

УДК 621.389

*Рогатых Н.П., кандидат технических наук, доцент
Ведущий инженер-конструктор
Катав-Ивановский приборостроительный завод
Россия, г. Катав-Ивановск*

О ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ ВИЗИРНОГО УГЛА

Аннотация:

В статье анализируются принципы построения датчиков визирного угла, которые используются для контроля бурового инструмента при проводке скважин. Рассматриваются датчики с использованием физических и виртуальных акселерометров.

Ключевые слова:

Визирный угол, акселерометры, векторы.

*Rogatykh N. P., candidate of technical sciences, associate Professor
Leading design engineer
Katav-Ivanovsk instrument engineering plant
Russia, Katav-Ivanovsk*

ABOUT BUILDING SENSORS SIGHT ANGLE

Annotation:

The article analyzes the principles of building sighting angle sensors, which are used to control drilling tools when conducting wells. Sensors using physical and virtual accelerometers are considered.

Keywords:

Sighting angle, accelerometers, vectors.

Визирный угол φ в общем понимании представляет собой угол поворота подвижного объекта относительно оси, указывающей направление его движения, при этом он отсчитывается в соответствии с правилом правого винта от проекции вектора гравитационного поля на плоскость, перпендикулярную направлению движения объекта. В авиации и судоходстве этот параметр известен как угол крена. В инклинометрах он рассматривается как угол поворота скважинных модулей инклинометров вокруг оси скважины, а, поскольку, эти модули жёстко связаны с бурильными трубами, визирный угол характеризует собой поворот бурильных колонн.

Траектории скважин при бурении задаются с помощью отклонителей, представляющих собой загнутые участки бурильных труб, на конце которых располагаются буры. Для контроля поворота отклонителей вокруг оси скважины используется такой технологический параметр, как угол установки отклонителя или Tool Face (φ_{TF}). Отсюда становится ясно, что визирный угол непосредственно связан с этим углом и его измерение необходимо для управления буровым инструментом и контроля траектории скважин.

Для установления связи между визирным углом и углом установки отклонителя рассмотрим вид отклонителя вдоль оси скважины (Рис.1) и введём два ортогональных базиса $R_0(O X_0 Y_0 Z_0)$ и $R_1(O X_1 Y_1 Z_1)$, направив оси OZ_0 и OZ_1 по оси бурильной трубы (оси скважины) в направлении забоя, а ось OX_0 -

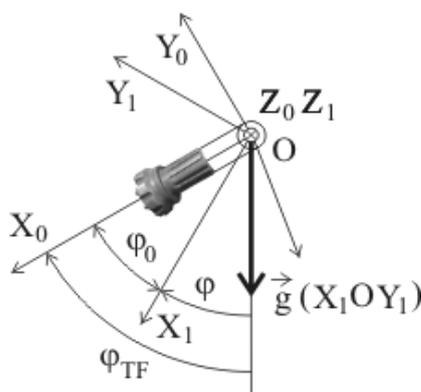


Рис.1

вдоль проекции оси отклонителя на плоскость, перпендикулярную оси трубы X_0OY_0 . Оси OX_1 , OY_1 свяжем с корпусом установленного внутри бурильной трубы инклинометра.

Тогда, угол между плоскостью действия отклонителя X_0OZ_0 и апсидальной плоскостью, проходящей через ось скважины (OZ_0) и вектор гравитационного поля \vec{g} (гравитационную вертикаль) будет представлять собой угол установки отклонителя φ_{TF} . Если говорить точнее, то φ_{TF} – это угол между проекцией оси отклонителя и проекцией вектора гравитационного поля на плоскость поперечного сечения скважины, В свою очередь визирный угол φ определяет поворот корпуса инклинометра относительно той же проекции вектора гравитационного поля.

Таким образом, визирный угол и угол установки отклонителя связаны соотношением

$$\varphi_{TF} = \varphi_0 + \varphi, \quad (1)$$

где φ_0 некоторый угол, определяющий разворот отклонителя относительно датчиков инклинометра. Значение этого угла определяется экспериментально для каждой конкретной компоновки отклонителя и инклинометра. Для этого компоновка нижней части бурильной трубы с отклонителем устанавливается на призмы таким образом, чтобы участок изгиба трубы находился между призмами. Вследствие смещения центра тяжести компоновки она поворачивается на призмах и занимает положение, соответствующее $\varphi_{TF}=180^0$, когда отклонитель направлен вверх. При этом с помощью датчиков инклинометра измеряется значение визирного угла $\varphi = \varphi(180^0)$ и указанный угол определяется как

$$\varphi_0 = 180^0 - \varphi(180^0). \quad (2)$$

Иногда верхнее положение принимается отклонителя за нулевую точку отсчёта угла установки отклонителя. В этом случае $\varphi_0 = 360^0 - \varphi(360^0)$.

Обычно для измерения визирного угла используются инклинометры [1], которые помимо датчиков визирного угла содержат датчики зенитного угла и датчики азимута. Однако в данной работе речь пойдёт о более простых приборах, включающих в себя только датчики визирного угла и применяемых только для контроля положения отклонителей. Эти приборы представляют интерес для решения специфической, но актуальной в настоящее время, задачи разбуривания старых преимущественно вертикальных обсаженных скважин с целью доступа к нереализованным остаткам нефти. С их помощью снабжённый фрезой отклонитель ориентируется в соответствии с планом будущей скважины, и вскрытие обсадной трубы производится в нужном месте.

Рассмотрим цилиндрический корпус прибора для ориентации отклонителя и связанный с ним базис $R_1(O_1X_1Y_1Z_1)$ (Рис.2). Вектор гравитационного поля в этом базисе имеет координаты

$$\vec{g}_1 = (\vec{g}_{11}, \vec{g}_{12}, \vec{g}_{13}) = (\cos\varphi \sin\theta, -\sin\varphi \sin\theta, \cos\theta), \quad (3)$$

где θ – зенитный угол, и визирный угол определяется, как

$$\varphi = \arctg \frac{-\vec{g}_{12}}{\vec{g}_{11}}. \quad (4)$$

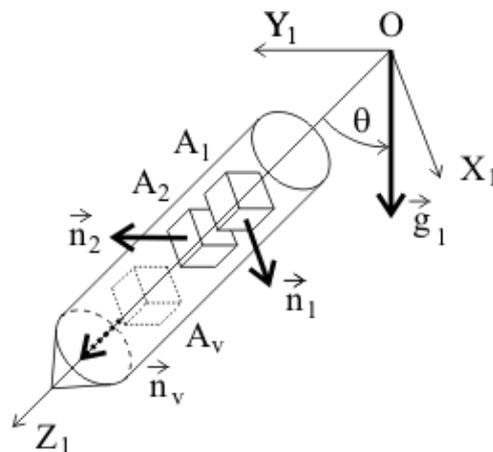


Рис.2.

Отсюда видно, что для определения визирного угла необходимо измерить соответствующих координат вектора гравитационного поля или величин, связанных с этими координатами. Для задачи в настоящее время

наилучшим образом подходят акселерометры, вследствие чего именно они используются в современных датчиках визирного угла.

Один из способов реализации датчиков визирного угла основан на положении о том, что визирный угол определяется только двумя компонентами вектора гравитационного поля и, следовательно, для его измерения достаточно обойтись двумя акселерометрами. Однако при произвольной установке двух акселерометров A_1, A_2 в корпусе прибора (Рис.2) их сигналы не пропорциональны необходимым компонентам измеряемого вектора, а имеют более сложные зависимости от измеряемого вектора \vec{g}_1 -

$$U_1 = \vec{n}_1 \cdot \vec{g}_1 + U_{01}, \quad U_2 = \vec{n}_2 \cdot \vec{g}_1 + U_{02}, \quad (5)$$

где U_{01}, U_{02} – смещения нулевых уровней сигналов,

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 &= (n_{11}, n_{12}, n_{13}) = N_1 \vec{c}_1, \\ \vec{n}_2 &= (n_{21}, n_{22}, n_{23}) = N_2 \vec{c}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

– параметрические векторы, определяющие коэффициенты преобразования

$$N_i = \sqrt{n_{i1}^2 + n_{i2}^2 + n_{i3}^2} \quad (7)$$

и направляющие векторы осей чувствительности акселерометров

$$\vec{c}_1 = (c_{11}, c_{12}, c_{13}), \quad \vec{c}_2 = (c_{21}, c_{22}, c_{23}). \quad (8)$$

Поэтому для достижения необходимых характеристик датчиков с двумя акселерометрами необходимо выполнить ряд условий. К ним относятся определение значений смещений нулевых уровней сигналов акселерометров, выравнивание коэффициентов преобразования акселерометров ($N_1=N_2$), установка осей чувствительности акселерометров в плоскость поперечного сечения корпуса X_1OY_1 ($c_{13}=c_{23}=0$) и обеспечение ортогональности осей чувствительности акселерометров ($\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2 = 0$). При этом нет необходимости в точном совмещении осей чувствительности акселерометров с соответствующими осями базиса R_1 , т.к. угол относительного разворота этих осей, равный

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{c_{12}}{c_{11}} = -\operatorname{arctg} \frac{c_{21}}{c_{22}} \quad (9)$$

и входящий в применяемую в данном случае формулу для вычисления визирного угла

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-(U_2 - U_{02})}{U_1 - U_{01}} - \Delta\varphi \quad (10)$$

в качестве постоянной составляющей, будет автоматически учитываться при определении угла разворота отклонителя относительно осей чувствительности акселерометров φ_0 .

Перечисленные условия обеспечиваются регулировкой положения акселерометров в корпусах приборов. Регулировка выполняется, как правило, методом последовательных приближений, который связан с многочисленными поворотами корпусов приборов и измерениями сигналов акселерометров и отличается значительной трудоёмкостью. При этом от настройщиков требуются определённые навыки и терпение.

Естественно, что для выполнения регулировок датчики должны содержать специальные регулировочные узлы, которые существенно усложняют их конструкции.

Таким образом, рассмотренный подход к построению датчиков визирного угла, хотя и даёт хорошие результаты, обладает очевидными недостатками и благодаря им постепенно уходит в прошлое,

Другой способ реализации датчиков визирного угла основан на вычислении координат вектора \vec{g}_1 по значениям сигналов акселерометров. Вследствие того, что этот вектор имеет три координаты, в датчиках используются три акселерометра. При этом вместо принудительного изменения параметров акселерометров используется калибровка акселерометров, в ходе которой параметры акселерометров определяются путём обработки ряда тестовых значений сигналов по специальным алгоритмам [2]. Это

позволяет обойтись без регулировочных узлов и устанавливать акселерометры в корпусах приборов произвольно в пределах разумного.

Итак, если в корпусе прибора установлены три акселерометра A_1, A_2, A_V (Рис.2), параметры которых известны, а зависимости сигналов от измеряемого вектора устанавливаются уравнениями вида (5), то для определения измеряемого вектора используются уравнения

$$\vec{c}_1 \cdot \vec{g}_1 = \frac{U_1 - U_{01}}{N_1}, \quad \vec{c}_2 \cdot \vec{g}_1 = \frac{U_2 - U_{02}}{N_2}, \quad \vec{c}_V \cdot \vec{g}_1 = \frac{U_V - U_{0V}}{N_V}, \quad (11)$$

где U_1, U_2, U_V – сигналы акселерометров, $\vec{c}_1, \vec{c}_2, \vec{c}_V, N_1, N_2, N_V, U_{01}, U_{02}, U_{0V}$ – соответственно направляющие векторы осей чувствительности, коэффициенты преобразования и смещения нулевых уровней сигналов акселерометров, которые выявляются при калибровке акселерометров. Совместное решение этих уравнений имеет вид

$$\vec{g}_1 = \frac{1}{\Delta} [U_1^* (\vec{c}_2 \times \vec{c}_V) + U_2^* (\vec{c}_V \times \vec{c}_1) + U_V^* (\vec{c}_1 \times \vec{c}_2)], \quad (12)$$

где $\Delta = \vec{c}_V \cdot (\vec{c}_1 \times \vec{c}_2)$ – определитель, образованный координатами направляющих векторов осей чувствительности акселерометров, а

$$U_1^* = \frac{U_1 - U_{01}}{N_1}, \quad U_2^* = \frac{U_2 - U_{02}}{N_2}, \quad U_V^* = \frac{U_V - U_{0V}}{N_V} \quad (13)$$

– относительные значения сигналов акселерометров. Оно даёт значения координат вектора \vec{g}_1 , определяющие визирный угол в соответствии с (4).

Заметим, что датчики на основе трёх акселерометров позволяют измерять не только визирный, но зенитный угол. Поэтому такие датчики используются практически во всех инклинометрах.

Однако использование трёх акселерометров в приборах, предназначенных для измерения только визирного угла, на наш взгляд создаёт аппаратную избыточность и ведёт соответственно к усложнению конструкций и увеличению стоимости приборов.

Эти недостатки могут быть устранены за счёт применения виртуальных датчиков, которые впервые были рассмотрены в работе [3] в плане упрощения и повышения надёжности скважинной аппаратуры. В частности замена одного из трёх акселерометров виртуальным акселерометром позволяет сохранить все основные качества трёхкомпонентных датчиков, но ограничиться при этом использованием только двух физических акселерометров.

В датчиках визирного угла с двумя физическими и одним виртуальным акселерометром параметры физических акселерометров выявляются путём калибровки, параметры виртуального акселерометра задаются разработчиком, а сигнал виртуального акселерометра определяется из уравнения

$$\vec{g}_1 \cdot \vec{g}_1 = 1, \quad (14)$$

устанавливающего связь между сигналами всех акселерометров.

Пусть A_1 и A_2 – физические акселерометры, сигналы которых описываются уравнениями (5), а A_V – виртуальный акселерометр, сигнал которого - по аналогии с (5) уравнением

$$U_V = N_V \vec{c}_V \cdot \vec{g}_1. \quad (15)$$

В нём значение коэффициента преобразования N_V может быть принято равным паспортному значению коэффициента преобразования одного из физических акселерометров, а вектор \vec{c}_V выбран сообразно с расположением осей чувствительности физических акселерометров.

Целесообразными являются два варианта задания оси чувствительности виртуального акселерометра –

$$\vec{c}_V(1) = \frac{1}{\sin \beta} (\vec{c}_1 \times \vec{c}_2), \quad (16)$$

где β – угол между осями чувствительности физических акселерометров, и

$$\vec{c}_v(2) = (0,0,1). \quad (17)$$

Первый вариант обеспечивает максимальную точность измерения вектора \vec{g}_1 при произвольном расположении осей чувствительности физических акселерометров, второй – при условии, что оси чувствительности физических акселерометров в первом приближении лежат в плоскости поперечного сечения цилиндрического корпуса прибора X_1OY_1 .

Соответствующие сигналы виртуальных акселерометров определяются из уравнения (14) с учётом (12), (15) и вариантов расположения их осей чувствительности. Для первого варианта $\vec{c}_v = \vec{c}_v(1)$, $\Delta(1) = \sin \beta$ и сигнал виртуального акселерометра будет равен

$$U_v^*(1) = \sqrt{1 - \frac{(1 - \sin \beta)^2}{\sin^4 \beta} (U_1^{*2} + U_2^{*2} - 2U_1^*U_2^* \cos \beta)}. \quad (18)$$

Для второго варианта расположения оси чувствительности $\vec{c}_v = \vec{c}_v(2)$, $\Delta(2) = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}$ и сигнал акселерометра составит

$$U_v^*(2) = \frac{1}{\sin^2 \beta} (B_1 + \sqrt{B_2}), \quad (19)$$

где $B_1 = U_1^*(c_{23} - c_{13} \cos \beta) + U_2^*(c_{13} - c_{23} \cos \beta)$,

$$B_2 = (U_1^{*2} + U_2^{*2} - 2U_1^*U_2^* \cos \beta)(c_{13}^2 + c_{23}^2 - 2c_{13}c_{23} \cos \beta - \sin^2 \beta) + \Delta(2)\sin^2 \beta.$$

В случае замены двух физических акселерометров одним двухосным акселерометром, ортогональность осей чувствительности которого обеспечивается технологическим путём и выдерживается достаточно точно, будет иметь место равенство $\beta=90^0$ и определение сигналов виртуальных акселерометров упростится –

$$U_v^*(1) = \sqrt{1 - (U_1^{*2} + U_2^{*2})}, \quad (20)$$

$$U_v^*(2) = (U_1^*c_{23} + U_2^*c_{13}) + \sqrt{(U_1^{*2} + U_2^{*2})(c_{13}^2 + c_{23}^2 - 1) + 1}. \quad (21)$$

Полученные значения сигналов виртуальных акселерометров наряду со значениями сигналов физических акселерометров используются в уравне-

нии (12) для определения координат измеряемого вектора и дальнейшего вычисления значений визирного угла.

Таким образом, построение датчиков визирного угла на основе двух акселерометров требует принудительного воздействия на параметры акселерометров, включающего в себя не только выравнивание коэффициентов преобразования и определение смещений нулевых уровней сигналов акселерометров, но и установку осей чувствительности акселерометров в нужное положение с помощью регулировочных узлов. Поэтому реализация таких датчиков отличается сложными конструкциями и значительной трудоёмкостью, которые могут быть упрощены только за счёт использования двухосных акселерометров.

Более эффективным способом построения датчиков визирного угла является использование в них трёх акселерометров при условии, что параметры акселерометров определяются путём калибровки, т.к. именно калибровка обеспечивает возможность свободного и в определённой степени произвольного размещения акселерометров в корпусах приборов и при её выполнении не требуется измерение большого количества значений сигналов акселерометров. В связи с этим датчики с тремя акселерометрами отличаются простотой конструкций и незначительной трудоёмкостью изготовления.

И, наконец, способ построения датчиков визирного угла с использованием двух физических и одного виртуального акселерометра сохраняет все достоинства датчиков с тремя физическими акселерометрами, но по сравнению с ними предельно упрощает конструкции датчиков и существенно уменьшает стоимость приборов. Благодаря этому данный способ является наиболее эффективным при построении датчиков визирного угла.

Более полное представление о построении датчиков визирного угла даёт пример реализации одного из приборов для контроля ориентации отклонителя. Такой прибор включает в себя скважинный модуль, наземный

блок, связанный со скважинным модулем посредством каротажного кабеля, и компьютер (Рис.3). Он был разработан автором для АО НПП «Бурсервис» (г.Уфа) и в течении ряда лет использовался при восстановление старых скважин.

Датчик визирного угла в приборе был построен на основе двухосного акселерометра серии ADXL203 и сформированного программным путём виртуального акселерометра, что позволило сделать скважинный модуль простым и надёжным. В приборе использовалось 10 – разрядное аналого-цифровое преобразование сигналов, при котором измерение угла установки отклонителя производилось с погрешностью, не превышающей $8,0^{\circ}$ и $0,15^{\circ}$ при соответствующих значениях зенитного угла $1,0^{\circ}$ и 80° . Кроме этого осуществлялись измерение зенитного угла в диапазоне $(0...80)^{\circ}$ и контроль установки скважинного модуля в фиксаторе в скважине, напряжения на входе скважинного модуля и температуры.



Рис.3

В процессе работы прибора на мониторе компьютера отражались круговая шкала и цифровое табло (Рис.4). На круговой шкале с помощью двух меток обозначались заданное и измеренное с помощью датчика положения отклонителя, а на табло высвечивались соответствующие этим

положениям точные значения углов установки отклонителя φ_{TF} . При этом задача бурового мастера сводилась к совмещению указанных меток путём поворота буровой колонны.

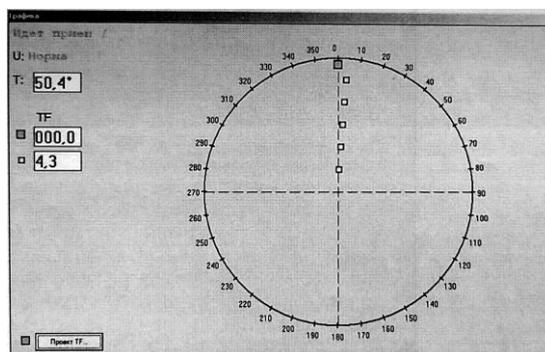


Рис.4

Использованные источники:

1. Ковшов, Г. Н. Инклинометры (Основы теории и проектирования) / Г. Н. Ковшов, Р. И. Алимбеков, А. В. Жибер – Уфа: Гилем, 1998. – 380 с.;
2. Рогатых, Н. П. Идентификация параметров инклинометрических датчиков [Электронный ресурс] / Н. П. Рогатых // Теория и практика современной науки: Международный научно-практический журнал. - 2018. - №3(33). - URL: [http://www.modern-j.ru.](http://www.modern-j.ru;);
3. Рогатых, Н. П. Синтез датчиков инклинометров. // Российский геофизический журнал. 45 – 46. – 2007 - С. 71 – 80.