

Контроль
исполнения

На правах рукописи

ЛЮБИМЦЕВ Андрей Ильич

**ИНКЛИНОМЕТРЫ
НА ОСНОВЕ НЕПОДВИЖНЫХ ДАТЧИКОВ
(АППАРАТНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ)**

**Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа 2004

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» Уфимского государственного авиационного технического университета.

Научный руководитель кандидат технических наук,
доцент Иванов Анатолий
Иванович

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Миловзоров Георгий
Владимирович
кандидат технических наук
доцент Иванов Михаил
Петрович

Ведущая организация ОАО НПФ "ГЕОФИЗИКА"
г.Уфа

Защита состоится 11 июня 2004г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Уфимского государственного авиационного технического университета по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «__»_____2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, профессор



Г.Н. Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Инклинометры применяются при контроле комплекса угловых параметров пространственной ориентации наклонно-направленных, горизонтальных скважин и скважинных объектов. Необходимость сокращения сроков строительства и увеличения производительности труда в бурении ставит задачу повышения точности соответствующей измерительной аппаратуры. Принятые законы об охране окружающей среды требуют максимального сохранения земельных угодий, лесов и т.д.

Наиболее перспективными являются инклинометры, основанные на системе жесткозакрепленных датчиков, так как они обладают простотой конструкции, высокой надежностью и точностью по сравнению магнитомеханическими и гироскопическими аналогами. Наличие на рынке инклинометрических телесистем зарубежного производства не позволяет решить проблему оснащения буровых бригад современной техникой из-за ее высокой стоимости. Информация по алгоритмическому обеспечению и устройству отдельных узлов инклинометров имеет коммерческий характер и является закрытой.

Попытки построить программы расчета зенитного, визирного и азимутального углов на основе информации, приведенной в известных монографиях, привели к отрицательным результатам, поскольку предлагаемые в них алгоритмы являются недостаточно четкими и допускают двойное толкование. В алгоритмах также не учтено влияние разрядности входной информации на конечную точность вычисления углов ориентации.

В связи с этим большое значение приобретают исследования, направленные на изучение поведения выходных координат датчиков с учетом конечной разрядности аналого-цифрового преобразователя с целью определения областей их максимальной чувствительности к искомому углу. Это позволит синтезировать алгоритмы с минимальной абсолютной ошибкой вычисления углов ориентации. Полученные алгоритмы могут быть использованы в инклинометрах, входящих в состав систем автоматического управления бурением.

Построение магнитометров на основе измерения второй гармоники требует значительных схмотехнических затрат, что в свою очередь приводит к увеличению массогабаритных показателей конструкции, а также к ухудшению метрологических характеристик из-за временного и температурного дестабилизирующих факторов. Применение принципа измерения площади под кривой сигнала феррозонда значительно упрощает схмотехнику магнитометра, повышает его метрологические характеристики и надежность.

Одним из средств передачи информации от инклинометра к наземной станции является проводной канал связи. Задача повышения помехоустойчивости передаваемой инклинометром ической информации и надежности приемных и передающих уз

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 309 55А

традиционного, применением в наземной части источника ЭДО, а в скважинной - источника тока.

Автономные инклинометры, из-за простоты технологии обслуживания, могут эксплуатироваться силами буровой бригады. Они могут использоваться не только для разовых замеров, но и для контроля положения ствола скважины в процессе бурения. Однако на линейных участках скважины и на участках с искусственным искривлением необходимо иметь различные интервалы съема информации с первичных датчиков. В связи с этим синтез принципов управления режимом работы автономного инклинометра позволит повысить точность контроля положения ствола скважины.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность сформулированной темы исследования.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является разработка математического и аппаратного обеспечения инклинометров с жестко закрепленными датчиками, отвечающего условиям повышенной метрологии и надежности.

Задачи исследования

Для достижения сформулированной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование чувствительности датчиков к углам ориентации в зависимости от пространственного положения с учетом конечной разрядности аналого-цифрового преобразователя. Синтез алгоритмов расчета углов ориентации, использующих в вычислениях группы датчиков с максимальной чувствительностью к искомому углу.

2. Разработка структурных и принципиальных схем магнитометров на основе дифференциального и полумостового феррозондов, обладающих повышенной временной и температурной стабильностью.

3. Исследование методов повышения помехоустойчивости передаваемой инклинометрической информации по проводному каналу связи и разработка приемных и передающих узлов, отвечающих требованиям повышенной надежности.

4. Синтез алгоритма работы и структурной схемы автономного многоточечного инклинометра.

Методы исследования

При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования, численного интегрирования и аппроксимации функций, численные методы обработки результатов измерений, методы теории автоматического регулирования, элементы теории аналоговой, цифровой и вычислительной техники.

На защиту выносятся

1. Алгоритмы расчета углов ориентации, основанные на использовании групп датчиков с максимальной чувствительностью к искомому углу.
2. Зависимости, позволяющие определить минимально необходимую разрядность аналого-цифрового преобразователя при заданной максимальной абсолютной погрешности вычисления углов ориентации.
3. Магнитометры, основанные на принципе измерения площади под кривой выходного сигнала феррозондов полумостового и дифференциального типа, и обладающие повышенными метрологическими характеристиками, а также повышенной временной и температурной стабильностью по сравнению с существующими аналогами.
3. Двухсторонний канал телеметрической связи с повышенной помехозащищенностью для передачи информации между наземным и скважинным оборудованием по одножильному каротажному кабелю.
4. Автономный инклинометр для контроля пространственного положения скважин с возможностью оперативного изменения интервала съема информации с первичных датчиков.

Научная новизна

Научную новизну проведенных в работе исследований определяют следующие основные результаты:

1. Получены поверхности, характеризующие чувствительность системы жестко закрепленных ортогональных датчиков к углам ориентации в зависимости от пространственного положения в рамках оценки код на градус.
2. Установлены зависимости, позволяющие определить минимально необходимую разрядность аналого-цифрового преобразователя при заданной максимальной абсолютной погрешности вычисления углов ориентации.

Практическая значимость и внедрение результатов работы

На основе проведенных в рамках диссертационной работы исследований разработаны и изготовлены инклинометрические телесистемы с проводным каналом связи, которые прошли успешные испытания в центре горизонтального бурения в г. Оренбурге.

Для НИИ ТС «Пилот» г.Уфа изготовлены опытные образцы магнитометров на основе полумостовых и дифференциальных феррозондов, а также передана техническая документация по их изготовлению и настройке.

По заказу фирмы «Телеком ГА» для забойной телесистемы «ГЕОПЛАСТ», находящейся на эксплуатации в Уфимском управлении буровых работ, разработан программный модуль расчета углов ориентации, а также программа калибровки датчиков. Инклинометры, оснащенные данным программным обеспечением, могут быть использованы в системах автоматического управления бурением. На программное обеспечение получено свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Региональная школа - конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике. Уфа, 2001г.

2. VI научная конференция для преподавателей и аспирантов факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства по вопросам энергосбережения и информационных технологий в сельском хозяйстве. Уфа, 2001 г.

3. Девятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 2003г.

Публикации

Основные положения, представленные в диссертации, опубликованы в 6 научных работа, в том числе, получен патент на проводной канал телеметрической связи, два свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, результатов и выводов, списка использованных источников из 92 наименований и приложения. Основное содержание изложено на 170 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность решаемой научной задачи, формулируется цель и задачи исследования, их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе показано, что актуальной задачей является разработка и исследование инклинометров на основе системы жестко закрепленных датчиков (акселерометров и феррозондов), поскольку она обладает более высокой надежностью, по сравнению с механическими, при действии вибрационных и ударных нагрузок.

Проводится обзор отечественных и зарубежных фирм, работающих в данной области, приведены некоторые технические данные выпускаемой ими продукции.

В рамках состояния вопроса по теме исследования рассмотрены основные варианты построения алгоритмов расчета углов ориентации пространственного положения скважины, магнитометров, телеметрических каналов связи. Поскольку подробная информация об устройстве существующих телесистем в последнее время получила коммерческий характер и является закрытой, то анализ проведен на основе патентного поиска, монографий, статей.

Во второй главе рассмотрена структура погрешностей инклинометра. Особое внимание уделено погрешности дискретизации, возникающей из-за конечной разрядности аналого-цифрового преобразователя и нелинейного характера выходного сигнала датчиков. Возможны ситуации, когда полезная информация содержится лишь в нескольких младших разрядах при достаточно большом значении кода, что резко увеличивает абсолютную ошибку определения углов ориентации.

Одним из путей повышения точности является увеличение разрядности входной информации. Реализация данного подхода требует значительного улучшения соотношения сигнал/шум, что ведет к конструктивным, схемотехническим, алгоритмическим затратам и имеет физическое ограничение. Другой путь связан с синтезом и использованием алгоритмов расчета углов ориентации, использующих в вычислениях группы датчиков с максимальной чувствительностью к искомому углу. В этом случае не требуется дополнительных аппаратных затрат (предполагается, что микроконтроллер уже используется), а основные силы сосредотачиваются на написании программного обеспечения.

Для комплексной оценки чувствительности, учитывающей конечную разрядность аналого-цифрового преобразователя и нелинейный характер выходного сигнала датчика, вводится оценка код на градус. Она характеризует количество информации (разрядов), получаемой с датчика при изменении его положения на некоторую угловую величину. Например, чувствительность акселерометра, расположенного на оси OX, к зенитному углу в рамках оценки код на градус запишется в следующем виде:

$$\Delta N = \left| \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \right| - \left| \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta + k) \right| \cdot 2^{n-1},$$

где φ - визирный гол; θ - зенитный угол; k - шаг движения; n - разрядность аналого-цифрового преобразователя. Для проведения исследований разрядность аналого-цифрового преобразователя выбрана равной 12, так как затраты на ее получение и точность преобразования являются наиболее оптимальными для большинства информационно-измерительных систем. Моделирование производилось в среде MathCAD 2000.

На рисунке 1 приведены трехмерные изображения оценок чувствительности акселерометров, расположенных на осях OX, OY, OZ, к зенитному углу при $k=0.2^\circ$, $n=12$.

Анализируя расположение максимумов и минимумов, во-первых, можно выделить зоны наиболее эффективной работы для каждого датчика. Во-вторых, выставить требования к функциям расчета зенитного угла по группе используемых в каждой зоне датчиков для получения минимальной абсолютной ошибки расчета. Данное требование носит характер необходимого условия, поэтому нужен дальнейший анализ структуры функций. Одним из видов такого анализа является оценка чувствительности функций по Боде.

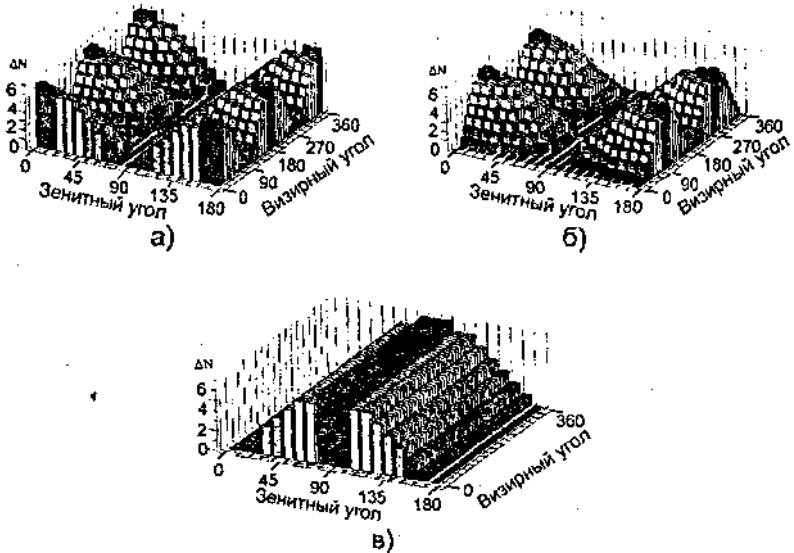


Рис. 1 Чувствительность акселерометров к зенитному углу в рамках оценки код на градус: а) – акселерометр на оси OX; б) – акселерометр на оси OY; в) – акселерометр на оси OZ

На рисунке 2 приведены графики абсолютных погрешностей определения зенитного угла по функциям: $\theta = \arcsin(\sqrt{b_1^2 + b_2^2})$, $\theta = \arccos(b_3)$, $\theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3}\right)$,

$\theta = \arcsctg\left(\frac{b_3}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}\right)$ (b_1, b_2, b_3 – нормированные значения сигналов акселерометров). Алгоритм их получения следующий. Задается зенитный угол θ , производится вращение по визирному углу φ в диапазоне от 0° до 360° и находится максимальная величина погрешности в определении зенитного угла обоих знаков. Найденные значения откладываются на графике, затем переходят к следующему углу θ . Моделирование выполняется при следующих условиях:

1. Величины перекосов приняты нулевыми;
2. Разрядность аналого-цифрового преобразователя – 12;
3. Число достоверных разрядов – 11 (шум младшего разряда распределен по нормальному закону);
4. Опорное напряжение АЦП – 5В;
5. Амплитуда датчика – 2В;
6. Уровень нуля датчика – 2.5В;
7. Диапазон изменения зенитного угла $0^\circ - 180^\circ$, шаг 1° ;
8. Диапазон изменения визирного угла $0^\circ - 360^\circ$, шаг 10° .

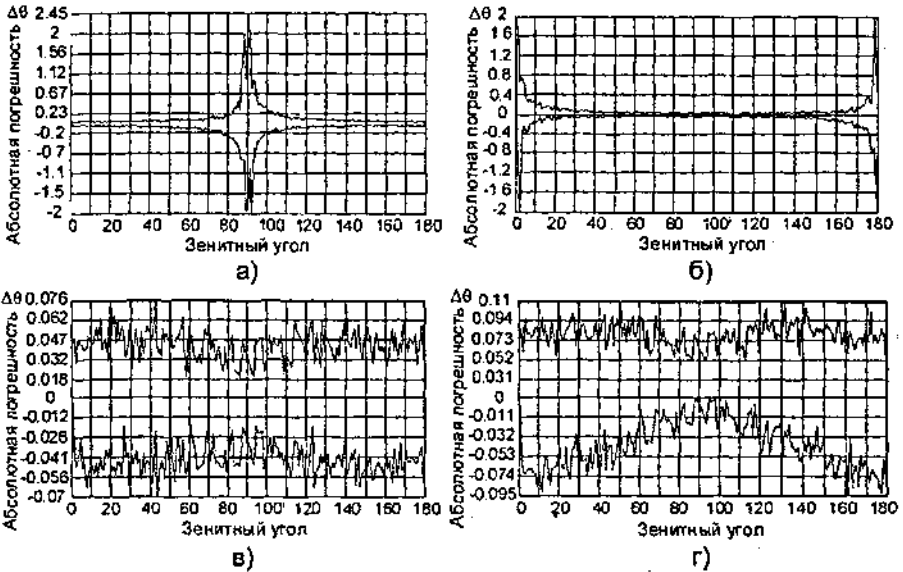


Рис. 2 - Графики абсолютных погрешностей определения зенитного угла по функциям: а) $\theta = \arcsin \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$; б) $\theta = \arccos(b_3)$; в) $\theta = \arctg \left(\frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3} \right)$; г) $\theta = \operatorname{arccctg} \left(\frac{b_3}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}} \right)$

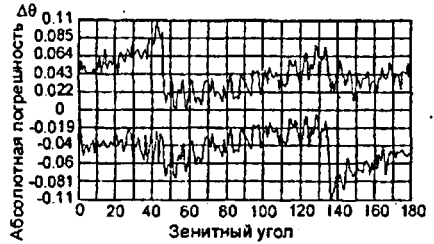
Анализ данных, изображенных на рисунках 2а и 2б, показывает, что для получения минимальной абсолютной погрешности во всем диапазоне зенитных углов необходимо комбинированное использование приведенных функций. Для этого интервал зенитных углов разбивается на сектора, и в каждом из них используются функции с минимальной абсолютной ошибкой. Сектора применимости находятся из условия максимальной чувствительности функций к измеряемому зенитному углу, которая оценивается по величине их производной в каждом секторе.

На основе выше изложенных рассуждений синтезирован алгоритм расчета зенитного угла на основе функций синуса и косинуса, рисунок 3а.

Из рисунков 2в и 2г видно, что абсолютная погрешность определения зенитного угла по функциям на основе тангенса и котангенса более равномерна в исследуемом диапазоне, однако для них существуют точки, в которых возможны ситуации деления на нуль. Для исключения неопределенных ситуаций воспользуемся разбиением на сектора из алгоритма на рисунке 3а. Алгоритм вычисления зенитного угла на основе функций тангенса и котангенса приведен на рисунке 4а.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } 1 \geq b_3 \geq \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ то } \theta = \arcsin(\sqrt{b_1^2 + b_2^2}) \\ \text{Если } \frac{1}{\sqrt{2}} \geq b_3 \geq -\frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ то } \theta = \arccos(b_3) \\ \text{Если } -\frac{1}{\sqrt{2}} \geq b_3 \geq -1, \text{ то } \theta = \pi - \arcsin(\sqrt{b_1^2 + b_2^2}) \end{array} \right.$$

а)

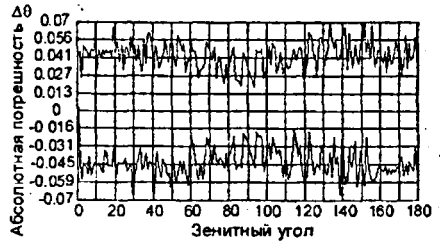


б)

Рис. 3 Вычисление зенитного угла по функциям \arcsin и \arccos
а) алгоритм вычисления зенитного угла; б) максимальная абсолютная погрешность расчета зенитного угла.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } 1 \geq b_3 \geq \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ то } \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3}\right) \\ \text{Если } \frac{1}{\sqrt{2}} \geq b_3 \geq -\frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ то } \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_3}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}\right) \\ \text{Если } -\frac{1}{\sqrt{2}} \geq b_3 \geq -1, \text{ то } \theta = \pi - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3}\right) \end{array} \right.$$

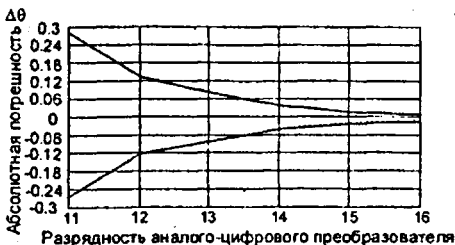
а)



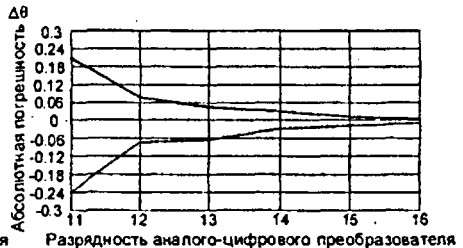
б)

Рис. 4 Вычисление зенитного угла по функции arctg
а) алгоритм вычисления зенитного угла; б) максимальная абсолютная погрешность расчета зенитного угла.

Проведено исследование влияния разрядности аналого-цифрового преобразователя на величину максимальной абсолютной ошибки вычисления зенитного угла по алгоритмам на рисунках 3а и 4б. Результаты представлены на рисунке 5.



а)



б)

Рис. 5 Зависимость максимальной абсолютной погрешности вычисления зенитного угла от разрядности аналого-цифрового преобразователя
а) для алгоритма на рисунке 3а; б) для алгоритма на рисунке 4а.

Как видно из графиков, наибольший спад абсолютной погрешности осуществляется при переходе от 11 к 12 разрядам. Дальнейшее увеличение разрядности до 16 существенного увеличения точности не дает, а аппаратные и программные затраты, направленные на стабилизацию значащих разрядов будут несоизмеримо больше, чем при 12 разрядах. Применение АЦП с 12+13 двоичными разрядами является наиболее оптимальным с точки зрения точности и затрат на аппаратную реализацию.

Синтез алгоритмов расчета и анализ их точностных характеристик для визирного, азимутального углов проводится аналогично сказанному выше. Следует отметить, что замена функций расчета азимутального угла производится в диапазоне зенитных и азимутальных углов.

Процесс определения углов ориентации имеет два режима. Первый осуществляется при зенитном угле $\theta=0$ - режим на вертикали, второй при $0<\theta<\pi$. Известно, что азимутальный и визирный углы однозначно определяются при зенитном в диапазоне $0<\theta<\pi$, а при $\theta=0$ определена лишь их сумма, которая носит название угла установки отклонителя на вертикали. Однако в реальных условиях при приближении зенитного угла к нулю из-за ограниченной разрядности аналого-цифрового преобразователя, используемого в инклинометре, и уменьшения амплитуды азимутальной и визирной составляющей в выходных сигналах датчиков (феррозондов и акселерометров), значительно возрастает абсолютная ошибка в определении азимутального и визирного углов. Ее величина не позволяет использовать полученные данные для контроля пространственного положения скважины. Поскольку соотношения, указанные в известных монографиях, не обеспечивают требуемой точности, то необходим поиск иных алгоритмов расчета угла установки отклонителя на вертикали:

Система уравнений, описывающих работу феррозондовых датчиков a_1 и a_2 (установленных на осях OX, OY соответственно), имеет вид:

$$\begin{cases} a_1 = \cos(\varphi) \cdot (\cos(\theta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\nu) - \sin(\theta) \cdot \sin(\nu)) - \sin(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\nu) \\ a_2 = -\sin(\varphi) \cdot (\cos(\theta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\nu) - \sin(\theta) \cdot \sin(\nu)) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\nu) \end{cases}$$

где α - азимутальный угол, ν - угол магнитного наклона.

Чувствительность функции $\cos(\theta)$ к изменению аргумента на зенитных углах близких к 0° мала, поэтому примем $\cos(\theta) \approx 1$. Чувствительность функции $\sin(\theta)$ к изменению аргумента на тех же зенитных углах гораздо выше, чем у функции $\cos(\theta)$, и поэтому не исключается из системы уравнений. С учетом сказанного система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} a_1 = \cos(\nu) \cdot \cos(\varphi + \alpha) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\nu) \\ a_2 = -\cos(\nu) \cdot \sin(\varphi + \alpha) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\nu) \end{cases}$$

Обозначим $\varphi + \alpha = \psi$, тогда функции расчета угла установки отклонителя на вертикали будут иметь вид:

$$\psi = \arccos \left(\frac{a_1 + \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\nu)}{\cos(\nu)} \right);$$

$$\psi = \arcsin \left(\frac{a_2 - \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\nu)}{\cos(\nu)} \right).$$

Следуя аналогичным рассуждениям при анализе функций расчета зенитного угла, синтезирован алгоритм расчета угла установки отклонителя на вертикали, рисунок 6а.

$$x = \frac{a_2 - \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\nu)}{\cos(\nu)}$$

$$y = \frac{a_1 + \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\nu)}{\cos(\nu)}$$

Если $0 \leq x \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ и $\frac{1}{\sqrt{2}} \leq y \leq 1$, то $\alpha = \arcsin(x)$

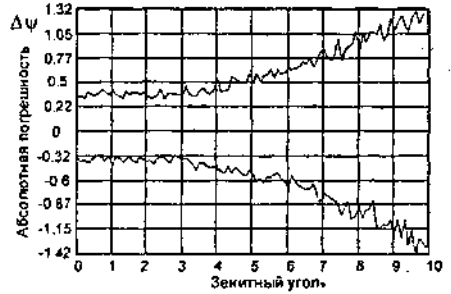
Если $\frac{1}{\sqrt{2}} \leq x$ и $-\frac{1}{\sqrt{2}} \leq y \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$, то $\alpha = \arccos(y)$

Если $-\frac{1}{\sqrt{2}} \leq x \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ и $y \leq -\frac{1}{\sqrt{2}}$, то $\alpha = \pi - \arcsin(x)$

Если $x \leq -\frac{1}{\sqrt{2}}$ и $-\frac{1}{\sqrt{2}} \leq y \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$, то $\alpha = 2 \cdot \pi - \arccos(y)$

Если $0 > x \geq -\frac{1}{\sqrt{2}}$ и $\frac{1}{\sqrt{2}} < y$, то $\alpha = 2 \cdot \pi + \arcsin(x)$

а)



б)

Рис. 6 Расчет угла установки отклонителя на вертикали

а) алгоритм вычисления угла установки отклонителя на вертикали;

б) максимальная абсолютная погрешность расчета угла установки отклонителя на вертикали.

Момент перехода от раздельного вычисления азимутального и визирного углов к углу установки отклонителя на вертикали определяется допустимой абсолютной ошибкой вычислений. И может представлять не точку на шкале зенитных углов, а зону, в которой действительно как раздельное вычисление азимутального и визирного углов, так и угла установки отклонителя на вертикали.

Приведена методика калибровки инклинометров, позволяющая учесть угловые перекосы датчиков и вычислить их нормировочные коэффициенты. Задачей метода, как и всех известных, является поиск матрицы направляющих косинусов.

Опишем метод поиска элементов матрицы на примере акселерометра, установленного на оси OZ. Инклинометр устанавливается так, чтобы

единичный вектор \vec{k} совпадал с вектором силы тяжести g , вектор \vec{j} направлен из плоскости чертежа рисунок 7а.

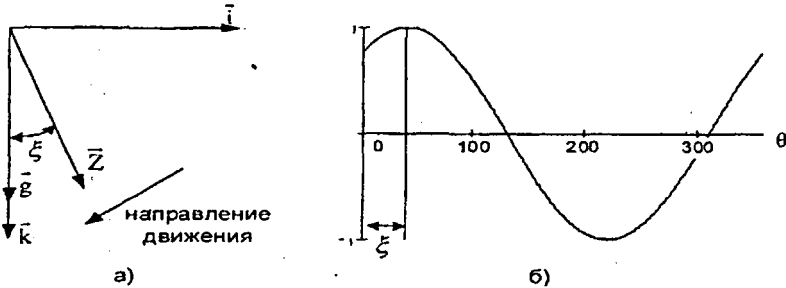


Рис. 7 Пояснения к нахождению элементов матрицы направляющих косинусов
а) - расположение векторов; б) - выходной сигнал акселерометра

При движении акселерометра Z по часовой стрелке в плоскости векторов \vec{k} и \vec{i} выходной сигнал достигнет максимума через некоторый угол ξ , рисунок 7б. Получаемые дискретные отсчеты сигнала датчика: аппроксимируются с помощью метода наименьших квадратов функцией вида:

$$f(\omega) = A_0 + \sqrt{A^2 + B^2} \cdot \sin(\omega + \varphi),$$

где ω - угол, по которому происходило снятие характеристики; A_0 - среднее значение сигнала; A - амплитуда синусоидальной составляющей сигнала; B - амплитуда косинусоидальной составляющей сигнала; φ - определяет начальную фазу сигнала датчика и соответствует величине ξ . Величина φ может быть найдена из выражения:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{B}{A}\right).$$

Аналогично находится начальная фаза акселерометра установленного на оси OZ при его вращении в плоскости векторов \vec{k} и \vec{j} . На основе полученных данных вычисляется угол между осью чувствительности датчика и вектором к ортогональному базису связанного с корпусом прибора. Найденный угол является элементом матрицы направляющих косинусов. Данная процедура повторяется для каждого акселерометра и феррозонда относительно векторов $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$. Несмотря на большое количество экспериментов, в конечном программном обеспечении их число составляет 6. Этого удалось добиться за счет совмещения нескольких экспериментов в одном.

В третьей главе рассматриваются варианты построения магнитометров, основанных на принципе измерения площади под кривой выходного сигнала феррозонда. Функциональная схема измерительного усилителя для дифференциального феррозонда приведена на рисунке 8. Она содержит усилитель переменного тока (DA1), синхронный детектор (ключ K1), устройство интегрирования (DA2).

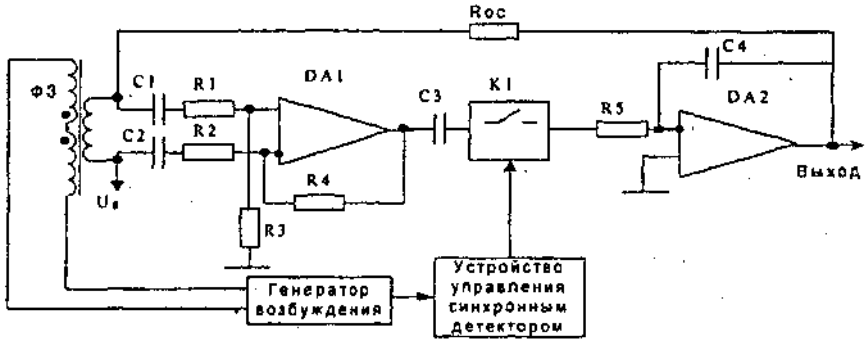


Рис. 8 Функциональная схема магнитометра

Генератор обеспечивает возбуждение феррозонда пилообразным током и синхронизацию устройства управления однополупериодным синхронным детектором.

Допустим, что ориентация феррозонда была изменена так, что в нем появилось некомпенсированное сигналом обратной связи магнитное поле. Тогда на его измерительной обмотке появится ЭДС, которое, пройдя через дифференциальный усилитель, синхронный детектор, поступит на интегратор. Выходной сигнал интегратора начнет изменяться, вызывая соответствующее изменение магнитного поля в измерительной обмотке феррозонда, что приведет к уменьшению генерируемой ЭДС. Этот процесс будет продолжаться, пока площадь под кривой ЭДС не станет равной нулю.

Функциональная схема измерительного усилителя для полумостового феррозонда приведена на рисунке 9.

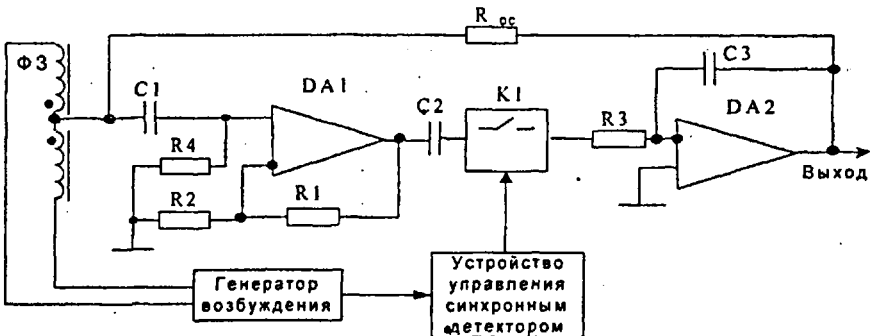


Рис. 9 Функциональная схема магнитометра

Его состав и работа основных узлов аналогична схеме на рисунке 8. Следует отметить, что генератор возбуждения феррозонда работает в режиме источника ЭДС, поэтому выполнен по схеме с трансформаторным выходом. Ток петли обратной связи перераспределяется в полуэлементах феррозонда, выравнивая

их индуктивные сопротивления и, соответственно, коэффициенты деления плеч моста.

Схемы, приведенные на рисунках 8,9 с метрологической точки зрения абсолютно одинаковы, поскольку содержат идентичные тракты усиления, выпрямления, цепи обратной связи. Выходной сигнал полумостового феррозонда примерно в 3 раза выше, чем у дифференциального, что требует меньшего коэффициента усиления в предварительном усилителе. Вследствие этого, в выходном сигнале магнитометра на рисунке 9 присутствует гораздо меньший уровень шумов, чем в магнитометре на рисунке 8, но при применении полумостовых магнитометров необходимо учитывать конструктивные сложности, возникающие при изготовлении и креплении трансформатора.

Для обеспечения двунаправленной передачи по геофизическому коротажному кабелю рассматривается телеметрический канал связи, основанный на применении источника напряжения в приемной и источника тока в передающей части. Так как источник напряжения обладает малым внутренним сопротивлением, то улучшено соотношение сигнал/шум для принимаемого сигнала. Функциональная схема канала приведена на рисунке 10. Эпюры, поясняющие работу схемы, приведены на рисунке 11.

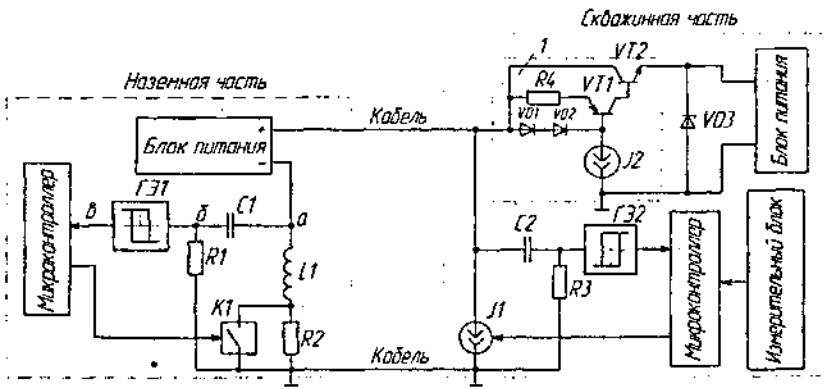


Рис. 10 Функциональная схема двунаправленного телеметрического канала связи

Для обеспечения надежной связи необходимо, чтобы блок питания скважинной части не шунтировал управляемый источник тока Л. Это достигается путем введения в устройство входного блока 1, собранного на элементах VT1, VT2, R4, VD1, VD2, J2 и обладающего высоким входным сопротивлением. Стабилитрон VD3, включенный параллельно со скважинным блоком питания, компенсирует изменения тока нагрузки в соответствии с принципом параметрического стабилизатора. Наземная часть содержит в качестве преобразователя ток-напряжение резистор R2 и дроссель L1. Такое включение позволяет выделить фронт импульсов.

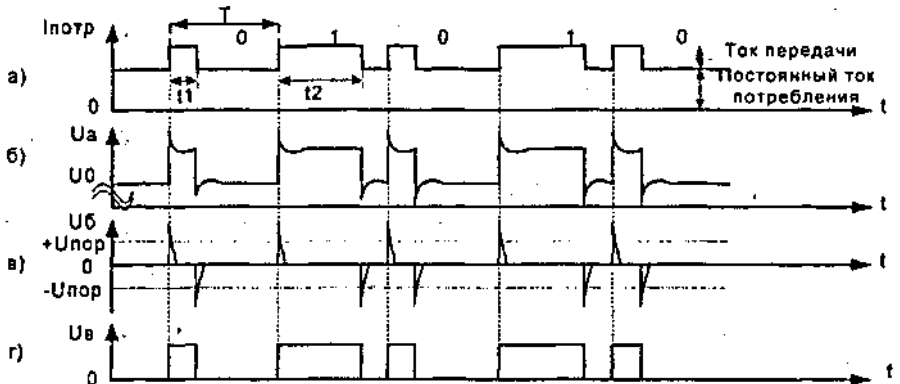


Рис. 11 Эпюры напряжений, поясняющие работу схемы на рисунке 10

Канал работает следующим образом. Напряжение питания скважинной части поступает с наземной части по каротажному кабелю. При этом ключ К1 находится в разомкнутом состоянии, а управляемый источник тока Л выключен. Скважинный блок питания обеспечивает нормальную работу всех блоков скважинной части. Информация с измерительного блока скважинной части кодируется в телеграфный код в микроконтроллере и подается на управляемый источник тока J1. При включении управляемого источника тока Л, происходит увеличение тока потребления от наземного источника напряжения на постоянную величину J, рисунок Па. Тем самым на преобразователе ток-напряжение L1R2 выделяются постоянные по амплитуде импульсы напряжения, рисунок 116, причем применение дросселя позволяет выделить их фронты. Эти импульсы проходят через дифференцирующую схему C1R1, которая увеличивает размах напряжения, рисунок Ив. Гистерезисный элемент ГЭ1 восстанавливает их форму до уровня необходимого для работы микропроцессора, рисунок 11г.

При передаче управляющей информации с наземной части, микропроцессорная система формирует ее в телеграфном коде и подает на ключевой элемент К1. При его замыкании падение напряжения на преобразователе ток-напряжение L1R2 выделяется на входе скважинной части благодаря ее высокому входному сопротивлению. Импульсы напряжения проходят дифференцирующую схему C2R3, восстанавливаются гистерезисным элементом ГЭ2 и поступают в микроконтроллер для дальнейшей обработки.

Исследована пропускная способность канала с применением телеграфного кода для передачи данных. Наиболее оптимальная частота передачи, удовлетворяющая по скорости и надежности получаемой информации, с кабелем длиной до 3 километров равна 300Гц.

В четвертой главе рассматривается алгоритм работы и конструкция автономного многоточечного инклинометра с управляемым интервалом измерения показаний первичных датчиков (акселерометров, феррозондов).

Отличительной чертой является наличие шокowego акселерометра. Он расположен в поперечной оси инклинометра и измеряет вибрационные перегрузки, возникающие при работе бурового инструмента. Чередую моменты бурения и останова можно управлять работой прибора.

При построении электронной части большое внимание уделено алгоритму управления энергопотреблением. Расчетное время работы прибора от батареи с напряжением **12В** и емкостью 7Ач составляет 600 часов.

Приведена конструкция шасси инклинометра. Показаны способы крепления феррозондов, акселерометров, элементов питания.

Описано сервисное программное обеспечение, позволяющее оператору задавать режимы перед спуском инклинометра в скважину, а также считывать и расшифровывать измеренные данные после его подъема.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. Исследована чувствительность датчиков (акселерометров и феррозондов) к углам ориентации в зависимости от их пространственного положения при конечной разрядности аналого-цифрового преобразователя. На основе полученных данных сформированы алгоритмы расчета, углов ориентации, использующие в вычислениях группы датчиков с максимальной чувствительностью к искомому углу.

2. Исследовано влияние разрядности аналого-цифрового преобразователя на величину максимальной абсолютной ошибки вычисления углов ориентации. При разрядности аналого-цифрового преобразователя равной Невозможен расчет углов ориентации со следующими максимальными абсолютными ошибками:

Угол	Максимальная абсолютная ошибка	Примечание
Зенитный	$\pm 0,06^{\circ}$	
Визирный	$\pm 0,5^{\circ}$	При зенитном угле в диапазоне от 5° до 175°
Азимут	$\pm 0,7^{\circ}$	При зенитном угле в диапазоне от 5° до 175°
Отклонитель на вертикали	$\pm 0,4^{\circ}$	При зенитном угле в диапазоне от 0° до 5°

3. Разработана методика калибровки инклинометров с жестко закрепленными первичными датчиками, отличающаяся малым числом (не более 6) экспериментов для получения наборов данных, на основе которых вычисляются калибровочные коэффициенты, позволяющие учесть технологические перекосы датчиков. На основе приводимой методики разработано программное обеспечение, на которое получено свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

4. Разработаны принципиальные электрические схемы полумостового и дифференциального магнитометров, основанных на принципе измерения площади под кривой выходного сигнала феррозонда. По сравнению с магнитометрами, основанными на измерении амплитуды второй гармоники в выходном сигнале феррозонда, они обладают: максимальной рабочей температурой $125\text{ }^{\circ}\text{C}$., дрейф выходного сигнала составляет не более $0,5\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$. Временная стабильность обеспечивается отсутствием высокочастотных фильтров.

5. Разработан двухсторонний телеметрический канал связи по одножильному каротажному кабелю, отличительной чертой которого, является применение источника напряжения в передающей и источника тока в приемной части. Надежность приемных и передающих узлов обеспечивается малым числом используемых компонентов. Наиболее оптимальная частота передачи с кабелем длиной до 3 километров равна 300 Гц. Оценка помехоустойчивости проведена на опытном образце и составляет 1 сбой на 1000 принятых пакетов. На двусторонний проводной канал телеметрической связи получен патент.

6. Разработан автономный инклинометр с управляемым интервалом измерения и записи данных. Подробно описан алгоритм работы прибора, а также принцип организации системы электропитания. Приведен сборочный чертеж конструкции инклинометра.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Патент №2217591 Проводной канал телеметрической связи / Иванов А.И., Любимцев А.И., Насыров Д.А., Нургалиев А.Р. Бюл №33, 27.11.2003.

2. Любимцев А.И. Программный комплекс для калибровки инклинометрических систем / Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2003611492 от 24.04.2003.

3. Иванов А.И., Любимцев А.И., Мануйлов М.Ю. Управляющая программа отказоустойчивого управляющего контроллера / Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2003611517 от 05.05.2003.

4. Иванов А.И., Абрамов А.Д., Любимцев А.И. Подсистема сбора измерительной информации / А.И. Иванов, А.Д. Абрамов, А.И. Любимцев // Электрофикация сельского хозяйства: Межвузовский научный сборник. Вып.3., Башкирский государственный аграрный университет. - Уфа, 2002. - с. 109-112.

5. Алексеева И.У., Любимцев А.И., Абрамов А.Д., Яушев Г.К. Полупроводниковый датчик давления / И.У. Алексеева, А.И. Любимцев, А.Д. Абрамов, Г.К. Яушев // Электрофикация сельского хозяйства: Межвузовский научный сборник. Выпуск 2. Башкирский государственный аграрный университет. - Уфа, 2000.-С.86-90.

6. Иванов А.И., Любимцев А.И. Определение угла установки отклонителя на вертикали в инклинометрах. / Электронный журнал «Исследовано в России», 41,445-453, 2004. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/041.pdf>

Любимцев Андрей Ильич

**ИНКЛИНОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ НЕПОДВИЖНЫХ ДАТЧИКОВ
(АППАРАТНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ)**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и
систем управления

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 29.04.2004. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 0,9. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ №301

Бесплатно.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Центр оперативной полиграфии

450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12

№ 13908