

«ГИРООРИЕНТАТОР-КУРС» – ПРИБОР ДЛЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО
ОРИЕНТИРОВАНИЯ ОТКЛОНИТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

Скобло Валерий Залманович – заместитель генерального директора ЗАО «НТ-КУРС», кандидат технических наук, skoblo@ntkurs.ru

Ропяной Александр Юрьевич – генеральный директор ЗАО «НТ-КУРС»,
Ropyanoy@ntkurs.ru

Лухт Алексей Иванович – ведущий специалист ЗАО «НТ-КУРС», luht@ntkurs.ru

Ключевые слова: направленное бурение, ориентирование отклонителя, гироскоп, измерение.

В статье описывается разработанный в ЗАО «НТ-КУРС» гироскопический ориентатор, предназначенный для ориентирования отклонителя на забое при направленном бурении. Особенность созданного прибора – измерение угла установки отклонителя в процессе бурения скважины. Его виброустойчивость обусловлена тем, что в приборе используется гироскоп в виде миниатюрного iMEMS-датчика. Рассмотрен принцип действия гироскопического ориентатора, проанализированы его работа и возможности.

Забойные измерительные устройства на базе гироскопических датчиков уже достаточно давно и успешно применяются в практическом бурении, в том числе, и на отечественном рынке буровых работ. Это гироскопические инклинометры и устройства для ориентации (гироскопические ориентаторы) забойных отклонителей — двигателей или клиньев. Основное преимущество таких приборов — измерение не магнитного, а географического азимута и, соответственно, возможность азимутальной ориентации плоскости отклонителя внутри (или вблизи) стальных колонн и труб — обсадных или бурительных.

Появившиеся в последнее время миниатюрные твердотельные гироскопические датчики, выполненные по, так называемой, iMEMS- технологии (микромашин), позволяют на их основе создавать качественно иные забойные измерительные устройства. В отличие от традиционных гироскопов, они более устойчивы к высоким температурам, вибрации, ударам, и в условиях, когда обычные гироскопические датчики разрушаются, эти миниатюрные устройства нормально

функционируют. Конечно, такие выдающиеся эксплуатационные параметры достигаются, в том числе, и за счет снижения их метрологических характеристик, тем не менее, даже на базе таких, сравнительно «грубых» датчиков, могут быть созданы забойные приборы вполне приемлемой точности. Их отличительная особенность — помехоустойчивость чувствительных элементов, миниатюрность, простая конструкция и высокая надёжность, что обеспечивает возможность проведения гироскопических измерений в экстремальных забойных условиях, в частности, непосредственно в процессе бурения. Ниже в статье описывается один из таких приборов, разработанный и изготовленный в ЗАО «НТ-КУРС», предназначенный для ориентирования двигателя-отклонителя в процессе бурения.

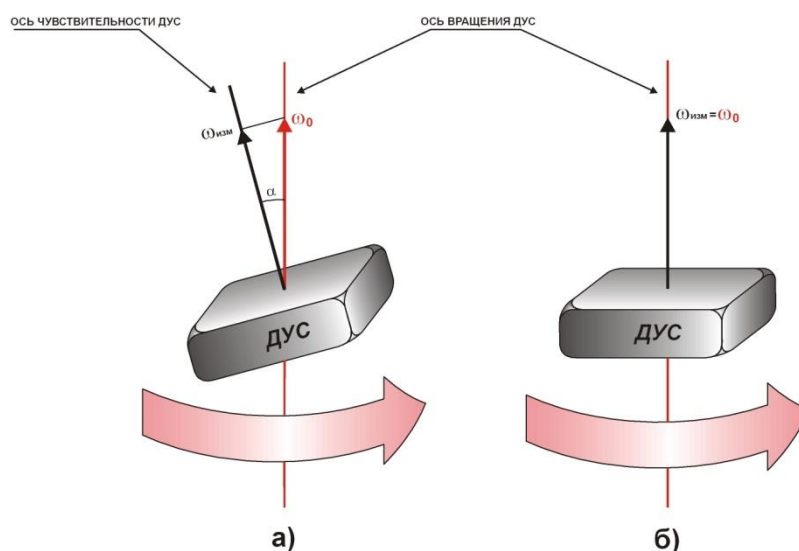


Рис. 1

Измерение угловой скорости вращения ДУС-ом

Миниатюрный твердотельный гироскоп, являющийся чувствительным элементом этого прибора, представляет собой датчик угловой скорости - ДУС, принцип действия которого иллюстрируется Рис.1. Выходной сигнал ДУС-а пропорционален величине вектора $\omega_{изм}$ - проекции на его ось чувствительности вектора угловой скорости вращения ω_0 :

$$U_{г} = K_{г} \cdot \omega_{изм} = K_{г} \cdot \omega_0 \cdot \cos\alpha$$

где $K_{г}$ — чувствительность ДУС-а

α - угол между вектором угловой скорости вращения ω_0 и осью

чувствительности ДУС-а.

Наибольшая чувствительность ДУС-а достигается тогда, когда его ось чувствительности совпадает с осью вращения, как показано на Рис.1б. Располагая ДУС в забойном приборе именно таким образом, т.е. чтобы его ось чувствительности была направлена вдоль продольной оси прибора, можно за некоторое время t измерить его угол поворота $\varphi(t)$ вокруг этой оси, интегрируя по времени выходной сигнал ДУС-а:

$$\varphi(t) = \int_0^t \frac{U_{\Gamma}}{K_{\Gamma}} \cdot dt \quad \dots 1$$

Устанавливая такой прибор на забое, внутри колонны бурильных труб, и сочленяя его с двигателем-отклонителем, можно измерять поворот бурильной колонны – угол $\varphi(t)$ и текущее значение угла установки отклонителя – параметр «Tool Face», в процессе бурения скважины. Поскольку результат измерения не зависит от угла наклона прибора (и ствола скважины), он может использоваться для ориентации отклонителя в наклонных, вертикальных и горизонтальных скважинах. Отметим, что в вертикальных скважинах прибором измеряется азимутальная ориентация плоскости отклонителя.

Принцип действия разработанного гириентатора поясняется Рис.2, на котором схематично показано его устройство и измерительная схема. Она представляет собой систему с отрицательной обратной связью, где ДУС является измерительным преобразователем, а электродвигатель — исполнительным механизмом. ДУС установлен на валу электродвигателя таким образом, что его ось чувствительности совпадает с осью вала электродвигателя и, соответственно, с продольной осью прибора и осью скважины.

Сигнал с ДУС-а, в виде напряжения U_{Γ} , пропорционального угловой скорости вращения вала и самого ДУС-а, подаётся на усилитель сигнала, с коэффициентом передачи K_{γ} . С выхода этого усилителя, напряжение U_{γ} подаётся на усилитель мощности с коэффициентом передачи K_M , который является электроприводом двигателя и подаёт напряжение U_{Δ} на его клеммы. В двигателе имеется встроенный датчик угла поворота его вала относительно корпуса — например, энкодер,

преобразующий угол поворота вала $\varphi(t)$ в число импульсов, которое транслируется на поверхность.

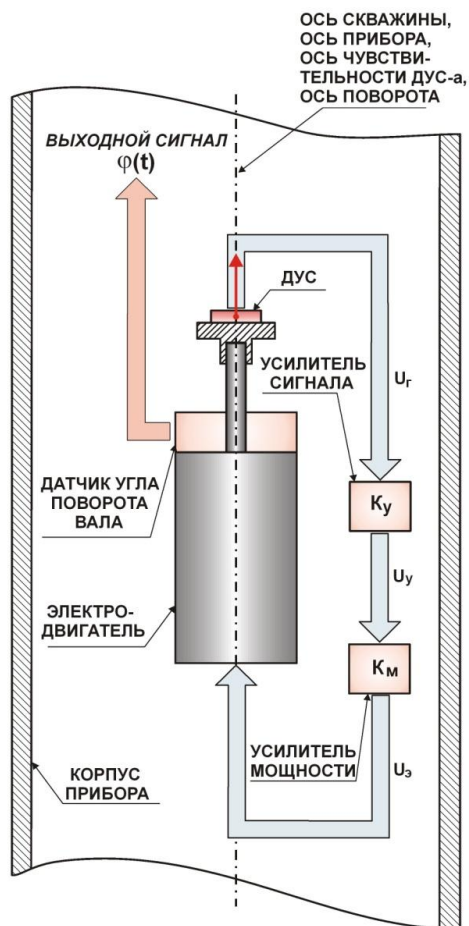


Рис. 2

Устройство и схема измерения забойного блока гироскопического ориентатора

В процессе бурения поворот колонны бурительных труб передаётся на корпус прибора, корпус электродвигателя, на его вал и ДУС. Пропорциональное угловой скорости вращения ДУС-а напряжение U_{Γ} усиливается усилителем, умощняется и подаётся на электродвигатель в обратной полярности, т.е. заставляя повернуться вал электродвигателя в обратную сторону. Если $\omega_{\text{э}}$ — угловая скорость смещения корпуса электродвигателя, $\omega_{\Gamma/\text{э}}$ — угловая скорость поворота вала электродвигателя относительно его корпуса, то:

$$\omega_{\Gamma} = \omega_{\text{э}} + \omega_{\Gamma/\text{э}}$$

$$\omega_{г/э} = K_{Эл} \cdot U_{э}$$

$$U_{г} = \omega_{г} \cdot K_{г}$$

$$U_{э} = U_{г} \cdot K_{у} \cdot K_{М}$$

где $K_{Эл}$ — коэффициент преобразования электродвигателя, преобразующего напряжение на его клеммах в скорость вращения его вала.

Преобразуя эту систему уравнений, которая описывает контур авторегулирования, представленный на Рис.2, получим:

$$\omega_{г} = (\omega_{э} + \omega_{г}) / K_{\Sigma} \quad \dots 2$$

где $K_{\Sigma} = K_{г} \cdot K_{у} \cdot K_{М} \cdot K_{Эл}$

Если суммарный коэффициент усиления по контуру авторегулирования достаточно большой, т.е. $K_{\Sigma} \approx \infty$, то $\omega_{г} \approx 0$. Т.е. система авторегулирования гироскопизатора обеспечивает пространственную стабилизацию вала электродвигателя, поскольку соотношение $\omega_{г} \approx 0$ свидетельствует о неподвижности вала относительно неподвижной системы координат, например, относительно стенок скважины. Действительно, поворот корпуса электродвигателя с угловой скоростью $\omega_{э}$ относительно стенок скважины, вызовет реакцию системы в виде поворота в противоположном направлении его вала относительно корпуса, с той же скоростью $\omega_{г/э} = \omega_{э}$, в результате чего, вал электродвигателя останется неподвижным. Если это так, то поворот корпуса электродвигателя относительно стенок скважины на угол $\Delta\varphi$ приводит к равному по величине, но направленному противоположно повороту вала электродвигателя относительно его корпуса, который измеряется энкодером и транслируется на поверхность.

Такая компенсационная измерительная схема позволила значительно снизить метрологические требования к ДУС-у, который в процессе измерений остаётся практически неподвижным и является, по существу, нуль-органом. Основное требование к нему - высокая чувствительность (точнее, высокое соотношение сигнал/шум), чем она больше, тем более точно можно измерять угол поворота $\Delta\varphi$. Еще одно положительное качество этой измерительной системы - отсутствие

специальных вычислительных алгоритмов интегрирования сигнала с ДУС (см. формулу 1); функции интегратора «скрытно» выполняет электродвигатель, преобразуя скорость вращения вала в угол его поворота.

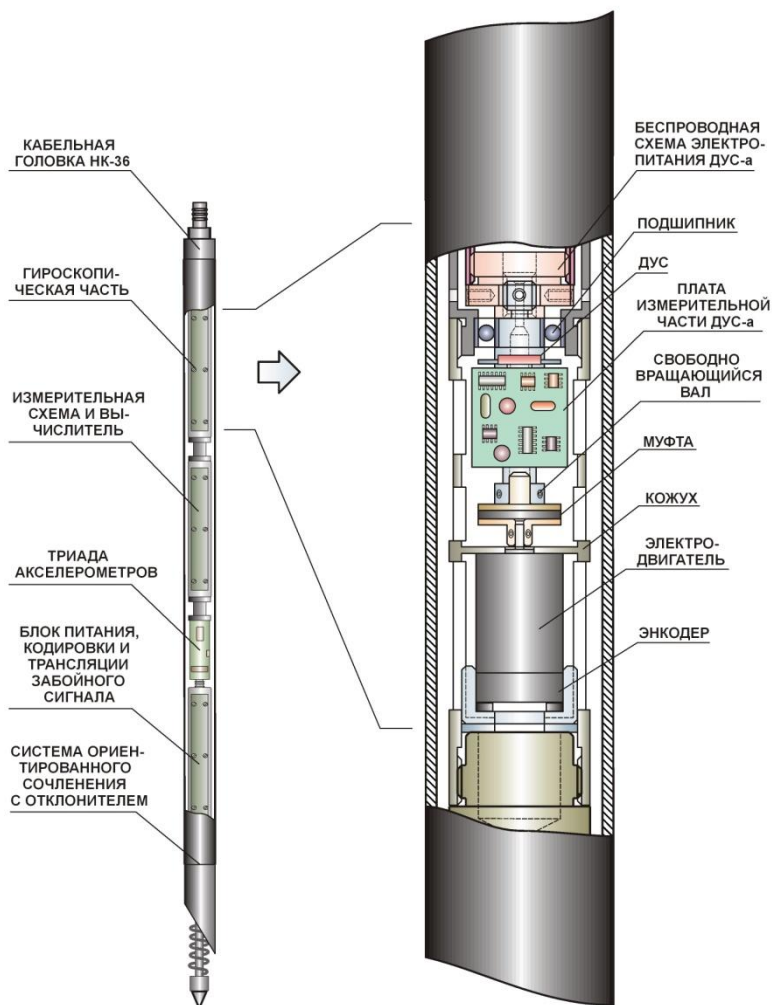


Рис. 3

Состав забойного блока гиросориентатора и структура его гироскопической части

На Рис.3 показаны схематично состав и конструкция забойного блока гиросориентатора. Внешний вид его и габариты практически не отличаются от забойных блоков телесистем, разработанных ЗАО «НТ-КУРС» [1, 2] - такая же система ориентированного сочленения с двигателем-отклонителем (в виде «клина»), кабельная головка типа НК-36; диаметр забойных блоков \varnothing 46мм, длина – около 1м. Состав забойного блока – обычный для телесистем «КУРС» - универсальный блок питания, кодировки и трансляции забойного сигнала, триада акселерометров с измерительной схемой и вычислителем. Основная особенность

гироориентатора – его гироскопическая часть, показанная на Рис. 3 более подробно.

Электродвигатель с сочлененным валом, который может свободно вращаться, установлен в цилиндрическом кожухе; на валу закреплен ДУС и плата измерительной схемы ДУС-а. Этот вал сочленяется с валом электродвигателя посредством муфты, а его свободный конец центрируется в подшипнике. Электропитание ДУС-а и его платы обеспечивается бесконтактным блоком питания; также бесконтактно «снимается» измерительный сигнал с платы ДУС-а. Используется электродвигатель со встроенным энкодером достаточной разрешающей способности – 1024 импульса на 1 оборот вала, или 2,84 имп/градус.

Наиболее эффективно использование разработанного гироскопического гириорентатора для решения следующих технологических задач:

1. Ориентирование отклонителя в вертикальных обсаженных скважинах, например, при забурировании боковых стволов. Обычная практика при этом – ориентирование отклонителя перед началом бурения, как правило – гириинклинометром, далее бурение «вслепую», вплоть до достижения некоторого угла наклона и достаточного удаления от обсадной колонны, чтобы её влияние на измерение азимута снизилось до приемлемых значений. После этого производится обычное направленное бурение с обычной (не гироскопической) MWD-системой. Использование гириорентатора позволяет исключить бурение «вслепую» и непрерывно контролировать направление плоскости отклонителя - азимут его установки. Текущий азимут установки отклонителя $A(t)$ составит:

$$A(t) = A_0 + \varphi(t)$$

где A_0 – начальный азимут установки отклонителя, измеренный гириинклинометром;

$\varphi(t)$ - поворот отклонителя в процессе бурения, измеряемый гириорентатором.

К сожалению, погрешность измерения угла $\varphi(t)$ со временем увеличивается, поскольку случайная ошибка, всегда сопровождающая любое измерение, в данном случае, т.е. при преобразовании угловой скорости в угол поворота, накапливается. Снижение этой ошибки связано с улучшением метрологических характеристик ДУС-а, в первую очередь, со снижением уровня его внутренних шумов. Отметим, что прогресс в разработке iMEMS-гироскопов происходит

непрерывно и достаточно быстро, настолько же быстро может возрасти точность в последующих модификациях гироориентатора.

Измеряемый гироориентатором угол $\varphi(t)$ является, по сути, углом закручивания колонны бурильных труб реактивным моментом сил, действующих на колонну со стороны долота при бурении. Этот угол может быть измерен в любой момент в процессе бурения, и его ошибка измерения не накапливается. При этом, информация об угле закручивания колонны бурильных труб также является существенной для ориентирования отклонителя и качественной проводки направленного ствола скважины.

2. Ориентирование отклонителя в процессе бурения при небольших углах наклона скважины. Использование для этой цели акселерометров (для измерения параметра Tool Face) часто бывает затруднено из-за их высокой чувствительности к вибрациям и ударам, поскольку в соответствии с их прямым назначением, они измеряют ускорение, а не углы. При небольших углах наклона, когда чувствительность акселерометров наиболее высокая, вибрация бурильной колонны не позволяет измерять параметр Tool Face и исключает возможность контроля положения отклонителя в процессе бурения. Использование для ориентации магнитных датчиков, менее чувствительных к вибрациям, часто бывает невозможным из-за влияния близко расположенных стальных (магнитных) труб, обсадных или бурильных. Гироориентатор идеально подходит для этой цели – измерительный сигнал с ДУС-а слабо чувствует вибрацию, а его точность измерения Tool Face не зависит ни от угла наклона, ни от магнитных полей. Кроме того, накапливающаяся во времени ошибка измерения ДУС-а всегда может быть скорректирована (т.е. сведена к нулю) показаниями акселерометров, замеряя ими угол установки отклонителя – параметр Tool Face в отсутствие вибрации, при остановках бурения.
3. Измерение траектории ствола скважины. Эта возможность базируется на принципе работы ДУС-а, «чувствующего» вектор угловой скорости, направление которого может и не совпадать с осью вращения ДУС-а, как например, на Рис. 1а. На Рис.4 схематично показано изменение положения забойного блока гироориентатора в стволе скважины при изменении её азимута. Поворот забойного блока происходит по стрелке, ось вращения при этом повороте направлена вертикально, угловая скорость поворота составляет $\Omega_{\Delta 3}$, а

соответствующее изменение азимутального угла Δ_{AZ} отсчитывается в горизонтальной плоскости и составляет:

$$\Delta_{AZ} = \int_0^t \omega_{AZ} \cdot dt$$

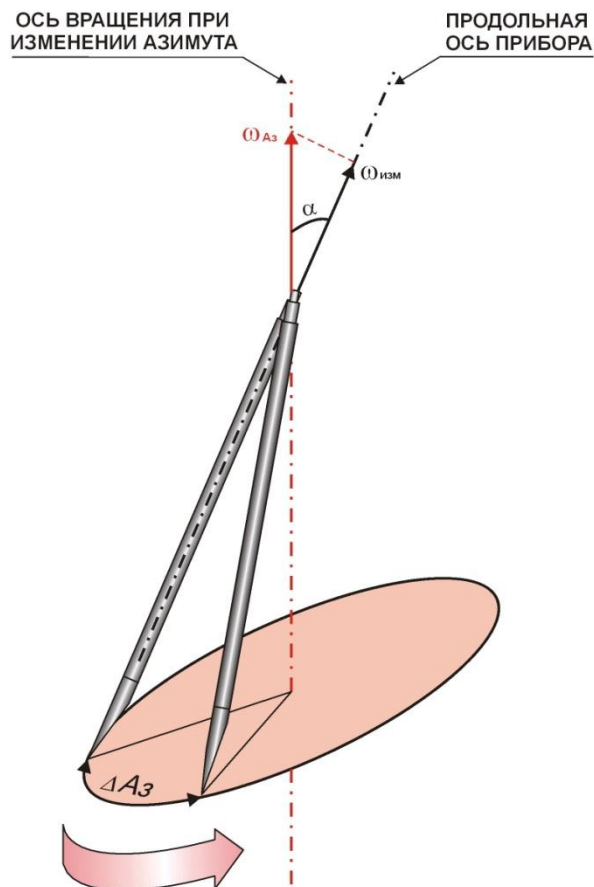


Рис.4

Гироориентатор в качестве измерителя азимута ствола скважины

Гироориентатор измеряет угол поворота, происходящего с угловой скоростью $\omega_{изм}$, которая является проекцией ω_{AZ} на продольную ось прибора:

$$\Delta\varphi_{изм} = \int_0^t \omega_{изм} \cdot dt$$

Поскольку $\omega_{\text{изм}} = \omega_{\text{аз}} \cdot \cos \alpha$ и если угол наклона α за время t не меняется, то

$$\Delta_{\text{аз}} = \Delta\varphi_{\text{изм}} / \cos \alpha$$

Измеренный за время t гириориентатором угол поворота $\Delta\varphi_{\text{гир}}$ складывается из двух составляющих, одна из них - $\Delta\varphi_{\text{изм}}$, обусловлена изменением азимута скважины, а другая – $\Delta \text{Tool Face}_{\text{АКС}}$ обусловленная поворотом прибора вокруг своей продольной оси, достаточно точно может быть измерена триадой акселерометров. Таким образом, чтобы измерить изменение азимута скважины, необходимо из показаний гириориентатора вычесть изменение угла установки отклонителя, измеренное акселерометрами:

$$\Delta_{\text{аз}} = (\Delta\varphi_{\text{гир}} - \Delta \text{Tool Face}_{\text{АКС}}) / \cos \alpha$$

В рассмотренном гириориентаторе все чувствительные элементы – гироскоп и акселерометры, представляют собой миниатюрные твердотельные iMEMS-датчики. Отличные эксплуатационные характеристики этих устройств, преимущества измерительных приборов, созданных на их базе, а также бурное развитие этого направления в мировой электронике, в том числе, дальнейшая миниатюризация iMEMS-датчиков, непрерывное возрастание их точности и стабильности, свидетельствует, на наш взгляд, об актуальности дальнейшей разработки гириориентатора и её перспективности.

Список литературы.

1. Ропяной А.Ю., Скобло В.З. Измерительный навигационный комплекс «КУРС». Вестник Ассоциации Буровых Подрядчиков, №3, 2002.
2. Скобло В.З., Ропяной А.Ю. Реальные телесистемы: технология разработки от идеи до изделия. М., Новые технологии, 2008.