

Волоконно-оптические гироскопы и системы на их основе

Часть 2

Ю. Березина¹

УДК 528.526.6 | ВАК 2.2.2

Волоконно-оптические гироскопы используются в различных отраслях для решения широкого спектра задач. В первой части статьи, которая была опубликована в журнале «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» №3 за 2024 год, мы рассмотрели применение волоконно-оптических гироскопов в системах контроля состояния железнодорожных систем, в системах стабилизации на подвижных объектах и в сейсморазведке. Во второй части продолжим обзор областей применения этих устройств и рассмотрим ключевые тенденции в разработке волоконно-оптических гироскопов и систем на их основе.

НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В нефтегазовой промышленности волоконно-оптические гироскопы, а также модули и системы на их основе нашли широкое применение в системах бурения скважин и в системах контроля их состояния. В частности, для определения профиля и траектории скважины после завершения бурения используется инклинометр (от англ. inclination meter – измеритель наклона) на основе волоконно-оптического гироскопа.

Траектория и конструкция скважины характеризуются тремя ключевыми параметрами (рис. 1): глубина скважины (L), угол наклона скважины (ϑ), азимутальный угол (ψ) [1].

Глубина скважины L обычно измеряется тросом с метками и считается от устья скважины до точки измерения. Углом наклона скважины называется угол между касательной к скважине в точке расположения инклинометра и отвесом. Азимутальный угол – угол между проекцией данной касательной и направлением на север.

Процесс измерения углов отклонения скважины и ее искривления называется инклинометрией. Ранее в этой сфере применялись преимущественно магнитные инклинометры, в состав которых входили акселерометры и магнитометры. Но, поскольку магнитометры подвержены воздействию электромагнитных помех, создаваемых железосодержащими минералами, для данного типа инклинометров требуются системы компенсации, которые, однако, не позволяют полностью решить проблему электро-

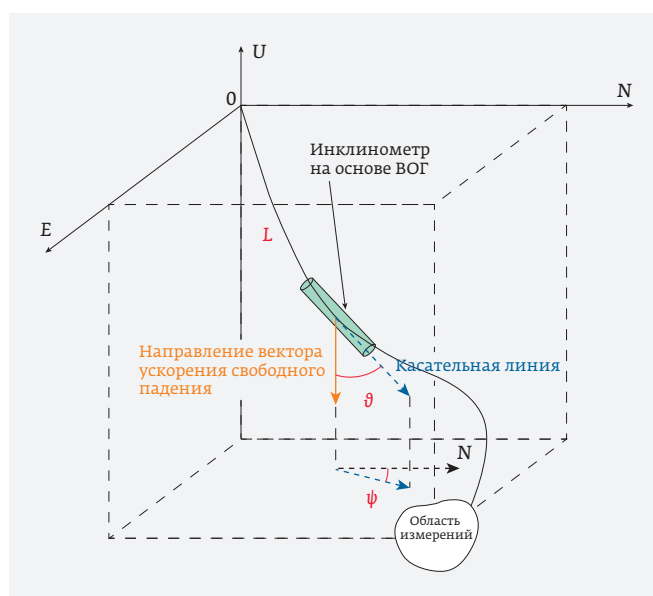


Рис. 1. Параметры скважины [1]

магнитных наводок, при этом удорожая оборудование и существенно увеличивая его размеры.

Инерциальные навигационные системы на основе ВОГ сопоставимы или превосходят магнитные инклинометры по точности, но при этом значительно менее восприимчивы к электромагнитным помехам. При этом подобные системы обладают большой устойчивостью к ударам, вибрации и перепадам температуры (в 2000 году была создана компьютерная модель для изучения влияния условий окружающей среды на инклинометр в скважине [1]). В 2005

¹ Компания «ИНЕЛСО», технический специалист, sales@inelso.ru.

году Адриан Ледроз (Adrian G. Ledroz), проходивший обучение в университете Калгари, выпустил статью о возможности использования измерительного модуля на основе ВОГ в качестве измерительного прибора для инклинометрии скважины [2]. В ходе исследований Ледроз и его коллеги на практике доказали, что предложенный ими для использования модуль на основе ВОГ соответствует требованиям по устойчивости к ударам и вибрации.

Стоит отметить, что инклинометрическое оборудование на основе ВОГ подходит не только для измерения параметров уже пробуренной скважины, но и для измерений в процессе бурения (measuring while drilling, MWD), что актуально для получения информации о направлении и состоянии скважины в реальном времени и, при необходимости, ее корректировки [1, 3]. Применение данного метода особенно актуально при наклонно-направленном бурении (ННБ), когда бурение скважины производится с отклонением от вертикали в заранее заданном направлении, и важно, чтобы бурение осуществлялось в соответствии с ранее просчитанной траекторией. Также важно заметить, что в подобных применениях обязательно используются модули, измеряющие угловую скорость и ускорение по трем осям (рис. 2).

Однако, в некоторых случаях достаточно будет модуля с триадой акселерометров и одним ВОГ. На рис. 3 показана структурная схема инерциального измерительного модуля на основе ВОГ, где измерение наклона проводится только по одной оси Y (вдоль оси направления движения бурового долота). Подобные модули применяются для повышения точности бурения практически горизонтальных или практически вертикальных скважин. В обоих случаях акселерометры нужны для компенсации накапливающейся ошибки гироскопов.

Основными игроками на рынке инклинометрического оборудования на основе ВОГ являются производители из США и Китая.

Из модулей и навигационных систем, которые предлагает китайская компания BLITZ Sensor, для использования в бурильных системах подойдут следующие серии:

- BS-IC01G (серия инерциальных МЭМС-модулей с высокой устойчивостью к ударам и вибрации);
- BS-FM150 (серия инерциальных модулей на основе ВОГ);
- BS-FN200 (серия инерциальных навигационных систем (ИНС) с диапазоном рабочих температур до 70 °C).

БЕСТРАНШЕЙНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Бестраншейное строительство – это вид подземных строительных работ, который не требует обустройства траншей для прокладки коммуникационных и инфраструктурных систем. Данный вид строительства осуществляется с помощью ряда методов [4], таких как туннельный метод,

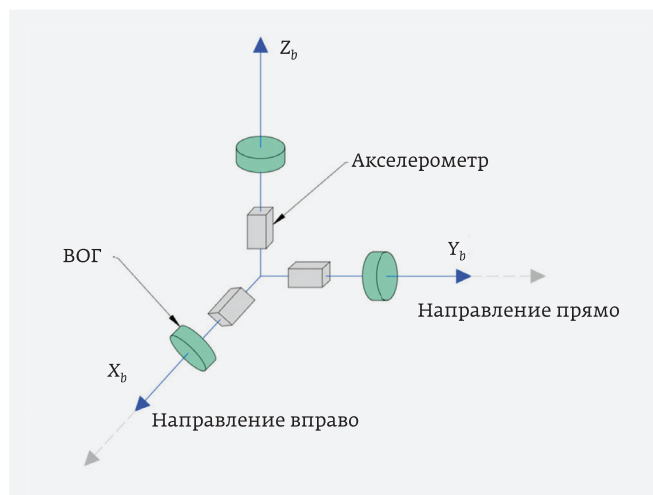


Рис. 2. Измерительный модуль на основе ВОГ с тремя измерительными осями [1]

микротоннелирование, горизонтально-направленное бурение, уплотнение труб, установка обсадных труб и др.

Микротоннелирование – это метод прокладки труб, заключающийся в продавливании грунта с помощью проходческих щитов и закреплении грунта с использованием бетонных или металлических колец. Грунт, скапливающийся в самой трубе во время процесса, разрабатывают и удаляют. В общем виде схема микротоннелирования показана на рис. 4.

Система, применяемая для микротоннелирования, должна обладать высокой точностью, поскольку максимально допустимым отклонением трубы от заданной траектории считается 50 мм. В настоящее время широко применяют лазерные и тахеометрические измерительные приборы, но у них есть свои недостатки. Лазерные датчики не подходят для прокладки труб по изогнутым линиям, и с увеличением расстояния световое пятно от лазера будет все менее сфокусировано, что приведет к ошибке в измерениях, поэтому такой способ используют, преимущественно, при прокладывании прямых

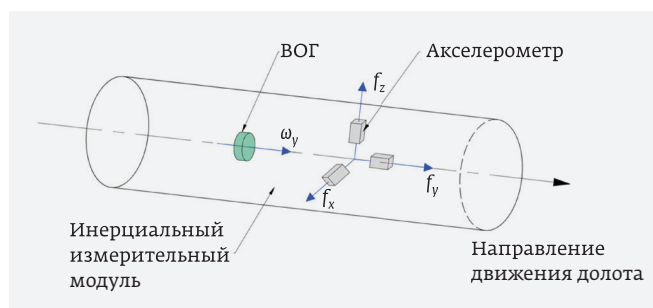


Рис. 3. Одноосевой инклинометр на основе ВОГ [1]



Рис. 4. Микро-тоннелирование [5]

участков труб на короткие расстояния. Тахеометрические приборы отличаются большими габаритами, поэтому чаще всего их применяют для прокладки труб с диаметром от 1,6 м, а трубы и футляры для некоторых видов коммуникации бывают меньшего размера.

ИНС на основе волоконно-оптических гироскопов с поддержкой RTK-режима (real time kinematic) могут обеспечить определение положения режущего колеса и проходческого щита в реальном времени благодаря своей автономности и встроенному навигационному алгоритму. Кроме того, ИНС не требует дополнительного оборудования, такого как тахеометры, или их ручной переустановки, как лазерные датчики. На рис. 5

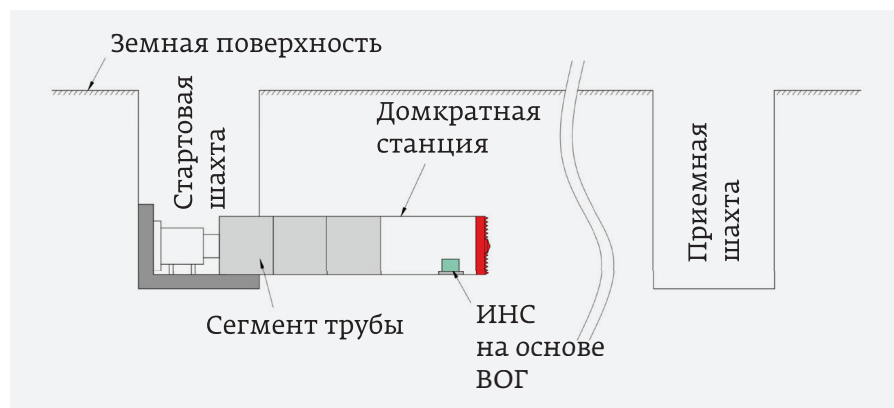


Рис. 5. Оборудование для микротоннелирования [1]



Рис. 6. Модуль на основе ВОГ в машине для микротоннелирования [6]

и 6 показано расположение модуля в системе микро-тоннелирования.

Инерциальный модуль совместно с управляющей электроникой позволяет скорректировать направление оси продавливания трубы (рис. 7).

В настоящее время особую популярность на рынке приобрели датчики немецкого и японского производства.

Для применения в системах микротоннелирования подойдут инерциальные навигационные системы с поддержкой RTK-режима от BLITZ Sensor, способные определять положение объекта в реальном времени с высокой точностью:

- BS-FN200 (ИНС на основе ВОГ средней точности);
- BS-FN300 (серия ИНС на основе ВОГ различной точности и в различных корпусах);
- BS-FN301 (ИНС на основе ВОГ повышенной точности);
- BS-FN500 (ИНС на основе ВОГ, поддерживающая работу с различными интерфейсами).

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И СИСТЕМ НА ИХ ОСНОВЕ

Главной тенденцией при разработке новых моделей ВОГ и систем на их основе в настоящее время является их миниатюризация. Волоконно-оптические гироскопы все еще являются достаточно крупными и громоздкими, особенно по сравнению с МЭМС-гироскопами. Исследования ведутся сразу в двух направлениях.

Во-первых, уменьшение размеров самого гироскопа путем модернизации и модификации технологии его изготовления. Например, ведутся работы по изменению структуры оптического волокна и изменения способа его намотки.

Вторым направлением является уменьшение размеров модулей и изделий, в состав которых входят ВОГ. Это достигается разными путями. Например, многоосевые гироскопы и модули могут использовать общий источник света для всех осей, что позволяет уменьшить размеры модуля. Что касается таких устройств, как инклинометры, к которым особенно часто предъявляются требования по габаритным размерам, то, в зависимости от области применения и требований к точности, можно использовать системы с меньшим числом датчиков, если требования по точности выше требований к размерам.

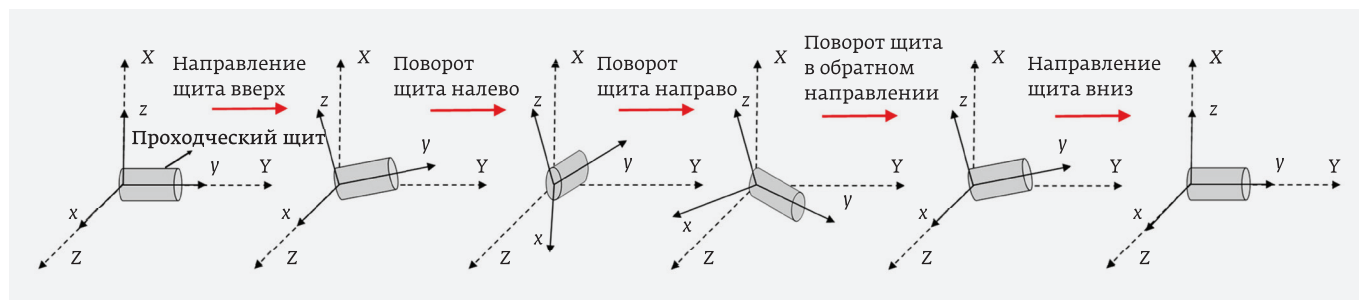


Рис. 7. Корректировка углов продавливания трубы [6]

Миниатюризация является важным направлением для всех применений, рассмотренных в данном материале. В киноиндустрии уменьшение размеров и массы оборудования привело к уменьшению операторских кранов и подвесов для аппаратуры. Это, в свою очередь, привело к уменьшению жесткости конструкций и к необходимости более точной стабилизации без существенного увеличения веса, чтобы сохранить высокую управляемость кранов. В системах стабилизации оптических систем на подвижных объектах (в частности, квадрокоптерах) необходимо осуществлять стабилизацию с высокой точностью, но без увеличения массы и размеров объекта. В нефтегазовой и горнодобывающей промышленности часто бывает необходимость провести инклинометрию относительно небольшой по диаметру скважины, что приводит к невозможности использования крупных громоздких систем.

Также ведутся исследования, направленные на устранение накапливающейся ошибки ВОГ и систем на их основе. Данная ошибка возникает из-за интегральных вычислений угловой скорости и координат, и для ее компенсации могут применяться как другие инерциальные датчики (акселерометры, магнитометры), так и системы спутниковой навигации. Однако, в некоторых применениях постоянная коррекция ошибки с использованием спутниковой связи невозможна (например под землей во время бурения или прокладки труб), что неминуемо приводит к накоплению ошибки. И в данный момент в подобных системах для компенсации ошибки, как уже было сказано, используют другие виды датчиков, но это приводит к удорожанию системы и увеличению ее размеров.

Кроме того, для некоторых из рассмотренных в статье применений актуально повышение устойчивости гироскопов к воздействиям внешней среды (высокое давление, удары, перепады температур, работа при экстремально низких или высоких температурах, высокая влажность и т.д.), что приводит к необходимости разработки новых способов изготовления гироскопов или к повышению характеристик устойчивости уже имеющихся моделей. В частности, при бурении измерительные модули помещают в дополнительную

изоляция и проводят измерения не все время, а интервально, поскольку диапазон рабочих температур, как правило, меньше того диапазона, который способен выдержать прибор в нерабочем состоянии.

В статье представлен обзор устройств и отраслей, где применяются волоконно-оптические гироскопы и системы на их основе. Компания «ИНЕЛСО» поставляет широкий ассортимент инерциальных датчиков, в частности от китайского бренда BLITZ Sensor, чьи инерциальные решения подходят для использования в большинстве систем, упомянутых в данной публикации. К основным преимуществам продукции китайских производителей относятся: короткие сроки поставки, большие производственные мощности, ориентированность на массовое производство, возможность доработки изделий по ТЗ заказчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Xu H., Wang L., Zu Yu. and others.** Application and Development of Fiber Optic Gyroscope Inertial Navigation System in Underground Space // <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/12/5627>
2. **Ledroz A.G., Pecht E., Cramer D. and others.** FOG-based navigation in downhole environment during horizontal drilling utilizing a complete inertial measurement unit: directional measurement-while-drilling surveying // <https://ieeexplore.ieee.org/document/1514655>
3. Компания Scientific Drilling // <https://scientificdrilling.com/technology-services/measurement-while-drilling/gyromwd/>
4. Бестраншейная технология. Бестраншейное строительство // <https://www.zaosi.com/blog/>
5. An introduction to pipe jacking and microtunnelling // https://www.pipjacking.org/assets/pj/static/PJA_intro.pdf
6. **Zu Yu., Wang L., Hu Yu., Yang G.** CEEMDAN-LWT De-Noiseing Method for Pipe-Jacking Inertial Guidance System Based on Fiber Optic Gyroscope // <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/4/1097>