

На правах рукописи



СТАРЦЕВ АНДРЕЙ ЭВРИКОВИЧ

**РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ СИГНАЛА ТЕЛЕСИСТЕМЫ С
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КАНАЛОМ СВЯЗИ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ
СКВАЖИНЫ**

Специальность: 25.00.15 – Технология бурения и освоения скважин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта 2012

Диссертация выполнена на кафедре электрификации и автоматизации технологических процессов Ухтинского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Зафар Хангусейн оглы Ягубов

Официальные оппоненты: доктор технических наук

Повалихин Александр Степанович

кандидат технических наук

Задирей Владимир Николаевич

Ведущее предприятие: ООО НПП «Горизонт»

Защита состоится «16» марта 2012 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.291.01 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.291.01,
кандидат технических наук, профессор



Н. М. Уляшева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Последние десятилетия характеризуются широкомасштабным строительством наклонно направленных, горизонтальных скважин и боковых стволов со сложным пространственным профилем. Практика показывает, что успешное бурение подобных скважин без использования забойных телеметрических систем невозможно. Для эффективного управления процессом бурения направленной скважины необходима информация о фактических режимах бурения, параметрах профиля ствола и прогноз траектории бурения.

Большинство используемых в настоящее время забойных телесистем с электромагнитным каналом связи осуществляют передачу информации на поверхность при помощи электрических полей, доходящих до поверхности за счет токов растекания. Дальность их действия ограничивается глубиной 3000 метров и зависит от свойств геологического разреза, что делает невозможной их эксплуатацию в море и соленосных отложениях.

Вместе с тем, выбор конкретной телесистемы оказывает непосредственное влияние на технологию бурения с точки зрения требований, предъявляемых телесистемой к свойствам бурового раствора и типу бурильных труб. В ряде случаев требуется корректировать удельное электрическое сопротивление бурового раствора, осуществлять выбор бурильных труб в зависимости от магнитных и проводящих свойств материала из которого они изготавливаются с целью обеспечения устойчивой связи забоя с поверхностью. Кроме того, возникают случаи внезапного отказа забойного блока, выработавшего энергетический ресурс автономного источника питания, что приводит к внеплановому проведению спуско-подъемных операций и, следовательно, к дополнительным затратам времени.

Это означает, что проблема совершенствования забойных телесистем с учетом влияния их технических характеристик на технологию бурения является особенно актуальной. Успешное решение указанной проблемы является одним из существенных факторов в повышении экономических показателей процесса бурения наклонных скважин по проектному профилю.

Целью исследований является повышение эффективности бурения наклонно направленных и горизонтальных скважин за счёт повышения надёжности работы электромагнитного канала связи и ресурса работы забойного блока телесистемы.

Основные задачи исследования

1. Анализ состояния средств и методов организации канала передачи информации от забойного блока телесистемы к наземной аппаратуре в процессе бурения.

2. Определение области применения буровых телеметрических систем с электромагнитным каналом связи в зависимости от параметров электропроводности бурового раствора, глубины, диаметра скважины, типа применяемых бурильных труб.

3. Исследование и оптимизация энергетических характеристик буровой телесистемы для увеличения времени автономной работы забойного блока.

4. Разработка технических средств для повышения надёжности электромагнитного канала связи и увеличения времени автономной работы забойного блока телесистемы.

Научная новизна

1. Разработаны математические модели электромагнитного канала передачи информации по замкнутому витку «колонна бурильных труб – буровой раствор» и выходного двухтактного каскада мостового типа забойного генератора сигнала с широтно-импульсной модуляцией на основе метода переменных состояния с последующим усреднением на интервалах дискретизации.

2. Разработан метод регулирования мощности излучения забойной антенны телесистемы по электромагнитному каналу двухсторонней связи передачи информации в функции глубины ствола скважины.

3. Определена взаимосвязь времени автономной устойчивой работы забойной телеметрической системы от технологических параметров бурения и технических характеристик забойного блока телесистемы.

4. Установлен диапазон допустимых значений удельного сопротивления бурового раствора, для обеспечения передачи достоверной информации на поверхность по электромагнитному каналу связи.

Основные защищаемые положения

1. Математическая модель электромагнитного канала передачи информации по замкнутому витку из колонны бурильных труб и бурового раствора, обеспечивающая объективность оценки частотных и дистанционных характеристик канала передачи информации с забоя скважины на дневную поверхность.

2. Способ расчета верхней границы диапазона значений удельного сопротивления бурового раствора, обеспечивающего устойчивую передачу сигнала на поверхность.

3. Непрерывная линейная модель выходного каскада двухтактного забойного генератора сигнала с широтно-импульсной модуляцией, позволяющая качественно и количественно оценивать воздействующие на каскад возмущения.

4. Способ управления мощностью забойного излучателя буровой телесистемы с поверхности, использующий канал связи по колонне бурильных труб и буровому

раствору в затрубном пространстве, обеспечивает кратное увеличение времени его автономной работы.

Практическая ценность работы

1. Разработано техническое решение, позволяющее увеличить предельную глубину скважин, геонавигация которых в процессе бурения осуществляется с помощью забойных телесистем с электромагнитным каналом связи. Результат достигается без модернизации забойного модуля телесистемы при одновременном повышении инвариантности ее применения в зависимости от химического состава и минерализации бурового раствора за счет использования бурильных труб с нанесенным диэлектрическим эпоксидным покрытием, обеспечивающим также снижение гидравлического сопротивления течению бурового раствора в затрубном пространстве (патент РФ № 104624, приоритет от 20.07.2010).

2. Предложен и обоснован способ, обеспечивающий повышение ресурса работы забойного блока телесистемы, основанный на кратном увеличении времени автономной работы забойного модуля телесистемы за счет регулирования с поверхности мощности забойного излучателя по асимметричному дуплексному каналу передачи информации (патент РФ № 104623, приоритет от 16.11.2010). Разработан алгоритм реализации способа и методика оценки энергетической эффективности его применения.

3. Разработан способ увеличения достоверности информации, получаемой по электромагнитному каналу связи, как результат управления энергетическим уровнем информационного сигнала в функции удельного сопротивления буровых промывочных систем.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: Межрегиональная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2003» при Ухтинском государственном техническом университете (УГТУ), Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2004» (УГТУ). Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций (СПбГУТ) им. проф. М. А. Бонч-Бруевича 2005 г. Научно-технические конференции преподавателей и сотрудников УГТУ (2003-2010 гг.), на научном семинаре кафедры бурения скважин (2010 г.), на заседании научно-технического совета УГТУ (2011 г.).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 81 наименования и 1 приложения, содержит 128 страниц текста, включая 22 рисунка.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 11 статьях, в т. ч. 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю: профессору, доктору технических наук Зафару Хангусейн оглы Ягубову за постоянный контроль и неоценимую помощь в подготовке работы.

Автор признателен ректору Ухтинского государственного технического университета профессору, доктору технических наук Николаю Денисовичу Цхадая за создание оптимальных условий для подготовки работы.

Автор благодарен коллективу кафедры бурения скважин Ухтинского государственного технического университета и лично канд. техн. наук, доценту Ю. Л. Логачеву, канд. техн. наук, профессору Н. М. Уляшевой, зав. кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, докт. техн. наук, профессору И. Ю. Быкову за консультации и советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, цель работы, сформулированы основные задачи исследования.

В первой главе проведен анализ состояния средств и методов организации канала передачи информации с забоя скважины на поверхность в процессе бурения

Среди работ, выполненных в этом направлении, следует отметить исследования таких ученых, как В. С. Басович, В. Ф. Буслаев, С. Е. Варламов, Ю. М. Гержберг, Г. А. Григашкин, А. Г. Калинин, С. А. Кейн, В. В. Кульчицкий, Э. Е. Лукьянов, П. Ф. Осипов, А. С. Повалихин, А. Ю. Ропяной, О. К. Рогачёв, В. З. Скобло, В. Н. Сорокин, Б. З. Султанов, В. К. Хегай, Ф. Х. Шафиков, Н. Х. Шаммасов, А. П. Шмидт, других.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

- среди существующих беспроводных забойных телесистем с электромагнитным каналом связи, общим свойством которых является зависимость скорости и дальности передачи информации от экранирующих свойств разбуриваемых пород, выделяются телесистемы, использующие электромагнитный канал связи по колонне бурильных труб и буровому раствору в затрубном пространстве (рис. 1), свободные от недостатков, присущих большинству

электромагнитных систем, и позволяющие осуществлять двустороннюю передачу информации;

- для определения границ области применения забойных телесистем с каналом связи по колонне бурильных труб и буровому раствору в затрубном пространстве необходимо исследовать частотные характеристики канала связи на основе адекватной математической модели процессов, обеспечивающих передачу данных на поверхность.

- ввиду автономности подобных телесистем и их инвариантности в зависимости от конструкции скважины, горных факторов и электропроводности контактных сред (буровой раствор – металл бурильной колонны), проблема разработки способов совершенствования энергетического потенциала забойных телесистем является актуальной и требует дальнейших исследований.

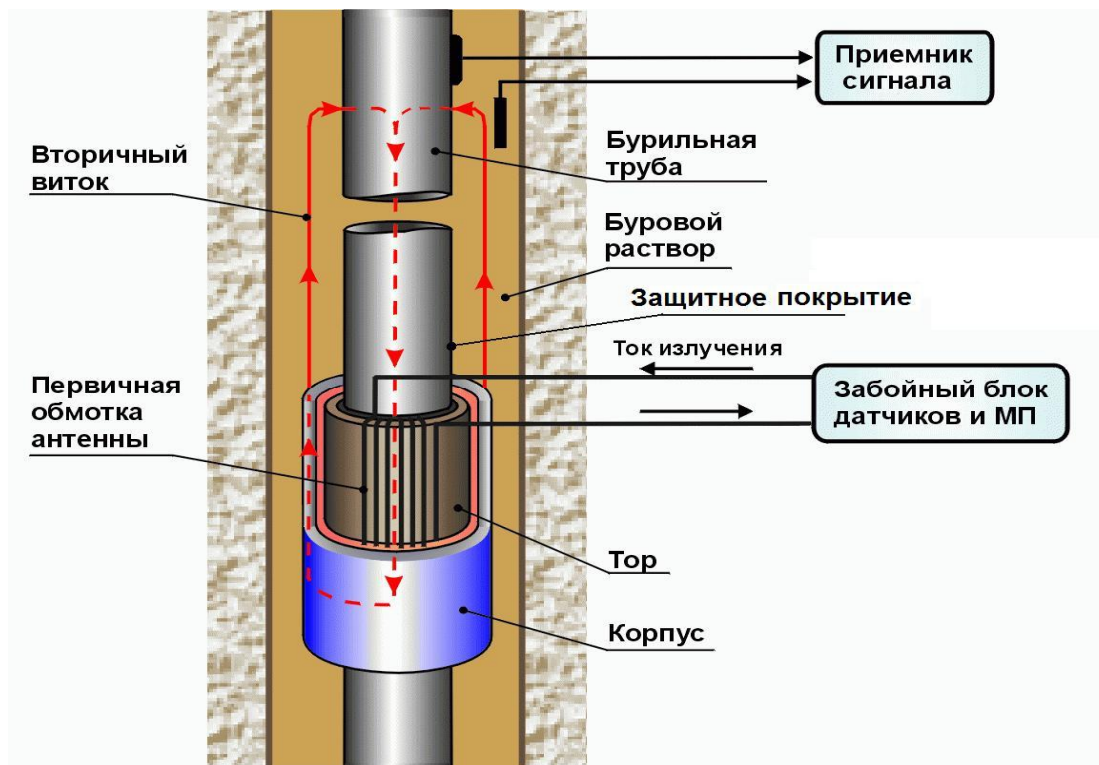


Рисунок 1– Способ реализации электромагнитного канала связи по колонне бурильных труб и буровому раствору в затрубном пространстве

Вторая глава посвящена рассмотрению методик исследования забойных информационных телесистем по теме диссертации.

1. Информационный канал передачи сигнала с забоя скважины на дневную поверхность по бурильной колонне рассматривался как система с распределенными параметрами в которой напряжение и ток для одного и того же момента времени

являются функциями пространственной координаты – глубины скважины. Система принималась однородной и линейной, в которой продольные и поперечные сопротивления участков во всех сечениях скважины одинаковы, напряжения и токи синусоидальны.

2. Измерения удельного электрического сопротивления буровых растворов проводились на двухэлектродной установке с одинарным четырехплечим мостом переменного синусоидального тока с компенсацией емкостной составляющей при атмосферном давлении и температуре.

3. Параметры буровой колонны как канала связи зависят от многих параметров (диаметра бурильной трубы, диаметра скважины, толщины эпоксидного покрытия трубы, проводимости бурового раствора), поэтому для анализа частотных характеристик исследуемого объекта применялась следующая методика:

а) производилось так называемое «центрирование» эксплуатационных и конструктивных параметров канала связи, т.е. определялись центральные значения варьируемых параметров;

б) анализировались частотные характеристики при изменении одного из параметров, сохраняя остальные параметры постоянными и равными их центральному значению.

4. Структура забойного ШИМ-формирователя сигнала, включающего в себя дискретную нелинейную часть (ключевой каскад) и непрерывную линейную часть (фильтр низких частот) осложняет процесс получения качественных характеристик ШИМ-формирователя, выбора и расчета корректирующих обратных связей, учета влияния на его работу различных возмущающих воздействий. Дискретная линейная модель выходного каскада забойного ШИМ-формирователя сигнала для различных интервалов времени, характеризующихся определенным состоянием ключевых элементов получена на основе метода переменных состояния. Переход к непрерывной линеаризованной модели осуществлен на основе усреднения систем и сведения их в одну, путем умножения каждого из уравнений на нормированную длительность действия каждого из уравнений.

5. Исследование модуляционных характеристик забойного ШИМ-формирователя сигнала производилось на основе анализа среднего значения напряжения на сопротивлении нагрузки выходного каскада забойного излучателя за период тактовой частоты ШИМ. Среднее значение напряжения определялось разностью вольт-секундных площадей положительных и отрицательных импульсов напряжения на сопротивлении нагрузки.

6. Оценка эффективности управления энергетическим уровнем информационного сигнала за цикл бурения в функции глубины скважины получена как отношение энергии, затраченной на передачу информации с забоя на поверхность при постоянном энергетическом уровне сигнала, к энергии, необходимой для передачи достоверного информационного сигнала при управлении его энергетическим уровнем.

В третьей главе исследован процесс передачи информации по бурильной колонне с целью определения связи между технологическими параметрами бурения скважины и энергетическими характеристиками канала передачи информации.

Математическая модель канала передачи информации с забоя скважины на ее устье может быть получена при рассмотрении системы бурильная труба - буровой раствор как длинной линии с распределенными параметрами, схема замещения которой представлена на рис.2.

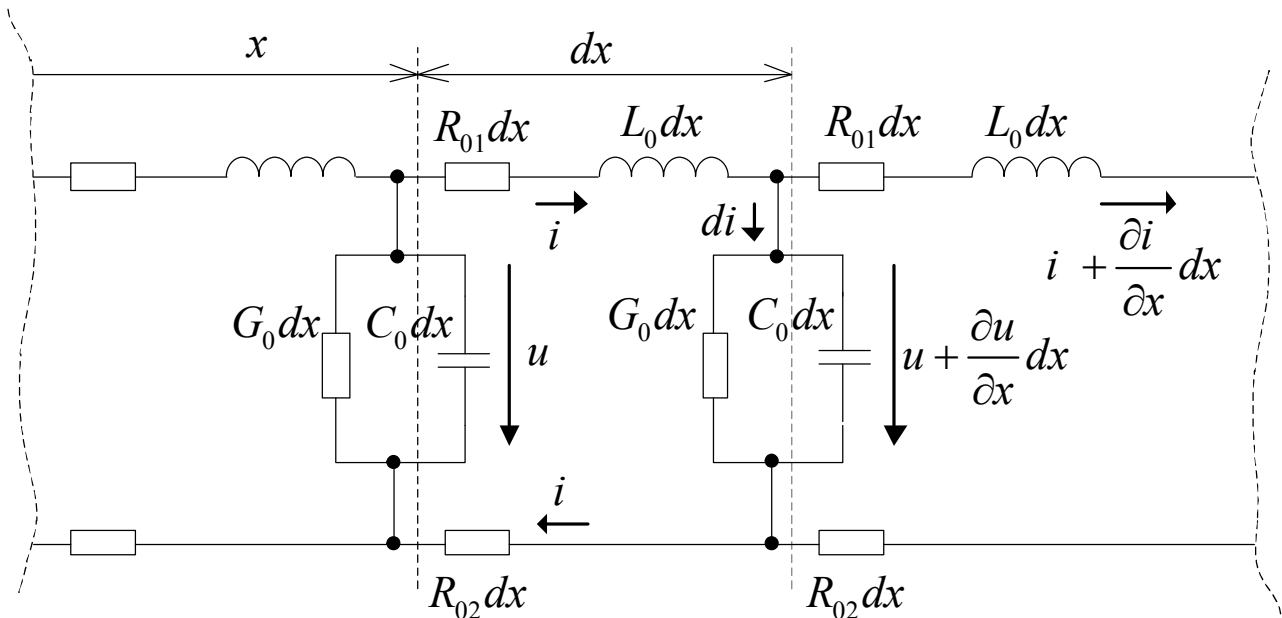


Рисунок 2 – Схема замещения участка канала передачи информации по бурильной колонне

Полученная на основе схемы замещения система дифференциальных уравнений в частных производных (1), называемых телеграфными, имеет частные решения для синусоидальных сигналов, с учетом допущений о ее линейности и однородности.

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + (R_{01} + R_{02})i \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

где R_{01} - активное сопротивление единицы длины бурильной колонны; R_{02} - активное сопротивление единицы длины бурового раствора в затрубном пространстве; G_0 - проводимость утечки на единице длины бурильной колонны; L_0 - продольная индуктивность единицы длины канала передачи информации, представленного в виде длинной линии; C_0 - емкость канала передачи информации на единицу длины.

Линия передачи сигнала рассматривается как физический объект (рис.3), представляющий собой конструкцию из двух коаксиальных соосных проводящих цилиндров, размещенных в скважине 4, разделенных слоем h диэлектрика 2, где в качестве внутреннего цилиндра принимается бурильная труба 3, а наружного цилиндра – буровой раствор 1 в затрубном пространстве

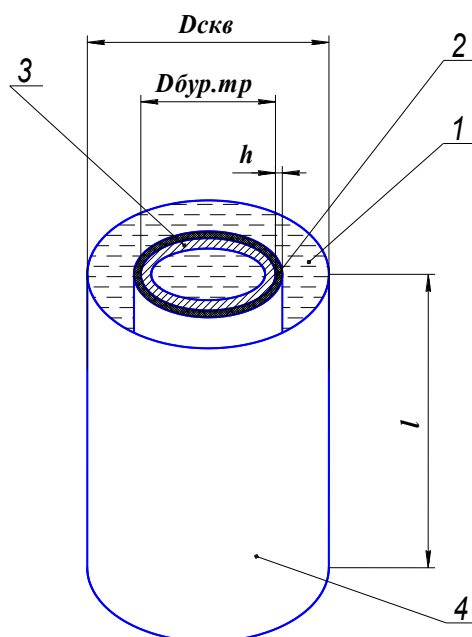


Рисунок 3 – Поперечный разрез бурильной колонны, размещенной в скважине

Пример результатов расчета затухания, вносимого одним километром канала передачи информации по бурильной колонне полученные на основе математической модели канала передачи информации для различных удельных сопротивлений бурового раствора представлен на рис.4.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент затухания сигнала в канале передачи информации в широком диапазоне частот определяется главным образом удельным сопротивлением бурового

раствора и величиной токов утечки через поверхностный слой бурильной трубы.

2. На частотах выше 100 Гц затухание, вносимое каналом передачи информации, становится значительным (до 450 дБ/км), что делает невозможной передачу достоверной информации на поверхность.

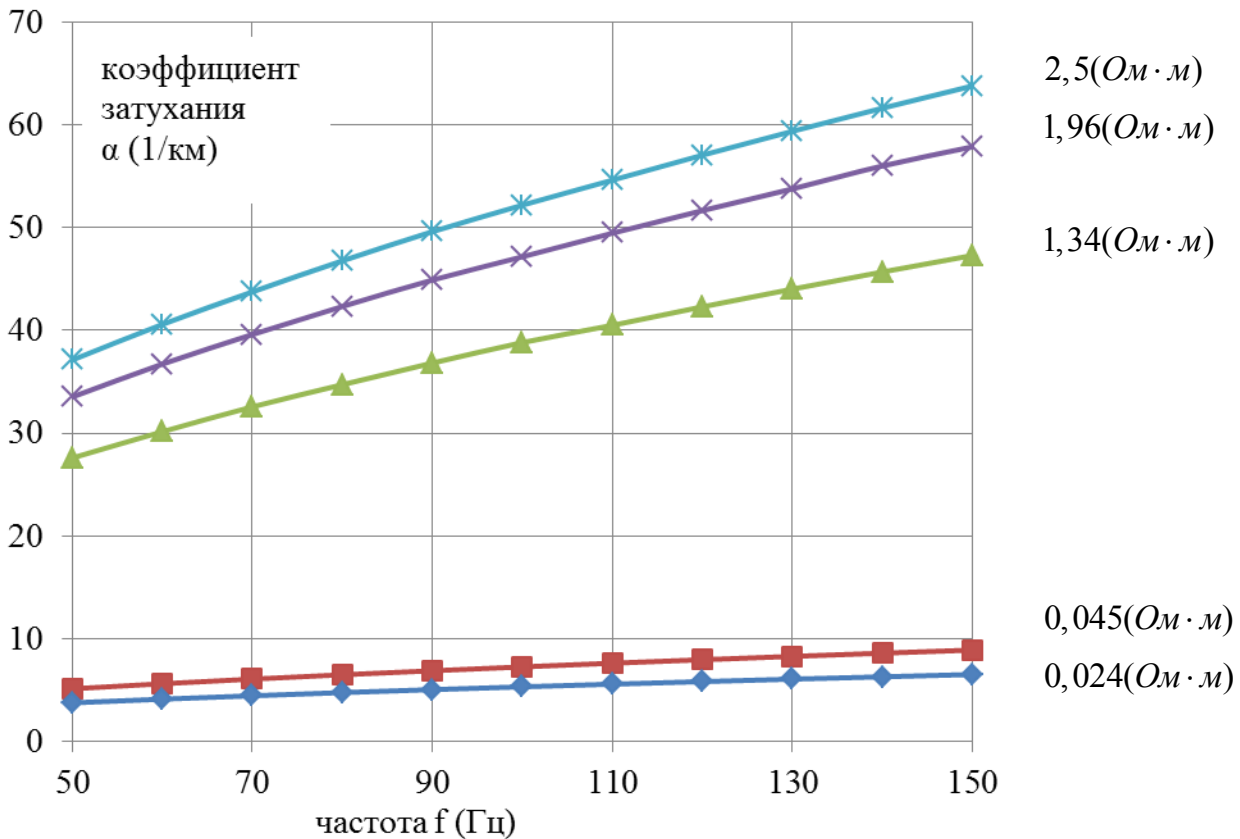


Рисунок 4 – Частотная зависимость коэффициента затухания информационного сигнала в бурильной колонне при различных значениях удельного сопротивления бурового раствора

Для улучшения энергетических характеристик канала передачи информации предложено использовать бурильные трубы с нанесенным защитным покрытием из эпоксидных композиций, уменьшающим токи утечки через поверхностный слой бурильной трубы (патент РФ № 104624), что одновременно позволяет снизить энергозатраты в процессе бурения посредством уменьшения гидравлического сопротивления циркуляции бурового раствора, а также увеличить срок службы труб.

На основании технических характеристик телесистемы, определяющих предельно допустимое значение соотношения сигнал/шум (SNR) в принимаемом на поверхности сигнале и максимально допустимого затухания в канале передачи

информации получено соотношение, позволяющее определить диапазон допустимых значений удельного сопротивления бурового раствора, обеспечивающий передачу достоверной информации на поверхность.

$$\rho_{\text{БУР.РАСТВ.}} \leq \frac{\left(\ln \left(\frac{U_{\text{ген.мах}}}{U_{\text{шум.мах}} \cdot 10^{\left(\frac{\text{SNR}(\text{дБ})}{20} \right)}} \right) \right)^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{D_{\text{БУР.ТР.}} + h}{D_{\text{БУР.ТР.}}} \right) \right) \cdot (D_{\text{СКВ.}}^2 - D_{\text{БУР.ТР.}}^2)}{8 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot f \cdot l^2} \quad (2)$$

где $D_{\text{БУР.ТР.}}$ – наружный диаметр бурильной трубы (м); $D_{\text{СКВ.}}$ – диаметр скважины (м); h – толщина поверхностного слоя бурильной трубы; l – расчетная глубина скважины (м); ε – относительная электрическая проницаемость поверхностного слоя бурильной трубы, $\varepsilon_0 = 8,85418781762 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м) – электрическая постоянная; $U_{\text{ген.мах}}$ – максимальное действующее значение напряжения на выходе забойного генератора (В); $U_{\text{шум.мах}}$ – среднеквадратическое значение шума на поверхности (В); SNR(dB) – предельное соотношение сигнал/шум для данной телесистемы (дБ); f – частота сигнала (Гц).

Пример полученных согласно выражению (2) частотных зависимостей для различных интервалов бурения представлен на рис.5. На основе подобных предварительно рассчитанных зависимостей производится проверка с возможной последующей корректировкой удельной электропроводности раствора на разных интервалах бурения.

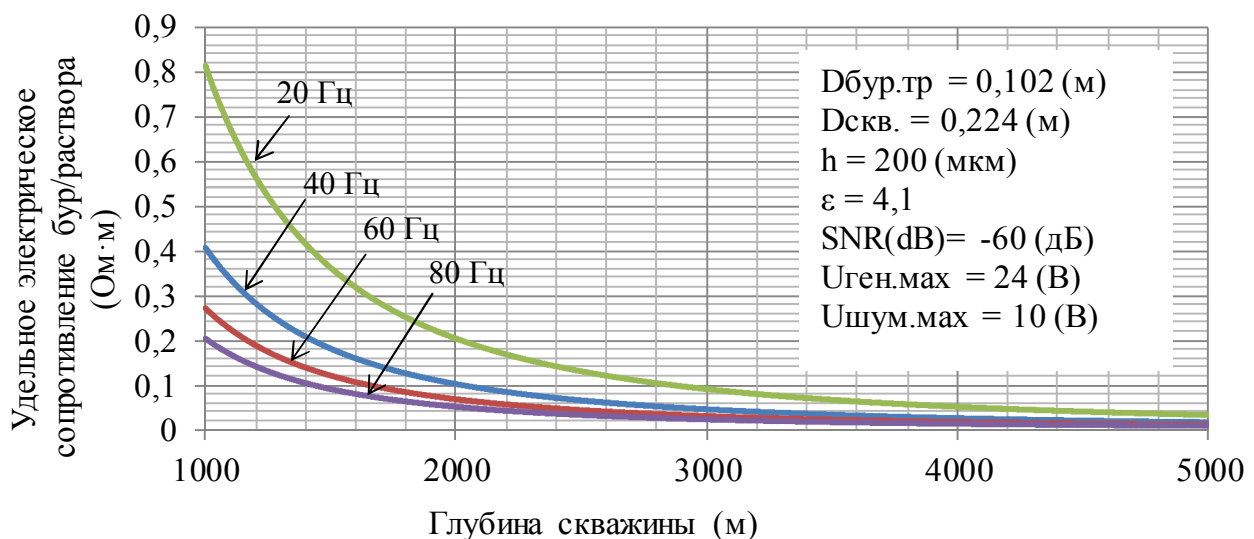


Рисунок 5 – Дистанционная зависимость предельно допустимого значения удельного сопротивления бурового раствора на различных частотах

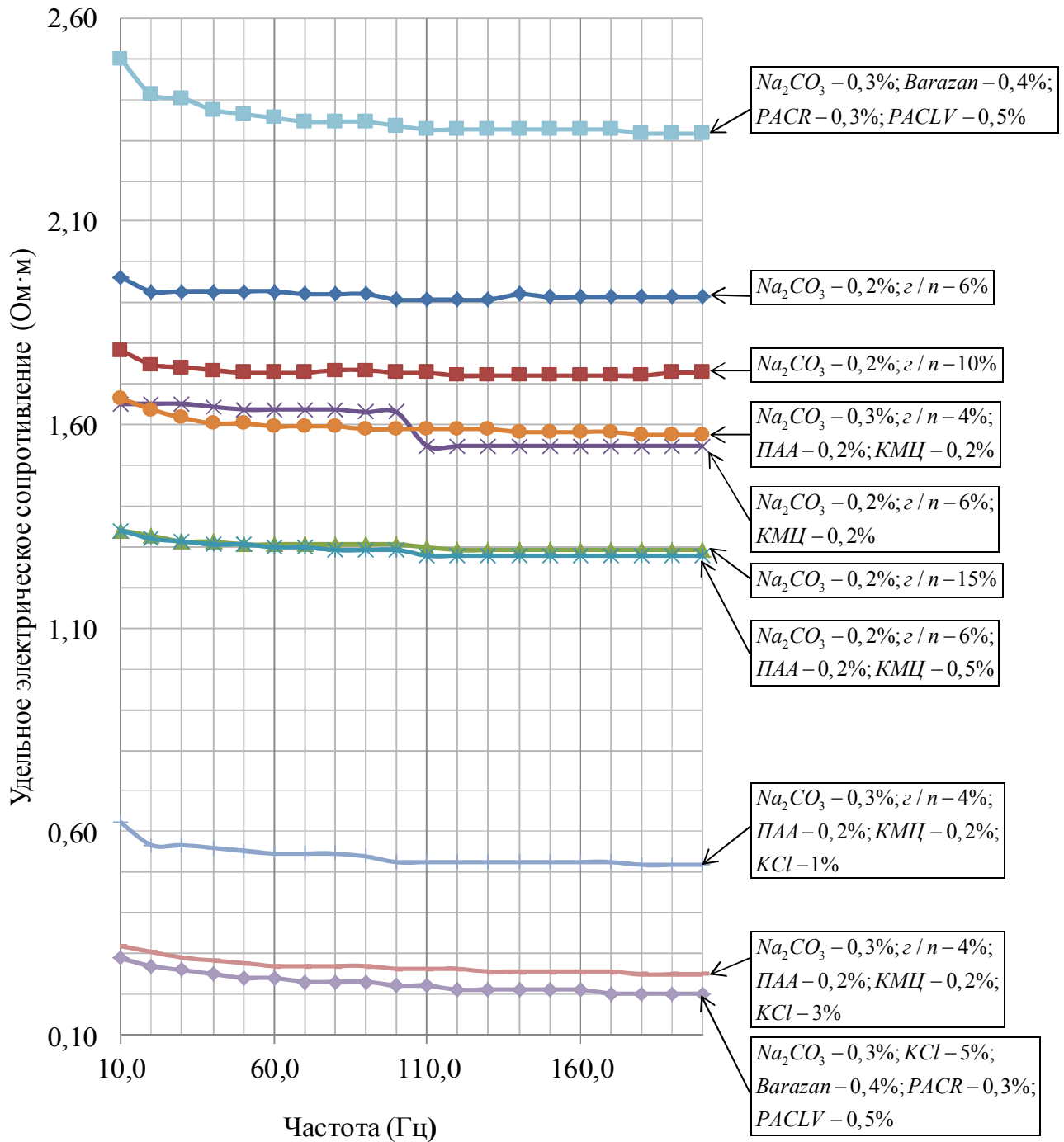


Рисунок 6 – Частотная зависимость удельного сопротивления буровых растворов

Для определения удельной электропроводности типовых буровых растворов с целью выработки рекомендаций по их использованию в электромагнитном канале связи по колонне бурильных труб и буровому раствору в затрубном пространстве была проведена серия экспериментов.

Измерение сопротивления осуществлялось мостовым методом с использованием четырехплечего моста (моста Уитсона) в диапазоне частот 10-200 Гц. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис.6.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать следующие выводы:

- удельное сопротивление раствора определяется преимущественно концентрацией водорастворимых солей в растворе;
- удельную электропроводность в исследованном частотном (60–200 Гц) диапазоне можно считать постоянной для каждого вида раствора;
- увеличение измеренного удельного электрического сопротивления буровых растворов на низких частотах (10–60 Гц) объясняется высокой интенсивностью окислительно-восстановительных реакций, уменьшающей концентрацию ионов вблизи электродов.

На основе полученных обобщений разработан способ управления энергетическим уровнем информационного сигнала в функции удельного сопротивления буровых промывочных систем. Этот способ заключается в том, что, исходя из требуемой глубины бурения l , поперечных параметров скважины $D_{СКВ}$ и бурильных труб $D_{БУР.ТР.}$, толщины h диэлектрического слоя определяется согласно (2) граница диапазона допустимых значений удельного электрического сопротивления бурового раствора. При увеличении глубины бурения, с которой необходима передача сигнала забойной телеметрии, возникает потребность в корректировке химического состава бурового раствора с целью увеличения его удельной электропроводности. Эта корректировка осуществляется также с помощью выражения (2) при решении обратной задачи.

Совершенствование энергетического потенциала автономной забойной телесистемы потребовало решения задачи увеличения коэффициента полезного действия забойного излучателя сигнала. Показано, что наибольшей эффективностью будет обладать забойный генератор сигнала с выходным каскадом, работающем в дискретном режиме с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

На основе методов пространства состояний и усреднения значений на интервале дискретизации разработана линейная модель ШИМ-формирователя синусоидального сигнала, которая с учетом налагаемых процессом линеаризации ограничений в матричной форме имеет вид:

$$\|\dot{x}\| = \|A'\| \cdot \|x\| + \hat{\tau}_{u1} (\|B'\|) \cdot \|E_0\| \quad (3)$$

где $\hat{\tau}_{u1} = \tau_{u1} / T$ - нормированная длительность открытого состояния ключа или коэффициент заполнения импульса; T - период тактовой частоты ШИМ; $\|A'\|$ - матрица

коэффициентов переменных состояния на интервале времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{t}_{u1}$; $\|A''\|$ - матрица коэффициентов переменных состояния на интервале времени $\hat{t}_{u1} < \hat{t} \leq 1$; $\|B'\|$ - матрица коэффициентов внешнего воздействия на интервале времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{t}_{u1}$; $\|B''\|$ - коэффициентов внешнего воздействия на интервале времени $\hat{t}_{u1} < \hat{t} \leq 1$.

На основе выражения (3) в матричной форме получена передаточная функция каскада по напряжению.

Выражение (4) позволяет определить влияние на амплитуду выходного сигнала генератора изменения ЭДС автономного источника питания и решить проблему компенсации этого возмущения. Для этого требуется изменять пропорционально уменьшению ЭДС тактовую частоту ШИМ, поддерживая $\frac{E}{T} = const$.

$$W_U(p) = \frac{U_C(p)}{T_{u1}(p)} = \frac{E}{T} \cdot \left(\frac{1}{p^2 CL + p \frac{L}{R_H} + 1} \right). \quad (4)$$

Забойный блок буровой телесистемы размещен в скважине, процессы в которой являются стохастическим. Такие параметры, как удельная электропроводность бурового раствора, толщина и диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя бурильной трубы в разных сечения скважины являются нестационарными и случайными. Изменение этих параметров в процессе бурения влияет на режим работы забойного генератора сигнала, что приводит к изменению сопротивления его нагрузки, спектра и амплитуды выходного сигнала. Это требует рассмотрения проблемы сохранения качественных показателей забойного генератора сигнала с ШИМ при изменении технических параметров скважины.

Четвертая глава посвящена анализу качественных показателей забойного ШИМ-генератора с учетом регулирования амплитуды выходного сигнала в условиях изменяющихся толщины и диэлектрической проницаемости поверхностного слоя бурильных труб, удельного сопротивления бурового раствора.

Показано, что наибольшим КПД будет обладать ШИМ-формирователь сигнала, имеющий нулевую начальную длительность управления ключевым элементом, т.е. реализующий дискретный режим ВД выходного каскада.

С целью уменьшения нелинейных искажений, вносимых выходным каскадом в режиме ВД, решен вопрос об условиях существования линейной модуляционной характеристики каскада.

Вид модуляционных характеристик для различных значений промежуточного

параметра $K = \omega_T L / (2\pi R_H)$, определяющего соотношение между сопротивлением нагрузки R_H , тактовой частотой ШИМ ω_T и индуктивностью дросселя фильтра L , приведен на рис.7.

Минимум нелинейных искажений обеспечивает наименьшее значение высших гармонических составляющих в излучаемом на поверхность сигнале.

Для оценки нелинейных искажений использована зависимость, определяющая амплитуды высших гармонических составляющих в режиме ВД.

$$\hat{U}_{2i+1} = \frac{4}{\pi \cdot m_0} \int_0^{m_0} \frac{\hat{u}(\hat{\tau}_{u1}) \sin \left[(2i+1) \arcsin \left(\frac{\hat{\tau}_{u1}}{m_0} \right) \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{\hat{\tau}_{u1}}{m_0} \right)^2}} d\hat{\tau}_{u1} \quad (5)$$

где m_0 – относительная амплитуда модулирующего синусоидального напряжения, \hat{u} – нормированное значение напряжения на выходе генератора, $\hat{\tau}_{u1}$ – нормированное значение длительности открытого состояния ключа.

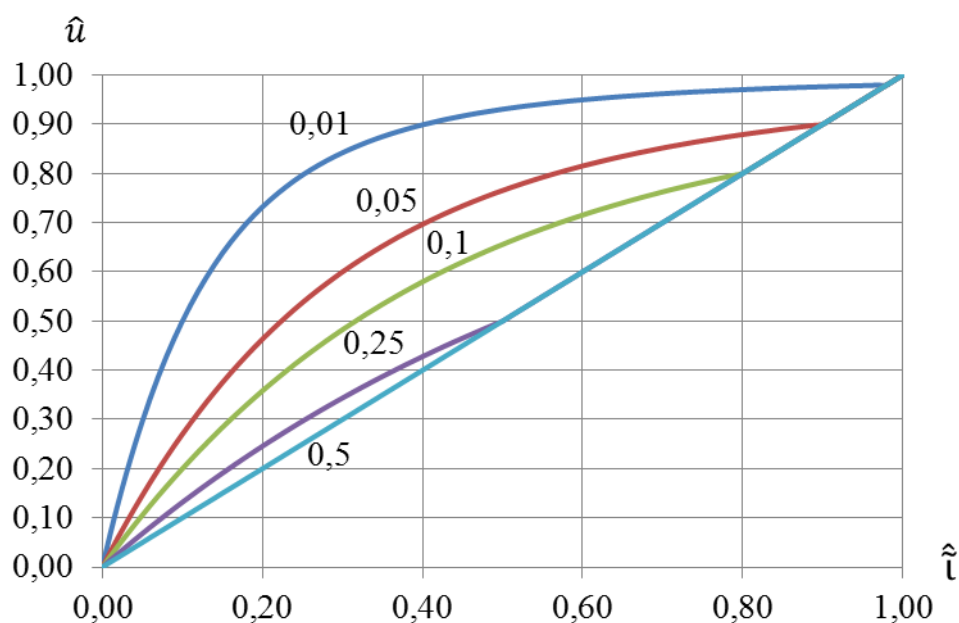


Рисунок 7 – Модуляционные характеристики выходного каскада забойного ШИМ-формирователя в режиме ВД в функции параметра $K = \omega_T L / (2\pi R_H)$

Анализ полученных результатов показывает, что при $K \geq 0.5$ токи дросселя становятся непрерывными, модуляционные характеристики линейризуются, и относительные амплитуды высших гармоник на выходе забойного генератора сигнала становятся пренебрежительно малы.

Это позволяет сделать вывод, что при неизбежном в процессе бурения износе

поверхностного покрытия бурильных труб, а, следовательно, увеличении токов утечки через эту поверхность и уменьшении сопротивления нагрузки R_H забойного генератора сигналов, увеличения шумовых составляющих в передаваемом сигнале происходить не будет. Это делает оправданным применение в забойном блоке ШИМ-формирователя синусоидального сигнала, работающего в наиболее экономичном режиме ВД, но имеющего нелинейную модуляционную характеристику.

Экономические показатели процесса строительства скважин напрямую связаны с цикловой скоростью бурения. Одним из способов ее повышения является разработка технических мероприятий, приводящих к сокращению времени спуско-подъемных операций, а, следовательно, и времени бурения. Существующие забойные телесистемы с электромагнитным каналом связи по колонне бурильных труб и буровому раствору в затрубном пространстве обеспечивают время автономной работы до 250 часов. При этом современные буровые долота способны работать до 600 часов, с постоянной тенденцией увеличения этого времени. Все это делает актуальной проблему разработки технических средств, увеличивающих время автономной работы забойного блока телесистемы.

В пятой главе произведен анализ энергетической эффективности ШИМ-генератора размещенного на забое скважины, управляемого по сигналу, передаваемому с поверхности по бурильной колонне и буровому раствору в затрубном пространстве.

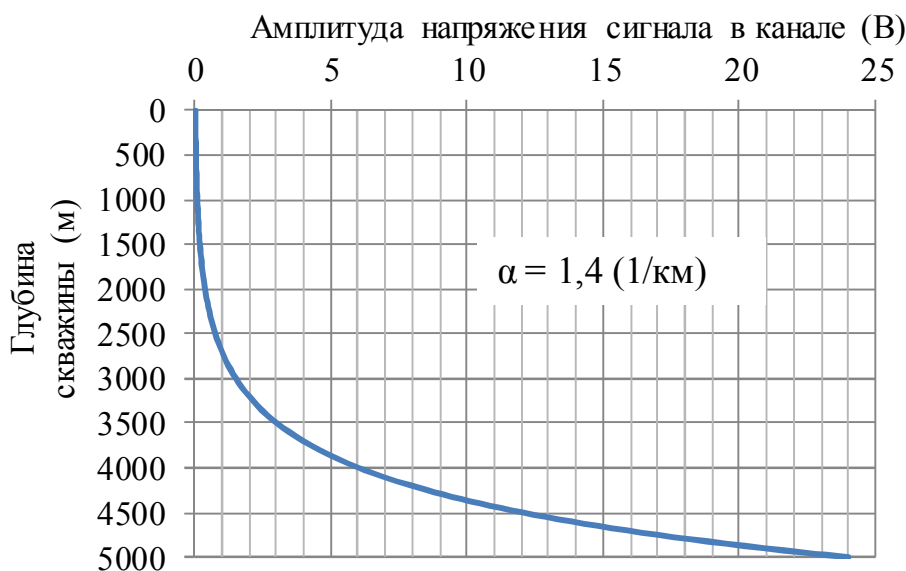


Рисунок 8 – Дистанционная характеристика амплитуды сигнала в канале передачи информации по бурильной колонне

Предложен способ кратного увеличения времени работы забойных телесистем, работающих от автономного источника питания. Сущность способа заключается в постепенном увеличении мощности забойного излучателя по мере роста глубины разбуриваемой скважины. Способ основан на закономерности, заключающейся в том, что на малых глубинах затухание сигнала невелико (рис.8) и, следовательно, для передачи его на поверхность требуется меньшая мощность. С углублением скважины интенсивность затухания сигнала возрастает, что требует повышения мощности забойного излучателя. Применение энергосберегающего способа особенно актуально в связи с тем, что проведение спуско-подъемных операций на буровой для замены истощившегося автономного источника снижает цикловую скорость бурения, и, следовательно, повышает стоимость скважины.

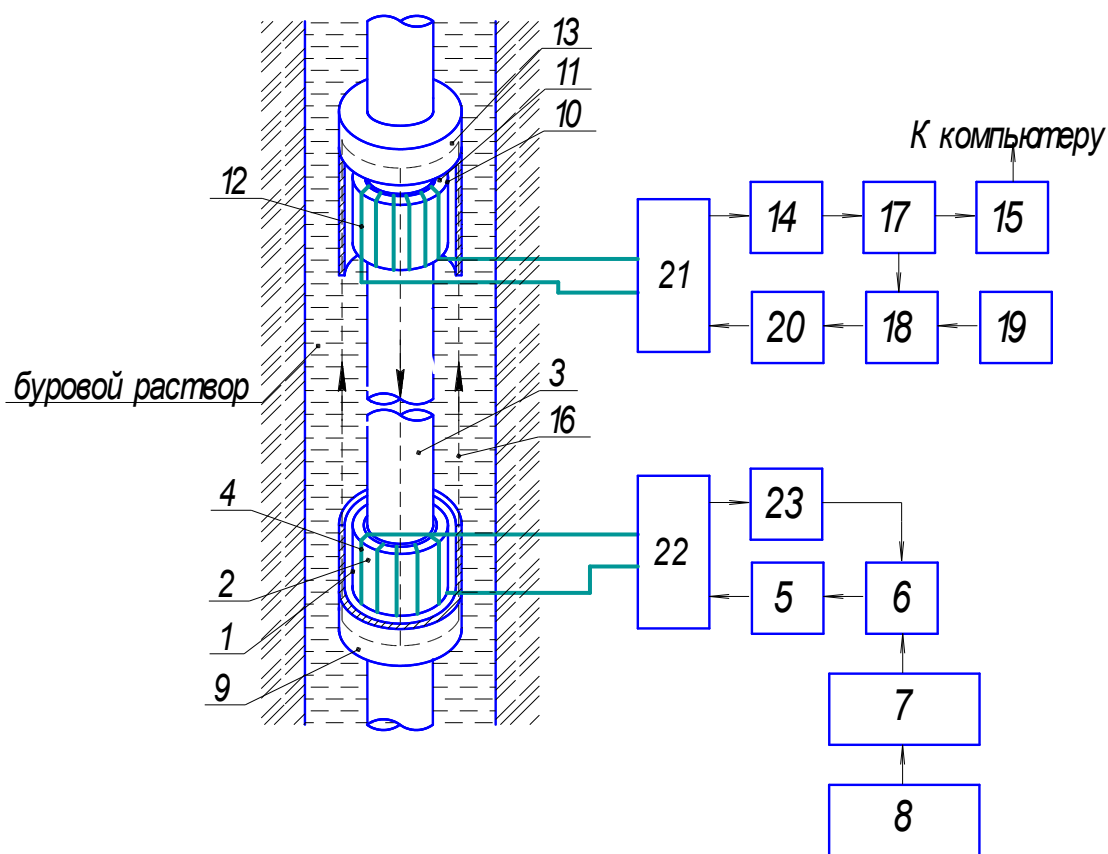


Рисунок 9 – Устройство для передачи информации с забоя скважины на поверхность

Для реализации способа предложено устройство передачи информации с забоя скважины на поверхность, позволяющее использовать асимметричный дуплексный канал передачи информации для регулирования мощности излучателя, передающего сигналы забойной телеметрии на поверхность (рис.9), где 1- забойная антенна; 2,11 - тороидальный сердечник; 3 - бурильная труба; 4,12 - обмотки антенны; 5 – усилитель; 6 - формирователь сигнала; 7 - преобразователя аналог – код; 8 - измерительный блок; 9 ,13 - герметичный кожух;10 - поверхностная антенна; 14 - усилитель – фильтр; 15 -

формирователь цифрового сигнала; 16 - вторичный виток; 17 - блок вычисления соотношения сигнал/шум; 18 - блок сравнения; 19 - блок задачи соотношения сигнал/шум; 20 - блок управления мощностью забойного излучателя; 21,22 - блоки коммутации антенн; 23 - блок приема и обработки сигнала управления мощностью.

Для оценки энергетической эффективности реализации предложенного алгоритма использована методика расчета динамического КПД выходного каскада забойного ШИМ генератора сигнала по экспериментальным статическим значениям КПД, полученным для различных значений относительной амплитуды выходного сигнала:

$$\eta(\xi) = \frac{\pi\xi}{4} \cdot \frac{\xi^2}{\int_0^\xi \frac{\hat{u}^2 d\hat{u}}{\eta_{cm}(\hat{u}) \sqrt{1 - (\hat{u}/\xi)^2}}} \quad (6)$$

Рассчитанная по формуле (6) зависимость динамического КПД $\eta(\xi)$ от относительной амплитуды ξ по известной статической зависимости $\eta_{cm}(\hat{u})$ для выходного каскада мощностью 2 Вт представлена на рис.10.

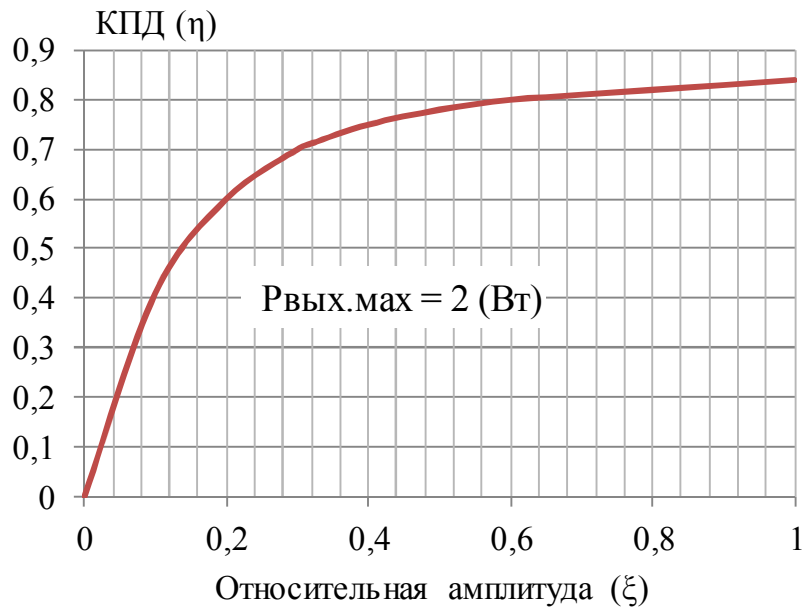


Рисунок 10 – Зависимость КПД выходного каскада забойного ШИМ генератора от уровня гармонического сигнала в режиме ВД

Анализ рис.10 позволяет сделать вывод о том, что динамический КПД выходного каскада забойного ШИМ-генератора гармонического сигнала в режиме ВД в широком диапазоне слабо зависит от уровня выходного сигнала. Это делает возможным и целесообразным его применение в забойных телеметрических системах, реали-

зующих управление мощностью забойного излучателя в функции глубины скважины.

Наличие зависимости, связывающей КПД забойного формирователя сигнала с относительной величиной выходного сигнала, позволяет оценить эффективность регулирования мощности забойного излучателя.

Для получения предельной оценки энергетической эффективности процесса регулирования мощности забойного генератора введена целевая функция эффективности регулирования мощности забойного излучателя, как отношение энергозатрат на передачу сигнала с забоя при постоянной мощности излучателя и при ее регулировании.

$$\begin{cases} w(\alpha, \bar{v}, T) = \frac{W_{CONST}}{W_{VAR}} = \frac{T / \eta(1)}{\int_0^T \frac{e^{2\alpha\bar{v}(t-T)}}{\eta(\xi)} dt}; \\ \xi = e^{\alpha(\bar{v}t-l)} \end{cases} \quad (7)$$

где P_{2MAX} - максимально возможная мощность на выходе генератора сигнала забойного блока; $\eta(\xi)$ - КПД забойного генератора сигнала в функции относительной амплитуды ξ ; T - интервал времени от начала проходки до завершения скважины; \bar{v} - рейсовая скорость бурения скважины; α - коэффициент затухания сигнала на единицу длины канала передачи информации.

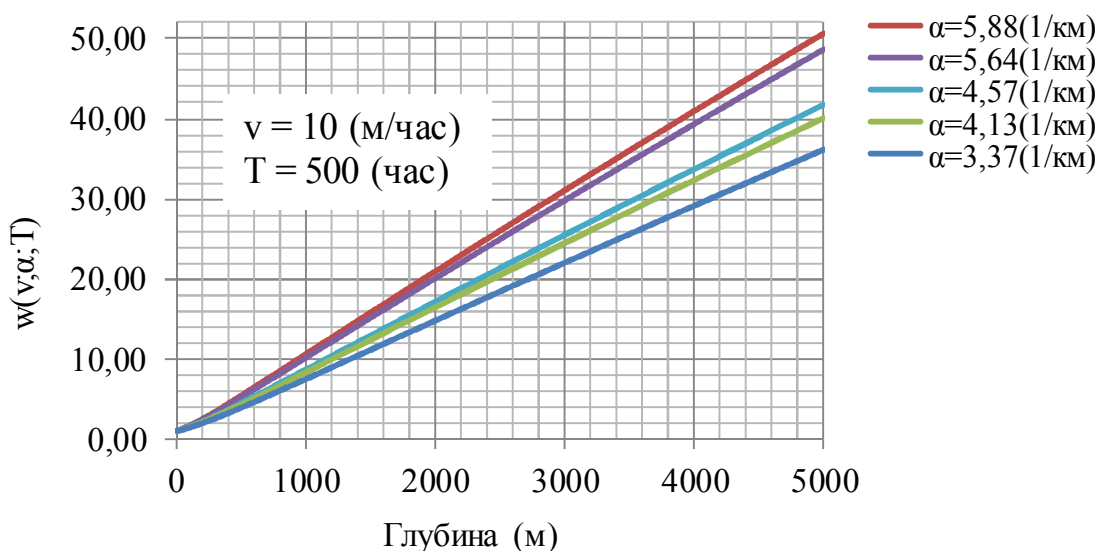


Рисунок 11 – Кратность увеличения времени автономной работы забойного модуля телесистемы в сравнении с базовым вариантом

Численное решение интегральной зависимости (7) относительно всех переменных, которые могут быть определены заранее, позволяет решить задачу определения кратного увеличения времени автономной работы забойной телесистемы (рис.11).

Увеличение срока автономной работы забойного блока телесистемы, снижает вероятность проведения спуско-подъемных операций для замены истощенных аккумуляторов, что приводит к увеличению рейсовой и цикловой скоростей бурения.

Основные выводы:

1. Разработана линия двухсторонней передачи информационного сигнала с забоя скважины на поверхность и, наоборот, в виде электромагнитного канала связи, состоящего из коаксиальной пары проводников «бурильная колонна – буровой раствор», разделенных слоем диэлектрика.

2. Установлено, что изменяя минерализацию бурового раствора возможно корректировать область применения и качественные характеристики забойной телесистемы, так как частотные характеристики канала связи по замкнутому витку из колонны бурильных труб и бурового раствора определяются главным образом значением удельного электрического сопротивления бурового раствора, уменьшение которого приводит к увеличению дальности приема сигнала с забоя скважины.

3. Получено математическое выражение, позволяющее определить пороговое значение удельного сопротивления бурового раствора, превышение которого делает неопределенной достоверность передачи информации по замкнутому витку из колонны бурильных труб и бурового раствора

4. Показано, что при неизбежном в процессе бурения изменении свойств диэлектрического покрытия бурильной трубы (нарушения целостности и толщины покрытия), выходной каскад забойного формирователя сигналов, выполненный на основе ШИМ формирователя в режиме VD, сохраняет наилучшие энергетические показатели при формировании синусоидального сигнала и соответствует требованиям канала с позиций диапазона изменения его волнового сопротивления и гармонического состава выходного сигнала.

5. Разработан способ управления энергетическим уровнем информационного сигнала, основанный на коррекции удельной электрической проводимости бурового раствора по мере углубления ствола скважины.

6. Разработан способ совершенствования энергетического потенциала забойной телесистемы на основе применения бурильных труб с нанесенным защитным покрытием, уменьшающим токи утечки через поверхность бурильной трубы, что позволяет увеличивать пропускную способность и дальность передачи информации без изменения конструкции забойного блока телесистемы (патент РФ № 104624, приоритет от 20.07.2010)

7. Разработан способ регулирования мощности забойного излучателя телесистемы по асимметричному дуплексному каналу передачи информации в функции

глубины скважины, обеспечивающий энергошадящий режим работы источника питания погружного блока, что позволяеткратно увеличить время автономной работы забойной части телесистемы от аккумуляторных батарей (патент РФ № 104623, приоритет от 16.11.2010).

8. Предложен способ контроля заряда аккумулятора забойного блока с передачей информации о значении ЭДС аккумулятора на поверхность, позволяющий корректировать процесс бурения в зависимости от предполагаемого остаточного энергоресурса забойного блока.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Старцев, А. Э. Исследование выходного каскада дискретного формирователя аналогового сигнала забойного модуля телесистемы с электромагнитным каналом связи на основе непрерывной линеаризованной модели [Электронный ресурс]: Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2010 / А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Startsev/Startsev_1.pdf.

2. Старцев, А. Э. Влияние удельной электропроводности бурового раствора на энергетические характеристики электромагнитного канала связи забойной телесистемы [Электронный ресурс]: Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2011, № 3/ А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Startsev_2/Startsev_2.pdf.

3. Ягубов, З. Х. Повышение энергетического потенциала буровой телесистемы с электромагнитным каналом связи [Электронный ресурс]: Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2011, № 3/ З. Х. Ягубов, А. Э. Старцев. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Yagubov/Yagubov_1.pdf.

4. Старцев, А. Э. Методика совершенствования забойной телесистемы с электромагнитным каналом связи с целью увеличения скорости бурения скважин [Текст] / А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов // Инженер-нефтяник. - 2011.– № 4. – С. 22-25.

5. Старцев, А. Э. Оптимизация режима работы ключевых каскадов ШИМ формирователей синусоидального напряжения [Текст] / А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции в 2 ч.; ч.2 (19 – 22 апреля 2005 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2005. – С. 33–36.

6. Старцев, А. Э. Построение непрерывной линеаризованной модели ШИМ преобразователей [Текст] / А. Э. Старцев // Сборник научных трудов: материалы

научно-технической конференции в 3 ч.; ч.2 (18 – 21 апреля 2006 г.) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2005. – С. 223–225.

7. Старцев, А. Э. Повышение экономической эффективности забойных телеметрических систем с электромагнитным каналом связи [Текст] / А. Э. Старцев, С. В. Полетаев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (15 – 18 апреля 2008г.) в 2 ч.; ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 202–205.

8. Старцев, А. Э. Математическая модель электромагнитного канала связи в буровых телеметрических системах [Текст] / А. Э. Старцев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (14 – 17 апреля 2009 г.) в 2 ч.; ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 163–165.

9. Старцев, А. Э. Частотные характеристики электромагнитного канала связи по бурильной колонне [Текст] / А. Э. Старцев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (13 – 15 апреля 2010 г.) в 3 ч.; ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 275–278.

10. Пат.104623 Российская федерация, 9МПК E21B47/12. Устройство для передачи информации на поверхность [Текст] / А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов – № 2010146623/03; заявл. 16.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.

11. Пат.104624 Российская федерация, 9МПК E21B47/12. Устройство для передачи информации на поверхность [Текст] / А. Э. Старцев, З. Х. Ягубов – № 2010130404/03; заявл. 20.07.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.