

УДК 531.8

© 1994 г. А. Д. БЕЛЕНЬКИЙ, В. Н. ВАСИЛЬЕВ, Н. Н. ШЕРЕМЕТЬЕВСКИЙ

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Рассматривается возможность создания системы автоматического управления бурового снаряда для проходки нефтяных и газовых скважин [1]. Показано, что управление траекторией бурения требует решения навигационной задачи и разработки системы стабилизации бурового снаряда для движения по заданной траектории. Стратегия управления строится с учетом ограничений на класс возможных траекторий. В системе управления используются датчики магнитного и гравитационного полей Земли, а также информация о текущей длине буровой колонны. В качестве исполнительного органа бурового снаряда применяется отклонитель, управляемый электромеханическим приводом.

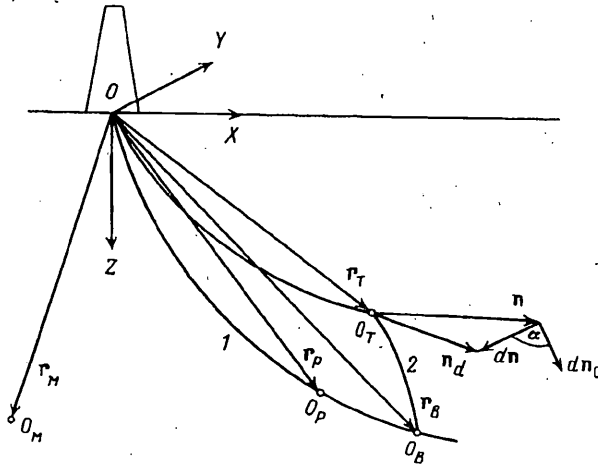
1. Постановка задачи. Задача автоматического управления траекторией движения бурового снаряда в процессе проходки нефтяных и газовых скважин, по-видимому, является одной из наиболее сложных задач управления механической системой на сегодняшний день.

Сложность обусловлена рядом факторов: ограниченными возможностями по созданию управляющих воздействий (в лучшем случае, возможность регулирования угла установки отклонителя и скорости проходки); большим временным запаздыванием в тракте передачи информации из забоя в устье и обратно; неопределенностью и нестабильностью параметров объекта управления (буровая колонна, буровой снаряд) и окружающей их среды; ограничениями по габаритам и расположению всех элементов системы управления; высокой температурой, давлением и вибрацией в забое, где должны быть размещены датчики, блоки управления, исполнительные механизмы и служебные агрегаты системы управления.

Для упрощения общей задачи управления траекторией бурения целесообразно разбить ее на ряд самостоятельных задач. Следует выделить задачу управляемого бурения на участке траектории выхода в район залегающих продуктивных пластов и задачу управления на участке проходки вдоль продуктивного пласта. Для названных участков траектории бурения следует реализовывать различные принципы управления: наведение по программной траектории для первого участка и наведение по геофизическим параметрам для второго участка траектории.

Наведение бурового снаряда по программной траектории, во многом, аналогично классической задаче управления траекторией летательного аппарата. Задача же наведения бурового снаряда по геофизическим параметрам весьма близка к задаче управления траекторией летательного аппарата в процессе преследования цели. Это позволяет применить при решении поставленной задачи широкий арсенал идей и методов, развитых в процессе совершенствования систем управления летательных аппаратов и, особенно, космических летательных аппаратов.

Для решения задачи управления траекторией бурового снаряда целесообразно использовать идею построения двухконтурной системы управления, возложив на внешний (навигационный) контур задачу выработки целеуказаний для движения по требуемой траектории, а на внутренний (стабилизации) задачу стабилизации углового положения бурового снаряда в соответствии с целеуказаниями навига-



Фиг. 1

ционного комплекса. Известно, что такой подход позволяет строить универсальные системы в рамках достаточно жестких структур контуров управления. В первую очередь, это относится к контуру стабилизации, который, по-видимому, может быть сделан единым для реализации управления на всех участках траектории бурового снаряда.

2. Построение контура навигации в задаче управления траекторией бурового снаряда. Для постановки и решения задачи построения контура навигации введем в рассмотрение несколько ортогональных систем координат. Начало координат O базовой системы координат поместим в устье скважины; ось OZ направим в надир; ось OX расположим в плоскости местного магнитного меридиана, ориентируя орт оси в направлении на север; ось OY дополняет систему до правой (фиг. 1). Начало координат O_T «текущей системы координат» поместим в точку расположения бурового снаряда в текущий момент времени t ; оси $O_T X_T$, $O_T Y_T$, $O_T Z_T$ коллинеарны соответствующим осям базовой системы координат. Начало координат O_C связанной системы координат поместим в точку O_T . Ось $O_C Z_C$ совпадает с продольной осью бурового снаряда, ось $O_C X_C$ расположена в плоскости «нулевого» положения отклонителя. Плоскостью «нулевого» положения отклонителя будем называть плоскость, проходящую через продольные оси бурового снаряда и долота при нахождении отклонителя в положении, соответствующем «нулю» отсчета датчика положения отклонителя. Начало координат O_P «программной системы координат» поместим в точку программной траектории l , удаленную от устья на длину дуги вдоль траектории, равную l . Оси $O_P X_P$, $O_P Y_P$, $O_P Z_P$ коллинеарны осям базовой системы координат. В качестве основного параметра, характеризующего текущее положение бурового снаряда, примем длину дуги l_T , измеренную вдоль траектории $l_T = \int_0^{O_T} dl(x_T, y_T, z_T)$.

Решение навигационной задачи включает в себя четыре этапа: вычисление координат текущего положения бурового снаряда, определение отклонения текущей траектории от программной, выработка стратегии возврата бурового снаряда на программную траекторию, расчет целеуказаний для выполнения маневра возврата на программную траекторию.

Пусть в некоторый момент времени t системе управления доступна информация о длине погруженной в скважину буровой колонны $l(t)$ и об угловом положении относительно базовой системы координат продольной оси бурового снаряда. В первом приближении можно считать, что направление продольной оси бурового

снаряда совпадает с вектором касательной траектории $n(l_T)$. Для вектора $n(l_T)$ известно соотношение

$$n(l_T) = \frac{dx(l_T)}{dl} i + \frac{dy(l_T)}{dl} j + \frac{dz(l_T)}{dl} k \quad (2.1)$$

где $x(l_T)$, $y(l_T)$, $z(l_T)$ — текущие координаты траектории в функции длины дуги l , i , j , k — орты базовой системы координат.

Умножая уравнение (2.1) последовательно слева на орты i , j , k , получим

$$dx/dl = n \cdot i = n_x \quad (2.2)$$

$$dy/dl = n \cdot j = n_y, \quad dz/dl = n \cdot k = n_z$$

Интегрируя уравнение (2.2), получим формулы для расчета текущих координат траектории бурового снаряда

$$x_T(l_i) = x_T(l_{i-1}) + \int_{l_{i-1}}^{l_i} n_x dl \quad (2.3)$$

$$y_T(l_i) = y_T(l_{i-1}) + \int_{l_{i-1}}^{l_i} n_y dl, \quad z_T(l_i) = z_T(l_{i-1}) + \int_{l_{i-1}}^{l_i} n_z dl$$

Метод вычисления интегралов в уравнениях (2.3) должен быть оптимизирован по минимуму накопленной ошибки [2].

Отклонение траектории бурового снаряда от программной может быть задано в виде координат программной точки $[x_P(l), y_P(l), z_P(l)]$ в текущей системе координат, которые определяются выражениями

$$\Delta x = x_T(l_i) - x_P(l_i) \quad (2.4)$$

$$\Delta y = y_T(l_i) - y_P(l_i), \quad \Delta z = z_T(l_i) - z_P(l_i)$$

Если рассчитанное отклонение траектории превышает уровень систематической ошибки оценки положения бурового снаряда, возникает задача маневра возврата на программную траекторию. Стратегия такого маневра может быть различной и, в значительной степени, базируется на априорных представлениях о классе реализуемых траекторий управляемого движения бурового снаряда. Если рассматривать движение на достаточно коротких отрезках траектории, то класс возможных траекторий можно ограничить кусочно-плоскими кривыми постоянной кривизны. Можно также предполагать, что в составе системы управления имеется специальная подсистема для априорной оценки кривизны траектории управляемого движения бурового снаряда. В этом случае стратегия маневра возврата бурового снаряда на программную траекторию может включать в себя построение плоскости маневра и расчет моментов переключки отклонителя из положения положительной кривизны в положение отрицательной кривизны траектории (и наоборот) в плоскости маневра. Стратегии с большим числом переключек отклонителя на участке маневра возврата в принципе позволяют выйти на программную траекторию с малым рассогласованием между направлением программной траектории и продольной осью бурового снаряда, что в конечном итоге обеспечит более высокую точность проходки. Однако учитывая энергетические затраты на управление и ресурс приводных устройств отклонителя, имеет смысл рассматривать стратегии с минимальным числом переключек.

Далее остановимся на вопросе расчета целеуказаний для реализации маневра возврата на программную траекторию. Пусть в некотором цикле управления зафиксировано отклонение траектории бурового снаряда от программной. Для ликвидации этого отклонения необходимо рассчитать целеуказания для угла установки и момента переключки отклонителя, которые обеспечат возврат тра-

ектории бурового снаряда к программной. Для вывода расчетных соотношений, введем понятие «плоскости маневра». Плоскостью маневра будем называть плоскость, проходящую через продольную ось бурового снаряда и точку O_B предполагаемого выхода траектории бурового снаряда на программную в процессе маневра. Чтобы определить положение плоскости маневра в пространстве, необходимо каким-либо образом определить положение точки выхода на программную траекторию O_B . Очевидно, ее положение существенно зависит от принятой стратегии управления отклонителем в процессе маневра. Так, для стратегии с одной переключкой положения отклонителя, координаты точки встречи $O_B(x_B, y_B, z_B)$ могут быть найдены решением системы из уравнения, описывающего тор возможных траекторий бурового снаряда

$$x_B^2 + y_B^2 + z_B^2 - 2R^v \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = 0 \quad (2.5)$$

и уравнения программной траектории

$$x_B = f_1(l_B), \quad y_B = f_2(l_B), \quad z_B = f_3(l_B) \quad (2.6)$$

в связанной системе координат, где R^v — априорная оценка радиуса кривизны траектории возврата 2 (см. фиг. 1).

Для исключения посторонних решений системы уравнений (2.5), (2.6) следует использовать условие

$$\int_0^{O_B} dl(x_P, y_P, z_P) > l_T$$

определяющее тот факт, что точка встречи должна быть более удалена от устья, чем текущая точка траектории.

Для стратегии управления с двумя переключками нахождение точки выхода не имеет принципиальных затруднений и сводится к решению лишь более громоздкой системы уравнений. При этом момент второй переключки положения отклонителя может быть найден из условия касания тора возможных траекторий к программной траектории в точке выхода на программную траекторию.

Следует особо остановиться на получении априорной оценки R^v кривизны траектории управляемого движения бурового снаряда. Как известно [1], кривизна траектории зависит от большого числа факторов различной физической природы. В этих условиях получение достаточной для практики достоверности оценки кривизны траектории может потребовать создания системы искусственного интеллекта. Система должна содержать базу знаний, обобщающую весь накопленный опыт бурения, механизм уточнения и накопления знаний, а также алгоритм оценки кривизны траектории. В простейшем случае, который может быть реализован на первых этапах, система оценки кривизны траектории может быть создана по принципу адаптивной системы, где оценка на каждом последующем цикле управления получается в результате уточнения алгоритма формирования оценки по фактической кривизне траектории на предыдущих циклах управления. Заслуживает также внимания полуавтоматическая система оценки кривизны. В этом случае система должна содержать средства визуализации траектории на фоне картины залегающих пород и таблицы справочных данных, что позволит оператору бурильной установки корректировать процесс проходки. После определения положения плоскости маневра, задача расчета целеуказаний сводится к нахождению угла установки α и времени переключки t_p отклонителя, обеспечивающих движение бурового снаряда в плоскости маневра до встречи с программной траекторией. Для получения расчетных формул рассмотрим векторный треугольник n , dn , n_d (фиг. 1). Единичный вектор n определяет направление продольной оси бурового снаряда, n_d — направление продольной оси долота, векторы dn и dn_0 ортогональны вектору n и определяют текущее и нулевое

положение отклонителя. Угол α между векторами dn и dn_0 есть угол установки отклонителя.

Из условия ортогональности векторов dn и n , а также dn_0 и n имеет место равенство

$$dn_0 \times dn = n |dn_0| |dn| \sin \alpha \quad (2.7)$$

Умножая уравнение (2.7) векторно слева на dn и преобразуя, получим $dn = dn_0 \cos \alpha - (dn_0 \times n) \sin \alpha$, откуда следует

$$n_d = n + dn_0 \cos \alpha - (dn_0 \times n) \sin \alpha \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) определяет положение продольной оси долота в зависимости от угла установки отклонителя α . Целеуказание для угла α можно получить из условия нахождения вектора n_d в плоскости наведения, что эквивалентно условию компланарности векторов n_d , n , $r_B - r_T$:

$$[(r_B - r_T) \times n] n_d = 0 \quad (2.9)$$

Система уравнений (2.5), (2.6), (2.8), (2.9) позволяет рассчитать целеуказание для установки угла отклонителя на участке маневра возврата на программную траекторию для случая стратегии управления с одной переключкой отклонителя на цикле работы контура навигации.

Поскольку векторы n и dn_0 , определяющие положение продольной оси бурового снаряда и нулевое положение отклонителя, известны в связанной системе координат, то для решения системы уравнений (2.5)—(2.9) необходимо найти оператор перехода от связанной к текущей системе координат. Отыскание оператора основано на измерении проекций векторов геомагнитного B и гравитационного поля G на оси связанной системы и прогноза проекций этих же векторов на оси текущей системы координат. Поскольку оператор перехода от связанной системы координат к текущей есть оператор вращения, то, для имеющего место случая поворотов на большие углы, важно выбрать оптимальную форму представления оператора. Известные представления оператора через углы Эйлера, Крылова имеют случай вырождения. Поэтому предпочтительнее использовать параметры Родрига—Гамильтона или кватернионы.

Пусть B и G — векторы магнитной индукции и силы тяжести в «текущей системе координат», а B' и G' — те же векторы в связанной системе координат. Переход от «текущей системы координат» к связанной может быть задан кватернионом S при помощи операции вращения [2] $B' = \bar{S} \circ B \circ S$, $G' = \bar{S} \circ G \circ S$, где \bar{S} — сопряженный кватернион.

Поскольку $B = B_1 i + B_3 k$, а $G = G_1 k$, то $B' = B_1 \bar{S} \circ i \circ S + B_3 \bar{S} \circ k \circ S$, $G' = G \bar{S} \circ k \circ S$. Эти соотношения можно рассматривать как систему уравнений для определения компонент кватерниона S по результатам измерения векторов B' и G' в связанной системе координат

$$\bar{S} \circ i \circ S = b, \quad \bar{S} \circ k \circ S = g \quad (2.10)$$

$$b = (GB' - B_3 G') / B_1 G = (b_1, b_2, b_3), \quad g = G' / G = (g_1, g_2, g_3)$$

Зададим компоненты $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ кватерниона S в виде параметров Родрига — Гамильтона

$$\lambda_0 = \cos \gamma / 2, \quad \lambda_1 = v_1 \sin \gamma / 2, \quad \lambda_2 = v_2 \sin \gamma / 2, \quad \lambda_3 = v_3 \sin \gamma / 2 \quad (2.11)$$

где γ — угол конечного поворота, v_1, v_2, v_3 — направляющие косинусы вектора конечного поворота, одинаковые для «текущей» и связанной систем координат.

Раскрывая равенства (2.10) по правилам алгебры кватернионов [2] с учетом (2.11), получим избыточную систему нелинейных уравнений, которым должны удовлетворять компоненты кватерниона

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 = b_1, \quad \lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3 = b_2/2$$

$$\lambda_0\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 = b_3/2, \quad \lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2 = g_1/2$$

$$\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3 = g_2/2, \quad \lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 = g_3$$

Найденную систему можно преобразовать относительно малых приращений $\Delta\lambda_i$ компонент кватерниона, полагая $\lambda_i = \mu_i + \Delta\lambda_i$ ($i=0, 1, 2, 3$). Пренебрегая величинами второго порядка малости, получим относительно малых приращений $\Delta\lambda_i$ систему линейных алгебраических уравнений

$$A\Delta\lambda = a \quad (2.12)$$

$$a_1 = (b_1 - \mu_0^2 - \mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2)/2, \quad a_2 = b_2/2 - \mu_1\mu_2 + \mu_0\mu_3$$

$$a_3 = b_3/2 - \mu_0\mu_2 + \mu_1\mu_3, \quad a_4 = g_1/2 - \mu_1\mu_3 + \mu_0\mu_2$$

$$a_5 = g_2/2 - \mu_0\mu_1 + \mu_2\mu_3, \quad a_6 = (g_3 - \mu_0^2 - \mu_3^2 + \mu_1^2 + \mu_2^2)/2$$

где A — матрица размером 6×4 , составленная из вычисленных компонент кватерниона, $\Delta\lambda = [\Delta\lambda_0, \Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3]^T$ — матрица-столбец искомых приращений компонент кватерниона, a — матрица-столбец 6×1 .

Решая матричное уравнение (2.12), найдем итерационную формулу для вычисления приращений компонент кватерниона по результатам измерения векторов магнитной индукции и силы тяжести $\Delta\lambda = (A^T A)^{-1} A^T a$.

Второе целеуказание, время перекладки t_p , может быть рассчитано, исходя из оценки длины дуги L_{TB} траектории возврата и оценки средней скорости прохода к скважине на данном участке $t_p = L_{TB} / (dL/dt)$.

Положение начальной и конечной точек дуги O_T и O_B задано в базовой системе координат векторами r_T и r_B . Положение центра кривизны траектории маневра O_M может быть задано вектором r_M , который определяется соотношениями $(r_M - r_T) \cdot n = 0$, $|r_M - r_T| = R^V$, $|r_M - r_B| = R^V$.

Поэтому для оценки длины дуги L_{TB} можно использовать выражение

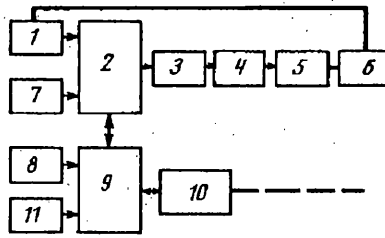
$$L_{TB} = R^V \arcsin \frac{(r_T - r_M) \times (r_B - r_M)}{|(r_T - r_M) \times (r_B - r_M)|}$$

При этом следует иметь в виду, что, если до окончания интервала времени t_p контур стабилизации получает новые целеуказания, то предыдущий цикл управления считается завершенным и начинается отработка новых целеуказаний.

Следует особо остановиться на стратегии управления после входа траектории бурового снаряда в трубку допустимых отклонений от программной траектории. Заслуживают внимания два варианта. В первом варианте система продолжает обрабатывать последние целеуказания по углу установки отклонителя до обнаружения выхода бурового снаряда за трубку допустимых отклонений. Во втором варианте, после входа в трубку, отклонитель устанавливается в плоскость программной траектории и производится периодический его разворот на 180 градусов, чем достигается в среднем движение по заданной траектории.

В системе управления траекторией должна быть предусмотрена возможность остановки процесса бурения в случае задержки получения информации из забоя на время больше критического, что позволит не допускать выхода траектории на отклонения, ликвидация которых потребует забуривания нового ствола.

Сделаем несколько замечаний по поводу формирования программной траектории. Для участков траектории до выхода к продуктивным пластам программная траектория формируется априорно по данным геофизической разведки данного района и может корректироваться оператором буровой установки в процессе



Фиг. 2

проходки с учетом возможностей системы управления траекторией. На участке проходки вдоль продуктивных пластов программная траектория формируется как прогноз линии максимальной мощности пласта на основе сигналов приборов каротажа, установленных на буровом снаряде и включенных в систему телеобработки.

3. Построение контура стабилизации в задаче управления траекторией бурового снаряда. Задачей контура стабилизации (фиг. 2) является приведение и удержание отклонителя 6 в плоскости маневра при коррекции траектории бурового снаряда, либо в плоскости программной траектории при движении в трубке допустимых отклонений. Информация для расчета истинного положения отклонителя в пространстве поступает от датчика углового положения отклонителя 1 относительно бурового снаряда и гравимагнитного датчика 7 положения бурового снаряда. Рассогласование между истинным положением отклонителя и его целеуказанием, поступающим из контура навигации, подается на вход электропривода отклонителя 5. Привод отклонителя создает момент для поворота отклонителя вокруг продольной оси бурового снаряда. Величина момента, развиваемого приводом ограничивается за счет обратной связи от специального датчика момента. Под действием управляющего момента привода колонна буровых труб закручивается на некоторый угол упругой деформации, передавая тем самым момент вращения на долото. За счет боковой фрезерующей способности долота происходит поворот отклонителя в пространстве. При достижении им заданного положения сигнал управления снимается и далее отклонитель удерживается в данном положении за счет самотормозящегося свойства привода.

Структурная схема привода отклонителя и ее основные связи с другими подсистемами забойного комплекса управления приведены на фиг. 2: 2 — блок управления, 3 — регулятор привода отклонителя, 4 — усилитель мощности, 8 — датчики каротажа, 9 — телеметрическая система бурового снаряда, 10 — гидроканал связи с устьем скважины, 11 — датчики нагрузки на долото.

Отметим, что техническая реализация системы автоматического бурения, принципиальная возможность создания которой не вызывает сомнения, потребует значительных затрат труда и материальных средств. Поэтому на первых стадиях разработки следует уделить повышенное внимание развитию методов моделирования как отдельных компонентов, так и всей системы в целом.

На основе приведенного обобщенного алгоритма могут быть разработаны частные алгоритмы управления траекторией бурового снаряда, соответствующие различным этапам внедрения автоматической системы управления бурением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин А. Г., Григорян Н. А., Султанов Б. З. Бурение наклонных скважин. Справочник. М.: Недра, 1990. 346 с.
2. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.