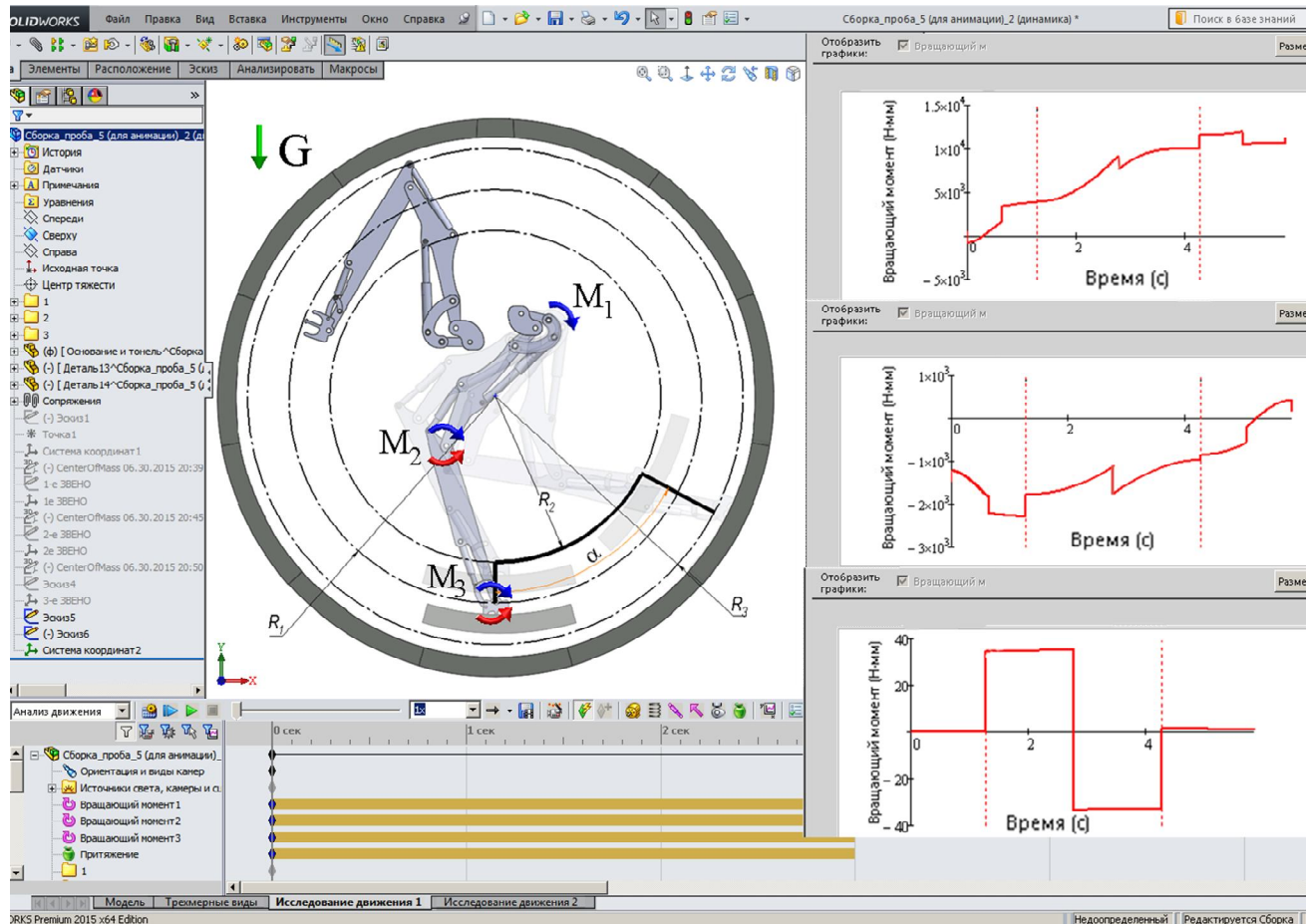
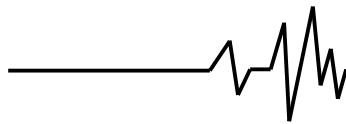


Рис. 3. Траектория движения точки соединения второго и третьего звена, полученная в программе SOLIDWORKS Motion, по заданным управляющим моментам



Выводы. 1. На основании уравнений Лагранжа 2-го рода разработана математическая модель манипулятора тоннельного укладчика. 2. В результате решения прямой задачи динамики получены выражения для управляющих моментов между звеньями манипуляторов позволяющих осуществить операции подъема, поворота и установки блока обделки. 3. Выбраны оптимальные законы управления позволяющие минимизировать рабочее время, затрачиваемое при монтаже элементов обделки.

Список использованных источников

1. Белоусов И.Р. Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов. Препринт ИПМ РАН № 45, 2002. – 28 с.
2. Босьяков С. М. Кинематическое и динамическое моделирование механических систем. – Минск: БГУ, 2011. – 260 с.
3. Журавлев Е.А. Использование базисных функций для описания динамики манипулятора // Исследования. Технологии. Инновации: сб. статей; под ред. В.А. Иванова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 107–110.
4. Курс теоретической механики / под ред. К.С. Колесников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.

Список источников в транслитерации

1. Belousov I.R. Formirovanie uravnenij dinamiki robotov-manipuljatorov. Preprint IPM RAN no. 45, 2002. 28 p.
2. Bosjakov S.M. Kinematicheskoe i dinamicheskoe modelirovanie mehanicheskikh sistem. – Minsk: BGU, 2011. 260 p.
3. Zhuravlev E.A. Ispol'zovanie bazisnyh funkcij dlja opisanija dinamiki manipuljatora // Issledovaniya. Tehnologii. Innovacii: sb. statej pod red. V.A. Ivanova. Joshkar-Ola: MarGTU, 2011. pp. 107–110.

4. Kurs teoreticheskoy mehaniki / red. K.S. Kolesnikov. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2005. 736 p.

ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧИ ДИНАМІКИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МАНІПУЛЯТОРА ТУНІЛЬНОГО УКЛАДАЛЬНИКА

Анотація. Для опису динаміки триланкового важільного маніпулятора тунельного укладальника використані рівняння Лагранжа другого роду. В якості узагальнених координат вибрані відносні кути поворотів ланок маніпуляторів. Вирішено пряму задачу динаміки маніпулятора. Отримано вирази керуючих моментів для основних типів руху маніпуляторів. З похибкою 7,2%, за допомогою моделювання руху в SOLIDWORKS Motion побудовані траєкторії руху. Обрані закони управління дозволяють мінімізувати робочий час, що витрачається на монтаж елементів обробки.

Ключові слова: укладальник, опорядження, маніпулятор, пряма задача динаміки, рівняння Лагранжа.

DESIGN OF THE MANIPULATOR FOR TUNNEL ERECTOR BASED ON DIRECT DYNAMIC PROBLEM

Annotation. Lagrange equations of the second kind are used to describe the dynamics of three-link manipulator lever tunnel stacker. Relative angles of rotation of manipulators units chosen as the generalized coordinates. The problem of the direct dynamics of the manipulator is solved. Expressions control torques for the main types of motion manipulators is given. With an accuracy of 7.2%, using the motion simulation built in SOLIDWORKS Motion trajectory. Conclusions are drawn about selected control laws allowing to minimize the working time spent on the installation of the lining elements.

Key words: erector, lining, manipulator, direct dynamics problem, the Lagrange equations.