

На правах рукописи



ЗИГАНГИРОВ Линар Рифхатович

**ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ
ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ С РАЗНОПОЛЯРНЫМ
ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СИГНАЛОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ
(развитие теории, разработка, исследование)**

Специальность:

**05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие
системы (в промышленности и медицине)**

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

Уфа – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре информационно-измерительной техники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Миловзоров Георгий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Заико Александр Иванович
кафедра теоретических основ электротехники
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
профессор

доктор технических наук
Коровин Валерий Михайлович
ОАО «Башнефтегеофизика»,
главный геофизик

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие
Центр метрологических исследований
«Урал-Гео»

Защита диссертации состоится «25» декабря 2012 г. в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса 12, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Автореферат разослан «22» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одной из основных технологических операций, осуществляемых в процессе бурения наклонно направленных и горизонтальных скважин, является контроль комплекса параметров искривления скважин с целью обеспечения оптимальных режимов бурения, устранения возможности возникновения осложнений и аварий, пересечения продуктивного пласта в проектной точке и решения многих других задач. Не менее важной при бурении скважины является операция ориентирования породоразрушающего инструмента бурильной колонны при проводке ствола скважины в заданном направлении либо удержания направления в конусе допустимых угловых отклонений. Для осуществления указанных операций служит инклинометрическая система (ИнС). ИнС включает в себя скважинный прибор (СП) и наземный интерфейсный блок (НИБ), которые соединяются каналом связи.

Анализ известных отечественных и зарубежных источников, отражающих теоретические и практические вопросы проектирования ИнС, показывает, что наиболее перспективным и признанным среди разработчиков направлением является построение СП на основе трехкомпонентного феррозондового преобразователя азимута (ТФПА) и трехкомпонентного преобразователя зенитного и визирного углов (ТПЗВУ). В данном направлении достигнуты определенные положительные результаты как в плане развития теории, так и в практической реализации технических решений, позволяющих создавать ИнС, обладающие приемлемыми метрологическими характеристиками.

Однако в последние годы возросли требования, предъявляемые потребителями геофизической аппаратуры к метрологическим характеристикам ИнС. Анализ известных работ и разработок в области инклинометрии показывает, что основным источником дополнительной температурной погрешности является температурный дрейф параметров первичных преобразователей и измерительных каналов в магнитометрах ТФПА. Весьма перспективным в этом направлении для снижения температурной погрешности представляется применение феррозондовых датчиков при импульсном возбуждении в магнитометрах, в которых информативный параметр выделяется при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода.

Кроме того, анализ известных работ в области инклинометрии показывает, что недостаточное внимание уделено математическому обеспечению алгоритмической обработки результатов измерений, учитывающему отклонения осей чувствительности от ортонормированного базиса корпуса СП и неидентичность функций преобразования акселерометров ТПЗВУ и феррозондов ТФПА.

Поэтому разработка научно обоснованных технических решений, проведение теоретических и экспериментальных исследований в области дальнейшего развития математического и методического обеспечения, позволяющих снизить основную и дополнительную погрешности инклинометрических измерений, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Цель работы. Разработка научно обоснованных технических, математических и методических решений в области построения ИнС с улучшенными метрологическими характеристиками на основе феррозондовых датчиков с разнополярным прямоугольным сигналом возбуждения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- обзор и критический анализ известных решений в области построения ИнС и определение наиболее перспективных направлений их развития;
- анализ математических моделей феррозондового измерительного преобразователя при разнополярном прямоугольном сигнале возбуждения;
- разработка математических моделей трехкомпонентных преобразователей азимутального, зенитного и визирного углов, учитывающих углы отклонения осей чувствительности акселерометров и феррозондов от осей базиса корпуса СП и неидентичность функций преобразования этих датчиков;
- разработка методики идентификации параметров отклонения осей чувствительности акселерометров и феррозондов от осей базиса корпуса СП и параметров неидентичности функций преобразования этих датчиков;
- разработка научно обоснованных технических решений трехкомпонентного феррозондового преобразователя азимута и проведение комплекса экспериментальных исследований.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы методы математического моделирования с применением положений из теории нелинейных электрических цепей и теории пространственной ориентации твердых тел, методы численного моделирования на основе языка программирования высокого уровня *Visual Basic 6.0*. В экспериментальных исследованиях использованы методы статистической обработки результатов измерений.

Достоверность научных положений обоснована соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований и работоспособностью разработанных технических решений.

Достоверность экспериментальных исследований подтверждена использованием аттестованных средств метрологического обеспечения. Достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждена также их внедрением и практическим использованием в производственных геофизических организациях.

На защиту выносятся:

– результаты анализа математических моделей феррозондового измерительного преобразователя при разнополярном прямоугольном сигнале возбуждения в виде аналитического выражения для определения значения максимальной частоты возбуждения и функции преобразования феррозондового канала, в котором информативный параметр выделяется при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода;

– математические модели ТФПА и ТПЗВУ, учитывающие параметры отклонения осей чувствительности акселерометров и феррозондов от осей базиса корпуса СП и параметры неидентичности функций преобразования датчиков, а также методика идентификации этих параметров;

– разработанные и внедренные научно обоснованные технические решения ТФПА и результаты экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в результатах анализа математических моделей феррозондового измерительного преобразователя при разнополярном прямоугольном сигнале возбуждения, представленных в виде аналитического выражения для определения значения максимальной частоты возбуждения и функции преобразования феррозондового канала, в котором информативный параметр выделяется при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода. При этом установлено, что данная функция преобразования линейна, что доказывает обоснованность применения данного способа выделения информативной составляющей сигнала.

На основе анализа ранее полученных математических моделей ТПЗВУ и ТФПА разработаны математические модели трехкомпонентных преобразователей, в которых учтены параметры отклонения осей чувствительности акселерометров и феррозондов и параметры неидентичности функций преобразования этих датчиков. На основе полученных математических моделей разработана методика идентификации параметров ТПЗВУ и ТФПА.

Практическая ценность результатов состоит в том, что непосредственное их применение позволило решить важную научно-техническую задачу повышения точности инклинометрических измерений.

Результаты анализа математических моделей феррозондового измерительного преобразователя составляют основу для разработки феррозондовых каналов ТФПА с улучшенными метрологическими характеристиками.

Разработанные модели ТФПА и ТПЗВУ составляют основу математического обеспечения вычисления азимутального, зенитного и визирного углов по измеренным сигналам с феррозондов и акселерометров, а методика идентификации параметров ТФПА и ТПЗВУ позволила усовершенствовать градуировочные операции ИнС.

Реализация результатов работы. Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических и экспериментальных иссле-

дований и практические разработки внедрены и используются в следующих организациях: в Государственном унитарном предприятии Центр метрологических исследований «Урал-Гео» (Уфа); в ОАО НПФ «Геофизика» (Уфа); в ФГБОУ ВПО УГАТУ (Уфа) и в ФГБОУ ВПО УдГУ (Ижевск).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VIII Конгресс нефтегазопромышленников России «Новые достижения в технике и технологии геофизических исследований скважин» (Уфа, 2009); Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2009); Международная научная конференция «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ – 2010» (Астрахань, 2010); Молодежная научно-практическая конференция «Промысловая геофизика» (Уфа, 2011); VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 2011), II Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2012» (Ижевск, 2012).

Публикации. Опубликовано 16 научных работ, из них 3 – в научных журналах, рекомендованных ВАК, получено 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 128 стр. Работа содержит 42 рис., 19 табл., список литературы из 153 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, методы исследований и научная новизна, приведены основные результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ работ в области разработки ИнС как отечественного, так и зарубежного производства. Выполнен обзор акселерометрических преобразователей зенитного и визирного углов. Рассмотрены варианты построения трехкомпонентных магнитометров и наиболее подробно – феррозондовых магнитометров. Произведен сравнительный анализ известных математических моделей ИнС. Осуществлена постановка задач исследований.

На рисунке 1 представлена структура ИнС с кабельным каналом связи, включающая СП, НИБ, ПЭВМ (PC) и блок датчика глубины (БДГ). Измерение проекций вектора напряженности магнитного поля осуществляется ТФПА, измерение проекций вектора ускорения свободного падения – ТПЗВУ.

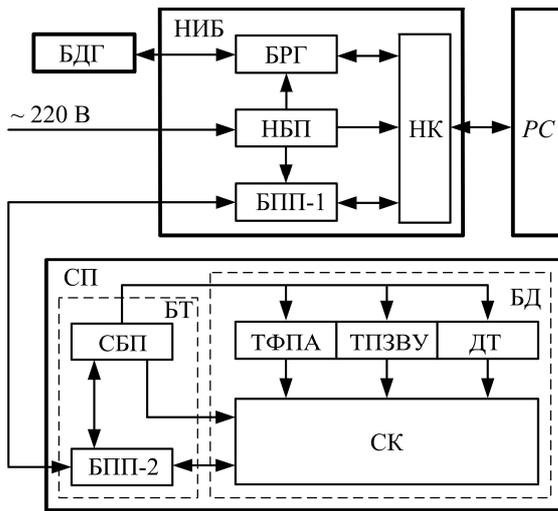


Рисунок 1 – Структура ИнС с кабельным каналом связи

того данные передаются из НИБ в PC.

Во второй главе выполнен анализ математических моделей (ММ) феррозондовых измерительных преобразователей (ФИП) при разнополярном прямоугольном сигнале возбуждения.

В работе рассмотрен одноэлементный феррозонд дроссельного типа, обладающий наиболее простой конструкцией. В качестве сигнала возбуждения предложен разнополярный прямоугольный сигнал.

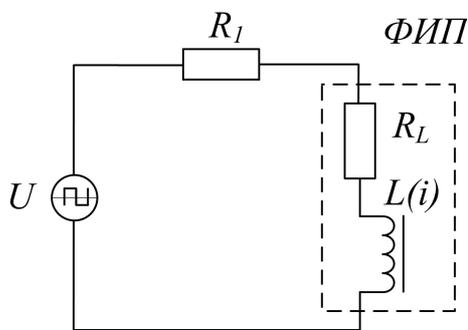


Рисунок 2 – Схема включения ФИП

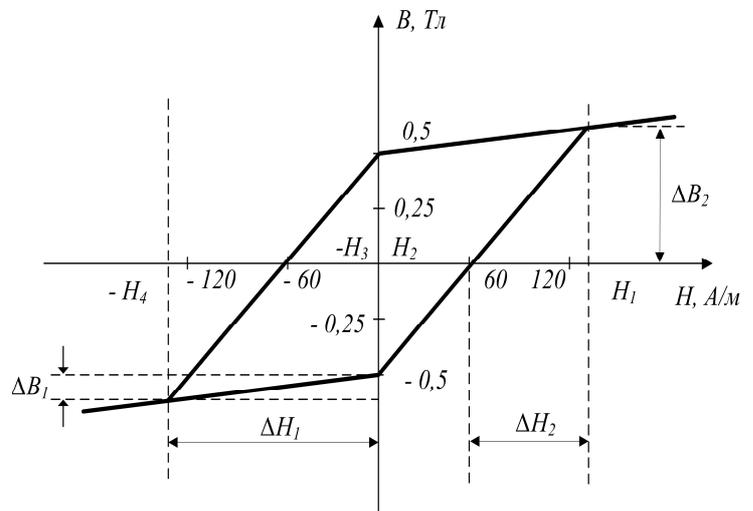


Рисунок 3 – Кусочно-линейная аппроксимация петли гистерезиса сердечника ФИП

На рисунке 2 представлена эквивалентная схема ФИП, где R_1 – токоограничивающий резистор, R_L – активное сопротивление обмотки возбуждения, $L(i)$ – нелинейная индуктивность, значение которой зависит от значения подмагничивающего тока. Протекающие электромагнитные процессы в ФИП описываются следующим нелинейным дифференциальным уравнением в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\frac{d}{dt} \{ [L(i) + L_0] i \} + i \cdot (R_1 + R_L) = U(t), \quad (1)$$

$$\text{где } U(t) = \begin{cases} U, & 0 \leq t < 0,5T, \\ -U, & 0,5T < t \leq T. \end{cases}$$

Для решения уравнения (1) использован метод кусочно-линейной аппроксимации динамической петли гистерезиса сердечника. Экспериментальные исследования динамической петли гистерезиса сердечника ФИП произведены осциллографическим методом. Результат графической кусочно-линейной аппроксимации динамической петли гистерезиса представлен на рисунке 3. Решением уравнения (1) является функция тока, на основе которой получена совокупность функций (2), описывающая э.д.с., наводимую в ФИП за время, равное периоду сигнала возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} e_F(0 \leq t \leq t_1) &= 2 \frac{R_1}{R} U \cdot e^{k_1 t} + \frac{R_L}{R} \cdot U \\ e_F(t_1 \leq t \leq t_2) &= R_1 \left[\frac{U}{R} - i_2 \right] \cdot e^{k_2(t-t_1)} + \frac{R_L}{R} \cdot U \\ e_F(t_2 \leq t \leq \frac{T}{2}) &= R_1 \left[\frac{U}{R} - i_3 \right] \cdot e^{k_1(t-t_2)} + \frac{R_L}{R} \cdot U \\ e_F(\frac{T}{2} \leq t \leq t_3) &= -2 \frac{R_1}{R} U \cdot e^{k_1(t-\frac{T}{2})} - \frac{R_L}{R} \cdot U \\ e_F(t_3 \leq t \leq t_4) &= -R_1 \left[i_5 + \frac{U}{R} \right] \cdot e^{k_2(t-t_3)} - \frac{R_L}{R} \cdot U \\ e_F(t_4 \leq t \leq T) &= -R_1 \left[i_6 + \frac{U}{R} \right] \cdot e^{k_1(t-t_4)} - \frac{R_L}{R} \cdot U \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\text{где } i_2 = \frac{H_2 + H_{\equiv} l_d}{N};$$

$$i_3 = \frac{H_1 + H_{\equiv} l_d}{N};$$

$$i_5 = \frac{H_3 + H_{\equiv} l_d}{N};$$

$$i_6 = \frac{H_4 + H_{\equiv} l_d}{N};$$

$$k_{1,2} = -\frac{R_1 + R_L}{L_1}, -\frac{R_1 + R_L}{L_2};$$

$$L_1 \approx \frac{SN^2}{l_d} \frac{\Delta B_1}{\Delta H_1};$$

$$L_2 \approx \frac{SN^2}{l_d} \frac{\Delta B_2}{\Delta H_2}; \quad U - \text{амплитуда сигнала возбуждения; } R = R_1 + R_L.$$

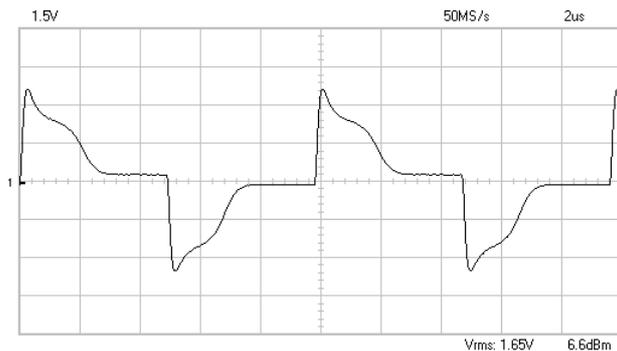


Рисунок 4 – Осциллограмма э.д.с. при частоте сигнала возбуждения 100 кГц

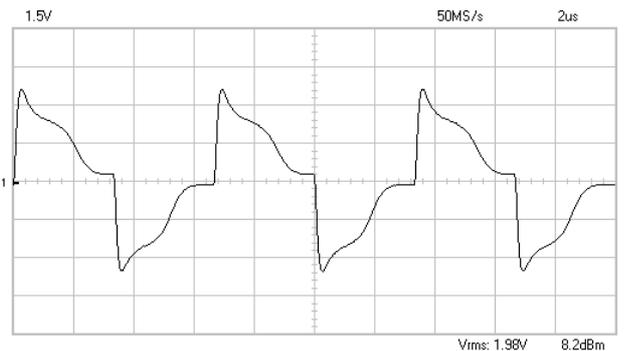


Рисунок 5 – Осциллограмма э.д.с. при частоте сигнала возбуждения 150 кГц

Для проверки достоверности полученной ММ ФИП (2) были проведены экспериментальные исследования при следующих условиях: частоты сигналов возбуждения равны 100 и 150 кГц, амплитуда сигнала возбуждения – 3 В. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 4 и 5, где изображены осциллограммы э.д.с., наводимых в обмотке ФИП (масштаб по вертикали – 1,5 В на деление, масштаб по горизонтали – 2 мкс

на деление). В работе исследован ФИП с сердечником из магнитомягкого аморфного сплава 71КНСР, параметры которого указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Конструктивные параметры ФИП

№	Параметры феррозонда	Обозначения	Ед. изм.	Значения
1.	Длина магнитопровода	l_d	м	0,025
2.	Площадь сечения магнитопровода	S	10^{-9} м^2	10
3.	Количество витков	N	–	300
4.	Активное сопротивление обмотки	R_L	Ом	10

На основе данных, указанных в таблице 1, и данных, полученных в результате графической кусочно-линейной аппроксимации (рисунок 3), для проведения вычислительного эксперимента ММ ФИП (2) представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} e_F(0 \leq t \leq t_1) &= 5 \cdot e^{-2 \cdot 10^6 t} + 0,375 \\ e_F(t_1 \leq t \leq t_2) &= 2,57 \cdot e^{-0,3 \cdot 10^6 \cdot (t - 35 \cdot 10^{-8})} + 0,375 \\ e_F(t_2 \leq t \leq 0,5T) &= 2,037 \cdot e^{-2 \cdot 10^6 \cdot (t - 1,15 \cdot 10^{-6})} + 0,375 \\ e_F(0,5T \leq t \leq t_3) &= -5 \cdot e^{-2 \cdot 10^6 t} - 0,375 \\ e_F(t_3 \leq t \leq t_4) &= -2,57 \cdot e^{-0,3 \cdot 10^6 \cdot (t - 5,35 \cdot 10^{-6})} - 0,375 \\ e_F(t_4 \leq t \leq T) &= -2,037 \cdot e^{-2 \cdot 10^6 \cdot (t - 6,15 \cdot 10^{-6})} - 0,375 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

График э.д.с. (рисунок 6), полученный в результате вычислительного эксперимента на основе системы уравнений (3), по своей форме совпадает с графиком э.д.с., полученным экспериментально (рисунок 4), что подтверждает достоверность ММ ФИП (2). На основе ММ ФИП было получено выражение для определения максимальной частоты сигнала возбуждения:

$$f_{\max} = \left\{ \ln \left(\left[5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R_L}{R} \right]^{-\frac{L_1}{R}} \cdot \left[\frac{U - R \cdot i_3}{U - R \cdot i_2} \right]^{\frac{L_1 - L_2}{R}} \right) \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Подставляя численные значения параметров, указанные выше, в выражение (4), была определена для рассматриваемого ФИП максимальная частота сигнала возбуждения $f_{\max} \approx 150$ кГц. Данный результат был подтвержден экспериментально и представлен на рисунке 5.

В результате анализа ММ было получено аналитическое выражение функции преобразования феррозондового канала, в котором информативный параметр сигнала выделяется при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода:

$$U_{=} = \frac{R_1}{\tau \cdot k_2} \cdot \left(\frac{2U}{R} \right)^{\frac{k_2}{k_1}} e^{k_2 \cdot 0,25T} \left[\left(\frac{U}{R} - \frac{H_2 + H_{=} l_d}{N} \right)^{1 - \frac{k_2}{k_1}} - \left(\frac{U}{R} + \frac{H_2 + H_{=} l_d}{N} \right)^{1 - \frac{k_2}{k_1}} \right], \quad (5)$$

где τ – постоянная времени интеграторов.

Данная функция преобразования (5) линейна (рисунок 7), что подтверждает обоснованность применения предложенного способа выделения ин-

формативной составляющей сигнала.

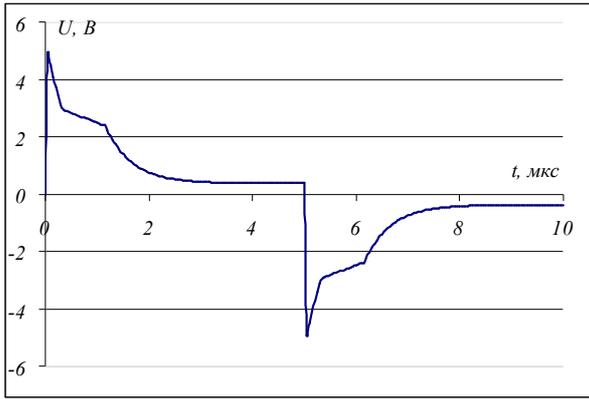


Рисунок 6 – График э.д.с., наводимой в измерительной обмотке

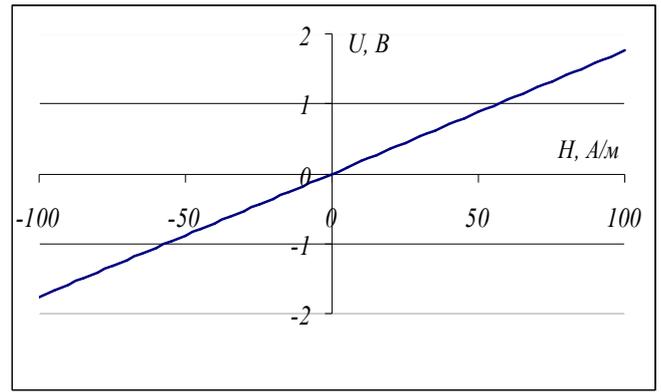


Рисунок 7 – Функция преобразования феррозондового канала

В третьей главе рассмотрены вопросы разработки математических моделей ТПЗВУ и ТФПА, учитывающих углы отклонения осей чувствительности феррозондов и акселерометров от осей базиса корпуса СП и неидентичность функций преобразования датчиков, а также методики идентификации этих параметров.

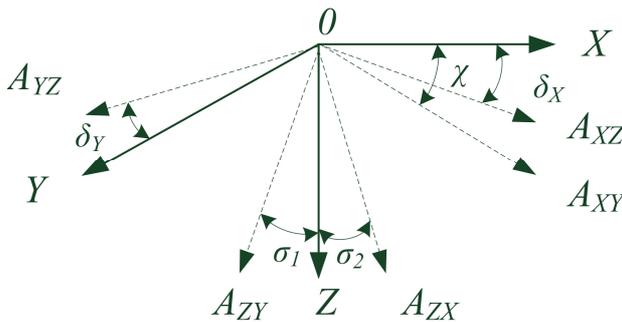


Рисунок 8 – Отклонения проекций осей чувствительности акселерометров

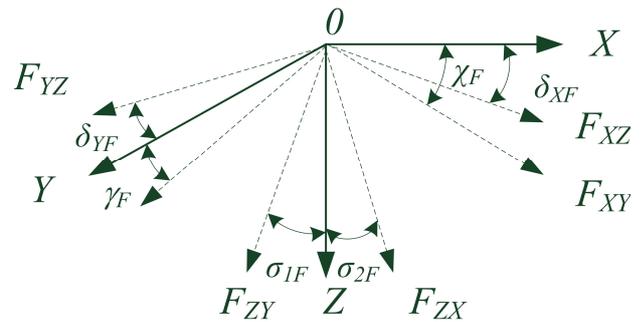


Рисунок 9 – Отклонения проекций осей чувствительности феррозондов

Малые угловые параметры отклонения осей чувствительности акселерометров и феррозондов от осей прямоугольной системы координат, связанной с корпусом СП, показаны на рисунках 8 и 9, где:

- δ_X, δ_{XF} – углы отклонения проекций A_{XZ}, F_{XZ} на плоскость OXZ осей чувствительности акселерометра A_X и феррозонда F_X от оси OX ;
- δ_Y, δ_{YF} – углы отклонения проекций A_{YZ}, F_{YZ} на плоскость OYZ осей чувствительности акселерометра A_Y и феррозонда F_Y от оси OY ;
- χ, χ_F – углы отклонения проекций A_{XY}, F_{XY} на плоскость OXY осей чувствительности акселерометра A_X и феррозонда F_X от оси OX ;
- γ_F – угол отклонения проекции F_{YZ} на плоскость OXZ оси чувствительности феррозонда F_Y от оси OY ;
- σ_1, σ_{1F} – углы отклонения проекций A_{ZY}, F_{ZY} на плоскость OYZ осей чувствительности акселерометра A_Z и феррозонда F_Z от оси OZ ;
- σ_2, σ_{2F} – углы отклонения проекций A_{ZX}, F_{ZX} на плоскость OXZ осей чувствительности акселерометра A_Z и феррозонда F_Z от оси OZ .

В общем случае линеаризованные функции преобразования акселерометров и феррозондов определяются следующим выражением:

$$U_i = S_i + R_i \cdot B_i \quad (6)$$

где S_i, R_i – параметры, характеризующие неидентичность функций преобразований датчиков; $B_{i(i=X, Y, Z)}$ – проекция вектора ускорения свободного падения \vec{g} или проекция вектора напряженности магнитного поля \vec{T} .

Выражения проекций \vec{g} в относительных единицах имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} g_X &= \cos \delta_X \cos \chi X + \cos \delta_X \cdot \sin \chi Y - \sin \delta_X Z \\ g_Y &= \cos \delta_Y Y + \sin \delta_Y Z \\ g_Z &= \sin \sigma_2 \cos \sigma_1 X - \sin \sigma_1 Y + \cos \sigma_1 \cos \sigma_2 Z \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} X &= -\cos \varphi \sin \theta \\ Y &= \sin \varphi \sin \theta \\ Z &= \cos \theta \end{aligned} \right\}.$$

С учетом выражения (6) система уравнений (7) представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_X &= S_X + R_X (\cos \delta_X \cos \chi X + \cos \delta_X \sin \chi Y - \sin \delta_X Z) \\ U_Y &= S_Y + R_Y (\cos \delta_Y Y + \sin \delta_Y Z) \\ U_Z &= S_Z + R_Z (\sin \sigma_2 \cos \sigma_1 X - \sin \sigma_1 Y + \cos \sigma_1 \cos \sigma_2 Z) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Решением системы уравнений (8) является система выражений (9), представляющая собой математическую модель ГПЗВУ для определения зенитного и визирного углов в диапазонах $(0 \div 180)^\circ$ и $(0 \div 360)^\circ$ соответственно. Данная модель учитывает как параметры отклонения осей чувствительности акселерометров от осей базиса корпуса СП, так и параметры, характеризующие неидентичность функций преобразования акселерометров.

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arctg \left(\frac{g_1 Y_1 + g_2 Y_2 + g_3 Y_3}{-(g_1 X_1 + g_2 X_2 + g_3 X_3)} \right) + k_1 \cdot 180^\circ \\ \theta &= \arctg \left(\frac{\sqrt{(g_1 X_1 + g_2 X_2 + g_3 X_3)^2 + (g_1 Y_1 + g_2 Y_2 + g_3 Y_3)^2}}{g_1 Z_1 + g_2 Z_2 + g_3 Z_3} \right) + k_2 \cdot 180^\circ \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $g_1 = \frac{U_X - S_X}{R_X}$; $g_2 = \frac{U_Y - S_Y}{R_Y}$; $g_3 = \frac{U_Z - S_Z}{R_Z}$; Y_A, X_A – числитель и

знаменатель первого выражения системы (9) соответственно; $k_1=0$ при $X_A \geq 0, Y_A \geq 0$; $k_1=1$ при $X_A < 0$; $k_1=2$ при $X_A > 0, Y_A < 0$; $k_2=0$ при $(g_1 Z_1 + g_2 Z_2 + g_3 Z_3) > 0$; $k_2=1$ при $(g_1 Z_1 + g_2 Z_2 + g_3 Z_3) < 0$;

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \cos \delta_Y \cos \sigma_1 \cos \sigma_2 + \sin \sigma_1 \sin \delta_Y; & X_2 &= \sin \sigma_1 \sin \delta_X - \cos \delta_X \sin \chi \cos \sigma_1 \cos \sigma_2 \\ X_3 &= \cos \delta_X \sin \chi \sin \delta_Y + \cos \delta_Y \sin \delta_X; & Y_1 &= \sin \delta_Y \cos \sigma_1 \sin \sigma_2; \\ Y_2 &= \cos \sigma_1 (\cos \delta_X \cos \chi \cos \sigma_2 + \sin \sigma_2 \sin \delta_X); & Y_3 &= -\sin \delta_Y \cos \delta_X \cos \chi; \\ Z_1 &= -\cos \sigma_1 \sin \sigma_2 \cos \delta_Y; & Z_2 &= \cos \delta_X (\sin \chi \cos \sigma_1 \sin \sigma_2 + \sin \sigma_1 \cos \chi); \\ Z_3 &= \cos \delta_X \cos \chi \cos \delta_Y. \end{aligned} \right\}$$

Выражения проекций \vec{T} в относительных единицах имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} t_X &= (\cos \delta_{XF} \cos \chi_F)X + (\cos \delta_{XF} \sin \chi_F)Y + (-\sin \delta_{XF})Z \\ t_Y &= (-\cos \delta_{YF} \sin \gamma_F)X + (\cos \delta_{YF} \cos \gamma_F)Y + (\sin \delta_{YF})Z \\ t_Z &= (\sin \sigma_{1F})X + (-\cos \sigma_{1F} \sin \sigma_{2F})Y + (\cos \sigma_{1F} \cos \sigma_{2F})Z \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} X &= (\cos \alpha \cos \theta \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi) \cos \vartheta - \cos \varphi \sin \theta \sin \vartheta \\ Y &= (-\cos \alpha \cos \theta \sin \varphi - \sin \alpha \cos \varphi) \cos \vartheta + \sin \varphi \sin \theta \sin \vartheta \\ Z &= \cos \alpha \sin \theta \cos \vartheta + \cos \theta \sin \vartheta \end{aligned} \right\}.$$

С учетом выражения (6) система уравнений (10) представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_{XF} &= S_{XF} + R_{XF} (\cos \delta_{XF} \cos \chi_F X + \cos \delta_{XF} \sin \chi_F Y - \sin \delta_{XF} Z) \\ U_{YF} &= S_{YF} + R_{YF} (-\cos \delta_{YF} \sin \gamma_F X + \cos \delta_{YF} \cos \gamma_F Y + \sin \delta_{YF} Z) \\ U_{ZF} &= S_{ZF} + R_{ZF} (\sin \sigma_{1F} X - \cos \sigma_{1F} \sin \sigma_{2F} Y + \cos \sigma_{1F} \cos \sigma_{2F} Z) \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Решением системы уравнений (11) является система выражений (12), представляющая собой математическую модель ТФПА для определения азимута и угла магнитного наклона в диапазонах $(0 \div 360)^\circ$ и $(0 \div 90)^\circ$ соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctg \frac{t_1(dm - fk) + t_2(ck - ma) + t_3(fa - cd)}{t_1(em - fl) + t_2(lc - bm) + t_3(bf - ce)} + k_F \cdot 180^\circ \\ \vartheta &= \arctg \frac{t_1(dl - ek) + t_2(kb - la) + t_3(ae - bd)}{\sqrt{Y_F^2 + X_F^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

$$\text{где } t_1 = \frac{U_{XF} - S_{XF}}{R_{XF}}; \quad t_2 = \frac{U_{YF} - S_{YF}}{R_{YF}}; \quad t_3 = \frac{U_{ZF} - S_{ZF}}{R_{ZF}}; \quad Y_F, X_F - \text{числитель}$$

и знаменатель первого выражения системы (12); $k_F=0$ при $Y_F \geq 0$ и $X_F \geq 0$;

$k_F = 1$ при $X_F < 0$; $k_F = 2$ при $Y_F < 0$ и $X_F > 0$;

$$\left. \begin{aligned} a &= \cos \delta_{XF} \cos \theta \sin(\varphi + \chi_F + 0,5\pi) - \sin \delta_{XF} \sin \theta; & b &= \cos \delta_{XF} \sin(\varphi + \chi_F); \\ c &= \cos \delta_{XF} \sin \theta \sin(\varphi + \chi_F + 0,5\pi) - \sin \delta_{XF} \cos \theta; \\ d &= -\cos \delta_{YF} \cos \theta \sin(\varphi + \gamma_F) + \sin \delta_{YF} \sin \theta; & e &= \cos \delta_{YF} \sin(\varphi + \gamma_F + 0,5\pi); \\ f &= \cos \delta_{YF} \sin \theta \sin(\varphi + \gamma_F) + \sin \delta_{YF} \cos \theta; \\ k &= \cos \theta (\cos \sigma_{1F} \sin \sigma_{2F} \cos \varphi + \sin \sigma_{1F} \sin \varphi) + \cos \sigma_{1F} \cos \sigma_{2F} \sin \theta; \\ l &= \cos \sigma_{1F} \sin \sigma_{2F} \sin \varphi - \sin \sigma_{1F} \cos \varphi; \\ m &= -\sin \theta (\cos \sigma_{1F} \sin \sigma_{2F} \cos \varphi + \sin \sigma_{1F} \sin \varphi) + \cos \sigma_{1F} \cos \sigma_{2F} \cos \theta. \end{aligned} \right\}.$$

Математическая модель ТФПА (12) учитывает как параметры отклонения осей чувствительности феррозондов от осей базиса корпуса СП, так и параметры, характеризующие неидентичность функций преобразования феррозондов.

$$\left. \begin{aligned} S_X &= \frac{U_{X1} + U_{X3}}{2} \\ \chi &= \arctg\left(\frac{U_{X2} - S_X}{U_{X3} - S_X}\right) \\ \delta_X &= \arctg\left(\frac{U_{X6} - S_X}{U_{X3} - S_X} \cdot \cos \chi\right) \\ R_X &= \frac{U_{X6} - S_X}{\sin \delta_X} \end{aligned} \right\}, (13)$$

$$\left. \begin{aligned} S_Y &= U_{Y3} \\ \delta_Y &= \arctg\left(\frac{U_{Y5} - S_Y}{U_{Y2} - S_Y}\right) \\ R_Y &= \frac{U_{Y5} - S_Y}{\sin \delta_Y} \end{aligned} \right\}, (14)$$

$$\left. \begin{aligned} S_Z &= \frac{U_{Z5} + U_{Z6}}{2} \\ \sigma_2 &= \arctg\left(\frac{U_{Z3} - S_Z}{U_{Z5} - S_Z}\right) \\ \sigma_1 &= \arctg\left(\frac{U_{Z4} - S_Z}{U_{Z5} - S_Z} \cdot \cos \sigma_2\right) \\ R_Z &= \frac{U_{Z4} - S_Z}{\sin \sigma_1} \end{aligned} \right\}, (15)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{XF} &= \frac{U_{XF6} + U_{XF3}}{2} \\ \chi_F &= \arctg\left(\frac{U_{XF2} - U_{XF4}}{U_{XF3} - U_{XF1}}\right) \\ \delta_{XF} &= \arctg\left(\frac{U_{XF6} - U_{XF1}}{U_{XF7} - U_{XF5}} \cdot \sin \chi\right) \\ R_{XF} &= \frac{U_{XF6} - U_{XF1}}{2 \sin \delta_{XF} \cos \vartheta} \end{aligned} \right\}, (16)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{YF} &= \frac{U_{YF6} + U_{YF3}}{2} \\ \gamma_F &= \arctg\left(\frac{U_{YF1} - U_{YF3}}{U_{YF2} - U_{YF4}}\right) \\ \delta_{YF} &= \arctg\left(\frac{U_{YF1} - U_{YF6}}{U_{YF7} - U_{YF5}} \cdot \cos \gamma_F\right) \\ R_{YF} &= \frac{U_{YF1} - U_{YF6}}{2 \sin \delta_{YF} \sin \vartheta} \end{aligned} \right\}, (17)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{ZF} &= \frac{U_{ZF6} + U_{ZF3}}{2} \\ \sigma_{2F} &= \arctg\left(\frac{U_{ZF4} - U_{ZF2}}{U_{ZF1} - U_{ZF6}}\right) \\ \sigma_{1F} &= \arctg\left(\frac{U_{ZF3} - U_{ZF1}}{U_{ZF1} - U_{ZF6}} \cdot \cos \sigma_{2F}\right) \\ R_{ZF} &= \frac{U_{ZF3} - U_{ZF1}}{2 \sin \sigma_{1F} \sin \vartheta} \end{aligned} \right\}, (18)$$

Численные значения параметров ТФПА и ТПЗВУ $(S_i, S_{iF})_{(i=X,Y,Z)}$, $(R_i, R_{iF})_{(i=X,Y,Z)}$, $(\delta_i, \delta_{iF})_{(i=X,Y)}$, $\chi, \chi_F, \gamma_F, (\sigma_i, \sigma_{iF})_{(i=1,2)}$ определяются на этапах экспериментальных исследований. Предлагаемая методика экспериментальных исследований включает в себя 2 этапа. На первом этапе подлежат идентификации параметры ТПЗВУ, а на втором этапе – параметры ТФПА.

На первом этапе задают значения углов пространственной ориентации СП: $\theta_1 = 90^\circ$ и $\varphi_1 = 0^\circ$. Далее вручную вращают корпус СП по визирному углу до минимальных показаний с акселерометрического датчика, расположенного по оси OX , и фиксируют корпус СП. Затем задают положения СП в соответствии с углами, указанными в таблице 2. Совокупность измеренных сигналов с акселерометров $U_{ij(i=X,Y,Z; j=1\dots6)}$ позволяет определить искомые параметры в соответствии с выражениями (13 – 15).

На втором этапе выставляют на поверочной установке лимб отсчетов визирного угла в нулевое положение, затем вручную вращают корпус СП вокруг продольной оси до вычисленных показаний с ТПЗВУ, соответствующих

$\varphi = 0^\circ$, и фиксируют корпус СП. Затем задают положения СП в соответствии с углами, указанными в таблице 3. Совокупность измеренных сигналов с феррозондов $U_{ij}(i=X,Y,Z; j=1\dots 6)$ позволяет определить искомые параметры ТФПА. В первую очередь находят значение угла магнитного наклона ϑ :

$$\vartheta = \arctg \frac{U_{XF2} - U_{XF4}}{U_{XF7} - U_{XF5}}.$$

Далее последовательно определяют остальные параметры в соответствии с выражениями (16 – 18).

Таблица 2 – Углы пространственного положения СП с ТПЗВУ

	1	2	3	4	5	6
$\theta, ^\circ$	90	90	90	90	0	180
$\varphi, ^\circ$	0	90	180	270	–	–

Таблица 3 – Углы пространственного положения СП с ТФПА

	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha, ^\circ$	0	0	0	0	90	180	270
$\theta, ^\circ$	90	90	90	90	90	90	90
$\varphi, ^\circ$	0	90	180	270	0	0	0

В четвертой главе рассмотрены варианты структурного построения феррозондового канала ТФПА. Приведены результаты практической реализации ТФПА в устройстве контроля вариаций магнитного поля и результаты экспериментальных исследований.

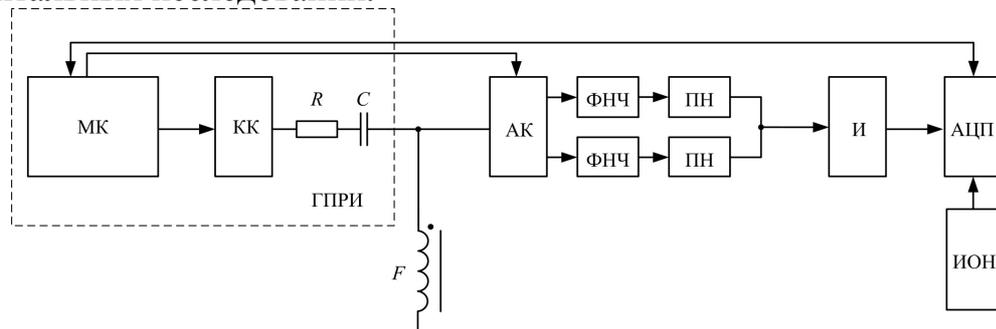


Рисунок 10 – Структура феррозондового канала

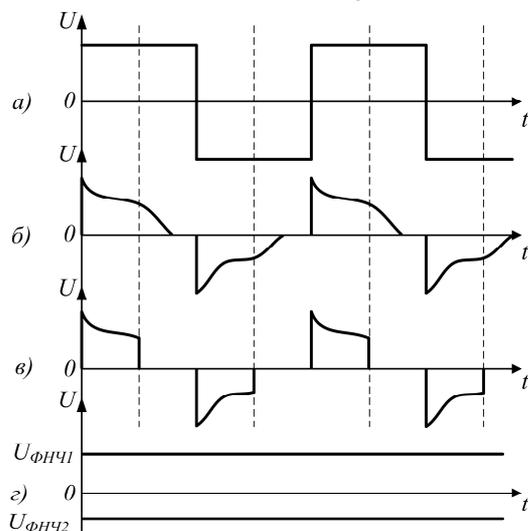


Рисунок 11 – Диаграммы работы феррозондового канала

Один из вариантов структурного построения феррозондового канала представлен на рисунке 10. Феррозондовый канал содержит генератор разнополярных прямоугольных импульсов (ГПИИ), реализованный с помощью микроконтроллера (МК), комплементарного ключа (КК), токоограничивающего резистора R и разделительного конденсатора C . ГПИИ осуществляет циклическое перемагничивание сердечника феррозонда F (рисунок 11, а). В катушке возбуждения феррозонда прямоугольный сигнал преобразуется в сигнал (рисунок 11, б) сложной формы. Управляющие сигналы от МК поступают на выво-

ды аналогового коммутатора (АК) таким образом, чтобы высокопотенциальный вывод обмотки возбуждения феррозонда в первую четверть периода подключался к входу первого фильтра нижних частот (ФНЧ) (рисунок 11, в), а в третью четверть – к входу второго ФНЧ. Далее выделенные части импульсов с феррозонда преобразуются ФНЧ в постоянные уровни напряжения и поступают на входы повторителей напряжения (ПН) (рисунок 11, г) и далее на вход интегратора (И). Далее сигнал после И поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП).

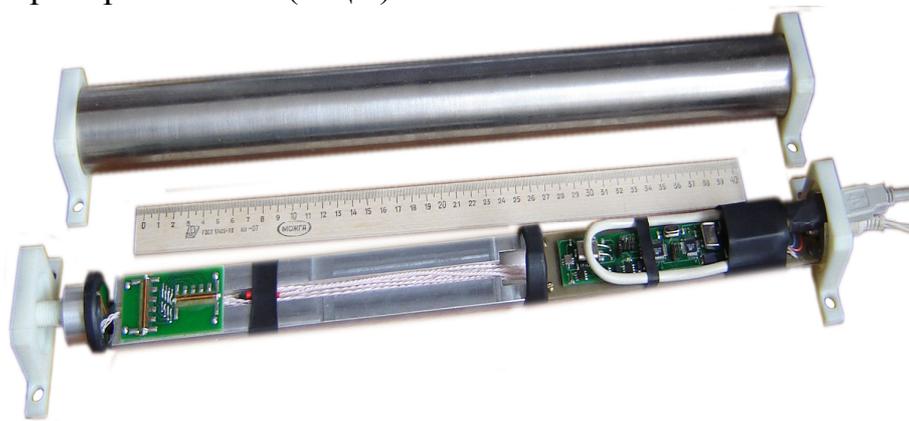


Рисунок 12 – Внешний вид УКВМП

Для улучшения характеристик ТФПА на основе предложенного выше решения была разработана структура феррозондового канала с компенсацией по магнитному полю (МП). Для коррекции погрешности, обусловленной вариациями вектора напряженности МП за время проводимых калибровочных и поверочных процедур ИнС, при непосредственном участии автора разработано и создано устройство контроля вариаций МП УКВМП (рисунок 12) на основе предложенной структуры ТФПА с компенсацией по МП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обзора и анализа известных решений в области инклинометрии выявлено, что наиболее перспективным направлением является построение скважинного прибора инклинометрических систем на основе трехкомпонентных феррозондовых и акселерометрических датчиков.

2. В результате анализа математических моделей феррозондового измерительного преобразователя при разнополярном прямоугольном сигнале возбуждения установлено, что:

– амплитуда э.д.с., наводимой в измерительной обмотке феррозонда, не изменяется при изменении значения напряженности внешнего магнитного поля;

– при изменении значения напряженности внешнего магнитного поля изменяется уровень и продолжительность участков графиков э.д.с. с наибольшим наклоном к оси абсцисс. Таким образом, по изменению уровней этих участков можно определять изменение значения напряженности маг-

нитного поля, и, следовательно, изменение пространственного положения феррозонда.

В результате анализа математических моделей феррозонда было получено аналитическое выражение для вычисления максимальной частоты сигнала возбуждения, при которой не искажаются информативные составляющие сигнала. Значение максимальной частоты разнополярного прямоугольного сигнала возбуждения для одноэлементного феррозонда с сердечником из аморфного магнитомягкого сплава 71КНСР, найденное по выражению (4), составило 150 кГц. Данный результат был подтвержден экспериментально.

Получено аналитическое выражение функции преобразования феррозондового канала, в котором при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода, и при последующем суммировании сигнала выделяется среднее значение напряжения, прямо пропорциональное измеряемому значению проекции вектора напряженности магнитного поля. Данная функция преобразования линейна, что подтверждает обоснованность применения предложенного способа выделения информативной составляющей сигнала.

3. Разработано математическое обеспечение ИнС, представляющее собой совокупность моделей ТФПА и ТПЗВУ, учитывающих углы отклонения осей чувствительности феррозондов и акселерометров от осей базиса корпуса скважинного прибора и неидентичность функций преобразования этих датчиков, из которых, как частные решения, следуют полученные ранее известные модели. Разработанные модели являются базисом алгоритмической обработки результатов измерений ИнС при вычислении азимутального, визирного и зенитного углов. В результате вычислительного эксперимента была подтверждена адекватность полученных математических моделей.

4. На основе предложенного математического обеспечения ИнС разработана методика идентификации численных значений параметров $(S_i, S_{iF})_{(i=X,Y,Z)}$, $(R_i, R_{iF})_{(i=X,Y,Z)}$, $(\delta_i, \delta_{iF})_{(i=X,Y)}$, χ , χ_F , γ_F , $(\sigma_i, \sigma_{iF})_{(i=1,2)}$, характеризующих конкретное исполнение рассматриваемых трехкомпонентных преобразователей азимутального, зенитного и визирного углов. Данная методика является основой для дальнейшего развития методики градуировки ИнС.

5. Предложены варианты структурного построения канала ТФПА на основе феррозондов с разнополярным прямоугольным сигналом возбуждения, в которых при интегрировании сигнала за интервалы времени, равные первой и третьей четвертям периода, и при последующем суммировании выделяется информативный параметр. Предложенные технические решения защищены патентами РФ на полезную модель № 106002 и № 115927.

Реализовано оригинальное техническое решение ТФПА в составе устройства контроля вариаций магнитного поля. При этом в результате экспериментальных исследований установлено, что применение ТФПА на осно-

ве феррозондовых каналов, реализующих предложенный способ выделения информативной составляющей сигнала с феррозондов, позволяет уменьшить наибольшее возможное значение дополнительной температурной погрешности измерения азимута до $0,5^\circ$ в диапазоне температур $(20 \div 125)^\circ\text{C}$.

В результате экспериментальных исследований произведены оценки систематической составляющей погрешности, среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности и абсолютной величины значения дополнительной температурной погрешности определения азимутального, зенитного и визирного углов. При этом установлено, что функции распределения оценок систематической составляющей погрешности измерения искомых углов в диапазоне зенитных углов $(90 \pm 20)^\circ$ определяются следующими выражениями:

$$\tilde{\Delta}_s(\alpha) = \left(\frac{0,01}{\sin \theta} + 0,5 \right)^\circ, \quad \tilde{\Delta}_s(\varphi) = \left(\frac{0,01}{\sin \theta} + 0,18 \right)^\circ, \quad \tilde{\Delta}_s(\theta) = 0,19^\circ,$$

а оценки среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения азимутального, зенитного и визирного углов представлены следующими значениями:

$$\tilde{\sigma} \left[\overset{0}{\Delta}(\alpha) \right] = 0,01^\circ, \quad \tilde{\sigma} \left[\overset{0}{\Delta}(\theta) \right] = 0,004^\circ, \quad \tilde{\sigma} \left[\overset{0}{\Delta}(\varphi) \right] = 0,006^\circ.$$

В результате экспериментальных исследований также установлено, что в диапазоне температур $(20 \div 125)^\circ\text{C}$ наибольшее возможное значение дополнительной температурной погрешности измерения зенитного и визирного углов не превышает $0,1^\circ$.

Таким образом, совокупность разработанных технических, методических и математических решений позволила создать ТФПА ИнС с улучшенными метрологическими характеристиками.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Г.В., Миловзоров Д.Г. Векторно-матричный аппарат в моделировании трехкомпонентных инклинометрических систем // Датчики и системы. 2011. №7. С. 30–35.
2. Зигангиров Л.Р., Воробьев А.В. Автоматизированная система управления подмагничиванием прецизионных магниторезистивных измерительных преобразователей // Приборы. 2011. №4. С. 24–27.
3. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Г.В., Воробьев А.В. Моделирование работы феррозондового измерительного преобразователя в векторно-измерительных магнитометрах // Датчики и системы. 2012. №2. С. 21–25.

Патенты РФ на полезную модель

4. Пат. № 106002 РФ, G01R33/02. Феррозондовый магнитометр / Л.Р. Зигангиров, Г.В. Миловзоров, Д.Г. Миловзоров. Оpubл. 27.06.11, бюл. № 18.
5. Пат. № 115927 РФ, G01R33/02. Феррозондовый магнитометр / Л.Р. Зигангиров, Г.В. Миловзоров, Д.Г. Миловзоров. Оpubл. 10.05.12, бюл. № 13.

В других изданиях

6. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Д.Г. О применении цифрового компаса в поверочных процедурах инклинометрических систем // Новые достижения в технике и технологии геофизических исследований скважин. Уфа: НПФ Геофизика, 2009. С. 200–202.

7. Зигангиров Л.Р. Цифровой магнитный компас с феррозондовыми датчиками // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Т. 2. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 102–103.

8. Зигангиров Л.Р. Структура цифрового магнитного компаса с феррозондовыми датчиками // Актуальные проблемы в науке и технике. Т. 2. Сборник трудов четвертой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: Диалог, 2009. С. 159–162.

9. Зигангиров Л.Р. О выборе магниточувствительного элемента для цифровых магнитных компасов // Электроника, автоматика и измерительные системы. Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 121–125.

10. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Д.Г. Цифровой магнитный компас с феррозондовыми датчиками // Электроника, автоматика и измерительные системы. Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 100–103.

11. Зигангиров Л.Р., Гарипова Г.Т., Логинова Т.М. Информационно-измерительная система бесконтактного контроля гармонического состава переменного тока на основе феррозондовых датчиков // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб.тр. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 273.

12. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Г.В., Миловзоров Д.Г., Морозова Е.С. О построении магнитометрической аппаратуры с феррозондовыми датчиками // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ – 2010»: материалы Международной научной конференции. Астрахань: Астраханский университет, 2010. Т.2. С. 24–25.

13. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Г.В., Сабирьянов Р.Р. Об определении численных значений угловых параметров отклонения осей чувствительности акселерометра от осей базиса корпуса // Электронные устройства и системы: межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 49–52.

14. Зигангиров Л.Р. Математическое моделирование феррозондового измерительного преобразователя с импульсным возбуждением // Промысловая геофизика. Уфа: НПФ Геофизика, 2011. С. 109–113.

15. Зигангиров Л.Р., Миловзоров Г.В., Миловзоров Д.Г. Аналитическое определение рациональных параметров импульсного сигнала возбуждения феррозондового измерительного преобразователя // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 162–173.

16. Зигангиров Л.Р., Морозова Е.С. Структура современной инклинометрической системы с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками // Измерения, контроль и диагностика: сб. материалов II Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Ижевск: А4, 2012. С. 101–104.

ЗИГАНГИРОВ Линар Рифхатович

ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ФЕРРОЗОНДОВЫХ
ДАТЧИКОВ С РАЗНОПОЛЯРНЫМ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СИГНАЛОМ
ВОЗБУЖДЕНИЯ

(развитие теории, разработка, исследование)

Специальность:

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(в промышленности и медицине)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.11.2012 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отг. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9
Тираж 100 экз. Заказ № 1036.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12