



Vertikal va qiya yo'naltirilgan quduqlar trayektoriyasini nazorat qilish tizimlari uchun inklinometrik o'zgartirgichlarga qo'yiladigan metrologik talablarni ishlab chiqish va tahlil qilish

Sulton F. Amirov¹, Aminjon O. Ataullayev^{2,a)}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; Sulton.amirov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

^{2,a)} PhD, dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; amin8181@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4419-7250>

Dolzarbli: maqolada quduqlarni vertikal va qiya yo'naltirilgan burg'ilashda qo'llaniladigan inklinometrik o'zgartirgichlarga qo'yiladigan metrologik talablar ko'rib chiqiladi. Quduq stvolining fazoviy holatini aniqlash aniqligini oshirish zamonaviy burg'ilash ishlab chiqarishining asosiy vazifalaridan biri hisoblanadi, chunki burg'ilash ishlarining xavfsizligi, iqtisodiy samaradorligi va texnologik samaradorligi inklinometrik o'lchovlarning ishonchligiga bog'liq. Yuqori harorat, bosim, tebranish va zarba yuklamalari sharoitida asbobning zenit va azimut burchaklarini o'lchash aniqligiga hamda fazoviy yo'nalishiga ta'sir qiluvchi asosiy omillar tahlil qilingan. Inklinometrik o'zgartirgichlarning o'lchash xatoligi, o'lchanadigan burchaklar diapazoni, ajrata olish qobiliyati, natijalarning takrorlanuvchanligi, harorat barqarorligi va uzoq muddatli ishonchligi talablariga alohida e'tibor qaratilgan.

Maqsad: o'zgartirgichlarning metrologik xususiyatlarini oshirish quduqlarni qurishning zamonaviy texnologiyalarini rivojlantirishning muhim yo'nalishi bo'lib, xavflarni kamaytirish, trayektoriyani optimallashtirish hamda geologiya-qidiruv va foydalanish ishlari sifatini oshirishni ta'minlaydi.

Usullari: xalqaro tajriba va talabni boshqarishning qiyosiy tahlil usullaridan foydalaniladi.

Natijalar: quduqning fazoviy holati parametrlarini o'lchash aniqligiga ekspluatatsion omillarning ta'sirini hisobga olgan holda vertikal va qiya yo'naltirilgan burg'ilash sharoitlarida ishlaydigan inklinometrik o'zgartirgichlarga qo'yiladigan metrologik talablarni shakllantirish va asoslash bo'yicha tadqiqotlar natijalari

Kalit so'zlar: metrologik talablar, inklinometrik o'zgartirgich, vertikal burg'ilash, qiya yo'naltirilgan burg'ilash, zenit burchagini o'lchash, azimutal o'lchash, o'lchash xatoligi, asosiy va qo'shimcha xatolik.

For citation: Amirov S.F., Ataullayev A.O. Development and analysis of metrological requirements for inclined well trajectory control systems. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 231-238.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23446557>

Received: 12.03.2026

Revised: 10.04.2026

Accepted: 20.05.2026

Published: 25.09.2026

Copyright: © Sulton F. Amirov, Aminjon O. Ataullayev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Разработка и анализ метрологических требований к инклинометрическим преобразователям для систем контроля траектории вертикальных и наклонно-направленных скважин

Султон Ф. Амиров¹, Аминжон О. Атауллаев^{2,a)}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; Sulton.amirov@bk.ru <https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

^{2,a)} PhD, доц., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навоий, 210100, Узбекистан; amin8181@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-4419-7250>

Актуальность: в статье рассматриваются метрологические требования к инклинометрическим преобразователям, применяемым при вертикальном и наклонно-направленном бурении скважин. Повышение точности определения пространственного положения ствола скважины является одной из ключевых задач современного бурового производства, поскольку от достоверности инклинометрических измерений зависят безопасность, экономическая эффективность и технологическая результативность буровых работ. Проанализированы основные факторы, влияющие на точность измерения зенитного и азимутального углов, а также пространственной ориентации инструмента в условиях высоких температур, давлений, вибраций и ударных нагрузок. Особое внимание уделено требованиям к погрешности измерений, диапазону измеряемых углов, разрешающей способности, повторяемости результатов, температурной стабильности и долговременной надежности инклинометрических преобразователей.

Цель: повышение метрологических характеристик преобразователей является важным направлением развития современных технологий строительства скважин и обеспечивает снижение рисков, оптимизацию траектории и повышение качества геологоразведочных и эксплуатационных работ.

Методы: используется международный опыт и сравнительный анализ методов управления сплосом.



Результаты: результаты исследований по формированию и обоснованию метрологических требований к инклинометрическим преобразователям, функционирующим в условиях вертикального и наклонно-направленного бурения, с учётом влияния эксплуатационных факторов на точность измерения параметров пространственного положения скважины

Ключевые слова: метрологические требования, инклинометрический преобразователь, вертикальное бурение, наклонно-направленное бурение, измерение зенитного угла, азимутальное измерение, погрешность измерений, основная и дополнительная погрешность.

Development and analysis of metrological requirements for inclinometric converters for vertical and inclined well trajectory control systems

Sulton F. Amirov¹, Aminjon O. Ataullayev^{2,a)}

¹ DSc, prof., Tashkent State Transport University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; Sulton.amirov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

^{2,a)} PhD., assoc.prof., Navoi State Mining and Technology University, Navoi, 210100, Uzbekistan; amin8181@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4419-7250>

Relevance: the article examines the metrological requirements for inclinometric converters used in vertical and inclined directional well drilling. Improving the accuracy of determining the spatial position of the wellbore is one of the key tasks of modern drilling production, as the safety, economic efficiency, and technological effectiveness of drilling operations depend on the reliability of inclinometric measurements. The main factors affecting the accuracy of zenith and azimuthal angle measurements, as well as the spatial orientation of the instrument under conditions of high temperature, pressure, vibration, and impact loads, have been analyzed. Particular attention is paid to the requirements for measurement error, the range of measured angles, resolution, reproducibility of results, temperature stability, and long-term reliability of inclinometric converters.

Aim: improving the metrological characteristics of converters is an important direction for developing modern well construction technologies and ensures risk reduction, trajectory optimization, and improving the quality of geological exploration and operational works.

Methods: international experience and methods of comparative analysis of demand management are used.

Results: the results of research on forming and substantiating metrological requirements for inclinometric converters operating under vertical and inclined-directional drilling conditions, taking into account the influence of operational factors on the accuracy of measuring well spatial position parameters.

Keywords: metrological requirements, inclinometric transducer, vertical drilling, inclined directional drilling, zenith angle measurement, azimuth measurement, measurement error, main and additional error.

1. Введение (Introduction)

Метрологические требования к инклинометрическим преобразователям (инклинометрам) в бурении фокусируются на точности измерений зенитного угла, азимута, устойчивости к вибрациям, температурным факторам и калибровке. Эти устройства используются в системах управления траекторией скважин (MWD/LWD), где ошибки могут привести к отклонениям от проектной траектории, увеличению затрат и рискам аварий. В последние годы исследования подчеркивают необходимость учета динамических факторов, таких как геомагнитные помехи, температура и накопление ошибок, с акцентом на гироскопические и MEMS-системы для повышения надежности.

В условиях интенсификации процессов разведочного и эксплуатационного бурения нефтяных и газовых скважин особую актуальность приобретают вопросы обеспечения высокой точности и надёжности измерений пространственного положения ствола скважины. Вертикальное и наклонно-направленное бурение предъявляют повышенные требования к метрологическим характеристикам инклинометрических преобразователей, используемых в составе автоматизированных систем контроля и управления процессом бурения. Ошибки измерения зенитного и азимутального углов могут приводить к существенным отклонениям траектории скважины от проектной, снижению эффективности бурения, росту материальных затрат и увеличению аварийных рисков[1-2].

В данной статье рассматриваются основные метрологические требования, предъявляемые к инклинометрическим преобразователям, применяемым при вертикальном и наклонно-направленном бурении. Проведён анализ влияния условий эксплуатации-высоких температур, вибраций, ударных нагрузок, магнитных и электрических помех на точные характеристики измерительных каналов. Особое внимание уделяется погрешностям преобразования первичных параметров (углов наклона и ориентации) в электрические сигналы, а также вопросам их компенсации и минимизации. В работе систематизированы основные виды метрологических погрешностей инклинометрических преобразователей, включая систематические, случайные и



динамические ошибки. Рассмотрены источники нелинейности, температурного дрейфа нуля, перекрёстной чувствительности измерительных осей и нестабильности чувствительности. Показано, что при наклонно-направленном бурении требования к точности измерения зенитного угла существенно возрастают по сравнению с вертикальным бурением, что обусловлено необходимостью строгого соблюдения проектной траектории скважины. Требованиям к разрешающей способности, повторяемости показаний и долговременной стабильности инклинометрических преобразователей. Обоснована необходимость применения методов калибровки, самоконтроля и программной коррекции погрешностей в реальном времени. Рассматриваются современные подходы к метрологическому обеспечению инклинометрических систем, включая использование цифровой обработки сигналов, алгоритмов фильтрации и компенсации возмущающих факторов[3-4].

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Показано, что повышение метрологического уровня инклинометрических преобразователей является ключевым фактором повышения эффективности и безопасности буровых работ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации инклинометрических систем, а также при формировании нормативно-технических требований к средствам измерений, применяемым в бурении скважин различного назначения.

Инклинометры предназначены для измерения углов пространственной ориентации ствола скважины при геофизических исследованиях, а также при проводке скважины по заданной траектории в составе систем управления бурением. В связи с увеличением глубин проводок (свыше 2000м), необходимости уплотнения сетки существующих скважин при кустовом методе бурения, необходимости восстановления “старого” фонда скважин, бурением, наклонно-направленных и горизонтальных скважин в пласты толщиной 2,5-5м, а также бурением скважин малого диаметра возрастают требования к метрологическим характеристикам инклинометрическим преобразователям (ИП).

Показатели инклинометров улучшают путем применения более надежных, виброустойчивых, высокоточных датчиков, подбора материалов изготовления датчиков, выбора их оптимальных режимов и диапазонов работы, разработки кинематических схем первичных преобразователей инклинометрическим преобразователям, тщательного исследования факторов, обуславливающих инструментальные погрешности инклинометрических преобразователей, уменьшения их влияния, отработки технологии изготовления элементов и узлов инклинометрических преобразователей, разработки высокостабильных схем вторичного преобразования и помехоустойчивой передачи информации, разработки методического и программно алгоритмического обеспечения для этапов создания инклинометрических преобразователей и проведения скважинных измерений [5].

Одним из важнейших этапов создания и метрологической аттестации инклинометрических преобразователей является исследование статических характеристик, проводимое на установках пространственной ориентации. С целью повышения точных показателей инклинометрических преобразователей данные статические характеристики записывают в память скважинного прибора и используют при определении искомых углов Эйлера. В качестве установок пространственной ориентации применяется ряд поворотных столов и установок, задающих требуемую ориентацию инклинометрических преобразователей относительно базовой системы координат. Устройство преобразования и обработки (УПО) различаются по условиям эксплуатации, по числу задаваемых углов, типу кинематической схемы, по конструктивному исполнению и т.д. Погрешности задания углов Эйлера устройство преобразования и обработки значительны и составляют от 4 угл. мин. до 30 угл. мин. В связи с ростом требований к точным показателям инклинометрическим преобразователям (погрешность измерения азимута до 1 град. и погрешности зенитного и визирного углов до 15-20 угл.мин.) точные показатели устройство преобразования и обработки становятся в некоторых случаях соизмеримы с точными показателями разрабатываемых инклинометрических преобразователей. При исследовании на устройство преобразования и обработки высокоточных инклинометрических преобразователей статические характеристики инклинометрических преобразователей искажаются и погрешности инклинометрических преобразователей возрастают.

Основными факторами, определяющими погрешности ориентации инклинометрических преобразователей на устройство преобразования и обработки, являются эксцентриситет осей вращения устройство преобразования и обработки, осевые смещения и угловые отклонения осей вращения, эксцентриситет шкал, погрешность исходной ориентации, неуравновешенное крепление инклинометра относительно осей вращения устройство преобразования и обработки.

Таким образом, с целью определения пути повышения точных показателей инклинометрических преобразователей нужно провести анализ данных факторов, определить параметры, позволяющие их учитывать и оценить их влияние на точные показатели инклинометрических преобразователей. Для этого необходимо провести обзор известных технических решений и анализ требований, предъявляемых к инклинометрическим преобразователям, анализ точных показателей существующих инклинометрических преобразователей и выявить инклинометрических преобразователей, наиболее удовлетворяющие предъявляемым требованиям со стороны системы управления бурением. Далее необходимо провести критический анализ параметров и кинематических схем существующих установок пространственной ориентации, выявить наиболее перспективную устройство преобразования и обработки. На основе сравнительного анализа выделенных факторов, требований, предъявляемых к инклинометрическим преобразователям, и параметров существующих устройств преобразования и обработки, необходимо сформулировать задачи исследований, решение которых позволяет повысить точность инклинометрических преобразователей.

Инклинометрические приборы и системы предназначены для измерения и контроля угловых параметров ориентации объектов относительно базовой системы координат, связанной с Землей. При геофизических исследованиях инклинометрические устройства используются для измерения параметров ориентации ствола бурящийся скважины, ее части или полной траектории при управлении проводкой скважины по задания траектории, а также контроля параметров ориентации скважинного снаряда в составе системы управления процессом бурения.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Технология геофизических измерений включает такие этапы как разовые замеры, проведение инклинометрических измерений в процессе бурения и окончательный каротаж [6-7]. Разовые замеры и окончательный каротаж производится геофизическими бригадами и, кроме измерения инклинометрических параметров, включают в себя контроль целого комплекса геофизических параметров. Инклинометрические измерения в процессе бурения проводятся силами буровой бригады и подразумевают работу инклинометрического снаряда в составе автоматизированной системы управления процессом бурения. Полученная и обработанная информация используется для контроля и управления проводкой скважины по заданной траектории. Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом бурения (АСУТП - бурения) представлена на рис. 1

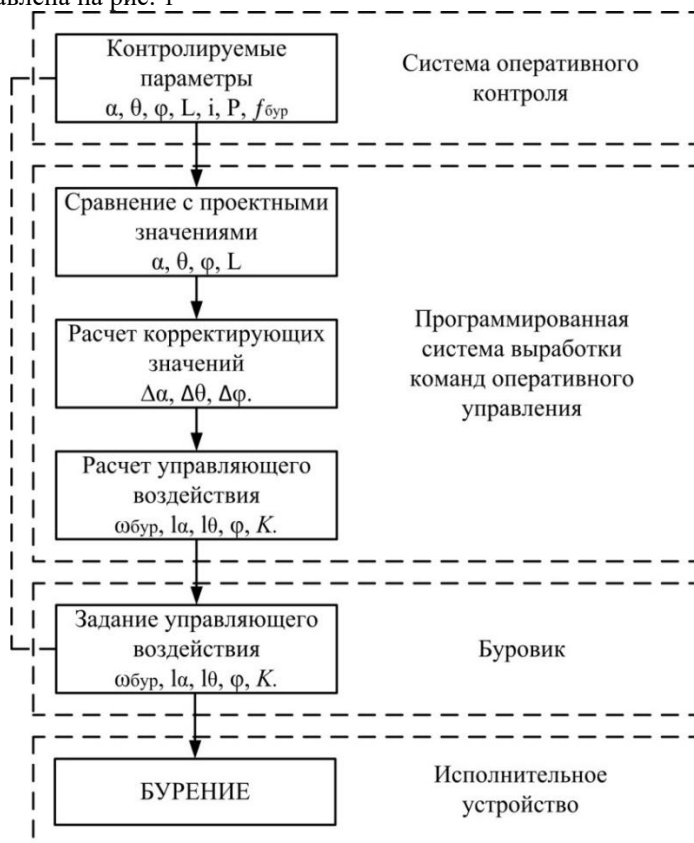


Рис. 1. Упрощенная функциональная структура АСУТП-бурения

Fig. 1. Simplified functional structure of the automated drilling process control system

Контроль параметров ориентации скважины в процессе бурения осуществляется системой оперативного контроля, так называемой MWD-системой. Измеренные данные передаются в наземный компьютеризированный пульт, где происходит обработка результатов измерений. На основе полученных данных, производят расчет текущего положения бурового инструмента и сравнение с проектными значениями траектории скважины. Далее проводится расчет корректирующих значений азимута, зенитного и визирного углов. Затем рассчитываются значения параметров управляющего воздействия с учетом влияющих факторов (глубины, окружающих пород). Результаты расчетов передаются буровой бригаде, которая управляет исполнительным устройством. Далее результаты искривления скважины при проходке контролируются инклинометрической системой. Полноценно функционировать в составе автоматизированных систем управления бурением. Сложность решаемых задач характеризуется тем, что в настоящее время, “несмотря на существенные успехи, создание автоматизированных систем управления техпроцессом бурения находится на стадиях исследований, доводки и совершенствования”.

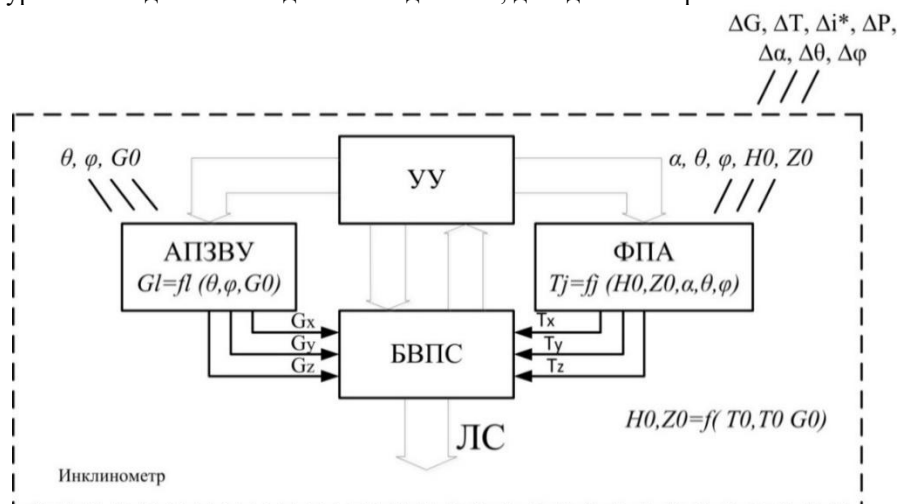


Рис.2. Блок-схема инклинометра на основе трехкомпонентных ФПА и АПЗВУ

Fig.2. Block diagram of an inclinometer based on three-component FPA and APZVU

Среды инклинометрических преобразователей контроля пространственной ориентацией скважины после бурения перспективными являются непрерывные инклинометрические преобразователи, производящие измерения на кабеле без остановок, а также дискретные модули инклинометров в составе агрегатированных комплексов и автономные инклинометрические преобразователи сбрасываемого типа или транспортируемые на кабеле.

Инклинометрическое устройство в общем случае состоит из скважинной части (инклинометра), наземной части и канала связи. Скважинная часть (рис.2) состоит из блока первичных преобразователей (преобразователя азимута и преобразователя зенитного и визирного углов), устройства управления и формирования образцовых сигналов (УУ) и блока вторичного преобразования сигналов (БВПС). Скважинная часть предназначена для измерения комплекса угловых параметров пространственной ориентации в заданной точке ствола скважины; наземная часть для регистрации, обработки данных и представления их в требуемой форме; канал связи - для обеспечения помехозащищенной передачи информации между скважинной частью и наземной частью инклинометрического устройства [8]. Характеристики и показатели инклинометрического прибора во многом определяются параметрами первичных преобразователей инклинометров.

Комплекс требований, предъявляемых к инклинометрическим преобразователям, различен и определяется влиянием ряда факторов: режимом работы инклинометра, типом скважины, параметрами бурения, требуемой погрешностью попадания в круг допуска. Требования к инклинометрическим преобразователям устанавливаются, учитывая комплекс параметров конкретной скважины: типа скважины, траектории ее проведения, среды бурения, глубины, требований к кругу допуска. В требования, предъявляемые к параметрам инклинометрических преобразователей, определяются в основном из требований, предъявляемых к скважинной части инклинометра [9].

Требования к метрологическим показателям инклинометрических преобразователей, а также частные требования к конструкции скважинного прибора определяются типом скважины (вертикальная, наклонно-направленная, горизонтальная), глубиной залегания продуктивного пласта, необходимой точностью проводки скважины по заданной траектории, точностью попадания забоя скважины в требуемую область продуктивной зоны.

Требования к конструкции инклинометрических преобразователей определяются в основ-

ном определяются условиями эксплуатации. В зависимости от технологических условий исследования скважин инклинометрических преобразователей подразделяются на модули - инклинометры в составе забойных систем; комплексы исследования геофизических параметров; приборы контроля искомых углов азимута (α) и зенитного (θ) углов пробуренных скважин, а также участков бурящейся скважины после подъема колонны буровых труб для смены долота и контроля ориентации скважины в процессе подъема колонны буровых труб [10-11].

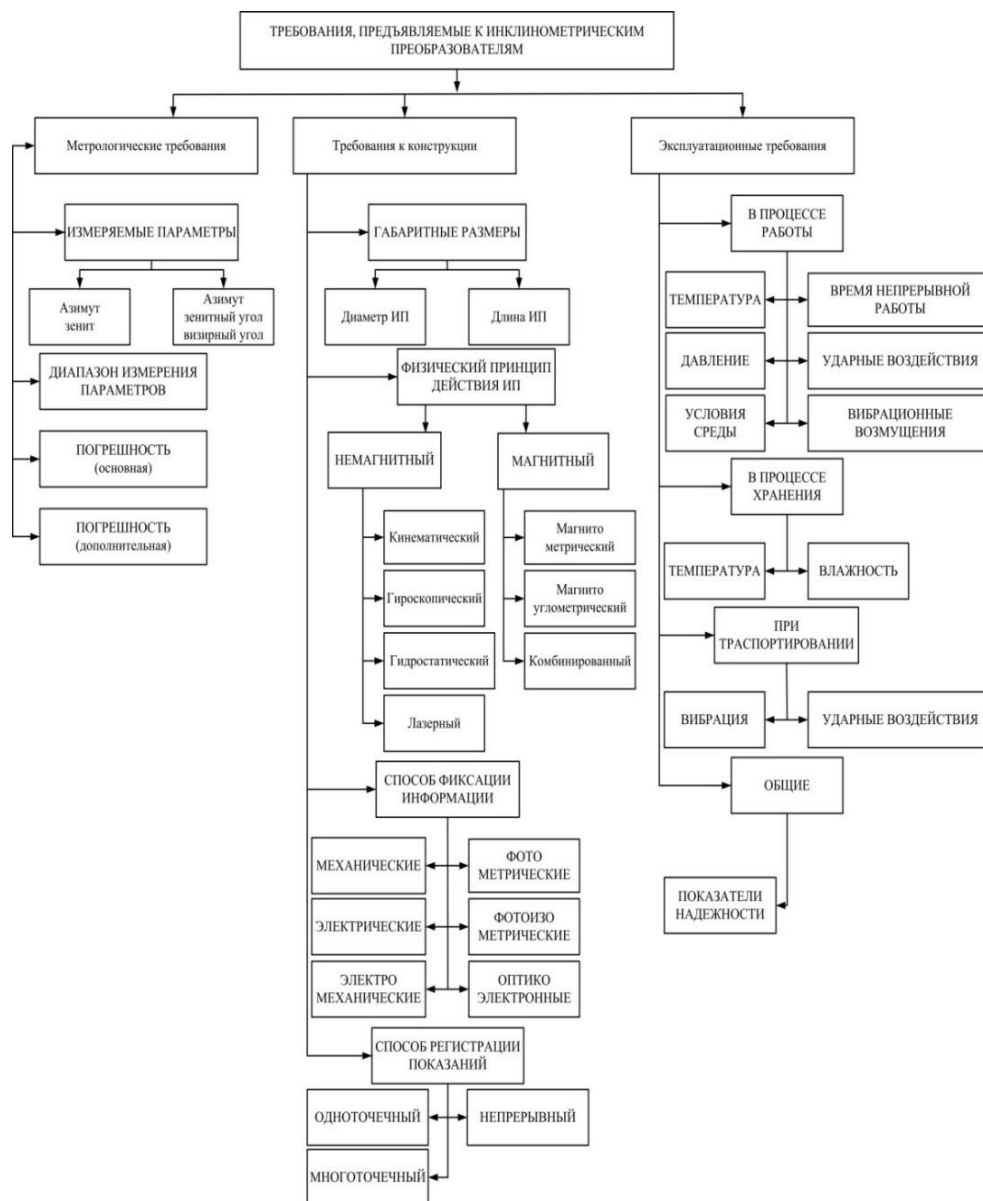


Рис.3. Структурная схема классификации инклинометрических преобразователей и формирования требований к ним

Fig.3. Block diagram of the classification of inclinometer transducers and the development of their requirements

Классификация требований, предъявляемых к инклинометрическим преобразователям, представлена на рис.3 В общем случае требования к инклинометрическим преобразователям можно разделить на три группы: требования к метрологическим конструкциям, эксплуатационные требования. Метрологические требования в свою очередь, подразделяются: на требования, регламентирующие число и тип измеряемых параметров (азимут и зенитный углы; азимут, зенитный и визирный углы); на требования к значениям диапазонов измерения каждого параметра, которые определяются типом и траекторией скважины (вертикальная, наклонно-направленная и горизонтальная); на требования к погрешности определения данных угловых параметров в заданных диапазонах (основная погрешность азимута $\pm 1^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ, \pm 6^\circ$, по зенитному углу ± 10 угл. мин, ± 15 угл. мин, ± 30 угл. мин.) [12].

Требования к конструкции различают по исполнению (автономный, дистанционный), по



принципу действия (магнитный, немагнитный); по способу фиксации информации (механический, электромеханический, фотометрический, оптоэлектронный); по способу регистрации информации (одноточечные, многоточечные, непрерывные); по габаритным размерам: перечень наружных диаметров кожухов (25мм, 30мм, 36мм, 42мм, 48мм, 60мм, 73мм, 89мм, 100мм, 110мм, 120мм), по длине инклинометрических преобразователей, параметр которого имеет немаловажное значение для горизонтальных скважин. Эксплуатационные требования характеризуют требования к инклинометрическим преобразователям, предъявляемые при работе, при хранении, при транспортировании и общие [13]. В процессе работы наибольшее внимание уделяется следующим параметрам: времени непрерывной работы, ударным воздействиям, вибрационным возмущениям, рабочей температуре, давлению, условиям среды. Время непрерывной работы должно быть не менее 8 ч. Значение максимальной рабочей температуры и рабочее давление зависят от глубины залегания пласта, и предельное значение температуры выбирается из ряда 50°, 80°, 100°, 120°, 150°, 180°, 200°, 250° С, максимальное давление выбирается из значений 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 150 МПа. Скважинная часть инклинометра должна сохранять свои параметры после воздействия вибрации в течение 0.5 ч с частотой от 10 до 70 Гц и ускорением до 35 м/с², а также после воздействия 2000 ударов с максимальным ускорением до 150 м/с², длительностью импульсов от 6 до 12 мс и частотой от 10 до 50 ударов в минуту.

В аспекте обеспечения точных показателей проводимых измерений наиболее значимыми являются требования к способам регистрации информации: одноточечные, многоточечные, непрерывные, к диапазонам измеряемых параметров, к погрешностям измерения параметров азимута, зенитного угла и визирного угла.

В развитии кинематических схем инклинометрических преобразователей прослеживается тенденция упрощения конструкций первичных преобразователей инклинометра с одновременным повышением надежности, виброустойчивости, улучшением точных показателей и усложнением преобразования сигналов и их обработкой [14]. В настоящий момент наиболее перспективными первичными преобразователями инклинометров являются акселерометрические, феррозондовые и гироскопические датчики на основе трехкомпонентной кинематической схемы с жесткой ортогональной ориентацией элементов. Стремительное развитие вычислительных систем делает применение таких преобразователей эффективным, позволяя путем алгоритмической обработки результатов измерений и коррекции характеристик инклинометрических преобразователей повысить точные показатели проводимых измерений. Данное направление является наиболее перспективным как в отечественных, так и зарубежных разработках.

4. Заключение (Conclusion)

Рост требований к скважинной части инклинометра происходит в первую очередь по точности, надежности, виброустойчивости, что определяется использованием их в составе систем управления бурением. Анализ параметров инклинометрических устройств показывает, что лучшими точными показателями обладают современные инклинометрических преобразователей на основе феррозондов и акселерометров. Показатели лучших образцов инклинометрических преобразователей в пределах: погрешность, азимута $\alpha \leq 1,5 - 2,0$ град, погрешность зенитного угла $\theta \leq 15 - 25$ угл. мин, погрешность визирного угла $\varphi \leq 15 - 20$ угл. мин.

Однако, в связи с достаточно низкими точными показателями современных устройств преобразования и обработки (погрешность задания угла 4-30 угл. мин.) возрастает доля инструментальных погрешностей инклинометрических преобразователей, вносимая при экспериментальных исследованиях. Для решения задачи создания инклинометрических преобразователей с повышенными точными показателями актуальным является современное устройство преобразования и обработки и анализ основных факторов, обуславливающих инструментальные погрешности инклинометрических преобразователей.

Таким образом, метрологические требования к инклинометрическим преобразователям при вертикальном и наклонно-направленном бурении формируются с учётом высокой ответственности измерений, жёстких условий эксплуатации и необходимости интеграции в автоматизированные системы управления. Повышение точности, стабильности и надёжности данных преобразователей является одним из ключевых направлений развития современных буровых технологий и играет важную роль в повышении эффективности и безопасности буровых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доросинский А. Ю. Алгоритмы и методы определения погрешности устройств, имитирующих электрические сигналы синусно-косинусных вращающихся трансформаторов // XXI



- век: итоги прошлого и проблемы настоящего. Научный журнал. Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2012. № 6. С. 42–46.
2. Бейнарович В. А. Основы автоматизации и систем автоматического управления: учебное пособие. Томск, 2022. 364 с.
 3. Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики: справочное пособие. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
 4. Алексеев В. В., Асиновский Е. Н. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор: патент № 1131429 SU. Опубликовано в бюллетене, 2005. № 5.
 5. Миловзоров Г. В. Преобразователь зенитного и визирного углов: авторское свидетельство № 1150353 SU, МКИ 4 Е 21 В 47/02. Опубликовано 15.04.1985. Бюл. № 14.
 6. Миловзоров Г. В. Анализ инструментальных погрешностей инклинометрических приборов. Уфа: Гилем, 1997. 184 с.
 7. Сафронов В. А. Теория и практика применения датчиков угла на основе синусно-косинусных вращающихся трансформаторов // Компоненты и технологии. М., 2014. № 4. С. 58–62.
 8. Никульшин И. В. Автоматическое управление зенитным углом искривления скважины: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2010.
 9. Есауленко В. Н., Есауленко Н. В., Дегтярева А. М. Струйный датчик зенитного угла искривления скважины // Научно-технический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». ВНИИОЭНГ. 2006. № 5.
 10. Есауленко В. Н., Никульшин И. В., Погуляева А. М. Математическая модель аэродинамического датчика зенитного угла искривления скважины // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2009. № 1. С. 110–113.
 11. Амиров С., Атауллаев А. // E3S Web of Conferences. 2024. Т. 525. Ст. 03010.
 12. Атауллаев А. О., Саидов М. К. // E3S Web of Conferences. 2023. Т. 414. Ст. 03006.
 13. Амиров С. Ф., Атауллаев Н. О., Атауллаев А. О., Мухаммадов Б. К., Мажидов А. У. и др. // E3S Web of Conferences. 2023. Т. 414. Ст. 03011.
 14. Амиров С. Ф., Атауллаев А. О., Саидов М. К., Тогаев И. Б. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 2094, № 5. Ст. 052053.

REFERENCES

1. Dorosinsky, A. Yu. Algorithms and methods for determining the error of devices simulating electrical signals of sine-cosine rotary transformers. XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present, Scientific Journal. Penza: Penza State Technological Academy, 2012, No. 6, pp. 42–46.
2. V. A. Beinarovich. Fundamentals of Automation and Automatic Control Systems. Textbook. Tomsk, 2022, 364 p.
3. Sharapov, V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., Ishanin G. G., Minaev I. G., Sovlukov A. S. Sensors: Reference Manual. Moscow: Technosphere, 2012, 624 p.
4. Patent No. 1131429 SU. Sine-Cosine Rotary Transformer / Alekseev V. V., Asinovsky E. N. Published in Bulletin I, 2005, No. 5.
5. Authors Certificate No. 1150353 SU, MKI 4 E 21 B 47/02. Converter of Zenith and Aiming Angles/Milovzorov G. V. Published 15.04.1985, Bulletin No. 14.
6. Milovzorov, G. V. Analysis of Instrumental Errors of Inclinatoric Devices. Ufa: Gilem, 1997, 184 p.
7. Safronov, V. A. Theory and Practice of Using Angle Sensors Based on Sine-Cosine Rotary Transformers. Journal Components and Technologies, Moscow, 2014, No. 4, pp. 58–62.
8. Nikulshin, I. V. Automatic Control of the Zenith Angle of Borehole Curvature. PhD Dissertation, Astrakhan, 2010.
9. Yesaulenko, V. N., Yesaulenko N. V., Degtyareva, A. M. Jet Sensor of the Zenith Angle of Borehole Curvature. Scientific and Technical Journal: Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea, VNII OENG, No. 5, 2006.
10. Yesaulenko V. N., Nikulshi, I. V., Pogulyaeva A. M. Mathematical Model of an Aerodynamic Sensor for the Zenith Angle of Borehole Curvature. Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences, No. 1, 2009, pp. 110–113.
11. Amirov S., Ataulayev A., E3S Web of Conferences, 525, 03010 (2024)
12. A.O. Ataulayev, M.K. Sayidov, E3S Web of Conferences 414 03006 (2023)
13. Amirov, S.F. Ataulayev, N.O. Ataulayev, A.O. Muxammadov, B.Q. Majidov, A.U., E3S Web of Conferences, 414, 03011 (2023)
14. Amirov, S.F., Ataulayev, A.O. Sayidov, M.K. Togayev, I.B., Journal of Physics: Conference Series, 2094(5), 052053 (2021)