

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-40-22-27>

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР БУРОВЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Евдокимов А.П.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Ключевые слова: манипулятор, бурильный агрегат, кинематическая пара, вектор, система координат.

Аннотация. Разработаны методические принципы единого подхода к анализу и синтезу структур буровых манипуляторов. Основой разработки является главный вектор направления рабочего органа бурильной машины. При этом положение в пространстве будет характеризоваться углами Эйлера – прецессии, мутации и собственного вращения. В результате проведённого исследования получены зависимости связи углов Эйлера и главным вектором, которые являются координатами бурильной машины.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF KINEMATIC STRUCTURES OF DRILLING MANIPULATORS

Evdokimov A.P.

*A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Keywords: manipulator, drilling unit, kinematic pair, vector, coordinate system.

Abstract. Methodological principles of a unified approach to the analysis and synthesis of structures of drilling manipulators have been developed. The basis of the development is the main vector of the direction of the working body of the drilling machine. In this case, the position in space will be characterized by the Euler angles of precession, mutation and proper rotation. As a result of the conducted research, the dependences of the relationship between the Euler angles and the main vector, which are the coordinates of the drilling machine, are obtained.

При создании подземных горных выработок и добыче полезных ископаемых в последние годы широкое применение получили буровые агрегаты, оснащённые мощными и сложными по своей структуре манипуляторами [1-4]. В основные функции таких манипуляторов входят: удержание бурильной машины при транспортировке и бурении, наведение её в нужное место забоя горной выработки, раскрепление её между шасси и забоем. Необходимо также отметить, что применение робототехнических манипуляторов повышает безопасность в нефтяной и газодобывающей промышленности [5].

Опыт эксплуатации буровых агрегатов позволяет утверждать, что все они служат одной цели: в конкретном месте забоя, в соответствии с требованиями обуривания забоя, воздействовать на буровую коронку так, чтобы она произвела определённым образом сориентированный шпур. Это

утверждение является основанием для разработки методических принципов единого подхода к анализу и синтезу структур буровых манипуляторов.

Рассмотрим процесс обуривания забоя. Считаем, что буровой инструмент (буровая коронка диаметром d) имеет возможность перемещаться на определённую длину вдоль оси предполагаемого шпура. Для получения следующего шпура необходимо буровую коронку извлечь из предыдущего, определённым образом переместить и сориентировать её относительно поверхности забоя, а затем произвести её разрушение горной породы на требуемую глубину.

Следовательно, конструктивные отличия различных видов буровых манипуляторов определяются способами реализации перемещения и ориентации буровой коронки в пространстве забоя.

Так как размеры буровой коронки существенно малы по сравнению с размерами всего агрегата, введём понятие единичного вектора направления бурового инструмента призабойном пространстве. Условно назовём этот вектор «Главным вектором направления рабочего органа» бурового агрегата. В дальнейшем под ним будем понимать единичный вектор-орт, совпадающий с осью вращения инструмента с плоскостью, перпендикулярной этой оси и проходящей через точку, ограничивающую продольный размер коронки со стороны лезвия и направленный в сторону забоя шпура. Обозначим начало этого вектора через ρ_0 , а сам вектор через $\bar{\rho}_0$.

Вектор $\bar{\rho}_0$ будем рассматривать в системе координат $OXYZ$, жёстко связанной с шасси агрегата таким образом, чтобы ось OY была направлена вдоль продольной оси агрегата, а начало координат совпадало с центром кинематической пары, связывающей манипулятор с шасси (рис. 1).

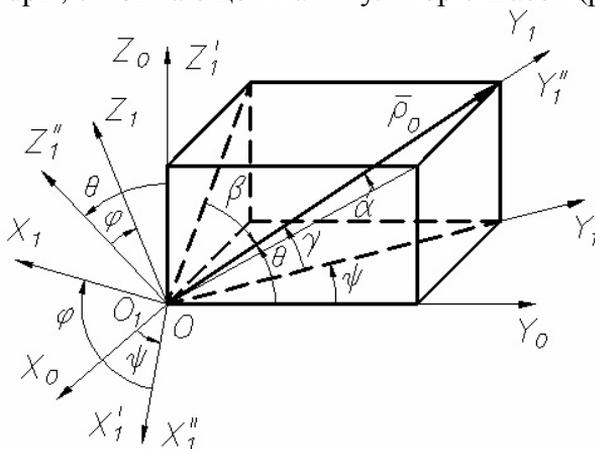


Рис. 1. К определению направления вектора $\bar{\rho}_0$ в пространстве забоя

В этом случае зона бурения агрегата может быть принята параллельной плоскости OXZ основной системы координат и отстоящей от её начала на расстоянии

$$Y = \text{const.} \quad (1)$$

Условие (1) позволяет при определении технологических возможностей различных структур буровых манипуляторов рассматривать кинематические цепи последних как замкнутые, в которых за неподвижное звено (стойку) принимается шасси бурового агрегата совместно с плоскостью забоя, а замыкание с плоскостью забоя осуществляется точечной, совпадающей с началом вектора $\bar{\rho}_0$ пятиподвижной кинематической парой.

Вектор $\bar{\rho}_0$ при замыкании его начала на забой удобнее рассматривать в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$, оси которой одинаково направлены с осями основной системы координат, а начало отсчёта лежит на продолжении оси OY и принадлежит плоскости забоя (рис. 1).

Тогда, в соответствии с требованиями буровзрывных работ, устье шпура и его направление можно охарактеризовать двумя линейными параметрами x_0 , z_0 и двумя угловыми параметрами α , γ . Здесь $x = x_0$ и $z = z_0$ – координаты устья шпура в основной системе координат и в системе координат, связанной с плоскостью забоя соответственно; α – угол наклона шпура с вертикальной плоскостью выработки; γ – угол наклона шпура с горизонтальной плоскостью выработки.

Углы, которые должен составлять вектор $\bar{\rho}_0$ с осями базиса $OXYZ$ (или $O_0X_0Y_0Z_0$) при бурении шпура требуемой ориентации, можно определить из следующих уравнений (рис. 1):

$$\rho_0^x = \sin \alpha; \rho_0^y = \sin \beta; \rho_0^z = \sin \gamma; \beta = \arcsin \sqrt{1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \gamma}, \quad (2)$$

где β – угол наклона шпура с плоскостью забоя; $\rho_0^x, \rho_0^y, \rho_0^z$ – направляющие косинусы вектора $\bar{\rho}_0$ в системе координат $OXYZ$.

Задачу изменения положения вектора $\bar{\rho}_0$ в пространстве забоя можно сформулировать следующим образом. Структура бурового манипулятора должна обеспечивать перемещение начала P_0 вектора $\bar{\rho}_0$ в любую точку плоскости забоя с учётом требуемой его ориентации относительно осей основной системы координат. При этом следует различать ориентирующие и переносные движения манипулятора, обеспечивающие соответственно требуемую ориентацию вектора $\bar{\rho}_0$ и смещение его начала P_0 в заданную точку плоскости забоя.

При ориентировании вектора $\bar{\rho}_0$ на бурение в заданной точке забоя, требуемого по направлению шпура, его конец описывает сферу единичного радиуса с центром в точке P_0 , которая характеризуется заданными ординатами X_0 , Y_0 . В этом случае каждой точке сферы соответствует определённое положение вектора $\bar{\rho}_0$ и его направление можно определить при помощи углов ψ и θ , которые являются координатами сферической системы координат. Здесь ψ – азимутальный угол, θ – полярный угол. Можно заметить, что углы являются углами Эйлера, если рассматривать движение бурильной машины как твёрдого тела относительно неподвижной точки.

Выделим из всех плоскостей, проходящих через главный вектор, плоскость симметрии бурильной машины. Её положение в пространстве можно задать при помощи углов Эйлера.

Совместим с началом вектора \bar{p}_0 центр системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ таким образом, чтобы ось O_1Y_1 совпадала с направлением вектора \bar{p}_0 . Ось O_1Z_1 принадлежала плоскости симметрии бурильной машины, а ось O_1X_1 образовывала правую систему координат.

При настройке рабочего органа на бурение требуемого по направлению шпура бурильная машина, следовательно, и связанная с ней система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ каким-то образом развернётся по отношению к основной системе координат. Это смещение можно охарактеризовать тремя углами Эйлера – углом прецессии ψ , углом нутации θ и углом собственного вращения φ . Первые два угла определяют положение вектора \bar{p}_0 в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$, а третий угол определяет положение бурильной машины при повороте её относительно бурильного шпура.

Из рисунка 1 следует, что углы ψ и θ определяются углами α и γ следующими зависимостями:

$$\psi = \arcsin \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma}; \theta = \gamma. \quad (3)$$

Угол собственного вращения φ зависит от положения плоскости симметрии бурильной машины. Его изменение не приводит к изменению ориентации вектора \bar{p}_0 и, значит, не влияет на технологические возможности манипулятора. Следовательно, возможный поворот вектора \bar{p}_0 относительно оси, совпадающей с направлением этого вектора, можно считать избыточной свободой манипулятора.

Таким образом, для того, чтобы в данной точке забоя пробурить шпур произвольной ориентации, необходимо и достаточно сориентировать главный вектор \bar{p}_0 углами ψ и θ , определяемые по зависимостям (3) через углы α и γ .

Возможны три ситуации при ориентировании, а, следовательно, и три класса буровых манипуляторов.

1. Без ориентации (структура манипулятора обеспечивает возможность в заданной точке забоя бурить шпур лишь одной определённой ориентации) – первый класс буровых манипуляторов.

2. Одна степень ориентации (изменения углов прецессии или нутации – структура манипулятора обеспечивает возможность бурения в заданной точке забоя нескольких шпуров, причём вектор \bar{p}_0 остаётся в одной плоскости) – второй класс буровых манипуляторов.

3. Две степени ориентации (одновременное изменение углов прецессии и нутации – структура манипуляторов обеспечивает возможность в заданной точке забоя бурить шпуры произвольной ориентации) – третий класс буровых манипуляторов.

В качестве вспомогательных классификационных признаков, определяющих особенности конструкции буровых манипуляторов, следует принять: число переносных движений; вид и количество дополнительных связей, налагаемых на относительное движение звеньев; степень маневренности манипуляторов.

Предлагаемая классификация схем буровых манипуляторов по степеням ориентирования главного вектора является основанием для поиска оптимального соотношения между числом кинематических пар и звеньев манипулятора, при котором его структура обеспечивает необходимые для выполнения поставленной технологической задачи смещение начала вектора \bar{p}_0 и его ориентацию.

Введём понятие рабочей подвижности буровых манипуляторов, под которой будем понимать минимальное необходимое число переносных и ориентирующих движений при настройке рабочего органа на бурение требуемого по направлению шпура. Рабочая подвижность манипулятора любой структуры определяется как [5]:

$$W_p = W - W_M, \quad (4)$$

где W – число степеней свободы звеньев кинематической цепи манипулятора; W_M – маневренность рассматриваемого манипулятора.

Число ориентирующих движений манипулятора определяется следующей формулой:

$$W_o = W_C - W_M, \quad (5)$$

где W_C – число степеней свободы кинематической цепи манипулятора при замыкании его на забой сферической кинематической парой.

Тогда число переносных движений манипулятора определяется как

$$W_n = W_p - W_o + W_M. \quad (6)$$

Используя известные структурные формулы Малышева-Сомова или О.Г. Озола [6] и условие (1) можно вывести соотношения для определения числа подвижных звеньев и одноподвижных кинематических пар буровых манипуляторов в зависимости от переменных W_p, k, q, d :

$$n = W_3 + 5k + d - 4 - q; \quad (7)$$

$$P_1 = W_3 + 6k + d - 5 - q, \quad (8)$$

где $W_3 = W - 1$ – число степеней свободы кинематической цепи манипулятора при замыкании её на забой точечной пятиподвижной кинематической парой; n – число подвижных звеньев манипулятора; P_1 – число одноподвижных кинематических пар; q – число избыточных связей; k – число замкнутых изменяемых контуров кинематической цепи манипулятора; d – число дополнительных связей, накладывающих ограничения на относительное движение звеньев.

Формулы (7) и (8) получены для структур манипуляторов, состоящих из одноподвижных кинематических пар и одной пятиподвижной, образуемой замыканием начала вектора \bar{p}_0 на плоскость забоя.

Выводы

1. На основании выведенных формул предлагается следующий алгоритм синтеза оптимальных структур буровых манипуляторов. Задаёмся требуемой рабочей подвижностью манипуляторов и, исходя из условия отсутствия избыточных связей и минимума замкнутых контуров, находим число подвижных звеньев манипулятора и число одноподвижных кинематических пар.

2. К важным практическим результатам может привести решение задачи расширения функциональных возможностей буровых манипуляторов за счёт введения в их кинематические схемы дополнительных связей, например гибких.

Список литературы

1. Варшавский А.Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // Мир (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 682-697.
2. Тчаро Хоноре, Воробьёв А.Е., Воробьёв К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснование «интеллектуальных» технологий // Вестник Евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 1-17.
3. Алексеев О.О., Мухаметов Ф.Х. Преимущества автоматизированных буровых установок // Бурение и нефть. – 2023. – № 7. – С. 24-27.
4. Сенькин А.С., Краевский Н.Н. К вопросу развития технологий роботизации и автоматизации в области текущего и капитального ремонта скважин // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 3. – С. 61-68.
5. Махутов Н.А. Безопасность России. Энергетическая безопасность (Нефтяной комплекс России). – М.: Знание. Международный гуманитарный фонд, 2000. – 432 с.
6. Фролов К.В. Теория механизмов и машин. – М.: Высшая школа. 1987, – 496 с.

References

1. Varshavsky A.E. Problems of the development of progressive technologies: robotics // MIR (Modernization. Innovation. Development). 2017, vol. 4, no. 4, pp. 682-697.
2. Tcharo Honore, Vorobyov A.E., Vorobyov K.A. Digitalization of the oil industry: basic approaches and justification of "intelligent" technologies // Bulletin of Eurasian Science. 2018, vol.10, no. 2, pp. 1-17.
3. Alekseev O.O., Mukhametov F.H. Advantages of automated drilling rigs // Drilling and oil. 2023, no. 7, pp. 24-27.
4. Senkin A.S., Krayevsky N.N. On the issue of the development of robotics and automation technologies in the field of routine and capital repairs of wells // Oil and gas business. 2020, no. 3, pp. 61-68.
5. Makhutov N.A. Security of Russia. Energy security (Russian oil complex). – М.: Knowledge. International Humanitarian Fund. 2000. – 432 p.
6. Frolov K.V. Theory of mechanisms and machines. – М.: Higher School. 1987. – 496 p.

Евдокимов Алексей Петрович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник a_evdo@mail.ru	Evdokimov Aleksey Petrovich – doctor of technical sciences, leading researcher
--	---

Received 05.02.2024