

ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНОГО МАНИПУЛЯТОРА ЧЕРЕЗ КРИТЕРИЙ ПОЛЕЗНОЙ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ МЕТОДОМ ЗАМКНУТЫХ ВЕКТОРНЫХ КОНТУРОВ

Лукиенко Л.В.¹, Гальченко К.В.²

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула;
ООО «ЭКОТЭЧ», Новомосковск*

Ключевые слова: манипулятор, зона обслуживания, метод замкнутых векторных контуров, щитовой проходческий комплекс, тубинг, гидроцилиндр, крепление выработки.

Аннотация. Из-за роста населения в крупных городах, строительство подземного транспорта с каждым годом приобретает большее распространение и актуальность. Строительство производится с помощью щитовых проходческих комплексов. На скорость работы комплексов в свою очередь влияет процесс закрепления проводимой выработки, осуществляемый с помощью манипуляторов различных конструкций. Применение предложенной трехзвенной схемы манипулятора позволит увеличить зону обслуживания до 63,8%. Для синтеза геометрических параметров манипулятора предложена математическая модель определения площади зоны обслуживания, которая основывается на методе замкнутых векторных контуров. Математическая модель была проверена методом графической прорисовки. Расхождение результатов не превышает 6,81%. При проведении исследований обнаружены зависимости увеличения длины линейного перемещения выходного звена по профилю горной выработки на 10,1% в зависимости от длины второго звена манипулятора. Математическая модель и выведенные зависимости позволят ускорить процесс проектирования манипуляторов для крепления горной выработки.

EVALUATION OF VARIOUS VARIATIONS OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE MINE MANIPULATOR THROUGH THE CRITERION OF THE SERVICE AREA DEFINED BY THE METHOD OF CLOSED VECTOR CONTOURS

Lukienko L.V.¹, Galchenko K.V.²

*Tula State Pedagogical University n.a. L.N. Tolstoy, Tula;
LLC "ECOTECH", Novomoskovsk*

Keywords: manipulator, service area, closed vector contour method, shield tunneling complex, tubing, hydraulic cylinder, mine support.

Abstract. Due to the growth of the population in large cities, the construction of underground transport is becoming more widespread and relevant every year. The construction is carried out using shield tunneling complexes. The speed of the complexes is influenced by the process of securing the excavation, which is carried out using manipulators of various designs. The use of the proposed three-link manipulator scheme will increase the service area to 63.8%. A mathematical model for determining the service area is proposed for the synthesis of the manipulator's geometric parameters. This model is based on the method of closed vector contours. The mathematical model was verified using the graphical drawing method. The discrepancy in the results does not exceed 6.81%. During the research, it was found that the length of the linear movement of the output link along the mine workings profile increases by 10.1% depending on the length of the second link of the manipulator. The mathematical model and derived dependencies will accelerate the process of designing manipulators for mining workings.

Введение

В связи со значительным увеличением транспортных потоков в современных городах резко возрастает необходимость развития подземного транспорта. Эта важная народно-хозяйственная задача может быть решена за счёт строительства дополнительных линий метро. Согласно стратегии развития транспортной системы г. Москвы и Московской области на период до 2035 года, одним из направлений развития было выбрано увеличение протяженности

сети метрополитена не только для расширения зоны существующей сети, но и для разгрузки радиальных направлений на подходе к центральной части города. В соответствии с программой строительства Московского метрополитена с 2025 по 2035 год, в Москве планируется открыть 33 станции метро с 2025 по 2030 год и 30 станций метро с 2031 по 2035 год.

Необходимость интенсификации производства, а также современные требования к производству промышленных работ предполагают повышение безопасности труда при снижении трудозатрат обслуживающего персонала. Решение этой важной научно-технической задачи может быть достигнуто за счёт модернизации щитовых проходческих комплексов, при помощи которых ведётся строительство линий метрополитена [1-5].

Проходка магистральных подземных выработок при помощи щитовых проходческих комплексов предполагает выполнение следующих операций: разработку забоя при помощи исполнительного органа; погрузку разрушенного в забое материала на внутришахтный транспорт; подъём этого материала на поверхность; подачу тубингов или бетонных блоков для крепления выработки на рабочее место; установку тубингов при помощи крепеукладчиков для обеспечения сплошного крепления выработки; расчеканку швов между тубингами и нагнетание цементного раствора за обделку выработки [6-9].

Производительная работа щитовых проходческих комплексов в значительной степени зависит от механизации, автоматизации и качества выполнения операции крепления проходимых горных выработок. Основные сложности связаны со значительными размерами проходимых горных выработок размер диаметра, которых достигают до 5 м, и с большим весом крепёжных элементов – тубингов, вес которых достигает до 2 т.

Для выполнения операции крепления горных выработок до настоящего времени не разработано единого конструктивного решения, позволяющего механизировать эту операцию при значительном расширении зоны обслуживания, а также снизить трудозатраты обслуживающего персонала. В связи с развитием горной промышленности возникла необходимость в создании машин, которые смогли бы увеличить скорость проходки за счет увеличения полезной зоны обслуживания.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследования используем конструкцию манипулятора, которая состоит из базовой плиты, захвата, трех рычажных звеньев, взаимное расположение которых определяется гидродомкратами (рис. 1).

Манипулятор, степень подвижности которого равна трем, предназначен для выполнения основных и вспомогательных технологических операций при креплении горной выработки. Он должен обеспечивать перемещение объекта манипулирования по заданной траектории. Например, прямой, за счет скорости работы приводных механизмов.

Выбор схемы трехзвенного манипулятора обусловлен увеличенной зоной обслуживания относительно других принципиальных схем (рис. 2). При прочих равных условиях зона обслуживания трехзвенного манипулятора превышает зону обслуживания до 63,8% относительно других схем.

Для моделирования работы манипулятора используем метод замкнутых векторных контуров, который основан на представлении механизма в виде отдельных векторов, образующих замкнутый векторный контур (рис. 3).

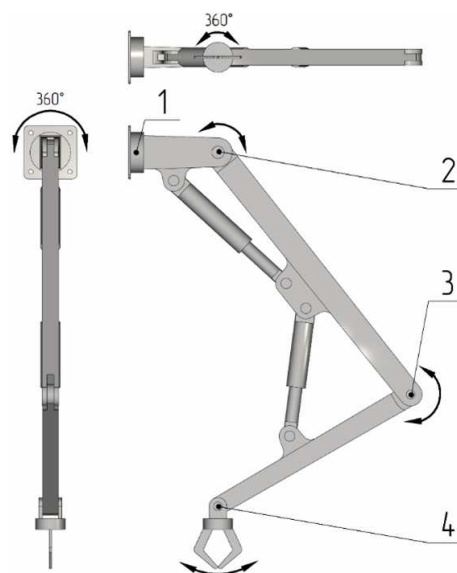


Рис. 1. Принципиальная схема манипулятора для крепления горной выработки: 1, 2, 3, 4 – шарниры, соединяющие звенья манипулятора

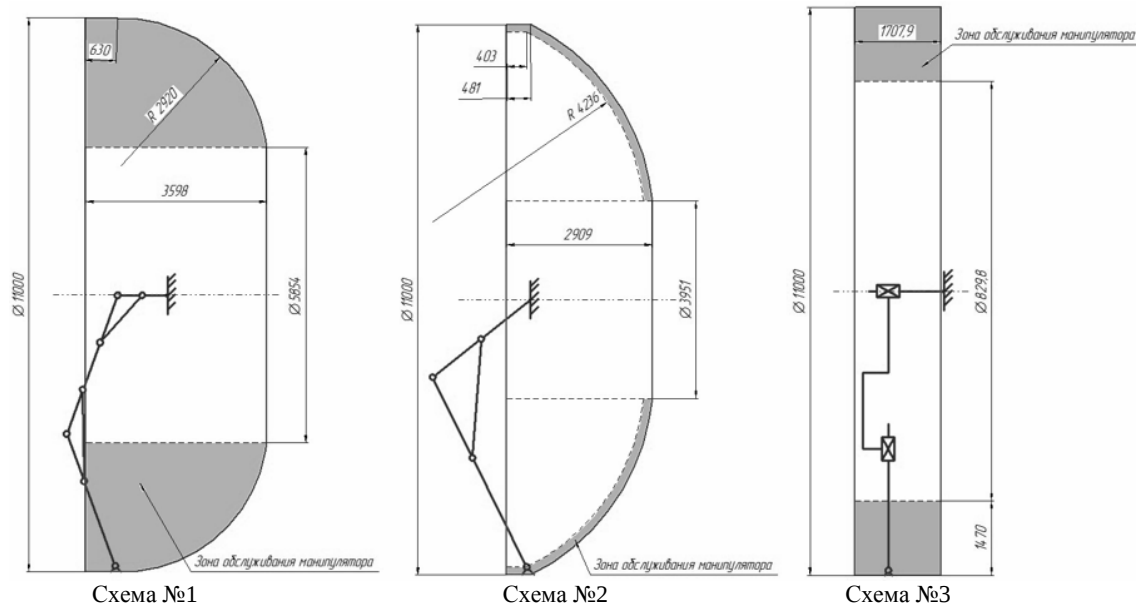


Рис. 2. Моделирование зон обслуживания манипуляторов различных схем

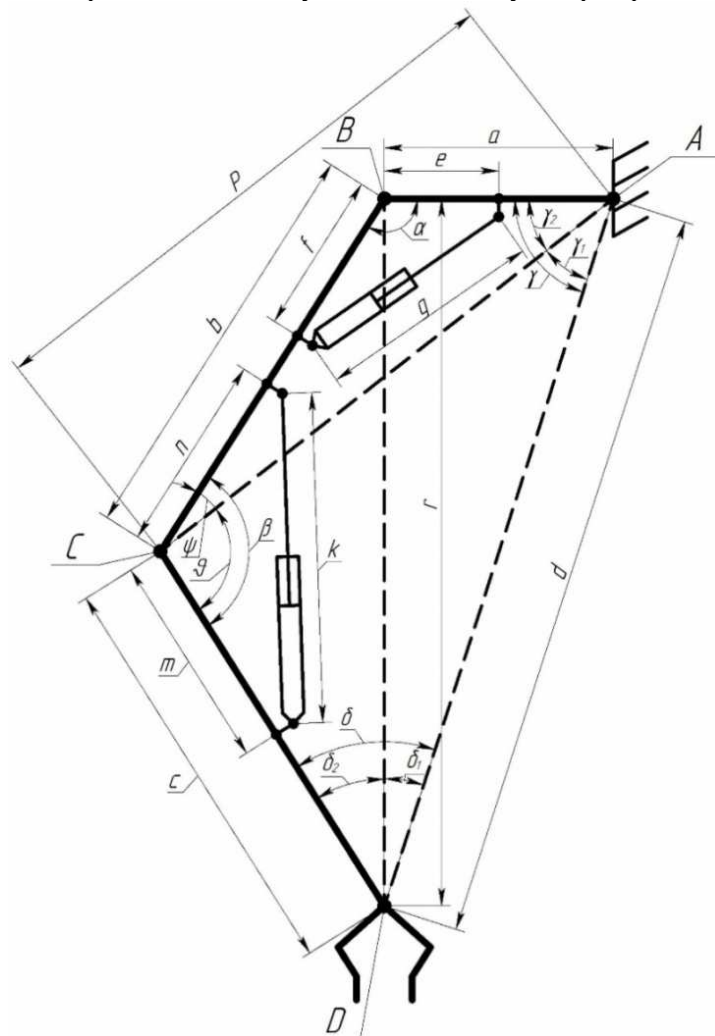


Рис. 3. Расчётная схема математической модели манипулятора: $a = AB$ – длина плеча манипулятора; $b = BC$ – длина предплечья; $c = CD$ – длина руки манипулятора; α – угол между звеном AB и BC ; β – угол между звеном BC и CD ; δ – угол между прямыми CD и AD ; δ_1 и δ_2 – разделенный угол δ прямой BD ; ψ – угол между BC и AC ; θ – угол между AC и CD ; e, f, n, m – расстояния точки крепления гидроцилиндров; g, k – длины гидроцилиндров; d – расстояние от базовой точки манипулятора до выходного звена; γ – угол между плечом AB и d ; γ_1, γ_2 – разделенный угол γ прямой AC ; p – расстояние от точки A до C ; r – расстояние от точки B до D

К основным достоинствам метода можно отнести [10]: простоту – реализация модели не требует больших математических вычислений и, соответственно, производительных вычислительных систем; возможность варьирования шага изменения промежуточных и основных аргументов модели; возможность оперативно добиваться нужной точности вычислений. Основной недостаток метода состоит в том, что необходимо определять аргументы модели и связи между отдельными векторами и контурами в каждый момент времени.

Для однозначного определения положения устройства захвата необходимо установить значения вектора d и угла γ :

$$d = \frac{2 \cdot a \cdot \cos \gamma \pm \sqrt{4 \cdot a^2 \cdot \cos^2 \gamma - 4 \cdot (a^2 - b^2 - c^2 + 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \beta)}}{2}. \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет два решения, одно из которых будет принимать отрицательное значение, что невозможно с точки зрения конструкции манипулятора. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать положительное решение данного уравнения.

Угол между звеном a и b :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{e^2 \cdot f^2 - g^2}{2 \cdot f \cdot e}\right). \quad (2)$$

Угол между звеном b и c :

$$\beta = \arccos\left(\frac{k^2 \cdot n^2 - m^2}{2 \cdot n \cdot m}\right), \quad (3)$$

Угол между плечом AB и d :

$$\gamma = 2 \cdot \pi - \alpha + \beta + \arcsin\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos \alpha} \cdot \sin(\beta - \psi)}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos \alpha} \cdot (\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos \alpha} + c \cdot (c - 2 \cdot \cos(\beta - \psi)))}\right), \quad (4)$$

Подставив зависимости (2)-(4) в выражение (1), мы получим уравнение для определения местонахождения точки D относительно точки A (базовая точка), зависящее от работы двух гидроцилиндров.

Для определения площади обслуживания исследуемой схемы трёхзвенного манипулятора необходимо установить точки нахождения выходного звена при граничных условиях работы приводных гидроцилиндров (рис. 4).

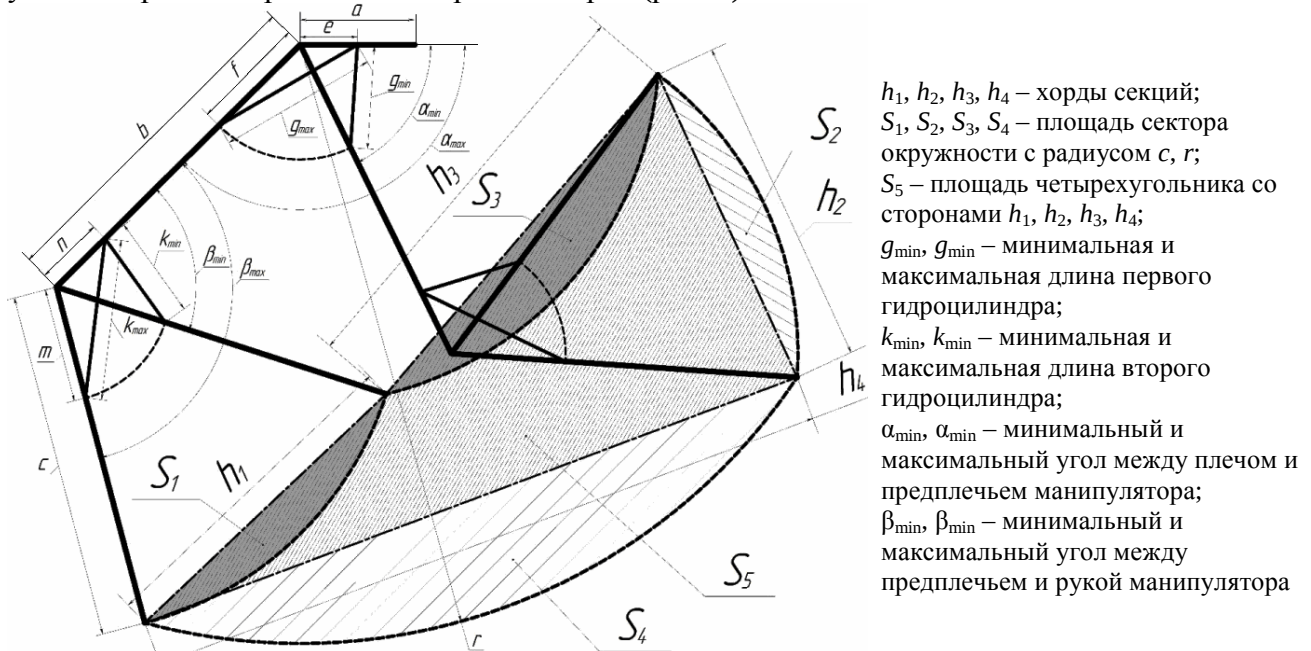


Рис.4. Расчетная схема шахтного рычажного манипулятора для определения площади возможных вариантов сечения

Исходя из расчетной схемы, площадь возможных вариантов перемещения выходного звена манипулятора равна:

$$S_6 = S_5 + S_2 + S_4 - S_1 - S_3, \quad (5)$$

где S_6 – площадь возможных вариантов перемещения выходного звена манипулятора.

Получим формулу площади зоны обслуживания:

$$\begin{aligned} S_6 = & \sqrt{\left(\frac{h_2 + h_3 + h_4 - h_1}{2}\right) \cdot \left(\frac{h_1 + h_3 + h_4 - h_2}{2}\right) \cdot \left(\frac{h_1 + h_2 + h_4 - h_3}{2}\right) \cdot \left(\frac{h_1 + h_3 + h_3 - h_4}{2}\right)} + \\ & + \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{a^2 + b^2 - b \cdot c \cdot \cos\left(\arccos\left(\frac{n^2 + m^2 - k_{\max}^2}{2 \cdot n \cdot m}\right)\right)}\right)^2 \cdot \right. \\ & \cdot \left(\left(\arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\max}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right) - \arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\min}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right)\right) - \right. \\ & \left. \left. - \sin\left(\arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\max}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right) - \arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\min}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right)\right)\right)\right) - \\ & - \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{a^2 + b^2 - b \cdot c \cdot \cos\left(\arccos\left(\frac{n^2 + m^2 - k_{\min}^2}{2 \cdot n \cdot m}\right)\right)}\right)^2 \cdot \right. \\ & \cdot \left(\left(\arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\max}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right) - \arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\min}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right)\right) - \right. \\ & \left. \left. - \sin\left(\arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\max}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right) - \arccos\left(\frac{e^2 + f^2 - g_{\min}^2}{2 \cdot e \cdot f}\right)\right)\right)\right). \end{aligned}$$

Результаты

Для проверки адекватности предложенной математической модели манипулятора используем метод графического моделирования работы выходного звена манипулятора. Основным достоинством этого метода является его наглядность и простота реализации.

Для исследования были определены значения основных геометрических параметров манипулятора (табл. 1).

Исходя из геометрической обоснованности, диапазон работы первого и второго гидроцилиндра был определен от 900 до 1400 мм.

Табл. 1. Значение основных геометрических параметров манипулятора

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Максимальный вылет стрелы	L	мм	5500
Длина первого звена	a		1000
Длина второго звена	b		от 3000 до 3500
Длина третьего звена	c		от 2509 до 3036,2
Расстояния, определяющие точки крепления гидроцилиндров	e		500
	f		1000
	n		600
	m		1000

В процессе исследования были определены области (рис. 5): 1 – описывает движение первого гидроцилиндра, область; 2 – движение второго гидроцилиндра, 3 – область «полезной» площади перемещения выходного звена («полезная» площадь – эта площадь,

которая ограничена возможной траекторией движения выходного звена), 4 – область ограничения площади, описываемой траекторией движения выходного звена, обусловленная диаметром проходимой выработки.

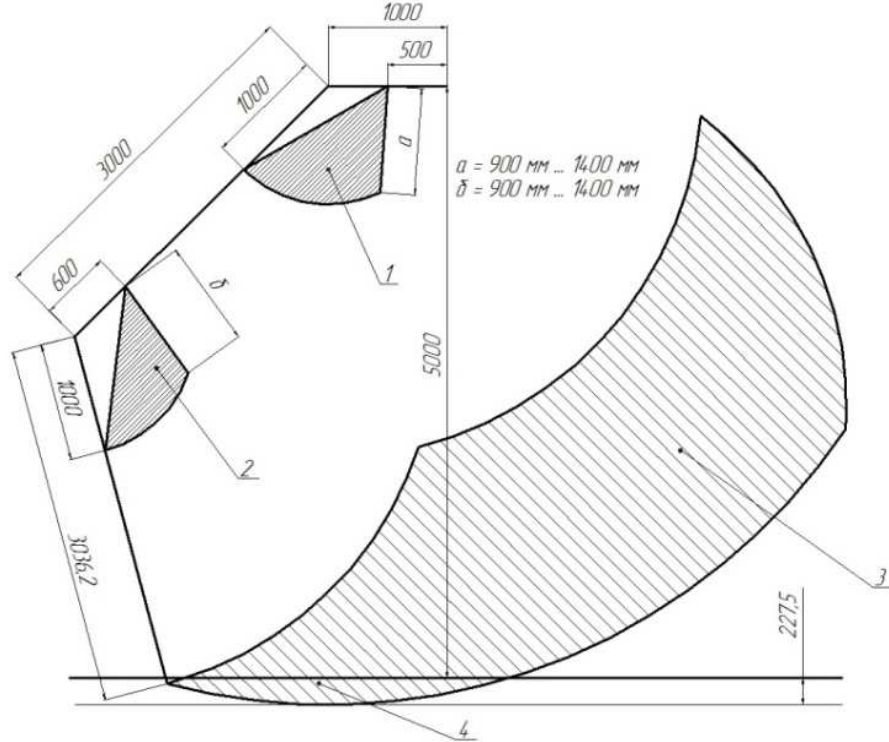


Рис. 5. Плоскость, которая описывающая траектории движения выходного звена, на примере манипулятора с геометрическими размерам звеньев равными 1000х3000х3036,2 мм

Выводы

Проведя исследования в диапазонах параметров, указанных в таблице 1 получим плоскости, описывающие траектории движения выходного звена манипулятора (рис. 6).

Сопоставление результатов графического моделирования с аналитическими исследованиями позволяет сделать вывод о том, что расхождение не превышает 6,81%. Это находится в допустимых пределах.

При синтезе геометрических параметров манипулятора с учетом обеспечения максимальной зоны обслуживания необходимо стремиться к максимальной длине линейного перемещения выходного звена по поверхности выработки для достижения возможности крепления и ремонта при необходимости нескольких колец обделок.

Исходя из результатов графического моделирования и расчетов на основе метода замкнутых векторных контуров (рис. 7).

Можно сделать вывод о тенденции увеличения длины линейного перемещения выходного звена по профилю горной выработки, за счет увеличения длины второго звена манипулятора. И в то же время уменьшения полезной зоны обслуживания.

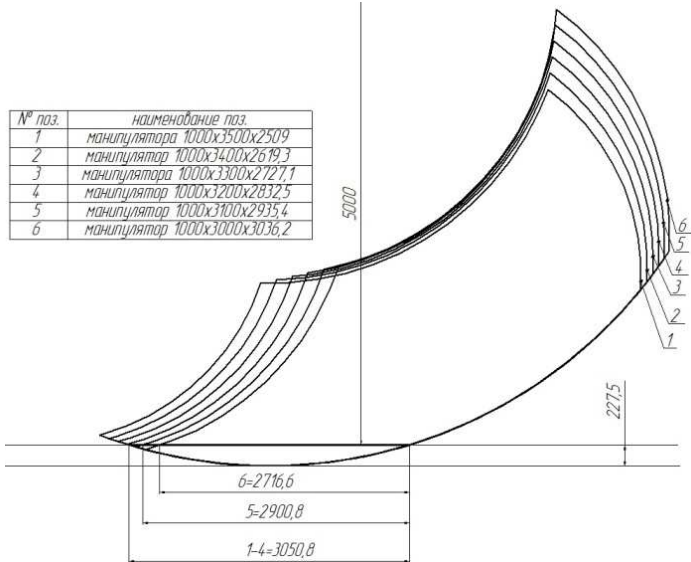


Рис. 6. Плоскости, описывающие траектории движения выходного звена манипуляторов

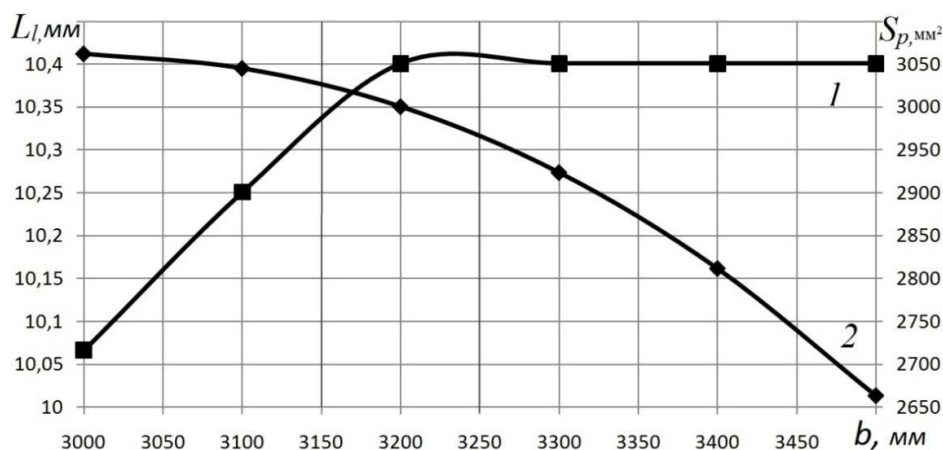


Рис. 7. Результаты материалов графического моделирования и расчетов на основе метода замкнутых векторных контуров: 1 – зависимость диапазона линейного перемещения L_l ; 2 – зависимость «полезной» площади возможной траектории движения выходного звена S_p от длины второго звена манипулятора b

Заключение

1. Предложены зависимости для определения возможного перемещения выходного звена манипулятора, основанного на методе замкнутых векторных контуров, которые позволяют оперативно определить положение выходного звена манипулятора. При этом сокращаются временные затраты на принятие обоснованных конструктивных решений при проектировании.

2. На основе анализа различных конструкций рычажных манипуляторов предложена кинематическая схема, которая обладает рациональной маневренностью и имеет необходимое и достаточное количество элементов.

3. Установлено, что при проектировании трехзвенных манипуляторов для крепления горной выработки необходимо стремиться к максимальному линейному перемещению выходного звена по профилю горной выработки и к максимальной «полезной» площади возможной траектории движения выходного звена. Проведенный анализ различных сочетаний конструктивных параметров звеньев манипулятора показал, что наиболее предпочтительным является сочетание: длина плеча 1000 мм; длина предплечья 3200 мм; длина руки 2832,5 мм. При этом происходит расширение рабочей зоны обслуживания.

4. При увеличении длины второго звена с 3000 мм до 3200 мм увеличивается длина линейного перемещения выходного звена по профилю горной выработки на 10,1 % (что увеличивает рабочую поверхность зоны обслуживания), при увеличении длины второго звена манипулятора с 3200 мм до 3500 мм длина линейного перемещения выходного звена остается постоянной и составляет 3050,8 мм. При увеличении длины второго звена манипулятора с 3000 мм до 3500 мм «полезная» площадь возможного перемещения выходного звена манипулятора уменьшается с 10,9 м² до 10,5 м².

Список литературы

1. Валиев А.Г., Власов С.Н., Самойлов В.П. Современные щитовые машины с активнымпригрузом забоя для проходки тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях. – М.: ЗАО «ТА Инжиниринг», 2003. – 74 с.
2. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М., Поляков Ал.В., Поляков Ан.В. Щитовые проходческие комплексы. – М.: Горная книга, 2009. – 447 с.
3. TunnelBoringMachines (SHIELD&TBM). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.global.kawasaki.com/en/industrial_equipment/industries/Tunnel_Boring_Machines_E.pdf.
4. Зайков В.И. Области применения выбор типа проходческого щита // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – №6. – С. 9-10.
5. Нестерук Д.Н. Анализ рынка применения щитовых проходческих комплексов в РФ // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 234-236.

6. Абрамчук В.П., Власов С.Н., Мостков В.М. Подземные сооружения. – М.: ТА Инжиниринг, 2005. – 464 с.
7. Зайков В.И., Берлявский Г.П. Эксплуатация горных машин и оборудования. – М.: МГГУ, 2001. – 257 с.
8. Храпов В.Г., Демешко Е.А., Наумов С.Н. Тоннели и метрополитены. – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.
9. Меркин В.Е., Власов С.Н., Макаров О.Н. и др. Справочник инженера-тоннелщика. – М.: Транспорт, 1993. – 389 с.
10. Кравченко В.М. Основы теории функционирования и повышения эксплуатационной надёжности карьерного оборудования как динамической системы разноресурсных элементов: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Донецк, 2000. – 34 с.

References

1. Valiev A.G., Vlasov S.N., Samoilov V.P. Modern shield machines with active face loading for tunneling in difficult engineering and geological conditions. – M.: TA Engineering CJSC, 2003. –74 p.
2. Brenner V.A., Zhabin A.B., Shchegolevsky M.M., Polyakov Al.V., Polyakov An.V.. Shield tunneling complexes. – M.: Mining book, 2009. – 447 p.
3. TunnelBoringMachines (SHIELD&TBM). [Electronic resource]. – Access mode: http://www.global.kawasaki.com/en/industrial_equipment/industries/Tunnel_Boring_Machines_E.pdf.
4. Zaikov V.I. Fields of application: choosing the type of tunneling shield // Mining information and analytical bulletin. 1999, no. 6, pp. 9-10.
5. Nesteruk D. N. Market analysis of panel tunneling systems in the Russian Federation // Innovative technologies and economics in mechanical engineering: proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. – Tomsk: TPU, 2015. – P. 234-236.
6. Abramchuk V.P., Vlasov S.N., Mostkov V.M. Underground structures. – M.: TA Engineering, 2005. – 464 p.
7. Zaikov V.I., Berlyavsky G.P. Exploitation of mining machinery and equipment. – M.: MSMU, 2001. –257 p.
8. Khrapov V.G., Demeshko E.A., Naumov S.N. Tunnels and subways. – M.: Transport, 1989. – 383 p.
9. Merkin V.E., Vlasov S.N., Makarov O.N. at al. Handbook of a tunneling engineer. – M: Transport, 1993. – 389 p.
10. Kravchenko V.M. Fundamentals of the theory of functioning and improvement of operational reliability of mining equipment as a dynamic system of diverse resource elements: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc. – Donetsk, 2000. –34 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лукненко Леонид Викторович – доктор технических наук, профессор	Lukienko Leonid Viktorovich – doctor of technical sciences, professor
Гальченко Константин Викторович – начальник конструкторско-технологического отдела	Galchenko Konstantin Viktorovich – head of the design and technology Department
Lukienko_lv@mail.ru	

Получена 16.09.2025