

Н. И. КРИВКО  
В. Д. ШАРОВАРИН  
В. Н. ШИРОКОВ

---

# ПРОМЫСЛОВО- ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по специальности  
«Геофизические методы поисков и разведки  
месторождений полезных ископаемых»*



МОСКВА «НЕДРА» 1981

Кривко Н. Н., Шароварин В. Д., Широков В. Н. Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование: Учеб. пособие для вузов.— М.: Недра, 1981.— 280 с.

В учебном пособии рассмотрены основы эксплуатации и конструирования скважинной и наземной аппаратуры и оборудования для проведения промысловых геофизических работ. Описаны измерительные и регистрирующие приборы, устройства для контроля и управления спуско-подъемными операциями, блоки питания, скважинные приборы, кабели. Указаны дальнейшие направления в разработке и совершенствовании геофизической аппаратуры.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». Оно представляет интерес также для промысловых геофизиков и разработчиков геофизической аппаратуры.

Табл. 20, ил. 126, список лит.— 24 назв.

Рецензенты:

д-р геол.-минер. наук *Е. И. Леонтьев* (Тюменский индустриальный ин-т),  
инж. *А. П. Лебедев* (МНП).

## ВВЕДЕНИЕ

При разведке и разработке месторождений полезных ископаемых широко применяются геофизические методы исследования скважин.

Специфика геофизических исследований скважин заключается в значительном удалении изучаемых объектов от наблюдателя. В этом случае измерительные устройства, использующиеся для непосредственного измерения, утрачивают свое самостоятельное значение и заменяются преобразователями физических величин в электрические сигналы. Такие преобразователи входят составной частью в комплекс технических средств, обеспечивающих дистанционное измерение физических величин, т. е. телезмерение. Поскольку основное назначение геофизических исследований скважин — получение, передача и переработка информации об изучаемых величинах, использующиеся технические средства измерения образуют информационно-измерительную систему.

Геофизические исследования, как правило, проводят по окончании бурения определенного интервала разреза с помощью спускаемых в скважину на специальном кабеле измерительных устройств. В последние годы в СССР и за рубежом успешно разрабатывается аппаратура, обеспечивающая получение информации о некоторых параметрах (КС и ПС горных пород, угле и азимуте скважины) непосредственно в процессе бурения скважины. Сигналы от воспринимающих устройств передаются в этом случае на поверхность с помощью специальных преобразователей по колонне бурильных труб, встроенному в колонну кабелю (при электробурении) или столбу промывочной жидкости.

В значительной степени перспективны и автономные скважинные приборы, в которых результаты измерения регистрируются или запоминаются специальными устройствами, расположенными внутри прибора.

Развитие геофизического приборостроения характеризуется непрерывным усложнением измерительной аппаратуры и расширением круга задач, решаемых с ее помощью. Создание и совершенствование техники для исследований скважин неразрывно связано с разработками теории и методики интерпретации геофизических методов, новейшими достижениями в измерительной технике и радиоэлектронике, применением новых конструкционных материалов и способов их обработки.

В развитии и совершенствовании геофизической аппаратуры можно выделить следующие основные направления: 1) автоматизация процесса измерений; 2) разработка скважинной аппаратуры для отдельных методов; 3) комплексирование измерений; 4) стандартизация и унификация аппаратуры.

Такое деление, разумеется, носит несколько условный характер, поскольку перечисленные направления находятся в тесной взаимосвязи, однако оно позволяет обобщить накопленный опыт и наметить пути дальнейшего совершенствования геофизического приборостроения.

В первые годы применения геофизических методов измерения проводили в отдельных точках скважины с помощью электроразведочной аппаратуры (электроразведочный потенциометр, источники постоянного тока). В дальнейшем на основе электро-механического преобразователя (пульсатора) и полуавтоматического регистратора были сконструированы разборные установки, которые монтировались на скважине и обеспечивали непрерывную регистрацию одного-двух измеряемых параметров. С 1947 г. стали применяться полуавтоматические станции, в которых использовалась та же аппаратура, что и в разборных установках, смонтированная в кузове автомобиля. Привод лентопротяжных механизмов регистраторов от мерного ролика, установленного на скважине, в этих станциях осуществлялся с помощью дистанционной сельсинной передачи.

Автоматизация процесса геофизических измерений в скважинах явилась результатом работы больших коллективов институтов, заводов и производственных организаций под общим руководством проф. С. Г. Комарова. Создание измерительных лабораторий и автоматических станций АКС/Л-50, ОКС-52, а затем АЭКС-900, АКС-4, ОКС/Л-64, АКС/Л-7 и др. позволило практически полностью автоматизировать процесс измерения при промыслово-геофизических исследованиях.

Основное направление автоматизации геофизических измерений в скважинах в последние годы заключается в создании регистрирующих устройств, обеспечивающих представление результатов не только в аналоговой, но и в цифровой форме. Это позволяет проводить автоматическую обработку и интерпретацию полученных данных с помощью ЭВМ и передачу их по каналам связи на значительные расстояния. При обработке результатов геофизических исследований широко применяется полуавтоматический графо-цифровой преобразователь Ф001 с регистрацией данных на перфоленду. Завершены научно-исследовательские работы по созданию автоматических преобразователей. Для преобразования промыслово-геофизических данных в цифровую форму непосредственно на скважине разработано несколько типов аппаратуры с записью на магнитную ленту (АЦРК-2, «Триас» и др.) и на перфоленду (ПЛК-6).

С 1977 г. начат выпуск первой отечественной геофизической лаборатории как с аналоговой, так и с цифровой записью типа ЛЦК-10. Эта лаборатория позволяет не только осуществлять полный комплекс исследований в скважине, но и проводить оперативную обработку измерительной информации непосредственно на скважине.

Для передачи результатов геофизических исследований по каналам связи в территориальные вычислительные центры разработана аппаратура «Север», «Волна».

Создание скважинных приборов и наземных устройств для измерения различных физических параметров проводилось в тесной связи с разработкой теории и методики интерпретации соответствующих геофизических методов. В результате работы коллективов научных и производственных организаций, многих советских геофизиков и приборостроителей (И. И. Башлыкин, К. А. Верпатов, С. Я. Выборных, Н. Н. Герасимов, Г. В. Горшков, В. Н. Дахнов, Д. И. Дьяконов, С. Г. Комаров, С. Я. Литвинов, Н. А. Перьков, В. Ф. Печерников, А. С. Семенов, Д. М. Сребродольский, Г. Н. Строцкий, В. В. Шаскольский, И. В. Шевченко, В. А. Шпак и др.) еще в 30—40-е годы были сконструированы приборы для измерения температуры, диаметра и искривления скважины. В послевоенные годы были разработаны совершенные типы аппаратуры для электрометрии и радиометрии скважин, новые образцы электротермометров, каверномеров и инклинометров. Разработка новых методов исследования скважин — индукционного, диэлектрического, акустического, фокусированных зондов электрометрии скважин, методов определения элементов залегания горных пород и др. — потребовала создания соответствующей аппаратуры. Для исследования сверхглубоких скважин с особо сложными условиями в Специальном конструкторско-технологическом бюро промышленной геофизики (г. Грозный) создана серия электрометрических и радиометрических приборов.

В послевоенные годы в связи с расширением комплекса геофизических исследований, ростом темпов бурения и непрерывным увеличением глубин скважин широко развернулись работы по созданию геофизической аппаратуры, обеспечивающей комплексирование измерений. По предложению В. Н. Дахнова, В. Ф. Печерникова и Г. С. Морозова в 1948 г. была начата разработка комплексных измерительных устройств на семижильном кабеле. Созданная лаборатория позволяла за одну спуско-подъемную операцию измерять до шести различных параметров. Позднее, как отмечалось выше, были разработаны комплексные геофизические лаборатории АКС-4 и АКС/Л-7.

Комплексная аппаратура на одножильном кабеле создавалась на основе уплотнения канала связи с применением временного и частотного разделения измеряемых сигналов и различных способов их передачи. В 1965 г. была разработана многоканальная телеизмерительная система с частотным разделением каналов и частотной модуляцией, которая обеспечивала одновременное измерение на одножильном кабеле трех-четырёх параметров; она и до настоящего времени является основой при создании комплексной аппаратуры для электрометрии скважин и контроля их технического состояния.

В последние годы интенсивно развернулись работы по созданию телеизмерительных систем с большим числом одновременно действующих измерительных каналов на основе импульсной модуляции и временного разделения.

Увеличение общего объема выпускаемой геофизической аппаратуры, расширение ее номенклатуры обусловили постановку работ по стандартизации наземных измерительных устройств и скважинных приборов, унификации их основных узлов и элементов, метрологических и эксплуатационных характеристик.

Начиная с 1970 г. введены в действие государственные общесоюзные стандарты на типы и основные параметры геофизических измерительных лабораторий и самоходных подъемников, охранные кожухи скважинных приборов, головки зондов, муфты для соединения зондов с геофизическими кабелями. Унифицированы установочные размеры наземных панелей, размеры шасси скважинных приборов, выходные параметры источников питания скважинной аппаратуры. Проводятся работы по унификации телеизмерительных систем.

С целью дальнейшей унификации скважинной геофизической аппаратуры разработана и утверждена агрегатированная система геофизических приборов (АСГП). Узлы этой системы унифицированы по конструкции, основным техническим данным и эксплуатационным характеристикам, параметрам электрических сигналов и т. п.; это существенно облегчает решение задачи создания комплексных и комбинированных приборов для исследования скважин.

Все изложенное наглядно иллюстрирует непрерывное развитие и высокий уровень современного состояния отечественной техники для геофизических исследований скважин.

Основными направлениями дальнейшего развития отечественного геофизического приборостроения являются следующие.

1. Разработка геофизических измерительных лабораторий, оснащенных ЭВМ, которые наряду с получением и первичной обработкой измерительной информации обеспечивали бы ее количественную интерпретацию.

2. Создание многоканальных измерительных устройств, позволяющих выполнять комплекс геофизических исследований в скважине за одну — две спуско-подъемные операции.

3. Улучшение метрологических характеристик, повышение надежности, термо- и баростойкости скважинной аппаратуры на основе использования новой элементной базы, конструкционных материалов и улучшения технологии производства.

4. Создание метрологического обеспечения геофизических исследований скважин.

5. Разработка спуско-подъемного оборудования и геофизического кабеля для исследования скважин глубиной 10—15 тыс. м.

6. Создание геофизических лабораторий и спуско-подъемного оборудования для морских скважин.

7. Дальнейшее расширение работ по созданию автономных скважинных приборов и устройств для геофизических исследований в процессе бурения.

Уровень разработки аппаратуры для геофизических исследований во многом определяет дальнейшее развитие промышленной геофизики, эффективность разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Вместе с тем все возрастающая сложность геофизической аппаратуры требует постоянного совершенствования подготовки инженерно-технических кадров, способных обеспечить ее квалифицированную эксплуатацию.

Введение, главы I, II, III и V, а также § 1—8 главы IV написаны доц. В. Д. Шаровариным, § 9—11 главы IV и глава VI—доц. В. Н. Широковым, главы VII и VIII—доц. Н. Н. Кривко.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СКВАЖИНАХ

---

### § 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СКВАЖИННЫХ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Особенность промыслово-геофизических исследований заключается в том, что объект измерений (горные породы) находится в скважине. Значительная удаленность изучаемого объекта от места наблюдения, небольшой диаметр скважины, наличие промывочной жидкости и т. п. делают невозможным непосредственное определение измеряемых величин. Поэтому геофизические исследования скважин, как процесс измерения на расстоянии, являются разновидностью телеизмерений.

Комплекс технических средств, обеспечивающих измерения в скважинах, будем называть скважинной телеизмерительной системой (СТС). Для обеспечения контроля нормальной работы телеизмерительную систему нередко дополняют блоками телесигнализации (ТС), телерегулирования (ТР) и телеуправления (ТУ).

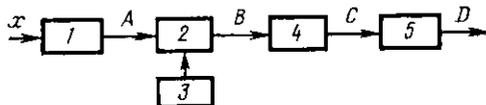
Основное назначение СТС — получение и передача информации об объекте исследования.носителем измерительной информации в СТС является сигнал.

На рис. 1 изображена информационная модель скважинной телеизмерительной системы, отображающая особенности преобразования сигналов информации в различных частях СТС. В входе системы расположен блок передачи информации 1, который обеспечивает преобразование измеряемой величины  $x$  в сигнал  $A=f(x)$ , имеющий форму, удобную для передачи по каналу связи 2.

Под каналом связи понимают совокупность технических средств, необходимых для передачи сигналов информации на заданное расстояние. Составной частью канала связи является линия связи, т. е. физическая среда, по которой передаются сигналы. В телеизмерительных системах используются электрические, акустические, гидравлические, оптические и другие каналы связи. В скважинных телеизмерительных системах преимущественное распространение получили электрические каналы связи, основанные на использовании проводной кабельной линии связи.

В процессе передачи по каналу связи сигнал  $A$  подвергается воздействию помех (блок 3). Помехой принято называть посторонние сигналы, спектр которых полностью или частично

Рис. 1. Информационная модель скважинной телеизмерительной системы



совпадает со спектром сигнала информации. Помехи могут иметь различную природу и по-разному влиять на полезный сигнал. В результате действия помех, а также вследствие особенностей канала связи сигнал  $A$  преобразуется в сигнал  $B = \varphi(A)$ .

В блоке восприятия информации 4 поступивший из канала связи сигнал  $B$  трансформируется в сигнал  $C = \psi(B)$ , который в свою очередь преобразуется блоком представления информации 5 в сигнал или символ  $D = \Phi(C)$ , удобный для анализа, обработки и других операций.

Таким образом, показания на выходе блока представления информации являются достаточно сложной функцией измеряемой величины  $D = F(x)$ .

Функциональные зависимости  $A = f(x)$ ,  $B = \varphi(A)$ ,  $C = \psi(B)$  и  $D = \Phi(C)$  отражают особенности преобразования сигнала информации в различных блоках СТС и носят название передаточных характеристик (характеристик преобразования) соответствующих блоков. Зависимость  $D = F(x)$  называется передаточной характеристикой скважинной телеизмерительной системы.

Для наибольшей точности передачи и воспроизведения измерительной информации необходимо, чтобы передаточная характеристика СТС была линейной во всем диапазоне изменения  $x$ . Наиболее просто это условие реализуется в случаях, когда каждый из блоков, входящих в систему, имеет линейную характеристику преобразования. При необходимости применяют различные способы коррекции передаточной характеристики СТС или отдельных ее блоков.

В связи со значительным многообразием телеизмерительных систем (в том числе и скважинных) в основу их классификации могут быть положены различные признаки [10]: принцип действия, род измеряемой величины, дальность действия и т. п. Наибольшее распространение получила классификация по параметру сигнала, передающего измерительную информацию.

Для формирования сигнала могут быть использованы постоянные состояния, колебания или импульсы любой физической природы, которые рассматриваются как носители информации. Как уже отмечалось, в скважинных телеизмерительных системах обычно используют электрические каналы связи, поэтому в них передача информации осуществляется путем изменения одного из параметров тока или напряжения. Процесс управления этим параметром посредством измеряемой величины называется модуляцией, преобразуемый электрический сигнал —

несущим, а сама измеряемая величина — модулирующим сигналом. Основное назначение модуляции — уменьшить действие помех в канале связи.

Если несущий сигнал изменяется по гармоническому закону, т. е. определяется выражением

$$U = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi), \quad (I.1)$$

то изменению могут подвергаться амплитуда  $U_{\max}$ , частота  $\omega$  или фаза  $\varphi$  колебания. Соответственно происходит амплитудная, частотная или фазовая модуляция (рис. 2).

При амплитудной модуляции (АМ) под воздействием модулирующего сигнала происходит изменение амплитуды несущего сигнала в соответствии с выражением

$$U_{\text{АМ}} = U_{\max} [1 + mf(t)] \sin(\omega t + \varphi), \quad (I.2)$$

где  $m = \Delta U / U_m$  — глубина модуляции ( $\Delta U$  — девиация амплитуды, т. е. наибольшее изменение амплитуды несущего сигнала);  $f(t) = x / x_{\max}$  — закон изменения модулирующего сигнала ( $x_{\max}$  — максимальное изменение сигнала).

При частотной модуляции (ЧМ) под влиянием управляющего сигнала изменяется частота несущего сигнала:

$$U_{\text{ЧМ}} = U_{\max} \sin \left\{ \omega \left[ 1 + m \int_0^t f(t) dt \right] + \varphi \right\}, \quad (I.3)$$

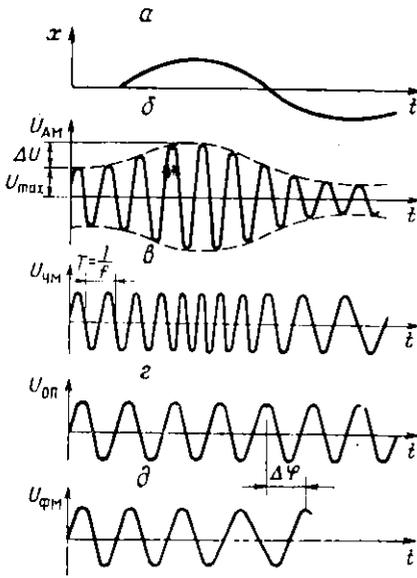


Рис. 2. Модуляция гармонического сигнала:

*a* — модулирующий сигнал; *б* — сигнал АМ; *в* — сигнал ЧМ; *г* — немодулированный (опорный) сигнал; *д* — сигнал ФМ

здесь  $m = \Delta \omega / \omega$  — глубина модуляции ( $\Delta \omega$  — девиация частоты — наибольшее изменение частоты сигнала).

При фазовой модуляции (ФМ) происходит изменение фазы несущего сигнала под воздействием модулирующего сигнала:

$$U_{\text{ФМ}} = U_{\max} \sin \{ \omega t + \varphi [1 + mf(t)] \}, \quad (I.4)$$

где  $m = \Delta \varphi / \varphi$  — глубина модуляции ( $\Delta \varphi$  — девиация фазы, т. е. наибольшее изменение фазы модулированного сигнала относительно опорного — немодулированного).

Частотная и фазовая модуляции иногда объединяются под общим названием угловой модуляции.

Как указывается в работе [13], на практике могут встре-

чатся смешанные виды модуляции — амплитудно-частотная или амплитудно-фазовая, при которых гармоническое колебание изменяется одновременно по амплитуде и частоте (фазе). Обычно один из видов модуляции является полезным, т. е. выражает закон передаваемого сигнала, другие — паразитными.

В качестве несущего сигнала может быть использована и периодическая последовательность импульсов (обычно прямоугольной формы), характеризующихся определенной амплитудой, длительностью, частотой следования и фазой, т. е. сдвигом во времени относительно начального положения (рис. 3, а). Изменяя модулирующим сигналом (рис. 3, б) любой из перечисленных признаков периодической последовательности импульсов, можно получить следующие виды импульсной модуляции.

1. Амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ) — изменение амплитуды  $U$  импульсов в соответствии с передаваемым сигналом (рис. 3, в).

2. Широотно-импульсную модуляцию — изменение длительности  $\tau_k$  импульсов в соответствии с передаваемым сигналом (рис. 3, д).

3. Частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ) — изменение частоты  $f$  следования импульсов по закону передаваемого сигнала (рис. 3, е). Частным случаем ЧИМ является счетно-импульсная модуляция, выражающаяся в изменении количества импульсов за определенный промежуток времени под действием модулирующего сигнала.

4. Фазово-импульсную модуляцию (ФИМ) — изменение величины сдвига импульсов во времени  $\Delta t$  относительно начального положения по закону передаваемого сигнала (рис. 3, е).

Иногда частотно-импульсная и фазово-импульсная модуляции объединяются в одну группу — время-импульсную модуляцию (ВИМ) [13].

Если модуляция заключается не в изменении параметров одного импульса, а в изменении параметров комбинации нескольких импульсов (их количества, расположения в сигналах), то она называется кодо-импульсной модуляцией (КИМ) (рис. 3, ж).

Все импульсные сигналы могут иметь высокочастотное заполнение — сигнал несущей частоты. В связи с этим применяют двойное обозначение видов модуляции, например АИМ-ЧМ, КИМ-ФМ и др., где второй вид модуляции относится к сигналам несущей частоты.

В зависимости от используемого вида модуляции различают следующие разновидности телеизмерительных систем.

1. Системы интенсивности тока или напряжения, в которых изменение измеряемой величины приводит к соответствующему изменению амплитуды тока или напряже-

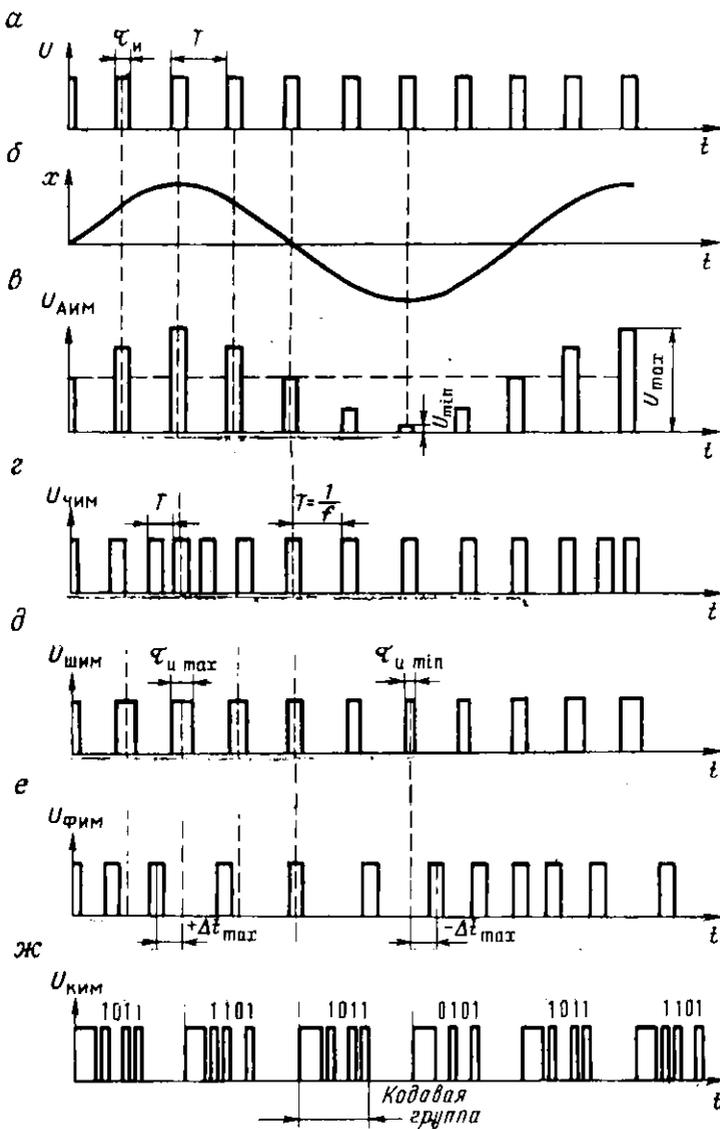


Рис. 3. Модуляция импульсного сигнала:  
 а — немодулированная последовательность импульсов; б — модулирующий сигнал; в — сигнал АИМ; г — сигнал ЧИМ; д — сигнал ШИМ; е — сигнал ФИМ; ж — сигнал КИМ

ния в канале связи (системы с АМ и АИМ, системы постоянного тока).

При использовании проводного канала связи предпочтительны системы передачи постоянного тока или напряжения, так как в этом случае уменьшаются погрешности, обусловлен-

ные непостоянством параметров линии связи по сравнению с системами переменного тока. Это связано с тем, что при установленном режиме передачи постоянный ток в линии связи зависит только от сопротивления проводов и качества их изоляции, тогда как величина переменного тока определяется также индуктивностью и емкостью линии связи. Изменение этих параметров часто приводит к существенному изменению амплитуды передаваемого сигнала.

II. Частотные системы, в которых под воздействием измеряемой величины изменяется частота переменного тока (системы с ЧМ) или импульсов постоянного тока (системы с ЧИМ).

Поскольку в таких системах определяющим является частотный признак электрического сигнала, изменение параметров канала связи не вносит дополнительной погрешности в результаты измерения, в чем заключается существенное преимущество частотных систем перед системами интенсивности.

III. Временные системы (системы времени), в которых измеряемая величина определяет длительность импульсов постоянного тока (системы с ШИМ), интервал между импульсами или положение импульсов относительно начального положения (система с ФИМ), а также угол сдвига фаз двумя синусоидальными токами — напряжениями (системы с ФМ).

При передаче информации в виде импульсов тока или напряжения изменение параметров линии связи приводит к искажению фронтов импульсов и появлению погрешности в результатах измерения. Уменьшение этой погрешности достигается путем соответствующего подбора длительности импульсов [10].

Фазо-синусоидальные системы требуют наличия двух проводных линий связи, что ограничивает их практическое применение.

IV. Цифровые (числовые) системы, т. е. системы с кодо-импульсной модуляцией.

В зависимости от числа одновременно измеряемых величин телеизмерительные системы делятся на одноканальные и многоканальные. В многоканальных системах передача измерительной информации наиболее просто обеспечивается многожильной проводной линией связи. При ограниченном числе токопроводящих жил, а также при использовании других каналов связи (акустический, гидравлический и др.) в многоканальных системах предусматриваются следующие способы разделения измерительных каналов.

1. Временное разделение (рис. 4), при котором осуществляется поочередная (последовательная) без перекрытия во времени передача сигналов по каналу связи. Системы с временным разделением каналов в свою очередь делятся на две группы:

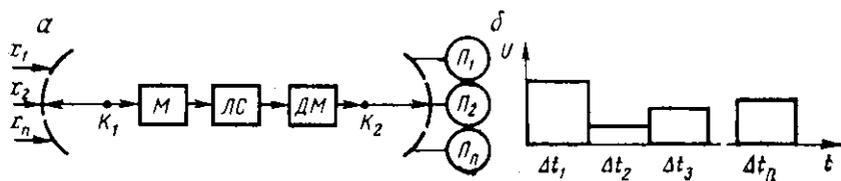


Рис. 4. Структурная схема (а) и временная диаграмма (б) многоканальной скважинной телеизмерительной системы с временным разделением каналов: М — модулятор; ЛС — линия связи; ДМ — демодулятор;  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_n$  — указывающие приборы;  $K_1, K_2$  — коммутаторы

а) спорадические системы, обеспечивающие возможность измерения определенной величины (по желанию наблюдателя или при возникновении определенных изменений в контролируемом объекте);

б) циклические системы, обеспечивающие поочередное измерение нескольких величин. В этом случае на входе и выходе канала связи устанавливаются синхронно и синфазно действующие переключающие устройства (коммутаторы), которые обеспечивают циклическое (через определенные промежутки времени  $\Delta t$ ) переключение измерительных каналов.

2. Частотное разделение (рис. 5), при котором каждому измерительному каналу отводится определенная полоса частот ( $\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_n$ ), для чего в блоке передачи информации устанавливаются модуляторы  $M_1, M_2, \dots, M_n$ . На поверхности с помощью фильтров  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  и демодуляторов  $DM_1, DM_2, \dots, DM_n$  осуществляются соответственно разделение и демодуляция сигналов. Для уменьшения взаимного влияния каналов между рабочими полосами частот оставляют свободные частотные интервалы. Такие системы обеспечивают одновременную (параллельную) передачу по линии связи информации о нескольких измеряемых величинах.

3. Кодовое разделение, при котором измерительные каналы образуются кодовыми группами с определенными ха-

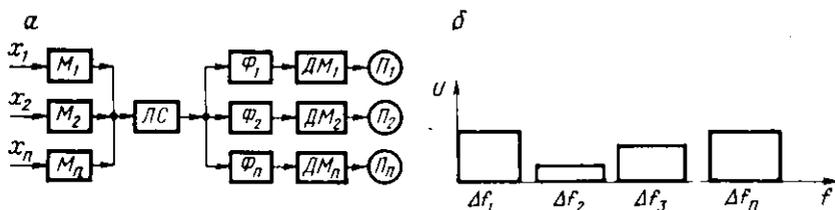


Рис. 5. Структурная схема (а) и частотная диаграмма (б) многоканальной скважинной телеизмерительной системы с частотным разделением каналов:

$M_1, M_2, M_n$  — модуляторы; ЛС — линия связи;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_n$  — фильтры;  $DM_1, DM_2, DM_n$  — демодуляторы;  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_n$  — указывающие приборы

раактеристиками (например, с определенными временными интервалами между импульсами). При изменении измеряемой величины происходит изменение параметров кодовой группы при постоянстве интервалов между импульсами (если этот признак был принят в качестве определяющего параметра кодовых групп). На приемной стороне линии связи происходит соответствующее разделение кодовых групп.

4. Разделение по уровню, осуществляемое в тех случаях, когда сигналы, передаваемые по нескольким измерительным каналам, различаются по амплитуде. Частным случаем разделения по уровню является разделение по полярности.

Реже применяются другие виды разделения сигналов: по фазе (при сдвиге фаз сигналов на  $90^\circ$ ), по форме и т. п.

Возможно комбинированное разделение каналов; например, для некоторых сигналов может быть применено частотное, а для других — временное разделение.

Следует отметить, что предпочтительно использование телеизмерительных систем с временным и кодовым разделением каналов, так как в этом случае рационально используется полоса частот в линии связи, упрощается электрическая схема за счет рационального использования ряда элементов и т. д.

## § 2. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКВАЖИННЫХ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

### Статические погрешности

Статические погрешности отражают степень соответствия показаний измерительного прибора действительному значению измеряемой величины и могут быть выражены как в единицах измеряемой величины, так и в относительных единицах. В зависимости от этого различают:

абсолютную погрешность  $\Delta$ , равную разности между измеренным  $x^*$  и действительным  $x$  значениями измеряемой величины:

$$\Delta = x^* - x;$$

относительную погрешность  $\delta$ , равную отношению абсолютной погрешности  $\Delta$  к действительному значению  $x$  измеряемой величины:

$$\delta = \Delta/x;$$

приведенную погрешность  $\epsilon$ , равную отношению абсолютной погрешности  $\Delta$  к максимальному значению измеряемой величины  $x_{\max}$ :

$$\epsilon = \Delta/x_{\max}.$$

Относительная и приведенная погрешности могут выражаться как в относительных единицах, так и в процентах.

Статические погрешности измерения зависят от многих факторов (условий измерения, особенностей изучаемого объекта, точности измерительного прибора и т. п.) и по-разному проявляются в результатах измерения. Выделяют следующие виды статических погрешностей.

1. **Систематические погрешности**, которые постоянны или изменяются по определенным, известным заранее законам, зависящим от источников их возникновения (окружающей температуры, внешних электрических и магнитных полей, нестабильности питающего тока и др.). Влияние систематических погрешностей может быть сведено к минимуму путем сохранения постоянства условий измерения, использования различных компенсирующих элементов, а также введения соответствующих поправок в полученные результаты.

2. **Случайные погрешности**, которые имеют непостоянный характер; зависимость их от вызывающих факторов не может быть должным образом исследована ввиду сложности и нестационарности процессов, приводящих к появлению этих помех. Влияние случайных погрешностей проявляется в отсутствии повторяемости результатов при многократных измерениях в одних и тех же условиях.

3. **Промехи** — это погрешности, явно не соответствующие правильному результату измерения. Причины их возникновения — несоблюдение надлежащих условий измерения, наличие погрешности в отсчете показаний, градуировке аппаратуры или вычислениях. При обработке опытных данных наблюдения, содержащие промахи, исключают как недостоверные.

Часто телеизмерительные системы характеризуются максимальными из возможных значений абсолютной  $\Delta_{\max}$  или приведенной  $\epsilon_{\max}$  погрешностей. При этом выделяют максимальную погрешность при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных техническими условиями (ее называют *основной*), и отдельно погрешности, обусловленные воздействием каждого из внешних факторов (их называют *дополнительными*). Совокупность максимальных значений основной и дополнительной погрешностей служит основанием для отнесения телеизмерительной системы к определенному классу точности.

### **Динамические характеристики**

Динамические характеристики отражают работу скважинной телеизмерительной системы при измерении меняющихся во времени величин. К динамическим характеристикам относятся время установления показаний измерительного (регистрирующего) прибора и динамические погрешности измерения.

Временем установления показаний называют промежуток времени с момента изменения значения измеряемой

величины до момента установления соответствующих показаний прибора.

Это время устанавливается теоретически, если известно уравнение движения подвижной части прибора и можно найти хотя бы приближенное решение этого уравнения. Возможно также экспериментальное определение времени установления путем изучения переходных процессов измерительного прибора или с помощью моделирующих устройств.

Среди динамических погрешностей выделяют амплитудную и фазовую погрешности. Амплитудная погрешность отражает степень несоответствия показаний измерительного (регистрирующего) прибора действительному значению измеряемой величины. Она проявляется в том, что выходной сигнал скважинной телеизмерительной системы еще не успевает достигнуть своего номинального значения, а входная величина уже начинает изменяться. Фазовая погрешность проявляется в отставании по фазе выходного сигнала по отношению к изменению входной величины.

Динамические характеристики системы зависят не только от инерционности отдельных ее узлов, определяемой особенностями электрической схемы и конструкции, но и от характера изменения во времени измеряемой величины. В связи с этим при конструировании скважинных телеизмерительных систем необходимо учитывать специфику изучаемого объекта и процесса измерения.

### **Помехоустойчивость**

Помехоустойчивостью принято называть способность телеизмерительной системы обеспечивать измерение изучаемой величины с погрешностью, не превышающей допустимую.

Искажение результатов измерения, связано, как правило, с воздействием различных помех, проникающих в измерительный канал по входным цепям, цепям питания, в результате действия внешних электромагнитных полей, влияния соседних каналов (в многоканальных системах) и т. п. Наличие помех приводит не только к появлению погрешностей в результатах измерения, но иногда и к нарушению работы измерительного прибора.

Помехоустойчивость телеизмерительной системы определяется совокупностью многих факторов: характером помех, соотношением уровней полезного сигнала и помех, принципом действия и динамическими характеристиками системы и др.

Различают следующие виды помех.

Флуктуационные помехи, представляющие собой хаотическую последовательность импульсов, амплитуда которых обычно не превышает уровня полезного сигнала. Это позволяет

уменьшить влияние флуктуационных помех введением элементов, настроенных на определенный уровень, несколько превышающий амплитуду помех.

Синусоидальные помехи, которые состоят из одного или нескольких гармонических колебаний и обычно являются результатом воздействия силовых цепей или промышленных установок. Влияние таких помех обычно устраняют с помощью полосовых фильтров, пропускающих сигнал информации определенной частоты, или заграждающих фильтров, настроенных на частоту помехи. В случае совпадения частоты сигнала информации и помехи последняя может быть устранена с помощью различных фазочувствительных элементов.

Импульсные помехи, проявляющиеся в виде одиночных импульсов или серии импульсов, амплитуда, длительность и период следования которых в общем случае являются случайными величинами. Источниками таких помех служат промышленные установки, коммутирующие устройства, плохой контакт в электрических соединениях и т. п.

Основной частью телеизмерительной системы, наиболее подверженной воздействию помех, является канал связи.

Мерой помехоустойчивости скважинной телеизмерительной системы служит динамический диапазон определяемый как

$$D = x_{\max}/\Delta, \quad (1.5)$$

где  $x_{\max}$  — максимальное значение измеряемой величины;  $\Delta$  — абсолютная погрешность измерения.

Динамический диапазон рассчитывают по формуле

$$D = 20 \lg \frac{x_{\max}}{\Delta} \quad (1.6)$$

и выражают в децибеллах (дБ).

### Информационные критерии

Понятия «измерение» и «информация» относятся к числу основных понятий при геофизических исследованиях скважин. Под измерением обычно понимают комплекс экспериментальных операций, выполняемых с целью определения значения измеряемой величины, выраженного в принятых единицах. Измерение, как правило, является многооперационной процедурой, осуществляемой для получения сведений о состоянии материального мира. Совокупность таких сведений охватывается общим понятием информации. Наибольшую ценность имеет измерительная информация, представляющая собой полученные при измерении значения физической величины. Как видно, понятие измерительной информации охватывает не сами изучаемые объекты, а их существенные и предста-

вительные характеристики в виде чисел, символов, образов и т. п.

В соответствии с этим определением под геофизической измерительной информацией следует понимать количественные сведения о каком-либо физическом параметре (или совокупности параметров) горных пород, полученные в результате измерения в скважине с помощью технических средств, взаимодействующих с горными породами.

В качестве меры количества информации может быть принято уменьшение неопределенности, происшедшее в результате измерения. Если обозначить через  $p(x_i)$  вероятность некоторого события до измерения, а через  $p_n(x_i)$  — вероятность того же события после измерения, то мерой количества информации следует считать функцию

$$I = f\left(\frac{p_n(x_i)}{p(x_i)}\right). \quad (1.7)$$

К. Шенноном установлено, что количество информации в одном сообщении о равновероятных событиях наилучшим образом выражается логарифмической функцией

$$I = \log_a \frac{p_n(x_i)}{p(x_i)}. \quad (1.8)$$

Если в результате измерения ситуация полностью определена, т. е.  $p_n(x_i) = 1$ , то

$$I = -\log_a p(x_i). \quad (1.9)$$

При  $a=2$  результат измерения выражается в двоичных единицах (или битах от английского Binary digit) информации:

$$I = -\log_2 p(x_i). \quad (1.10)$$

Используемые мера количества информации и единица информации разработаны для дискретных сообщений. Между тем геофизическая измерительная информация представляет собой непрерывное сообщение, т. е. непрерывную функцию того или иного геофизического параметра в зависимости от глубины  $y_i = \varphi(H)$  или при постоянной скорости каротажа — в зависимости от времени  $y_i = f(t)$ . Поскольку эти функции неперiodические, то они имеют сплошной (неограниченный) спектр частот. Однако, как показано в работе [15], геофизическую информацию можно с известной степенью точности рассматривать как функцию с ограниченным спектром, т. е. спектром, не содержащим составляющих с частотой выше некоторой граничной частоты  $f_c$ , обычно называемой частотой среза. Согласно теореме Котельникова, каждая непрерывная функция с ограниченным спектром частот может быть представлена в виде отдельных отсчетов

(т. е. дискретной), если максимальный интервал между отсчетами не превышает

$$\Delta t = \frac{1}{f_c}. \quad (I.11)$$

В пределах абсолютной погрешности измерения  $\Delta$  значения измеряемой величины практически неразличимы, поэтому представление непрерывной функции в виде ее дискретных значений вполне допустимо и дает возможность оценить количество информации, передаваемой по измерительному каналу СТС. Если все возможные (дискретные) значения измеряемой величины в пределах от нуля до  $x_{\max}$  считать равновероятными, то количество информации (в дв. ед.) может быть подсчитано как

$$I = \log_2 \frac{x_{\max}}{\Delta} = \log_2 D. \quad (I.12)$$

Из формулы (I.12) следует, что чем меньше погрешность измерения, тем больше количество информации, передаваемой телеизмерительной системой.

Пропускной способностью измерительного канала называется количество информации, которое может быть передано по измерительному каналу в единицу времени (в дв. ед./с):

$$C = I/\Delta t. \quad (I.13)$$

Пропускная способность многоканальной телеизмерительной системы определяется числом  $n$  одновременно действующих измерительных каналов:

$$C_c = nC. \quad (I.14)$$

Максимальная пропускная способность реальных телеизмерительных систем во многом определяется пропускной способностью используемого канала связи, которая, в свою очередь, зависит от выбранного периода дискретизации (интервала времени между отдельными отсчетами), полосы пропускания частот канала связи и соотношения уровней полезного сигнала и помех.

### Надежность

Под термином «надежность» понимается свойство телеизмерительной системы выполнять необходимые функции в определенный период времени и при заданных условиях эксплуатации. Основным показателем надежности является безотказность, определяемая следующими параметрами:

1) вероятностью ( $p$ ) безотказной работы системы, т. е. вероятностью того, что при заданных условиях

эксплуатации и в определенном интервале времени не произойдет отказа<sup>1</sup>;

2) средним временем безотказной работы  $T$ , т. е. ожидаемым временем исправной работы системы до первого отказа;

3) интенсивностью отказов  $\lambda$  — отношением числа отказавших изделий (систем) за некоторый промежуток времени к числу работоспособных изделий (систем) в начале этого промежутка.

Иногда для оценки надежности применяют и другие показатели.

На рис. 6 изображена типичная кривая интенсивности отказов.

Участок *I* (от нуля до  $t_1$ ) характеризуется уменьшением интенсивности отказов и соответствует начальному периоду работы (так называемой приработке) системы. На этом этапе выходят из строя наименее надежные, недоброкачественные элементы, выявляются все дефекты сборки, монтажа и настройки. Продолжительность периода приработки зависит от сложности аппаратуры, культуры производства и длится от нескольких десятков до нескольких сотен часов.

Основным и наиболее продолжительным по времени является участок *II* (от  $t_1$  до  $t_2$ ). Отказы в этот период носят случайный характер, но средняя частота их резко снижается и становится приблизительно постоянной. Длительность этого периода иногда называют условной долговечностью. Она зависит от условий эксплуатации аппаратуры, ее сложности и многих других причин.

Участок *III* (начинающийся за  $t_2$ ) характеризуется возрастанием интенсивности отказов вследствие износа и старения элементов и материалов, из которых выполнены блоки телеизмерительной системы.

На надежность телеизмерительной системы влияет много факторов, определяемых условиями эксплуатации: окружающая температура и скорость ее изменения, электрический режим, вибрационные воздействия, механические удары, линейные ускорения, влажность, внешнее давление и др.

Отдельные узлы и элементы в телеизмерительных системах связаны между собой так, что отказ хотя бы одного из них на-

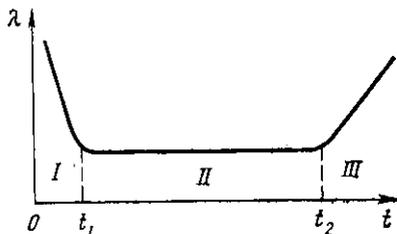


Рис. 6. Зависимость частоты отказов  $\lambda$  радиоэлектронной аппаратуры от времени  $t$  ее работы

<sup>1</sup> Под отказом понимается событие, которое приводит к невозможности использования хотя бы одного из рабочих свойств системы.

рушает работоспособность всей системы. С точки зрения надежности такое соединение является последовательным. В этом случае вероятность безотказной работы системы, содержащей  $n$  элементов, каждый из которых характеризуется вероятностью безотказной работы  $p_0(t)$ , будет определяться выражением

$$p(t) = p_0^n(t). \quad (I.15)$$

Например, если для каждого элемента  $p_0(t) = 0,99$ , то аппаратура, состоящая из 100 таких элементов, будет иметь  $p(t) = 37\%$ , из 250 элементов — 8%, а из 500 элементов — только 1%.

Таким образом, надежность телеизмерительной системы зависит от количества использованных в ней элементов и деталей, их надежности, правильности выбора, технологичности конструкции и т. д. Повышение надежности может быть достигнуто путем допустимого упрощения схемы телеизмерительной системы, выбора соответствующих элементов, материалов и конструкций, тщательности изготовления, а также специальными приемами — использованием элементов в разгруженном режиме, тренировкой элементов перед применением их в аппаратуре и резервированием.

### § 3. СОСТАВ И НАЗНАЧЕНИЕ БЛОКОВ СКВАЖИННЫХ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Обобщенная структурно-функциональная схема телеизмерительной системы изображена на рис. 7. В ее состав входят зонд 1, блок первичных измерительных преобразователей 2, блок передачи информации 3, линия связи, блок приема информации 4 и блок представления и обработки результатов измерения 5. Часть системы (блоки 1, 2 и 3) располагается в скважине, другая часть (блоки 4 и 5) — на поверхности. Линией связи обеих частей системы является геофизический кабель.

Зонд служит для создания в околоскважинном пространстве физического поля, измерения его параметров и характера изменения по стволу скважины. Для формирования поля с заданными параметрами применяется источник (излучатель), а для измерения — приемник. Зонды, используемые для изучения естественных физических полей, содержат только приемник. Работа источника поля осуществляется по заданной заранее программе либо по команде с поверхности (от человека-оператора). В зависимости от количества одновременно измеряемых величин, принципа измерения и т. п. зонд может содержать несколько источников поля и приемников.

В ряде случаев (измерение диаметра, профиля, искривления скважины и т. п.) восприятие измерительной информации осуществляется с помощью датчика — конструктивной совокуп-

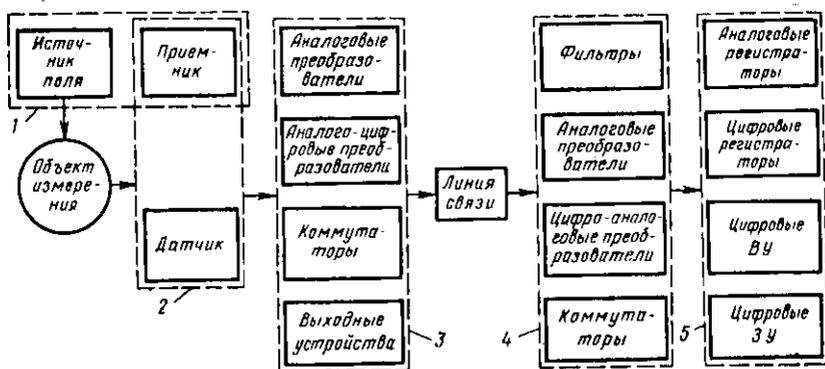


Рис. 7. Обобщенная структурно-функциональная схема скважинной телензимерительной системы

ности нескольких измерительных преобразователей, размещенных вблизи изучаемого объекта.

Приемник зонда и датчик составляют блок первичных преобразователей геофизической информации. Основное назначение этого блока — преобразование измеряемой величины в электрический сигнал, удобный для дальнейших операций.

Блок передачи информации служит для кодирования передаваемой информации, т. е. представления ее в форме, удобной для передачи по линии связи. В зависимости от способа передачи информации этот блок может содержать: а) аналоговые преобразователи (измерительные усилители, выпрямители, генераторы-модуляторы и др.); б) аналого-цифровые преобразователи (АЦП); в) коммутаторы; г) устройства выдачи сигналов кодо-импульсной модуляции и тактовых импульсов (синхроимпульсов); д) выходные суммирующие и согласующие устройства и др.

В многоканальных телензимерительных системах такие преобразования осуществляются в нескольких передающих каналах.

В отдельных случаях измерительная информация с выхода блока первичных преобразователей может быть передана по линии связи без дополнительных преобразований.

Блок приема информации, служащий для декодирования воспринимаемых сигналов, содержит один или несколько измерительных каналов, обычно наделенных избирательными свойствами, что позволяет выделить из довольно сложного поступающего сигнала информацию, характеризующую измеряемую величину. В общем случае в состав блока входят: а) каналные фильтры; б) аналоговые преобразователи

(измерительные усилители, выпрямители, демодуляторы и др.); в) цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП); г) коммутаторы; д) устройства выделения тактовых импульсов (синхронимпульсов) в системах с КИМ и др.

На выходе блока приема информации обычно формируется электрический сигнал, удобный для измерения, регистрации или соответствующей обработки.

Аналоговые и цифровые регистраторы, цифровые вычислительные (ВУ) и запоминающие (ЗУ) устройства образуют блок представления и обработки результатов измерения. Регистрирующие устройства, входящие в этот блок, обычно совмещают функции измерения и регистрации результатов в виде каротажных диаграмм (светолучевые осциллографы, автоматические потенциометры), перфоленг или перфокарт (регистраторы типа ПЛК-4, Ф005 и др.), записи на магнитный носитель (регистраторы типа ПМЗ-3, «Триас» и др.).

Как указывалось выше, в состав телеизмерительной системы обычно входят элементы телеуправления (ТУ), обеспечивающие подключение соответствующего зонда (датчика), установку требуемого предела измерения и т. п. В качестве переключающих устройств в скважинной части системы применяются различные переключатели и реле. Управление работой переключающих устройств осуществляется с поверхности.

Система телесигнализации (ТС) включает в себя устройства индикации подключенного зонда (датчика), предела измерения, контроля величины питающего тока и т. п.

Питается телеизмерительная система обычно от источников, расположенных на поверхности. В зависимости от вида подаваемого по геофизическому кабелю тока (переменный, постоянный) в состав скважинной части телеизмерительной системы могут входить преобразующие выпрямительные и стабилизирующие элементы для питания различных цепей электрической схемы. В отдельных случаях скважинная часть системы снабжается автономным источником электропитания (например, батареей сухих элементов), однако такой способ применим лишь при небольшой потребляемой мощности или при исследовании неглубоких скважин.

Обеспечение работоспособности скважинной части системы достигается ее конструктивным оформлением в виде скважинного прибора. Основными конструктивными элементами скважинного прибора являются:

- 1) охранный кожух, служащий для герметизации тех узлов и элементов системы, которые по условиям эксплуатации не должны иметь непосредственного контакта с окружающей средой. Конструкция охранный кожуха обеспечивает подключение выхода блока передачи информации к жилам геофизического кабеля и подсоединение груза для улучшения проходности прибора по стволу скважины;

2) центрирующие и прижимные устройства, применяющиеся в случаях, когда по условиям измерения необходимо центрирование зонда (датчика) по оси скважины или его прижатие к стенке скважины. Центрирующие и прижимные устройства нередко имеют механизм дистанционного управления, входящего в систему телеуправления.

В состав наземной части телеизмерительной системы помимо указанных выше блоков входят различные вспомогательные устройства, обеспечивающие контроль за перемещением зонда (датчика) по стволу скважины, определение глубины его погружения, измерение натяжения геофизического кабеля, нанесение и отбивку меток глубин и др. Наземные блоки системы (в том числе источники электропитания, элементы телесигнализации, телеуправления и вспомогательные устройства) обычно выполняются в виде панелей, имеющих определенное функциональное назначение; они унифицированы по размерам, внешним соединениям и т. п. Совокупность панелей, размещенных в общем корпусе, образует аппаратный стенд измерительной промысловой геофизической лаборатории.

Скважинный прибор с соответствующими преобразователями блока приема информации составляет скважинную геофизическую аппаратуру.

#### § 4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В предыдущих разделах неоднократно отмечалось, что геофизические исследования представляют собой многооперационную процедуру, сопровождающуюся непрерывным преобразованием измерительной информации. Поэтому скважинная телеизмерительная система может рассматриваться как совокупность различного рода измерительных преобразователей.

Под измерительным преобразователем понимается устройство, в котором с известной точностью реализуется однозначная функциональная зависимость между двумя величинами, одна из которых ( $x$ ) является входной, а другая ( $y$ ) — выходной [18]. Функциональная зависимость  $y=f(x)$  носит название передаточной характеристики преобразователя. Большинство преобразователей имеет линейную характеристику, т. е. прямую пропорциональную зависимость между изменением входной величины  $\Delta x$  и соответствующим приращением выходной величины  $\Delta y$ .

Отношение  $K=\Delta y/\Delta x$  называется чувствительностью (коэффициентом передачи) преобразователя. У преобразователя с линейной характеристикой величина  $K$  постоянна, у преобразователей с нелинейной (показательной, логарифмической и др.) характеристикой (функциональных

преобразователей) чувствительность меняется в соответствии с входной величиной.

Чувствительность (коэффициент передачи) системы, состоящей из нескольких последовательно соединенных преобразователей, определяется произведением чувствительностей всех преобразователей. Для сохранения постоянства чувствительности системы необходимо, чтобы характеристики каждого преобразователя были строго линейны. Однако чувствительность каждого преобразователя постоянна лишь на определенном участке, ограниченном с одной стороны пределом преобразования, а с другой — порогом чувствительности.

Пределом преобразования преобразователя называется максимальное значение входной величины, которое может быть преобразовано без искажения и повреждения преобразователя.

Порог чувствительности преобразователя — это минимальное значение входной величины, которое уверенно обнаруживается преобразователем.

Реальная передаточная характеристика преобразователя всегда отличается от номинальной, т. е. указанной в его паспорте и используемой при работе с данным преобразователем. Это отличие проявляется в виде систематического отклонения реальной характеристики от номинальной, в зависимости характеристики от направления изменения входной величины (гистерезис), в неравномерном разбросе и т. д. Кроме того, реальная характеристика может быть подвержена самопроизвольному изменению во времени (дрейфу) и изменяться под влиянием посторонних факторов.

Совместное действие перечисленных причин приводит к неоднозначности реальной характеристики преобразователя: характеристика из линии на графике превращается в полосу неопределенности, половина ширины которой есть номинальная погрешность преобразователя.

Ширина полосы неопределенности может оставаться постоянной для всей характеристики преобразователя (рис. 8, а); в этом случае погрешность преобразования  $\Delta_0$  называется аддитивной, или погрешностью нуля. В других случаях ширина полосы неопределенности увеличивается с ростом входной величины  $x$ . Такая погрешность называется мультипликативной, или погрешностью чувствительности  $\delta x$  (рис. 8, б). Обычно аддитивная и мультипликативная погрешности присутствуют одновременно, в результате чего полоса неопределенности реальных преобразователей распределяется, как показано на рис. 8, в.

Общая погрешность преобразования для каждого значения  $x$  — текущая погрешность преобразователя — определяется выражением

$$\Delta = \Delta_0 + \delta x. \quad (I.16)$$

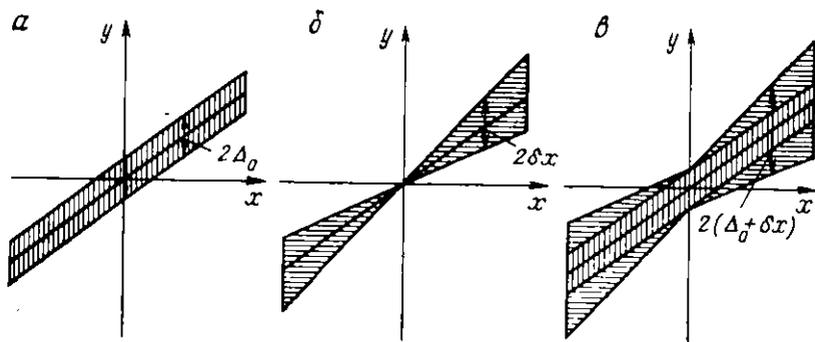


Рис. 8. Виды погрешностей измерительных преобразователей.  
Погрешность: а — аддитивная, б — мультипликативная, в — текущая

Точность измерения в большинстве случаев оценивается относительной погрешностью. Если абсолютная погрешность измерения определяется только мультипликативной составляющей, то относительная погрешность  $\delta$  постоянна для любого значения  $x$  и равна  $\delta_0$ . Если же погрешность носит аддитивный характер, то относительная погрешность, равная  $\delta_0 = \Delta_0/x$ , возрастает по мере уменьшения  $x$  и при  $x \rightarrow 0$  стремится к бесконечности. При  $x = \Delta_0$   $\delta = 1$  (т. е. 100%). Исходя из этого, значение  $x = \Delta_0$  и принимают в качестве порога чувствительности преобразователя. Отсюда полным или динамическим, диапазоном преобразователя называется диапазон, в котором относительная погрешность не превышает 100%. Иногда динамический диапазон выражают через номинальное значение  $x_n$  входной величины и аддитивную погрешность преобразователя, приведенную к его входу  $\Delta x_0 = \Delta_0/K$ :

$$D = 20 \lg \frac{x_n}{\Delta x_0}. \quad (1.17)$$

Поскольку вблизи порога чувствительности относительная погрешность достигает очень больших значений, наряду с понятием динамического диапазона используется понятие рабочего диапазона — диапазона измеряемых величин, в котором относительная погрешность не превышает заданного (номинального) значения.

Как видно, динамический и рабочий диапазоны являются мерой помехоустойчивости измерительного преобразователя.

Если преобразуемая величина изменяется во времени, возникают динамические погрешности преобразователя — амплитудная и фазовая.

Измерительные преобразователи, использующиеся в скважинных телеизмерительных системах, должны удовлетворять следующим требованиям:

1) характеризоваться непрерывностью действия, т. е. обеспечивать возможность получения непрерывной зависимости выходной величины от входной;

2) иметь достаточную чувствительность и удобное согласование с другими узлами телеизмерительной системы;

3) обладать возможно большим рабочим диапазоном;

4) характеризоваться высокой точностью преобразования, т. е. иметь возможно меньшие статические и динамические погрешности;

5) не оказывать существенного обратного влияния на измеряемую величину.

По назначению измерительные преобразователи, применяющиеся в скважинных телеизмерительных системах, могут быть классифицированы на три группы:

а) преобразователи неэлектрических величин в электрические;

б) преобразователи одних электрических величин в другие;

в) преобразователи электрических сигналов в отклонение указателя измерительного (регистрирующего) прибора; сюда же входят преобразователи, обеспечивающие иную форму представления результатов измерения.

В данном пособии ограничимся рассмотрением преобразователей только первой и третьей группы, применяющихся в скважинных телеизмерительных системах. Измерительные преобразователи электрических величин с достаточной полнотой описаны в технической литературе.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

---

Значительное число параметров, изучаемых при геофизических исследованиях скважин (естественная и искусственно созданная радиоактивность, упругие, магнитные, тепловые свойства горных пород; диаметр, азимут и зенитный угол скважины и др.) или контролируемых в процессе проведения геофизических работ (глубина спуска и скорость перемещения скважинного прибора и др.), представляет собой неэлектрические величины. В качестве первичных преобразователей информации об этих величинах используют ИП первой группы — преобразователи неэлектрических величин в электрические. Выбор типа и конструкции такого преобразователя в каждом конкретном случае определяется видом входной неэлектрической  $x$  и выходной электрической  $y$  величины.

Входными величинами измерительного преобразователя могут быть: а) механические — линейные или угловые перемещения, давление, скорость, ускорение, частота колебаний и т. п.; б) физические — магнитные, тепловые, упругие и другие свойства среды, интенсивность и спектральный состав излучения и т. п.; в) химические — концентрация вещества и его количество.

Выходными электрическими величинами измерительного преобразователя являются: активное, индуктивное или емкостное сопротивление, электродвижущая сила или падение напряжения, частота и фаза переменного тока и т. п.

Измерительные преобразователи этой группы различаются по назначению, конструкции, принципу действия и другим признакам.

#### § 1. КОНТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Контактными называют измерительные преобразователи, в которых в результате внешнего воздействия происходит замыкание или размыкание контактов, управляющих электрической цепью. Работа контактных преобразователей может быть связана с влиянием механических (линейные или угловые перемещения) или физических (температура, магнитное поле) величин.

Наибольшее распространение получили контактные преобразователи, содержащие несколько пар контактов. Такие

преобразователи применяются, например, в инклинометрах для подключения соответствующего указателя к измерительной схеме, в автоматических потенциометрах типа ПАСК-8 для отключения реохорда при достижении пишущим устройством края шкалы и других типах геофизической аппаратуры.

Контактные преобразователи используют также для преобразования электрического тока. Примером может служить однопольный контактный вибропреобразователь, установленный на входе нуля-органа автоматического потенциометра типа ПАСК-8. Аналогичный по устройству контактный ИП, выполненный в виде поляризованного реле, применяется в измерительной схеме геофизической лаборатории АКС/Л-7, где является составной частью фазочувствительного выпрямителя разности потенциалов кажущегося сопротивления ( $U_{КС}$ ).

Серьезным недостатком контактных вибропреобразователей является их механическая нестабильность, требующая весьма тщательной технологии производства и регулировки преобразователей. Наличие подвижных контактов вносит элемент ненадежности и ограничивает срок службы устройства. Следует, однако, иметь в виду, что в измерительных схемах контакты вибропреобразователей коммутируют ничтожно малые мощности, поэтому срок их службы и надежность неизмеримо выше, чем в контактных устройствах энергетических систем. Практически нарушение работы контактных преобразователей происходит при их разрегулировке.

## § 2. РЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В резистивных преобразователях изменение входной величины приводит к изменению сопротивления преобразователя электрическому току. В зависимости от вида преобразуемой величины различают несколько разновидностей резистивных преобразователей.

### Реостатные (потенциметрические) преобразователи

Под реостатным преобразователем понимают переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается в соответствии с изменением входной величины, какой обычно является линейное или угловое перемещение изучаемого объекта. Выходной величиной такого преобразователя является активное сопротивление.

Реостатные преобразователи выполняют в виде намотки из изолированной манганиновой, константановой или вольфрамовой (а иногда из специальных сплавов) проволоки на каркасе из изолирующего материала. Форма каркаса может быть самой разнообразной: прямоугольной, кольцевой и др.

Характеристика реостатного преобразователя  $R=f(x)$  зависит от распределения сопротивления по пути движения контакта и может быть линейной или нелинейной (показательной, логарифмической и др.). Нелинейность получают путем использования каркаса переменной высоты, намотки с переменным шагом или проводом переменного сечения, шунтирования отдельных частей реостата постоянными резисторами и т. п.

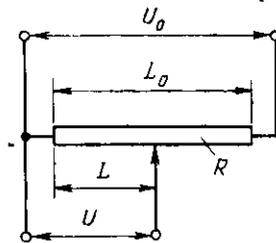


Рис. 9. Принципиальная схема потенциометрического преобразователя

Часто реостатный преобразователь включается в электрическую цепь делителем напряжения, и тогда он называется потенциометрическим (рис. 9). Выходной величиной такого преобразователя является падение напряжения между подвижным и одним из неподвижных контактов. Характеристика потенциометрического преобразователя (зависимость выходного напряжения  $U$  от перемещения  $L$  подвижного контакта) соответствует закону изменения сопротивления вдоль потенциометра. В преобразователях с линейной характеристикой выходное напряжение пропорционально отклонению подвижного контакта:

$$U = \frac{U_0}{L_0} L = K_{\pi} L, \quad (II.1)$$

где  $U_0$  — падение напряжения на всем резисторе длиной  $L_0$ ;

$K_{\pi}$  — чувствительность преобразователя.

Таким образом, увеличение чувствительности потенциометрического преобразователя может быть достигнуто путем повышения питающего напряжения.

Реостатные и потенциометрические преобразователи являются дискретными (ступенчатыми), так как непрерывному изменению входной величины обычно соответствует скачкообразное изменение сопротивления, определяемое переходом подвижного контакта преобразователя с одного витка (или группы витков) на другой (другую группу). Это обстоятельство обуславливает погрешность измерения, уменьшающуюся с увеличением числа витков  $w$  обмотки потенциометра. Поэтому у проводочных потенциометрических преобразователей максимальное значение чувствительности  $K_{\pi \max}$  зависит от допустимой (из соображений точности преобразования) величины ступенчатости, определяемой падением напряжения  $\Delta U$  на одном витке обмотки потенциометра:

$$K_{\pi \max} = \frac{\Delta U w}{L_0}; \quad (II.2)$$

при намотке вплотную

$$K_{п \max} = \frac{\Delta U}{d}, \quad (II.3)$$

где  $d$  — диаметр провода.

Чувствительность потенциометрических преобразователей обычно не превышает 3—5 В/мм. На точность преобразования влияют стабильность питающего напряжения, тщательность изготовления и температурная стабильность преобразователя, а также другие факторы. Погрешность их в среднем равна 0,2—0,5 %.

Преимущества потенциометрических преобразователей: простота конструкции и регулировки, малые масса и габариты, возможность питания постоянным и переменным током и др. Недостаток — наличие подвижного контакта, что снижает надежность и ограничивает срок службы преобразователей.

Потенциометрические преобразователи широко применяются в геофизической аппаратуре. Их используют в приборах для измерения диаметра и искривления скважин, системах контроля за натяжением геофизического кабеля, автоматических потенциометрах и других устройствах.

### Терморезисторы

Измерительные преобразователи этого типа основаны на свойстве некоторых проводников и полупроводников изменять свое активное сопротивление в результате теплообмена с окружающей средой.

Интенсивность теплообмена в общем случае определяется: а) температурой окружающей газовой или жидкой среды и самого преобразователя; б) физическими свойствами (теплопроводностью, плотностью, вязкостью и т. п.) среды; в) скоростью движения среды относительно преобразователя; г) геометрическими размерами и конструкцией преобразователя, а также состоянием его поверхности.

Зависимость температуры (а следовательно, и сопротивления) терморезисторов от перечисленных факторов может быть использована для измерения различных незлектрических величин — температуры, скорости, плотности, концентрации и др.

Для достижения необходимой точности преобразования материалы, применяемые в качестве терморезисторов, должны обладать возможно большим температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha$  и высоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . С этой точки зрения наибольший интерес представляют объемные полупроводниковые терморезисторы, у которых величина  $\alpha$  достигает (0,03÷0,04) 1/°C, однако сильно зависит от температуры. Поэтому основными материалами для терморезисторов являются чистые металлы — платина, медь и

никель, которые обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления, колеблющимся (в интервале 0—100 °С) от 0,0035 до 0,0068 1/°С. Зависимость сопротивления металлов от температуры в общем случае нелинейна, однако для измерения в ограниченном диапазоне температур ее часто представляют в виде линейной функции  $R=f(T)$ . Например, для медного терморезистора обычно пользуются двучленной формулой

$$R_T = R_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)], \quad (II.4)$$

где  $R_0$  — сопротивление при температуре  $T_0$ ;  $\alpha_0$  — температурный коэффициент сопротивления для интервала температур, начинающегося с температуры  $T_0$ .

Следует обратить внимание на то, что в этой формуле  $R_0$  должно соответствовать начальному значению того интервала температур, для которого задана величина  $\alpha_0$  [12]. В противном случае возможны существенные погрешности в расчете величины сопротивления. Пусть величина  $\alpha_0$  задана для температурного диапазона  $T_0 - T_K$  (рис. 10). Тогда изменение сопротивления терморезистора в указанном диапазоне температур будет определяться отрезком прямой  $AB$ .

Сопротивление  $R_T$ , соответствующее температуре  $T$  внутри рассматриваемого диапазона, может быть определено из выражения

$$R_T = R_0 + (T - T_0) \operatorname{tg} \beta. \quad (II.5)$$

Сравнив это выражение с формулой (II.4), получим

$$\operatorname{tg} \beta = R_0 \alpha_0; \quad \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \beta}{R_0}.$$

Как видно, величина  $\alpha_0$  определяется не только углом наклона характеристики терморезистора, но и значением  $R_0$ .

Выбор материала терморезистора определяется также его химической инертностью по отношению к исследуемой среде. С этой точки зрения наибольший интерес представляет платина, которая может быть использована для измерения температуры до 1000—1200 °С. Платину нельзя использовать в восстановительной среде (углерод, пары натрия, калия, кремния и др.). Медные терморезисторы, как правило, применяют в диапазоне температур от —50 °С до 180 °С в атмосфере, свободной от влажности и корродирующих газов. При более высокой температуре происходит окисление меди. Недостатком меди является также ее низкое удельное сопротивление (около 0,0175 Ом · мм<sup>2</sup>/м).

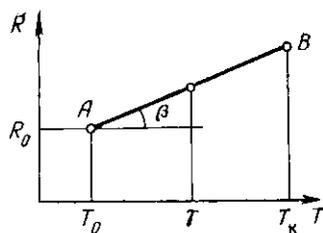


Рис. 10. Характеристика медного терморезистора

Чувствительность терморезисторов определяется выражением

$$K_T = \frac{\Delta R}{\Delta T} = R_0 \alpha_0, \quad (11.6)$$

которое может быть легко получено из формулы (11.4).

При геофизических исследованиях обычно приходится измерять температуру, меняющуюся во времени. Поэтому представляется определенным интерес рассмотреть работу терморезисторов в динамическом режиме.

Известно [12], что процесс нагревания или охлаждения любого тела включает в себя следующие стадии (рис. 11): 1) стадию дорегулярного (неупорядоченного) режима, характер и продолжительность которой определяются первоначальным распределением температур тела (участок I); продолжительность этой стадии ( $t_1 - t_0$ ) невелика; 2) стадию регулярного режима, не зависящую от первоначального распределения температур тела (участок II); 3) стадию теплового равновесия (участок III), наступающую теоретически через бесконечный, а практически — через достаточно большой промежуток времени.

Таким образом, основное время нагревания или охлаждения тела занимает регулярный режим. Тепловое состояние тела на этой стадии может быть описано дифференциальным уравнением

$$\frac{d(T_c - T_n)}{dt} = -\frac{1}{\tau} (T_c - T_n) \quad (11.7)$$

или

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \theta, \quad (11.8)$$

где  $T_c$  — температура среды;  $T_n$  — температура преобразователя;  $\theta = T_c - T_n$  — разность мгновенных значений температур среды и преобразователя;  $\tau$  — постоянная времени преобразователя, определяемая его конструкцией, теплопроводностью, а также свойствами окружающей среды.

В том случае, когда температура среды постоянна, решение этого уравнения имеет вид

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau}, \quad (11.9)$$

где  $\theta_0$  — начальная разность температур среды и преобразователя, соответствующая скачкообразному изменению температуры на величину  $\theta_0$  (см. рис. 11).

Выражение (11.9) позволяет экспериментально определять величину постоянной времени преобразователя путем измерения значений  $\theta$  через определенные промежутки времени. Действи-

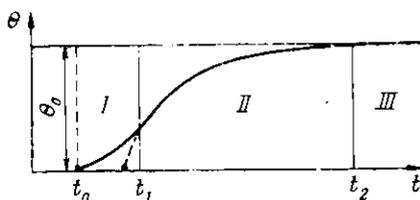


Рис. 11. Изменение температуры терморезистора при скачкообразном изменении температуры среды [12]

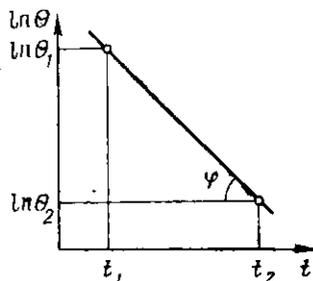


Рис. 12. Изменение логарифма температуры терморезистора во времени

тельно, после логарифмирования выражения (II.9) имеем

$$\ln \theta = -\frac{t}{\tau} + \ln \theta_0, \quad (\text{II.10})$$

что графически отображается прямой линией в полулогарифмическом масштабе (рис. 12). Определив  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , соответствующие моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ , можно найти

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \theta_1 - \ln \theta_2} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} = \text{ctg } \varphi. \quad (\text{II.11})$$

Таким образом, температура  $T_{\text{п}}$  преобразователя может быть определена по формуле

$$T_{\text{п}} = T_{\text{с}} - \theta = T_{\text{с}} - \theta_0 e^{-t/\tau}, \quad (\text{II.12})$$

из которой следует, что преобразователь воспримет температуру  $T_{\text{с}}$  окружающей среды через бесконечно большой промежуток времени. Практически же считают, что равенство температур преобразователя и среды наступает тогда, когда величина  $\theta = T_{\text{с}} - T_{\text{п}}$  станет меньше допустимой абсолютной погрешности измерения  $\Delta$ . Соответствующий промежуток времени  $\tau_1$  называется временем установления показаний прибора с данным преобразователем. Нетрудно показать, что величина  $\tau_1$  пропорциональна постоянной времени терморезистора.

Наряду с рассмотренным процессом восприятия преобразователем скачкообразного изменения температуры представляет интерес динамические погрешности, возникающие за счет инерционности преобразователя при измерении температуры, меняющейся по гармоническому закону с круговой частотой  $\omega$ :

$$T_{\text{с}} = T_0 + \Delta T_{\text{max}} \sin \omega t, \quad (\text{II.13})$$

где  $T_0$  — средняя температура среды.

Терморезистор обычно включают в измерительную цепь, к которой легко уравновесить при среднем значении температуры газового или жидкостного потока. Поэтому можно ограничиться рассмотрением лишь переменной составляющей температуры среды, для мгновенного значения которой можно записать

$$\Delta T_c = \Delta T_{\max} \sin \omega t. \quad (II.14)$$

При рассмотрении влияния тепловой инерции преобразователя на характер восприятия пульсирующей температуры будем считать следующее: а) скорость газового или жидкостного потока среды постоянна; б) величина тока, протекающего по терморезистору, невелика и вследствие этого тепло, выделяемое в окружающую среду, пренебрежимо мало по сравнению с теплом, воспринимаемым им от среды; в) теплообмен преобразователя с окружающей средой происходит за счет конвекции.

Тогда уравнение теплового равновесия преобразователя со средой будет иметь вид

$$mc \frac{d(\Delta T_n)}{dt} = S \eta (\Delta T_{\max} \sin \omega t - \Delta T_n), \quad (II.15)$$

где  $m$ ,  $S$  и  $c$  — соответственно масса, поверхность и удельная теплоемкость терморезистора;  $\eta$  — коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T_n$  — мгновенное значение температуры преобразователя (терморезистора).

Левая часть этого уравнения характеризует тепло, которое обусловлено неравенством температур преобразователя и среды в каждый момент времени и идет на изменение теплосодержания преобразователя.

Разделив обе части равенства (II.15) на  $S\eta$  и перенеся  $\Delta T_n$  в левую часть, получим

$$\tau \frac{d(\Delta T_n)}{dt} + \Delta T_n = \Delta T_{\max} \sin \omega t, \quad (II.16)$$

где  $\tau = mc/S\eta$  — постоянная времени терморезистора.

Общее решение дифференциального уравнения (II.16) имеет вид [12]

$$\Delta T_n = \theta_0 e^{-t/\tau} + \frac{\Delta T_{\max}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t). \quad (II.17)$$

Первый член в правой части выражения (II.17) характеризует изменение температуры терморезистора при скачкообразном изменении температуры среды и в случае установившегося гармонического процесса отсутствует. Тогда

$$\Delta T_n = \frac{\Delta T_{\max}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t)$$

или

$$\Delta T_n = \frac{\Delta T_{\max} \cos \omega t}{1 + \omega^2 \tau^2} (\operatorname{tg} \omega t - \omega \tau). \quad (II.18)$$

Полагая  $\omega\tau = \operatorname{tg}\varphi$ , имеем

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{\Delta T_{\max} \sin(\omega t - \varphi)}{(1 + \omega^2 \tau^2) \cos \varphi}$$

или

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{\Delta T_{\max}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t - \operatorname{arctg} \omega\tau). \quad (\text{II.19})$$

Сравнивая выражение (II.19) с уравнением (II.14), определяющим характер изменения температуры среды, можно видеть, что колебания температуры терморезистора уменьшены по амплитуде в  $\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}$  раз и отстают на угол  $\varphi = \operatorname{arctg} \omega\tau$  относительно колебаний температуры среды.

Полагая линейный характер изменения сопротивления терморезистора с температурой, можно записать

$$\Delta R_{\Pi} = \frac{K_T \Delta T_{\max}}{1 + \omega^2 \tau^2} \sin(\omega t - \operatorname{arctg} \omega\tau), \quad (\text{II.20})$$

где  $\Delta R_{\Pi}$  — мгновенное изменение сопротивления терморезистора;  $K_T$  — чувствительность терморезистора.

Как видно, динамические (амплитудная и фазовая) погрешности терморезистора увеличиваются с ростом тепловой инерции и скорости изменения температуры окружающей среды.

Терморезисторы, используемые в приборах для измерения температуры, обычно питаются небольшим по величине током, чтобы тепло, выделяемое терморезистором за счет джоулева эффекта, было намного меньше тепла, получаемого от окружающей среды. При значительном нагревании терморезистора током его температура определяется режимом теплового равновесия между подводимым к нему количеством тепла и количеством тепла, уходящим в окружающую среду. Если среда находится в спокойном состоянии, то отдаваемое терморезистором тепло зависит главным образом от теплопроводности среды и в меньшей степени — от естественной конвекции. При движении среды, окружающей терморезистор, преобладает эффект сноса тепла потоком. В этом случае температура и сопротивление терморезистора определяются в основном скоростью потока окружающей среды. На этом принципе строятся приборы для измерения скорости движения жидких и газообразных сред — термоанемометры или количества прошедшего газа или жидкости — термоэлектрические расходомеры.

Зависимость количества тепла, отдаваемого нагретым терморезистором в окружающую среду, от ее теплофизических свойств может быть использована для анализа состава газов. При постоянной скорости газового потока эффект охлаждения терморезистора будет определяться главным образом теплопро-

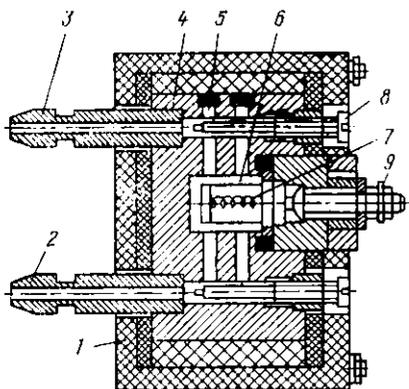


Рис. 13. Чувствительный элемент термохимического газоанализатора газокаротажной станции АГКС-65 [6]

станции АГКС-65. Чувствительный элемент состоит из двух рабочих камер 6 — основной и запасной (на рисунке не показана), располагающихся в металлической колодке 4. В камерах находятся платиновые терморезисторы 7, подключаемые к электрической схеме газоанализатора через выводы 9. Каждая камера каналами 5 соединена с входным 2 и выходным 3 штуцерами, через которые она подключается к газовой линии. Для регулирования объемной скорости исследуемой газовой смеси и уравнивания давлений в камерах используются игольчатые вентили 8. Чувствительный элемент защищен корпусом 1 из текстолита.

### Тензорезисторы

Работа тензорезисторов основана на явлении тензоэффекта, который заключается в изменении активного сопротивления проводников под влиянием механических деформаций. Величина тензоэффекта характеризуется коэффициентом относительной тензочувствительности — отношением изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$K_{от} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}, \quad (II.21)$$

где  $\varepsilon_R = \Delta R/R$  — относительное изменение сопротивления проводника;  $\varepsilon_l = \Delta l/l$  — относительное удлинение проводника.

Опытные данные, однако, показывают, что тензоэффект возникает не только вследствие изменения геометрических размеров проводника в процессе деформации, но и в результате изменения его удельного сопротивления  $\rho$ .

Если активное сопротивление проводника, имеющего длину  $l$  и поперечное сечение  $S$ ,

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (II.22)$$

то изменение этого сопротивления определяется выражением

$$\Delta R = \Delta \rho \frac{l}{S} + \rho \frac{\Delta l}{S} - \rho \frac{l \Delta S}{S^2}. \quad (II.23)$$

Относительное изменение сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S^2}$$

или

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta b}{b}, \quad (II.24)$$

где  $b$  — поперечный размер проводника квадратного сечения или радиус круглого.

Относительное удлинение и поперечное сокращение твердых тел связаны, как известно, соотношением

$$\epsilon_b = -\mu \epsilon_l,$$

где  $\epsilon_b = \Delta b/b$  — относительная величина поперечного сокращения;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Тогда

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2\mu \frac{\Delta l}{l}. \quad (II.25)$$

Обозначив относительное изменение удельного сопротивления проводника через  $\epsilon_\rho = \Delta \rho/\rho$ , получим, что коэффициент относительной тензочувствительности преобразователя будет равен:

$$K_{от} = 1 + 2\mu + c, \quad (II.26)$$

где  $c = \epsilon_\rho/\epsilon_l$ .

Материалы для тензорезисторов должны характеризоваться возможно большими величинами коэффициента относительной тензочувствительности и удельного электрического сопротивления при минимальных значениях температурного коэффициента сопротивления. Материалами тензорезисторов обычно служат сплавы (константан, манганин, нихром), никель, висмут, а также полупроводники — германий и кремний. Последние обладают довольно большим коэффициентом относительной тензочувствительности (от  $-200$  до  $850$ ), в  $60-80$  раз превышающим значение  $K_{от}$  для металлов.

Так как тензорезисторы характеризуются простотой конструкции и малыми размерами, их применяют в устройствах

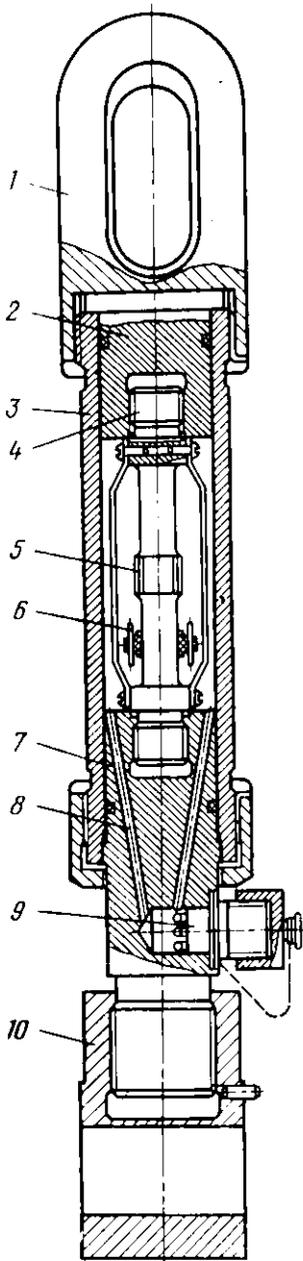


Рис. 14. Тензометрический датчик натяжения кабеля типа ДНТ-033

контроля натяжения геофизического кабеля при скважинных исследованиях и в датчиках давления некоторых типов опробователей пластов на кабеле (ОИД-7-10).

На рис. 14 показано устройство тензометрического датчика натяжения типа ДНТ-033, используемого с подвесной системой роликов на скважине. Основным узлом датчика является упругий стержень 4 с наклеенными на нем тензорезисторами 5. Выводы тензорезисторов, соединенных по мостовой схеме, подключены к коллектору 6. Упругий стержень помещен в жесткий корпус 3 и ввернут в верхнюю 2 и нижнюю 7 пробки. В нижней пробке имеются отверстия 8 для прохода проводов от коллектора к колодке штепсельного разъема 9. С помощью кабеля, подключаемого к штепсельному разъему датчик соединяется с измерительной панелью, расположенной на пульте управления каротажного подъемника. Для подсоединения датчика к талевому крюку и подвесному ролику служат проушины 1 и 10.

Датчик позволяет измерять усилие натяжения геофизического кабеля до 500 Н с приведенной погрешностью не более 1,5 %.

### Электролитические преобразователи

Электролиты (водные растворы солей, кислот и щелочей), как известно, характеризуются ионной проводимостью. Активное сопротивление электролита определяется выражением  $(11.22)$ , в котором  $S$  — действующая площадь погруженных в электролит электродов;  $l$  — расстояние между электродами.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  электролита зависит от концентрации, степени диссоциации молекул растворенного вещества, подвижности ионов и других факторов. Это позволяет применять электролитические преобразователи для изучения химического состава

и концентрации электролитов. Зависимость сопротивления от геометрических размеров измерительной установки способствует использованию электролитических преобразователей и для измерения различных механических величин — линейных и угловых перемещений, деформаций и др.

Электролитические преобразователи обычно питаются переменным током для уменьшения погрешности за счет поляризации электродов и во избежание электролиза изучаемого раствора.

В геофизической практике электролитические преобразователи применяют при лабораторных исследованиях водных растворов. Разновидностью электролитических преобразователей являются также некоторые типы скважинных резистивметров.

### § 3. МАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Работа магнитных преобразователей основана на изменении параметров магнитной цепи (магнитного сопротивления, магнитной проницаемости и т. п.) под воздействием входной величины.

Из большого числа магнитных преобразователей, использующихся для измерения неэлектрических величин, в геофизической аппаратуре применяются индуктивные, магнитоупругие и магнитомодуляционные преобразователи.

#### Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных (электромагнитных) преобразователей основан на изменении сопротивления катушки индуктивности при введении в нее ферромагнитного сердечника или при изменении величины воздушного зазора в магнитном сердечнике, на котором помещена катушка. Входной может быть механическая величина  $x$  (линейное или угловое перемещение, давление, деформация и др.), а выходной — изменение индуктивности  $L$  или полного сопротивления  $Z$  катушки.

Чувствительность индуктивного преобразователя определяется как

$$K_n = \frac{\Delta Z}{\Delta x} \quad (11.27)$$

На рис. 15 изображены некоторые типы индуктивных преобразователей. Наиболее распространен преобразователь с малым воздушным зазором  $\delta$  (рис. 15, а), величина которого связана с перемещением изучаемого объекта. Изменение зазора приводит к изменению сопротивления магнитной цепи, а следовательно, и индуктивности катушки, надстой на сердечник и включенной в цепь переменного тока. При этом

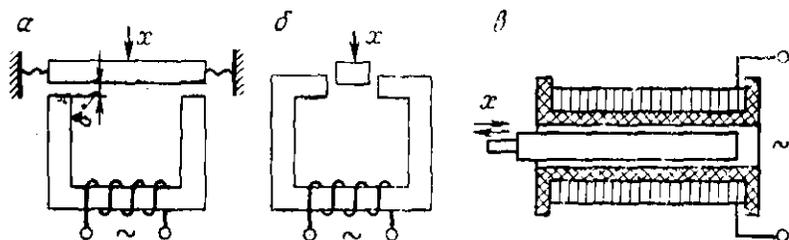


Рис. 15. Разновидности индуктивных преобразователей:

а — с переменной толщиной воздушного зазора; б — с переменной площадью воздушного зазора; в — с перемещающимся сердечником

меняются индуктивное и полное сопротивление катушки, в результате чего обеспечивается функциональная зависимость  $Z = f(x)$ .

Изменение сопротивления катушки индуктивности может быть связано с изменением площади воздушного зазора (рис. 15, б) в соответствии с изменением входной величины или с перемещением ферромагнитного сердечника внутри катушки (рис. 15, в). Преобразователь, изображенный на рис. 15, в, носит название индуктивного преобразователя с разорванной магнитной цепью; его обычно применяют для измерения значительных механических перемещений.

Разновидностью индуктивных преобразователей являются трансформаторные (взаимоиндуктивные) преобразователи (рис. 16), содержащие две катушки, одна из которых (намагничивающая или первичная) питается стабильным переменным током. Выходной величиной таких преобразователей является индуцированная во вторичной катушке э. д. с., которая зависит от сопротивления на пути магнитного потока, сцепленного с витками обеих катушек, а следовательно, и от толщины воздушного зазора  $\delta$ . Величина этой э. д. с. измеряется прибором И.

Установим соотношение между полным сопротивлением катушки и толщиной воздушного зазора преобразователя, показанного на рис. 15, а. Полное сопротивление катушки индуктивности определяется выражением

$$Z = R + j\omega L = R + j\omega \frac{\omega^2}{Z_m}, \quad (\text{II.28})$$

где  $R$ ,  $L$  и  $\omega$  — соответственно активное сопротивление, индуктивность и число витков катушки;  $Z_m$  — сопротивление магнитной цепи;  $\omega$  — круговая частота тока.

Пренебрегая возможными путями утечки магнитного потока, можно представить величину  $Z_m$  как сумму двух сопротивлений — магнитного сопротивления  $Z_{\text{мст}}$  стального участка маг-

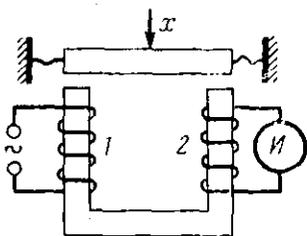


Рис. 16. Трансформаторный индуктивный преобразователь.

Катушки: 1 — намагничивающая, 2 — измерительная

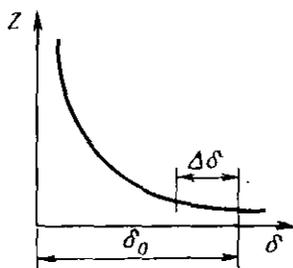


Рис. 17. Характеристика индуктивного преобразователя

нитной цепи и магнитного сопротивления  $Z_{M\delta}$  воздушного зазора. Магнитное сопротивление воздушного зазора, в свою очередь, зависит от его площади  $S$ , толщины  $\delta$  и магнитной проницаемости  $\mu_0$  воздуха. Тогда полное сопротивление катушки индуктивности может быть определено как

$$Z = R + j\omega \frac{\omega^2}{Z_{M\text{ст}} + \frac{\delta}{\mu_0 S}} \quad (11.29)$$

Полученное выражение показывает, что зависимость  $Z = f(\delta)$  индуктивного преобразователя является нелинейной (рис. 17). С известным приближением она может быть представлена совокупностью линейных отрезков, длина которых не превышает  $\Delta\delta = (0,1 \div 0,15)\delta_0$  (здесь  $\delta_0$  — начальная величина зазора).

Такая же зависимость наблюдается и между величиной зазора и потоком, сцепленным с витками катушек, а следовательно, и вторичной э. д. с. в преобразователях трансформаторного типа.

Увеличения линейного участка характеристики можно добиться, используя дифференциальные индуктивные преобразователи (рис. 18). В таких преобразователях при отсутствии внешнего воздействия ( $x=0$ ) якорь (подвижная часть сердечника) расположен симметрично относительно обоих сердечников (или катушек), и магнитные сопротивления для потоков, создаваемых обеими катушками, одинаковы. Под действием входной величины магнитное сопротивление изменяется, причем увеличение сопротивления для одной половины преобразователя сопровождается уменьшением сопротивления для другой его половины. Зависимости  $Z_1 = f(\delta)$  и  $Z_2 = \varphi(\delta)$  для дифференциального преобразователя с малой толщиной воздушного зазора показаны на рис. 19.

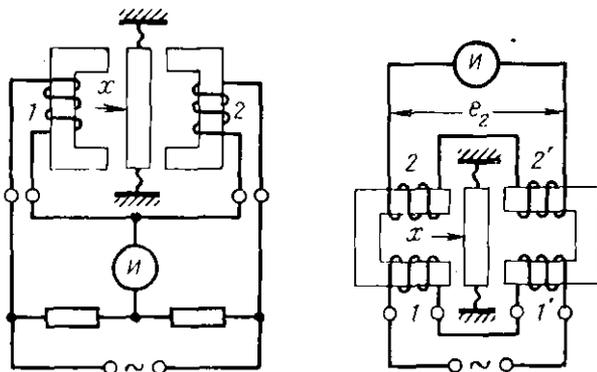


Рис. 18. Разновидности дифференциальных индуктивных преобразователей.  
 Катушки: 1, 1' — намагничивающие; 2, 2' — измерительные

Обычно катушки дифференциального преобразователя включаются в соседние плечи мостовой схемы, которая уравнивается при начальном значении толщины зазора. Тогда при перемещении сердечника под действием преобразуемой величины будет изменяться электрический сигнал, определяемый разностью  $Z_1 - Z_2$  и измеряемый прибором И. Как видно на рис. 19, линейный участок характеристики дифференциального индуктивного преобразователя значительно увеличен и достигает  $\Delta\delta = (0,3 \div 0,4) \delta_0$ .

Для дифференциального преобразователя трансформаторного типа получение сигнала  $e_2$ , пропорционального разности  $Z_2 - Z_1$ , достигается встречным включением измерительных катушек 2 и 2'.

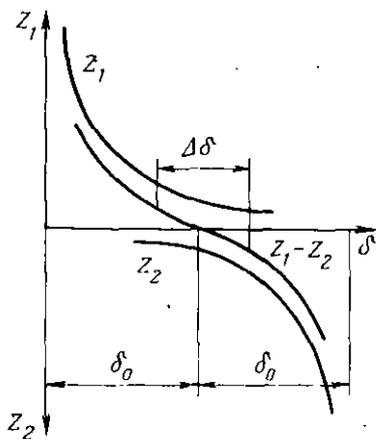


Рис. 19. Характеристика дифференциального индуктивного преобразователя

Индуктивные преобразователи характеризуются весьма большой мощностью преобразования (1—5 В·А), что позволяет применять их вместе с измерительными приборами пониженной чувствительности. В геофизической практике индуктивные преобразователи используют в устройствах для измерения диаметра и профиля скважины, отбивки муфтовых соединений металлических колонн и выявления дефектов в них, контроля за натяжением кабеля и т. п.

## Магнитоупругие преобразователи

Работа магнитоупругих преобразователей основана на явлениях, возникающих в результате взаимодействия между магнитными и механическими состояниями ферромагнитных тел, обычно объединяемых под названием магнитоупругих явлений.

Различают собственно магнитоупругий эффект — изменение магнитных свойств ферромагнитных тел под воздействием механических деформаций и магнитострикционный эффект — изменение формы и размеров ферромагнитных тел под воздействием внешнего магнитного поля.

При магнитоупругом эффекте действие внешней силы  $P$  вызывает в ферромагнитном теле механические напряжения, обуславливающие изменение магнитной проницаемости  $\mu$  тела. Если ферромагнитное тело используется в качестве сердечника катушки индуктивности, то изменение магнитной проницаемости приводит к изменению сопротивления магнитной цепи и, как следствие, к изменению полного электрического сопротивления катушки.

При магнитострикционном эффекте происходит обратное явление.

Величина магнитоупругого и магнитострикционного эффектов может быть охарактеризована относительным изменением магнитных свойств  $\epsilon_\mu = \Delta\mu/\mu$  и относительным удлинением  $\epsilon_l = \Delta l/l$  ферромагнитных тел. Численные значения коэффициентов  $\epsilon_\mu$  и  $\epsilon_l$  зависят от материала ферромагнетика, напряженности магнитного поля  $H$  или величины нагрузки  $P$ , окружающей температуры и других факторов. Во многих случаях зависимости  $\epsilon_\mu = f(P)$  и  $\epsilon_l = \varphi(H)$  являются нелинейными.

В общем случае магнитоупругий эффект характеризуется коэффициентом относительной магнитоупругой чувствительности

$$K_{\text{ом}} = \frac{\epsilon_\mu}{\epsilon_l}. \quad (11.30)$$

В качестве материалов для магнитоупругих преобразователей используют никель, железо-никелевые (пермаллой, пермендюры К49Ф2 и К-65) и железо-алюминиевые (альферы Ю-8, Ю-10 и Ю-12) сплавы, а также ферриты (окислы железа, цинка и закись никеля), характеризующиеся значениями  $K_{\text{ом}} \approx 200$ .

Основное назначение магнитоупругих преобразователей — возбуждение и прием упругих колебаний, поэтому они широко применяются в аппаратуре акустического каротажа и других устройствах, основанных на изучении распространения упругих волн.

Магнитоупругий преобразователь (рис. 20) конструктивно представляет собой пакет крепко стянутых пластин из магнитоупругого материала, образующий замкнутый магнитопровод 1, на котором расположена обмотка 2. Поскольку при пропуска-

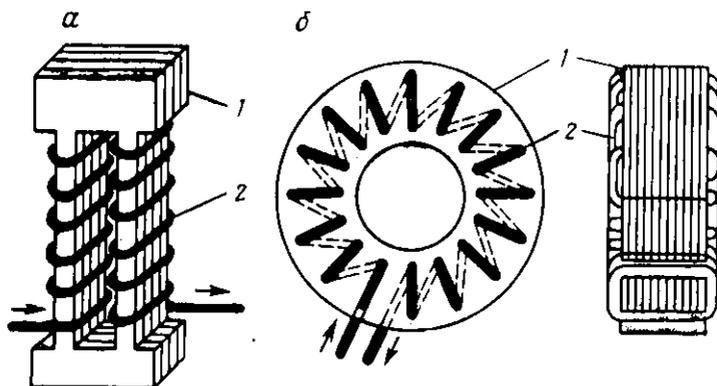


Рис. 20. Магнестрикционные излучатели:  
а — стержневой; б — кольцевой

нии тока по обмотке деформация магнитоупругого материала происходит вдоль линий магнитной индукции, выбором соответствующей формы пластин можно добиться определенной направленности действия преобразователя.

У преобразователей стержневого типа (рис. 20, а) магнитоупругий эффект направлен вдоль оси пакета пластин. Цилиндрические (кольцевые) преобразователи в наибольшей степени отвечают геометрии среды при скважинных исследованиях; они получили преимущественное распространение в акустической геофизической аппаратуре. Такой преобразователь (рис. 20, б) выполнен в виде полого цилиндра, состоящего из тонких (0,1—0,2 мм) кольцевых пластин из магнитоупругого материала, склеиваемых между собой. Высота цилиндра обычно мала по сравнению с длиной излучаемой волны, поэтому такие преобразователи практически не обладают направленностью действия. В пластинах предусматриваются отверстия или пазы для обмотки с целью ее защиты от механических повреждений.

Иногда сердечник преобразователя выполняют путем навивки из ленты магнитоупругого материала и последующей его склейки в виде цилиндра.

В цилиндрических преобразователях линии магнитной индукции имеют форму колец с центром на оси цилиндра и замыкаются внутри обмотки. Поэтому при пропускании по обмотке переменного или пульсирующего тока будет происходить периодическое изменение длины средней окружности цилиндра, а следовательно, и длины его наружной и внутренней окружностей, что вызовет радиальные упругие колебания преобразователя, которые передадутся в окружающую среду. При работе преобразователя в режиме приема упругих колебаний происходит обратный процесс.

Магнитоупругие преобразователи являются острорезонансными системами, собственная частота которых определяется материалом и геометрическими размерами сердечника. Так, собственная частота радиальных колебаний (в Гц) цилиндрического преобразователя с толщиной стенки  $0,1-0,25$  диаметра определяется выражением [4]

$$f = v/\pi d, \quad (II.31)$$

где  $v$  — скорость распространения звука в материале сердечника, м/с;  $d$  — средний диаметр сердечника, м.

Резонансную частоту стержневого преобразователя можно приближенно оценить по формуле

$$f \approx v/2l, \quad (II.32)$$

где  $l$  — длина стержня.

Магнитоупругие преобразователи, применяемые в аппаратуре акустического каротажа, обычно работают в диапазоне частот  $3-80$  кГц. При более низких частотах требуется увеличение размеров сердечника; при более высоких частотах возможны значительные потери мощности за счет вихревых токов.

Магнитоупругие преобразователи характеризуются простотой конструкции, высокой механической прочностью и не нуждаются в герметизации, вследствие чего устраняются потери энергии упругих колебаний на герметизирующей оболочке; в то же время они обладают значительной акустической мощностью и сравнительно высоким электроакустическим к. п. д. (отношением акустической мощности, отдаваемой на выходе, к электрической мощности, потребляемой на входе). Для возбуждения преобразователей, работающих в режиме излучения колебаний, не требуется высокого напряжения, а нужен лишь мощный импульс тока в обмотке для создания магнитного поля. Это весьма важно в условиях скважины, где иногда трудно обеспечить высокое качество электрической изоляции.

В скважинной акустической аппаратуре магнитоупругие преобразователи используются главным образом в качестве излучателей и режее — приемников упругих колебаний.

На применении собственно магнитоупругого эффекта основана работа прихватаопределителей — устройств для определения мест прихвата в скважине бурильных и насосно-компрессорных труб.

### Магнитомодуляционные преобразователи

В магнитомодуляционных (ферроиндукционных) преобразователях используется явление изменения магнитного состояния ферромагнитных тел, намагничиваемых переменным магнитным полем стабильной напряженности, при наложении постоянного поля, индукция которого изменяется. Существует ряд разно-

видностей преобразователей, различающихся способом возбуждения, формой ферромагнитного сердечника и т. п.

В качестве примера рассмотрим преобразователь с продольным возбуждением, который состоит (рис. 21) из двух одинаковых и параллельно расположенных пермалловых стержней 1, длина которых превышает их поперечные размеры. На стержнях размещены намагничивающие обмотки 2, питаемые напряжением  $U_1 \approx U_{\max} \sin \omega t$ ; они включены между собой последовательно и навиты так, что в каждый момент времени магнитные потоки в сердечниках имеют одинаковое значение и встречное направление. При полной идентичности обеих половин преобразователя и отсутствии внешнего магнитного поля э. д. с., индуцируемая в измерительной обмотке 3, охватывающей оба сердечника, будет равна нулю.

Если же преобразователь поместить в постоянное магнитное поле напряженности  $H_0$ , направленное под произвольным углом  $\psi$  к осям стержней, то в них образуется магнитный поток

$$\Phi = \Phi_0 \cos \psi = \mu H_0 S \cos \psi, \quad (II.33)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость пермаллоя;  $S$  — сечение каждого сердечника.

Э. д. с., индуцируемая в измерительной обмотке (с учетом встречного включения намагничивающих обмоток)

$$e_2 = -2 \omega_2 \frac{d\Phi}{dt} = -2 \omega_2 S H_0 \cos \psi \frac{d}{dt} \left( \frac{dB}{dH_{\sim}} \right); \quad (II.34)$$

здесь  $H_{\sim}$  — напряженность переменного поля возбуждения;  $B$  —

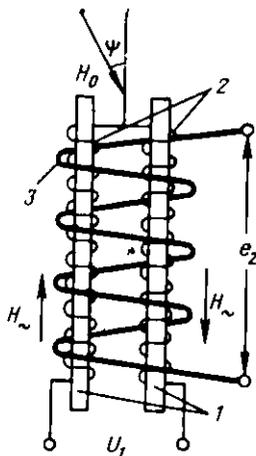


Рис. 21. Принципиальная схема магнитомодуляционного преобразователя

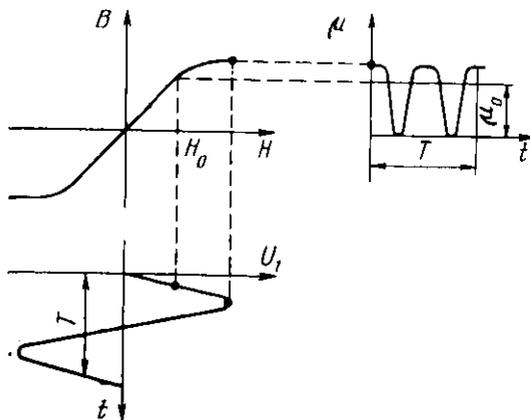


Рис. 22. Характеристика  $B=f(H)$  и кривая изменения магнитной проницаемости материала  $\mu$  стержней магнитомодуляционного преобразователя

значение индукции в сердечниках;  $\omega_2$  — число витков измерительной обмотки.

Так как  $dB/dH \sim \mu$  — магнитная проницаемость, то

$$e_2 = -2\omega_2 S H_0 \cos \psi \frac{d\mu}{dt} = -K_1 H_0 \cos \psi \frac{d\mu}{dt}, \quad (II.35)$$

где  $K_1$  — постоянная, определяемая конструкцией преобразователя.

Пермаллой обладает способностью быстро насыщаться в относительно слабых магнитных полях, поэтому уже при  $U_1 < U_{\max}$  угол наклона характеристики (рис. 22) и величина магнитной проницаемости станут близкими к нулю. Поскольку магнитная проницаемость не меняется по знаку, то одному периоду напряжения  $U_1$  будет соответствовать два периода изменения  $\mu$ , т. е.

$$\mu \approx \mu_0 + K_2 \sin 2\omega t, \quad (II.36)$$

где  $K_2$  — постоянная; определяемая магнитными свойствами пермаллой.

Таким образом, величина э. д. с. в измерительной обмотке

$$e_2 = K_1 K_2 H_0 \cos \psi \cos 2\omega t \quad (II.37)$$

и достигает максимума при совпадении оси преобразователя с направлением внешнего магнитного поля. При этом величина  $e_2$  в некоторых пределах оказывается пропорциональной напряженности магнитного поля  $H_0$ .

Как видно, в процессе работы такого преобразователя происходит модуляция постоянного магнитного поля переменной магнитной проницаемостью.

Магнитомодуляционные преобразователи обладают высокой чувствительностью, простотой и надежностью конструкции. Они применяются в аппаратуре магнитного каротажа для измерения составляющих земного магнитного поля, а также в устройствах для улавливания магнитных меток глубины при проведении геофизических исследований скважин.

#### § 4. ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

К емкостным относятся измерительные преобразователи, у которых электрическая емкость и диэлектрические потери в ней изменяются под действием входной величины.

Известно, например, что емкость  $C$  плоскопараллельного конденсатора с площадью обкладок  $S$  и расстоянием между ними  $\delta$  определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta}, \quad (II.38)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками.

Изменяя путем воздействия входной неэлектрической величины  $\epsilon$ ,  $S$  или  $\delta$ , можно изменять электрические параметры емкостного преобразователя. Преобразуемая величина может быть связана с линейным или угловым перемещением изучаемого объекта, давлением, усилием, деформацией; она может также отражать состав или различные физико-химические свойства веществ.

Из формулы (II.38) следует, что емкостные преобразователи, у которых входная величина связана с  $\delta$ , имеют нелинейную характеристику. Для повышения точности преобразования и расширения диапазона измерения обычно применяют дифференциальные емкостные преобразователи, состоящие из двух половин (аналогично дифференциальным индуктивным преобразователям). При изменении  $\delta$  под воздействием входной величины емкость  $C_1$  одной половины преобразователя увеличивается, а емкость  $C_2$  другой половины соответственно уменьшается. При включении дифференциального преобразователя в соседние плечи мостовой схемы его характеристикой является зависимость  $C_1 - C_2 = f(x)$ . Подобные преобразователи, обычно используемые для измерения малых (0,2—0,4 мм) перемещений, отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм) и точностью преобразования.

Преимуществом преобразователей с переменной площадью пластин, применяющихся для измерения больших линейных (более 1 см) и угловых (до 270°) перемещений, является возможность получения любой функциональной зависимости между изменением емкости и входной величиной. Это достигается подбором соответствующей формы пластин [12].

Зависимость емкости и диэлектрических потерь преобразователя от диэлектрической проницаемости среды между его пластинами (обкладками) позволяет применять емкостные преобразователи для анализа состава различных сред, в частности, для разделения горных пород по характеру их насыщения методом диэлектрического каротажа. Такое разделение основано на существенной разнице в значениях  $\epsilon$  для нефти (2,5 отн. ед.) и воды (80 отн. ед.). Скважинный прибор аппаратуры диэлектрического каротажа ДК-1 в качестве первичного преобразователя содержит цилиндрический конденсатор определенных размеров, входящий в колебательный контур высокочастотного генератора. Поэтому изменение емкости конденсатора под влиянием характера насыщения и других свойств горных пород отмечается изменением частоты генерируемых колебаний.

Для емкостных преобразователей характерны высокая чувствительность, хорошая стабильность и практически безынерционность; однако они обладают небольшой выходной мощностью.

Емкостные преобразователи (помимо преобразования неэлектрических величин) могут использоваться в качестве

модуляторов малых постоянных электрических напряжений, например, во входных устройствах усилителей постоянного тока.

## § 5. РАДИАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Радиационные измерительные преобразователи, иначе называемые счетчиками (детекторами) радиоактивного излучения, служат для преобразования энергии ядерного излучения в электрическую энергию. Из большого числа радиационных преобразователей, использующих различный принцип действия, в геофизической аппаратуре преимущественно применяются преобразователи, основанные на явлении ионизации газов при прохождении через них ядерного излучения (газоразрядные преобразователи) или люминесценции некоторых веществ под действием ядерного излучения (сцинтилляционные преобразователи).

### Газоразрядные преобразователи

В газоразрядном преобразователе происходит непосредственное преобразование энергии ядерного излучения в электрические импульсы. Преобразователь (рис. 23) представляет собой цилиндрический стеклянный баллон 1, в котором помещены два электрода — металлическая нить 2, расположенная по оси баллона и являющаяся анодом, и металлический цилиндр 3 (или металлизированная внутренняя поверхность баллона), являющийся катодом. Некоторые типы газоразрядных преобразователей выполнены в виде металлического баллона, который одновременно служит катодом. Баллон заполнен газом под низким давлением (порядка  $1,33 \cdot 10^4$  Па).

Газоразрядные преобразователи различаются механизмом переноса ионов в электрическом поле электродов. На рис. 24 показана вольт-амперная характеристика преобразователя — зависимость импульса тока  $I$ , возникающего при его работе, от напряжения  $U$  на электродах. Вначале при малых напряжениях на электродах величина тока  $I$  возрастает пропорционально напряжению  $U$  — так называемая омическая область работы ( $I$ ). Начиная с некоторого значения напряжения  $U_n$ , ток достигает насыщения и не изменяется при дальнейшем росте  $U$  в значительном интервале напряжения. Это связано с тем, что при малых напряжениях не все ионы, образовавшиеся под действием ядерного излучения, достигают электродов. Часть их, сталкиваясь с ионами противоположного знака, рекомбинирует. Величина ионизационного тока в интервале напряжений  $U_n - U_n$  определяется только количеством образующихся ионов в единицу времени. Преобразователи, работающие в этой области ( $I$ ), носят название ионизационных камер.

При дальнейшем увеличении напряжения на электродах ( $U > U_n$ ), несмотря на постоянство начальной ионизации,

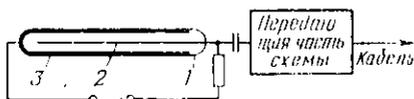


Рис. 23. Устройство и схема включения газоразрядного преобразователя

наблюдается рост тока в импульсе. Это связано с возникновением ударной ионизации, при которой электроны, образовавшиеся при первоначальном воздействии радиации, сильно ускоряются электрическим полем и ионизируют молекулы газового наполнителя. При этом достигается значительное усиление ионизационного тока. Отношение числа ионов, достигающих анода преобразователя, к числу первичных ионов, созданных ионизирующей частицей, называется коэффициентом газового усиления. Величина его зависит от приложенного напряжения и может достигать  $10^7$ .

С возникновением ударной ионизации вначале наблюдается пропорциональная зависимость между амплитудой выходного импульса, с одной стороны, и напряжением  $U$  на электродах преобразователя и ионизирующей способностью исследуемых частиц — с другой. Эта область обычно называется областью пропорциональности (III) и характеризуется относительно невысоким коэффициентом газового усиления (порядка нескольких тысяч). При дальнейшем увеличении напряжения в интервале  $U_{оп} - U_T$  пропорциональность между величиной импульса и начальной ионизацией нару-

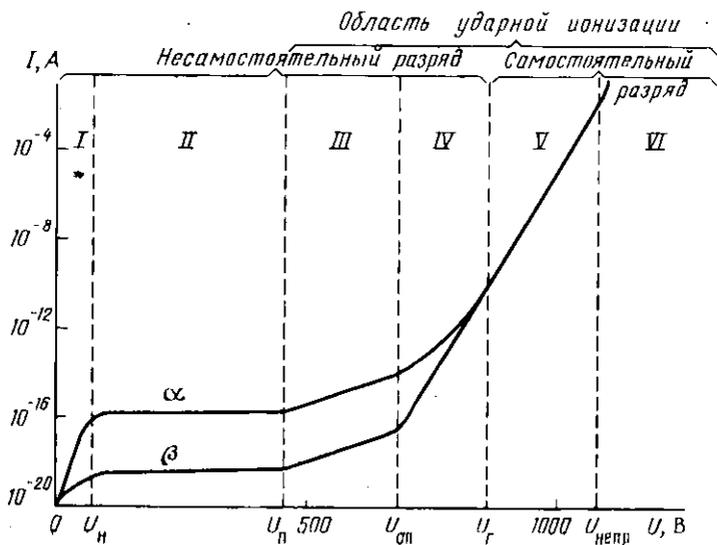


Рис. 24. Вольт-амперная характеристика радиационного преобразователя

шается — область ограниченной пропорциональности (IV). Вслед за ней располагается область Гейгера (V), в которой амплитуда импульса совершенно не зависит от начальной ионизации. Коэффициент газового усиления здесь достигает  $10^8$ — $10^9$  и увеличивается с повышением напряжения питания электродов.

К области Гейгера примыкает область непрерывного разряда (VI), для возникновения которого не нужен специальный ионизатор — достаточно к электродам преобразователя приложить напряжение, превышающее  $U_{\text{непр}}$ , как наступает самопроизвольный разряд. Следует отметить, что как непрерывный разряд, так и разряд в области Гейгера относятся к самостоятельному разряду, который в отличие от несамостоятельного не требует для своего поддержания внешних ионизаторов.

Газоразрядные преобразователи, применяющиеся в геофизической аппаратуре, служат для измерения интенсивности гамма-излучения и плотности потока нейтронов и работают в пропорциональной области (пропорциональные преобразователи) и в области Гейгера (преобразователи Гейгера—Мюллера).

Пропорциональные газоразрядные преобразователи (пропорциональные счетчики), баллон которых заполнен трехфтористым бором, используют преимущественно для измерения плотности тепловых нейтронов. При работе таких преобразователей нейтроны захватываются атомами бора, и выделяющиеся альфа-частицы вызывают ионизацию газа. Для измерения нейтронов надтепловых энергий пропорциональные преобразователи окружают слоем водородсодержащей среды (парафин, полиэтилен), а затем — тонким (около 0,5 мм) слоем кадмия, обладающего большим сечением захвата тепловых нейтронов и пропускающего к преобразователю практически только надтепловые нейтроны. Последние замедляются водородсодержащей средой до тепловых скоростей и фиксируются преобразователем.

Газоразрядные преобразователи Гейгера—Мюллера применяют при измерении интенсивности гамма-излучения. В качестве газового наполнителя баллона таких преобразователей используют инертный газ (аргон, гелий), в который добавляют пары высокомолекулярных органических соединений (этиловый спирт, этиловый эфир) или галогенов (хлор, бром). Такая добавка способствует гашению непрерывного разряда: положительные ионы, образовавшиеся в процессе ионизации инертного газа, нейтрализуются при столкновении с молекулами высокомолекулярного соединения или галогенов и не вызывают вторичной электронной эмиссии с катода.

При работе газоразрядного преобразователя за счет газового разряда усиливается ионизационный ток, повышается чув-

ствительность преобразователя и создается принципиальная возможность измерения каждого попавшего гамма-кванта или нейтрона. Однако в течение некоторого времени (порядка  $10^{-4}$ с) после регистрации очередной элементарной частицы газоразрядный преобразователь не способен отмечать попадание следующей частицы (так называемое «мертвое время») или реагирует на нее образованием импульса пониженной амплитуды («время восстановления»). Таким образом, величина «мертвого времени» и «времени восстановления» определяет разрешающую способность и эффективность газоразрядного преобразователя.

Разрешающей способностью преобразователя называется количество ионизирующих частиц  $N_{\max}$ , уверенно отмечаемых преобразователем в единицу времени. Этот параметр связан с «мертвым временем»  $\tau_m$  и «временем восстановления»  $\tau_b$  соотношением

$$N_{\max} = \frac{1}{\tau_m + \tau_b}. \quad (11.39)$$

Разрешающая способность может быть также определена как минимальный промежуток времени между моментами прохождения ионизирующих частиц, необходимый для уверенной регистрации последних. В этом случае

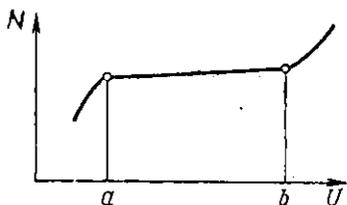
$$\tau_{\min} = \tau_m + \tau_b. \quad (11.40)$$

Под эффективностью газоразрядного преобразователя понимается отношение числа частиц, отмеченных преобразователем, к общему числу частиц, прошедших через его объем. Повышение эффективности, необходимое для увеличения точности преобразования и производительности исследований, обычно достигается увеличением рабочей поверхности катода, т. е. параллельным соединением газоразрядных преобразователей.

Основной рабочей характеристикой газоразрядного преобразователя является его счетная характеристика (рис. 25) — зависимость частоты импульсов  $N$  на выходе преобразователя при постоянной интенсивности облучения от напряжения  $U$ , приложенного к электродам преобразователя. Участок  $ab$ , являющийся рабочим участком, называется плато. Чем больше протяженность плато и меньше его наклон, тем лучше преобразователь.

У газоразрядных преобразователей Гейгера—Мюллера с примесью многоатомных газов (типа СИ, ВС, МС) протяженность плато составляет 250—300 В, угол наклона плато — 3—5 % на 100 В. Галогенные газоразрядные преобразователи (типа СГС) имеют плато шириной до 200 В и больший угол наклона — 10—15 % на 100 В.

Рис. 25. Счетная характеристика газоразрядного преобразователя Гейгера—Мюллера



К недостаткам газоразрядных радиационных преобразователей относятся:

1) невысокая эффективность счета (от долей процента до нескольких процентов у преобразователей Гейгера—Мюллера, до 10 % у пропорциональных преобразователей) и малая разрешающая способность;

2) постоянство амплитуды выходных импульсов независимо от энергии гамма-квантов — для преобразователей Гейгера—Мюллера, что не позволяет использовать их для изучения энергетического спектра излучения;

3) ограниченный срок службы — для преобразователей Гейгера—Мюллера ( $10^8$ — $10^{10}$  имп.), связанный с необратимым распадом молекул многоатомного наполнителя. У галогенных преобразователей за счет рекомбинации молекула срок службы несколько выше.

Вместе с тем газоразрядные преобразователи сохраняют работоспособность при повышенных (до 250—300 °С для преобразователей СИ-31Г) температурах. Наличие достаточно широкого плато позволяет снизить требования к стабилизации питающего напряжения. Кроме того, такие преобразователи характеризуются достаточно высокой мощностью — амплитуда выходных импульсов достигает единиц и даже десятков вольт.

### Сцинтилляционные преобразователи

Сцинтилляционный радиационный преобразователь (рис. 26) представляет собой конструктивную совокупность люминофора 1 (оптически прозрачного вещества, люминесцирующего под действием ядерного излучения) с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) 2. Сцинтилляционный преобразователь работает следующим образом. В результате взаимодействия попавшей элементарной частицы (или гамма-кванта) с материалом сцинтиллятора часть атомов сцинтиллятора переходит в возбужденное состояние. Обратный переход в нормальное состояние сопровождается испусканием кратковременной (порядка  $10^{-7}$ — $10^{-9}$  с) световой вспышки. Фотоны в дальнейшем преобразуются фотоэлектронным умножителем.

Фотоэлектронный умножитель представляет собой комбинацию фотоэлемента с электронным усилителем, дей-

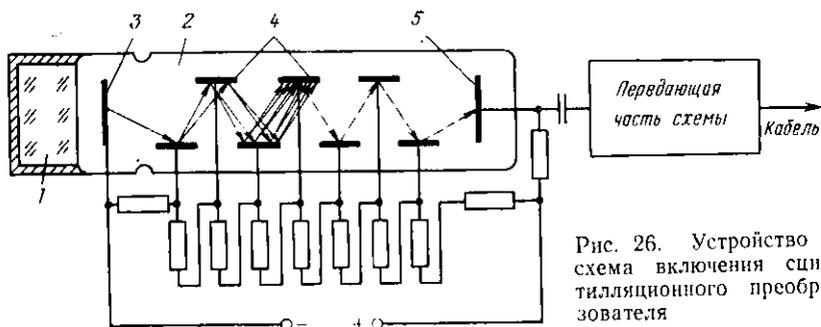


Рис. 26. Устройство и схема включения сцинтилляционного преобразователя

стве которого основано на явлении вторичной электронной эмиссии. Фотоны из сцинтиллятора попадают на фотокатод 3 и выбивают из него фотоэлектроны, которые, ускоряясь электрическим полем, устремляются к первому диноду 4 ФЭУ. Вследствие вторичной электронной эмиссии каждый электрон выбивает из динода вторичные электроны, число которых зависит от напряжения между электродами. Эти электроны, в свою очередь, ускоряются полем второго динода и при попадании на него также вызывают вторичную электронную эмиссию. В дальнейшем процесс повторяется и заканчивается образованием электронной лавины, достигающей анода 5 ФЭУ.

При попадании элементарной частицы на сцинтиллятор в энергию светового излучения преобразуется только небольшая часть всей поглощенной энергии частицы. Образовавшиеся фотоны разлетаются во все стороны, частично поглощаются в толще сцинтиллятора и т. д. Поэтому только часть фотонов достигает фотокатода ФЭУ и преобразуется в электрические импульсы. Таким образом, параметры сцинтилляционного преобразователя определяются свойствами как сцинтиллятора, так и фотоэлектронного умножителя.

Характеристиками сцинтиллятора являются его физическая и техническая эффективность. Физическая эффективность сцинтиллятора характеризует долю энергии ядерного излучения, преобразованную в световое излучение, техническая эффективность — долю энергии ядерного излучения, достигшую в виде энергии фотонов поверхности фотокатода ФЭУ и преобразованную в электрические импульсы. Важной характеристикой сцинтиллятора является также зависимость физической эффективности от энергии исследуемых частиц. При линейном характере этой зависимости сцинтилляторы могут применяться для спектрометрических исследований.

Основными характеристиками ФЭУ являются эффективность и спектральная характеристика фотокатода, а также общий коэффициент усиления и темновой ток ФЭУ. Эффективность фотокатода показывает, какая часть попадающих

на катод фотонов вырывает фотоэлектроны, а спектральная характеристика отражает величину фототока при облучении световыми волнами различной длины. Наибольшей эффективностью характеризуются сурьмяно-цезиевые катоды, максимум спектральной характеристики которых совпадает с максимумом спектра излучения сцинтилляторов.

Общий коэффициент усиления ФЭУ определяется усилением одного каскада  $\sigma$  и числом  $n$  каскадов:

$$M = \sigma^n. \quad (II.41)$$

Нижний предел чувствительности ФЭУ определяется темновым током, протекающим в анодной цепи умножителя при неосвещенном катоде. Темновой ток вызывается эмиссией электронов с фотокатода и первых диодов, усиливающих последующими каскадами ФЭУ, и возрастает с увеличением напряжения питания умножителя, повышением температуры и др.

В качестве сцинтилляторов в геофизической аппаратуре обычно применяют монокристаллы галлоидных щелочных металлов с небольшой (порядка 0,1—1,0 %) добавкой галлия: NaI(Tl), CsI(Tl), KI(Tl) — для регистрации гамма-излучения, и кристаллы сернистого цинка с добавкой серебра (или меди) и бора: ZnS(Ag) и ZnS(Cu) — для измерения плотности тепловых нейтронов. Примесь активатора (Tl, Ag, Cu) способствует созданию в решетках неорганических кристаллов дополнительных центров люминесценции [5].

С целью повышения чувствительности сцинтилляционного преобразователя, точности преобразования, а также производительности работ размеры сцинтиллятора выбирают возможно большими. При этом диаметр кристалла определяется диаметрами фотокатода ФЭУ и скважинного прибора, а длина — технической эффективностью сцинтиллятора. Например, при измерении естественного гамма-излучения кристаллы, работающие с фотоумножителем ФЭУ-35, имеют размер 30×70 мм. При измерении рассеянного гамма-излучения ввиду большей его интенсивности применяют сцинтилляторы меньших размеров.

Защита кристалла от атмосферного воздействия обеспечивается его герметизацией с помощью дюралюминиевого цилиндра, один из торцов которого выполнен из стекла. Через стекло фотоны попадают на фотокатод ФЭУ. В цилиндре кристалл окружают слоем окиси магния, создающим отражающую поверхность для световых вспышек. В некоторых случаях (например, при ГК и НГК) сцинтиллятор окружают металлическим (дюралюминиевым, свинцовым или кадмиевым) экраном для поглощения мягкой компоненты гамма-излучения или защиты от активации нейтронами. Для регистрации тепловых нейтронов применяют светосоставы Т-1 и Т-2 (смесь порошка из кристаллов ZnS(Cu) или ZnS(Ag) с борсодержащим веществом), которые размещают в пазах плексигласового цилиндра

(сцинтилляторы типа ЛДН) или наносят на внутреннюю поверхность цилиндра, пластины, Т-образной емкости и др. (сцинтилляторы типа ГОИ). Здесь, как и в пропорциональных газоразрядных преобразователях, при захвате нейтрона ядром бора происходит выделение альфа-частицы, которая затем отмечается преобразователем. Для регистрации надтепловых нейтронов сцинтиллятор окружают водородсодержащим веществом (полиэтилен, парафин) и кадмием.

Счетная характеристика сцинтилляционного преобразователя, в отличие от газоразрядного, имеет плато очень небольшой протяженности, в связи с чем для питания преобразователей следует применять высокостабилизированное напряжение.

Сцинтилляционные преобразователи обладают рядом преимуществ перед газоразрядными. Основными из них являются [5] следующие:

1) высокая эффективность, достигающая 20 % для гамма-излучения и еще больших величин для тепловых нейтронов;

2) большая разрешающая способность, позволяющая регистрировать более высокие скорости счета;

3) зависимость амплитуды выходных импульсов от энергии гамма-излучения, дающая возможность изучать энергетический спектр последнего;

4) небольшие размеры.

Вместе с тем большинство сцинтилляционных преобразователей характеризуется низкой термостойкостью и термостабильностью, что требует их термостатирования в скважинной радиометрической аппаратуре.

### Полупроводниковые преобразователи

Принцип действия полупроводниковых радиационных преобразователей основан на ионизации атомов в области, которая называется *p-n*-переходом и создается при тесном соприкосновении двух пластинок полупроводников, обладающих различной проводимостью. В местах соприкосновения пластинок происходит диффузия электронов из *n*-полупроводника в *p*-полупроводник. При этом часть дырок в тонком граничном слое *p*-полупроводника нейтрализуется, и этот слой заряжается отрицательно. Аналогично тонкий граничный слой *n*-полупроводника заряжается положительно. Таким образом, создается *p-n*-переход, препятствующий дальнейшей диффузии носителей заряда и обладающий свойствами диода. Если подключить *n*-полупроводник к отрицательному полюсу источника тока, а *p*-полупроводник — к положительному, то через переход потечет ток; при обратной полярности сопротивление *p-n*-слоя, называемого запиорным, возрастает и система не проводит тока.

При прохождении ионизирующей частицы (гамма-кванта) через запиорный слой в нем происходит ионизация и образуются

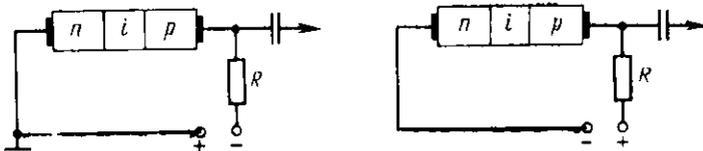


Рис. 27. Схемы включения полупроводниковых радиационных преобразователей

свободные носители заряда, которые под действием электрического поля дрейфуют к соответствующим электродам, что приводит к возникновению импульса напряжения на нагрузке  $R$  (рис. 27). Амплитуда импульса пропорциональна числу носителей зарядов, образованных ионизирующей частицей, а следовательно, ее энергии, что дает возможность изучать энергетический спектр излучения.

Эффективность регистрации гамма-квантов повышают увеличением толщины чувствительного (запорного) слоя. Для этого в контактирующий торец полупроводника с дырочной проводимостью добавляют литий, обладающий высоким коэффициентом диффузии. В результате получается трехслойный детектор с  $p$ - $i$ - $n$ -переходом.

Слой, куда проникли атомы лития, сохраняет  $p$ -проводимость. Тонкий слой, в котором преобладает литий, обладает свойствами  $n$ -полупроводника. В промежуточном слое концентрации лития и полупроводника-акцептора равны. Этот слой, обладающий высоким удельным сопротивлением, называется  $i$ -слоем. Его толщину в отдельных случаях удается довести до 8 мм, что достаточно для хорошего энергетического разрешения и неплохой эффективности (до 10 %) для гамма-квантов.

Преимущества полупроводниковых радиационных преобразователей — экономичность питания, весьма малые размеры и хорошее амплитудное разрешение (в 20—30 раз лучше, чем у сцинтилляционных преобразователей). Однако их широкое применение ограничивается относительно небольшими размерами чувствительной части.

## § 6. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В генераторных преобразователях, в отличие от резистивных, магнитных, емкостных и радиационных, иногда объединяемых под общим названием параметрических, выходной величиной является э. д. с., возникающая в результате действия входной величины. К числу генераторных относятся пьезоэлектрические и индукционные преобразователи.

## Пьезоэлектрические преобразователи

Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на явлении пьезоэффекта, который возникает в результате взаимосвязи между электрическим и механическими свойствами некоторых диэлектрических материалов, называемых пьезоэлектриками. Различают прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты.

Прямой пьезоэффект проявляется в возникновении электрических зарядов на гранях пьезоэлектриков под влиянием механических напряжений и исчезновении зарядов после снятия внешней нагрузки.

Обратный пьезоэффект заключается в изменении формы и геометрических размеров пьезоэлектриков, помещенных в электрическое поле.

Способность различных материалов к пьезоэффекту характеризуется пьезоэлектрической постоянной  $K_{\text{пэ}}$ , численно равной величине заряда (в кулонах), возникающего при действии внешней силы в 1 Н. Наиболее сильно пьезоэлектрический эффект выражен у сегнетоэлектриков — кристаллических веществ с аномально высокой диэлектрической проницаемостью и аномально большими значениями  $K_{\text{пэ}}$ . К ним относятся сегнетова соль, кварц, турмалин, титанат бария, дигидрофосфат аммония, цирконат-титанат свинца и др.

Сегнетова соль ( $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{KNa}$ ) обладает наибольшей пьезоэлектрической чувствительностью ( $K_{\text{пэ}} \approx 300 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н), однако отличается повышенной гигроскопичностью и низкой механической прочностью.

Кварц ( $\text{SiO}_2$ ) характеризуется пьезоэлектрической постоянной  $K_{\text{пэ}} = 2,1 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, практически не меняющейся при температуре до 500 °С, а также хорошими механическими свойствами.

Титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) — синтетическое поликристаллическое вещество, применяемое обычно в виде поляризованной керамики. Пьезоэлектрические свойства керамики титаната бария определяются ее составом (наличием примесей) и технологией изготовления. Значение  $K_{\text{пэ}}$  составляет приблизительно  $107 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н и не меняется при повышении окружающей температуры до 120 °С.

Керамика обладает высокой механической прочностью и не подвержена воздействию влаги.

Цирконат-титанат свинца (ЦТС)  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ , метаннобат свинца-бария  $(\text{PbBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$  и некоторые другие пьезоэлектрические материалы, также применяющиеся в виде керамики, обладают столь же ярко выраженным пьезоэффектом, сохраняющимся при более высокой (до 150—200 °С) температуре [4, 14]. Ценным свойством керамики является возможность изготовления из нее преобразователей любой формы, в том числе и ци-

линдрической, наиболее удобной для исследований в скважинах.

Рассмотрим на примере кристалла кварца основные соотношения для пьезоэлектрических преобразователей. В кристалле кварца (рис. 28), представляющем собой гексагональную призму, выделяют следующие кристаллографические оси: оптическую (продольную) ось  $z$ , электрические оси  $x$ , проходящие через ребра кристалла нормально к оптической оси, и механические (нейтральные) оси  $y$ , нормальные к граням кристалла.

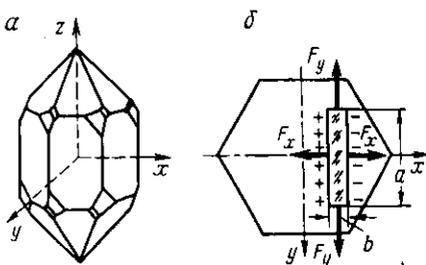


Рис. 28. Схема кристалла кварца:  $a$  — общий вид;  $b$  — поперечное сечение

Если из кристалла кварца вырезать пластинку в форме параллелепипеда с гранями  $a$ ,  $b$  и  $c$ , параллельными главным осям, то под влиянием внешних сил, направленных перпендикулярно к оптической оси, пластинка будет поляризоваться: на плоскостях, перпендикулярных к оси  $x$ , появятся электрические заряды.

Под действием силы, направленной вдоль оптической оси, электризации пластинки не происходит. Упрощенно явление пьезоэффекта можно объяснить нарушением электрического равновесия кристаллической решетки при ее деформации под действием внешней силы.

Пьезоэлектрический эффект характеризуется линейной зависимостью между интенсивностью поляризации и деформацией (а в пределах упругих деформаций — давлением). Поэтому при действии на кварцевую пластинку однородной растягивающей силы  $F_x$ , направленной вдоль электрической оси  $x$ , интенсивность поляризации

$$P = K_{пз} \rho_x = K_{пз} \frac{F_x}{S_x}, \quad (11.42)$$

где  $\rho_x$  — давление на грань  $ac$  пластинки;  $S_x$  — площадь грани  $ac$ .

Величина электрических зарядов, возникающих на каждой из граней, перпендикулярных к электрической оси:

$$q = P S_x = K_{пз} F_x. \quad (11.43)$$

При противоположном направлении действующей на пластинку силы  $F_x$  знаки зарядов, возникающих на гранях  $ac$ , меняются на обратные.

Пьезоэффект, проявляющийся при действии механической силы вдоль электрической оси, называется продольным.

Величина возникающих при этом зарядов определяется лишь значением силы и не зависит от размеров пластинки.

Если внешняя сила действует на пластинку вдоль механической оси, то заряды снова возникают на гранях  $ac$ , перпендикулярных к электрической оси, однако знаки зарядов будут противоположными по отношению к рассмотренным выше случаям. Например, при действии однородной растягивающей силы  $F_y$  вдоль оси  $y$  интенсивность поляризации будет определяться выражением

$$P = -K_{пз} p_y = -K_{пз} \frac{F_y}{S_y}, \quad (\text{II.44})$$

где  $p_y$  — давление на грань  $bc$ ;  $S_y$  — площадь грани  $bc$ .

Величина зарядов на каждой из граней  $ac$ .

$$q = PS_x = -K_{пз} F_y \frac{S_x}{S_y} = -K_{пз} F_y \frac{a}{b}. \quad (\text{II.45})$$

При действии однородной сжимающей силы  $F_y$  вдоль оси  $y$  знаки зарядов на гранях  $ac$  изменятся на противоположные.

Пьезоэффект, проявляющийся при действии внешней силы вдоль механической оси, называется поперечным. Величина зарядов, которые возникают в этом случае, определяется не только значением  $F_y$ , но и геометрическими размерами пластинки. Эту особенность обычно используют для повышения чувствительности пьезоэлектрических преобразователей.

В тех случаях, когда внешняя сила направлена под углом к электрической или механической оси, а также когда грани пластинки не параллельны главным осям кристалла, величина возникающих зарядов будет меньше, чем в рассмотренных случаях.

Поскольку величина зарядов меняется в соответствии с действующей силой, пьезоэлектрические преобразователи могут быть применены для измерения динамических нагрузок, деформаций, перемещений и т. п. В промышленной геофизике пьезоэлектрические преобразователи используют для изучения особенностей распространения упругих колебаний в окоскважинном пространстве. Обычно они имеют вид тонкостенных цилиндров из пьезокерамики с серебряным покрытием (электродами) на внутренней и внешней поверхностях. К электродам в зависимости от назначения преобразователя подключают источник переменного (пульсирующего) тока или измерительную схему. В первом случае под воздействием тока периодически изменяется длина средней окружности цилиндра и возникают его радиальные колебания, во втором — процесс протекает в обратном направлении.

Пьезоэлектрические преобразователи характеризуются простотой конструкции и малыми размерами, однако их примене-

ние в условиях скважины невозможно без жесткой оболочки, защищающей чувствительный элемент от механических повреждений, проникновения промывочной жидкости, контакт с которой приводит к замыканию электродов преобразователя, уменьшения гидростатического давления и т. п. Эта оболочка вместе с электроизоляционным материалом (масло, резиноподобные материалы), заполняющим пространство между ней и чувствительным элементом, существенно снижает чувствительность преобразователя и искажает излучаемое (воспринимаемое) волновое поле.

В аппаратуре акустического каротажа пьезоэлектрические преобразователи используют преимущественно в качестве приемников упругих волн. В скважинном акустическом телевизоре, а также акустических каверномерах и профиломерах они служат приемозлучателями.

### Индукционные преобразователи

Принцип действия индукционных преобразователей основан на явлении электромагнитной индукции, которая возникает при движении катушки в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом или электромагнитом. При изменении магнитного потока  $\Phi$ , сцепленного с витками катушки, в ней индуцируется э. д. с.

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}, \quad (II.46)$$

где  $\omega$  — число витков катушки.

Таким образом, входной величиной  $x$  индукционного преобразователя является скорость линейных или угловых перемещений.

По принципу действия индукционные преобразователи подразделяются на две группы [12]. В преобразователях первой группы (рис. 29, а) сопротивление на пути магнитного потока остается постоянным, а изменение индуцированной э. д. с. определяется перемещениями катушки 2 и магнита 1 относительно друг друга:

$$e = -Bl \frac{dx}{dt} = -B\pi d\omega \frac{dx}{dt} = K_k \frac{dx}{dt}, \quad (II.47)$$

где  $B$  — индукция в воздушном зазоре магнита;  $l = \pi d\omega$  — активная длина обмотки катушки;  $K_k = -B\pi d\omega$  — чувствительность катушки.

В преобразователях второй группы катушка 2 и магнит 1 неподвижны, а величина индуцированной э. д. с. определяется изменением магнитного потока в результате

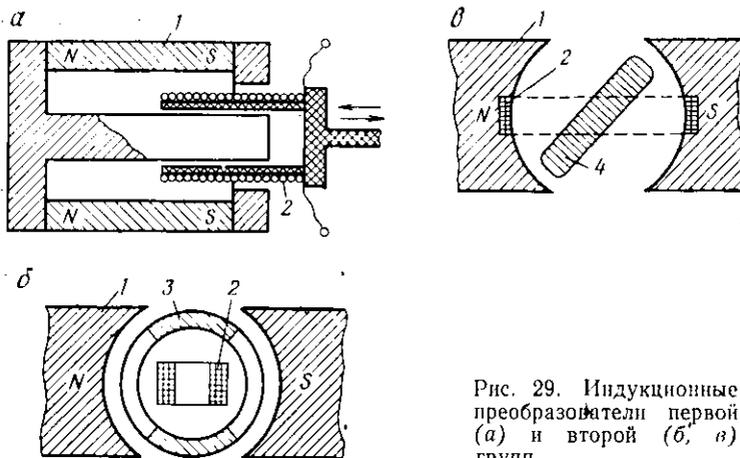


Рис. 29. Индукционные преобразователи первой (а) и второй (б, в) групп

изменения сопротивления магнитной цепи. Это изменение обычно осуществляет кольцо 3 (рис. 29, б) или якорь 4 (рис. 29, в) из ферромагнитного материала, связанные с изучаемым объектом.

При расчете индуцированной э. д. с. в преобразователях второй группы необходимо учитывать переменную составляющую, обусловленную изменением сопротивления магнитной цепи. Действительно, при изменении сопротивления магнитной цепи от  $R_M$  до  $R_M + \Delta R_M$  магнитный поток изменяется на величину

$$\Delta \Phi = \frac{F}{R_M} - \frac{F}{R_M + \Delta R_M}, \quad (\text{II.48})$$

где  $F$  — магнитодвижущая сила магнита.

Учитывая, что при периодическом изменении магнитного потока действующее значение его переменной составляющей равно  $\Delta \Phi / 2\sqrt{2}$ , величину индуцируемой в катушке э. д. с. можно рассчитать как

$$e = -\omega \Phi = -\frac{\omega F}{2\sqrt{2}} \left( \frac{1}{R_M} - \frac{1}{R_M + \Delta R_M} \right) = -K_k \omega \left( \frac{1}{R_M} - \frac{1}{R_M + \Delta R_M} \right), \quad (\text{II.49})$$

где  $\omega$  — круговая частота магнитного потока  $K_k = \frac{\omega F}{2\sqrt{2}}$  чувствительность катушки.

Из формул (II.47) и (II.49) следует, что чувствительность индукционного преобразователя может быть повышена путем увеличения числа витков катушки. Однако при этом возрастает

сопротивление катушки, что может затруднить согласование преобразователя с измерительной схемой; увеличиваются масса и размеры преобразователя; возрастает реакция поля катушки, что приводит к развозбуждению преобразователя и уменьшению его чувствительности.

К индукционным преобразователям относятся сельсинны и тахогенераторы, применяющиеся в геофизической практике соответственно для дистанционной передачи вращения мерного ролика блок-баланса и контроля скорости перемещения приборов (зондов) по стволу скважины. Тахогенераторы используют также в некоторых типах автоматических потенциометров для обеспечения надлежащего режима их работы.

**ЗОНДЫ И ДАТЧИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ****§ 1. ЗОНДЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ**

Зонды этой группы предназначены для создания в около-скважинном пространстве электрического или высокочастотного электромагнитного поля и измерения его параметров. Результатом измерения является кажущееся удельное сопротивление или кажущаяся электропроводность горных пород.

Среди зондов для электрометрии скважин выделяют: обычные зонды, зонды бокового каротажа, микрозонды и зонды бокового микрокаротажа.

К зондам для электромагнитных методов относятся индукционные зонды и зонды диэлектрического каротажа.

В рассматриваемую группу входят также и скважинные резистивметры. В зависимости от принципа действия они представляют собой небольшие по размерам обычные зонды или индукционные зонды и применяются соответственно для измерения удельного сопротивления или удельной электропроводности заполняющей скважину жидкости.

**Обычные зонды**

Обычный зонд для электрометрии скважин (градиент-зонд, потенциал-зонд) представляет собой трехэлектродное измерительное устройство, которое опускается в скважину и вместе с удаленным электродом образует установку для измерения кажущегося удельного сопротивления горных пород. Расстояния между электродами выбирают исходя из решаемых задач, геологических особенностей разреза скважины и других факторов. Излучателями зонда являются токовые электроды *A* и *B*, питаемые стабильным током *I* определенной частоты. Кажущееся сопротивление горных пород находят из выражения

$$\rho_k = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (\text{III.1})$$

где  $\Delta U$  — разность потенциалов между измерительными электродами *M* и *N*, мВ; *K* — коэффициент зонда, определяемый расстояниями между электродами, м.

В практике геофизических исследований обычно применяют многоэлектродные зонды, представляющие собой со-

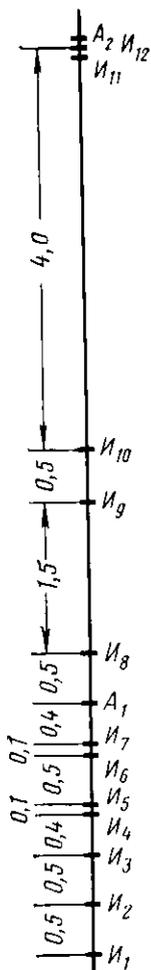


Рис. 30. Схема многоэлектродного зонда аппаратуры КСП-2

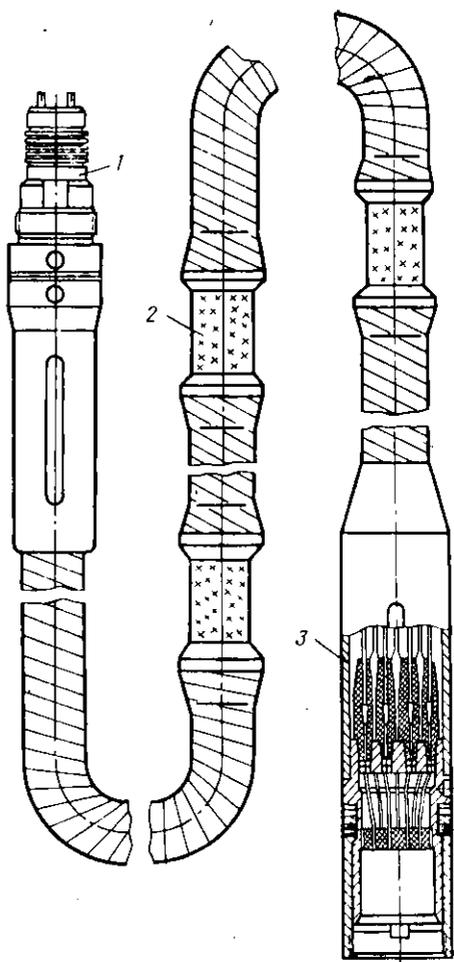


Рис. 31. Многоэлектродный зонд для электрометрии скважин [3]

чаще нескольких трехэлектродных зондов с общим токовым электродом. Число электродов и расстояния между ними выбирают такими, чтобы можно было скомбинировать необходимые зонды для стандартной электрометрии и бокового каротажного зондирования.

На рис. 30 изображена схема многоэлектродного зонда электрометрической аппаратуры типа КСП-2, содержащего два токовых ( $A_1$  и  $A_2$ ) и двенадцать измерительных ( $I_1$ — $I_{12}$ ) элект-

тров<sup>1</sup>. С помощью переключающего устройства, расположенного в скважинном приборе, можно за три цикла (три спуско-подъемных операции) обеспечить измерение  $\rho_k$  семью зондами: первый цикл —  $A_2, 0M, 0,5N$  (электроды  $A_1, I_2, I_1$ );  $N, 0,5M, 2,0A$  ( $I_{10}, I_9, A_1$ );  $N, 6,0M, 0,5A$  ( $I_{12}, I_8, A_1$ ); второй цикл —  $A, 0,4M, 0,1N$  ( $A_1, I_7, I_6$ );  $A, 1,0M, 0,1N$  ( $A_1, I_5, I_4$ );  $A, 2,0M, 0,5N$  ( $A_1, I_2, I_1$ ); третий цикл —  $A, 8,0M, 1,0N$  ( $A_2, I_3, I_1$ );  $A, 4,0M, 0,5N$  ( $A_2, I_{10}, I_9$ ) и резистивметр ( $A_2, I_{12}, I_{11}$ ).

Конструкция многоэлектродного зонда зависит [3]: а) от типа геофизического кабеля, с которым работает скважинный прибор; б) от заданного комплекта электродных установок; в) от способа соединения зонда с кабелем и скважинным прибором; г) от способа закрепления электродов и подводящих проводов.

Конструктивную основу многоэлектродного зонда (рис. 31) составляет отрезок специального многожильного кабеля типа КЗФ-1, на котором размещаются стальные или свинцовые (для измерения ПС) патрубки-электроды 2, запрессованные в резиновый корпус. Каждый электрод подсоединяется к соответствующей жиле зондового кабеля. Нижний конец зонда снабжен зондовым наконечником 3 для механического и электрического сочленения со скважинным прибором. Сверху зонд оканчивается стандартной кабельной головкой 1, служащей для присоединения к геофизическому кабелю.

### Зонды бокового каротажа

В зависимости от назначения зонды бокового каротажа содержат три, семь или девять электродов точечной или удлиненной формы, располагающихся по одной линии (рис. 32). В от-

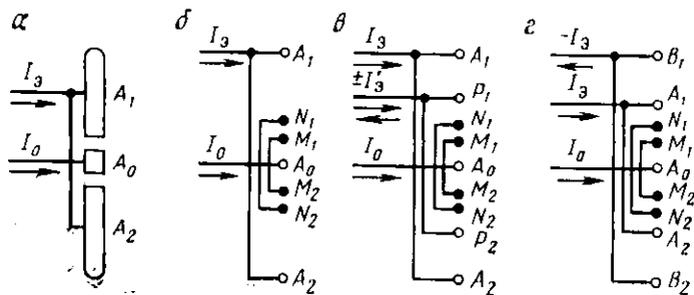


Рис. 32. Схемы зондов бокового каротажа.

Зонды: а — трехэлектродный, б — семиэлектродный, в — девятиэлектродный, г — псевдобокового каротажа

<sup>1</sup> Электроды  $A_2, I_{12}$  и  $I_{11}$  образуют скважинный резистивметр, поэтому в сравнении с остальными межэлектродными расстояниями их можно считать расположенными в одной точке.

личие от обычных зондов КС зонды бокового каротажа содержат дополнительные (экранные) электроды  $A_1, A_2, B_1, B_2, P_1, P_2$ , обеспечивающие распространение тока  $I_0$  основного токового электрода  $A_0$  в заданном направлении, т. е. фокусировку тока.

Фокусировка тока достигается выравниванием потенциалов центрального  $A_0$  и экранных электродов, которое может быть обеспечено двумя способами [2]: 1) автоматическим регулированием тока через экранные электроды; 2) гальваническим соединением центрального и экранных электродов.

Величину экранного тока  $I_0(I'_0)$  и расстояния между электродами выбирают в соответствии с мощностью изучаемых пластов и требуемой глубиной исследования.

Многояэлектродные зонды бокового каротажа выполняют или как обычные многояэлектродные зонды КС, или в виде жесткой цилиндрической конструкции, на внешней поверхности которой изолированно друг от друга располагаются кольцевые электроды, а внутри размещается электронная схема.

В трехэлектродном зонде (рис. 33) электродами  $A_0, A_1$  и  $A_2$  являются отдельные части охранного кожуха, разделенные изоляционными промежутками. Вспомогательные электроды (обратный токовый  $B$  и измерительный  $N_\infty$ ) измерительной установки располагаются на некотором удалении от основных электродов.

Размеры зонда устанавливают исходя из условий линейной зависимости его показаний от удельного сопротивления исследуемых пород. Как показывают результаты моделирования, достаточная степень фокусировки тока центрального электрода обеспечивается при общей длине зонда  $L > (8 \div 10)d_c$  (где  $d_c$  — диаметр скважины). Для повышения разрешающей способности зонда длину  $L_0$  центрального электрода следует выбирать возможно меньшей. Однако при  $L_0 < 0,3d_c$  существенно возрастает сопротивление заземления электрода, что приводит к усложнению условий измерения. Для того чтобы электрическое поле центрального электрода не было искажено, расстояния между центральным и экранными электродами (т. е. тол-

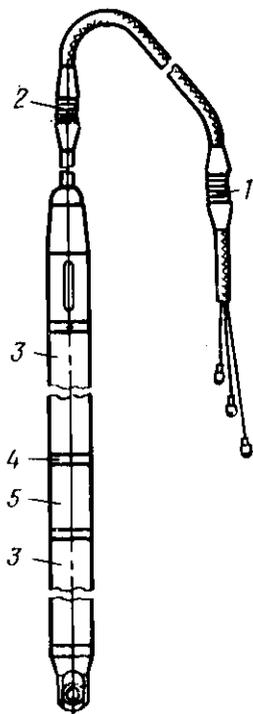


Рис. 33. Трехэлектродный зонд бокового каротажа [3]:

1 — удаленный токовый электрод; 2 — удаленный измерительный электрод; 3 — экранные электроды; 4 — изоляционные промежутки; 5 — центральный электрод

щина изоляционных промежутков) должны быть возможно меньшими.

Уменьшение влияния скважины и вмещающих пород на результаты измерения обеспечивается выбором диаметра зонда  $d$ , который должен быть более 0,25 диаметра исследуемой скважины.

В соответствии с указанными положениями общая длина зонда отечественной аппаратуры бокового каротажа трехэлектродным зондом (ТБК, АБКТ, Э-1 и др.) принята равной  $L = 3,2$  м, длина центрального электрода  $L_0 = 0,15$  м, а диаметр  $d = 70-73$  мм.

### Микрозонды

Микрозонд представляет собой трехэлектродную измерительную установку с небольшими (2,0—2,5 см) расстояниями между электродами, используемую для изучения прискважинной части разреза. Для уменьшения влияния промывочной жидкости на результаты измерения такую установку монтируют на башмаке из изоляционного материала, который в процессе исследования специальным устройством прижимается к стенке скважины.

Конструкция микрозонда должна обеспечить надежный и постоянный контакт электродов с горными породами. Это достигается выбором соответствующей формы башмака и конструкцией прижимного устройства.

На рис. 34 показаны некоторые разновидности измерительных башмаков микрозондов. Жесткий башмак (рис. 34, а) изготавливают из износостойчивой резины 2, армированной стальной пластиной 3. В башмак на расстоянии 25 мм один от другого вмонтированы три латунных электрода 1 диаметром 10 мм. С помощью выводов 5 электроды соединяются с измерительной схемой. Ввиду плотного облегания электродов резиной рабочей является только торцовая поверхность электродов. Места выводов электродов тщательно изолируются резиной 4. Такую конструкцию имеют измерительные башмаки микрозондов МДО-2, Э-2 и некоторых других.

Однако жесткий башмак не всегда обеспечивает плотный контакт электродов со стенкой скважины из-за ее неправильной формы. Более надежный контакт достигается при использовании гидравлического башмака, имеющего гибкую внешнюю поверхность (рис. 34, в). Находясь под воздействием прижимного устройства, гидравлический башмак принимает форму, соответствующую поверхности стенки скважины. Внутренняя полость башмака заполняется трансформаторным маслом.

Поскольку размеры электродов микрозондов и межэлектродные расстояния соизмеримы, коэффициент микрозондов в отличие от обычных зондов КС определяют экспериментально по

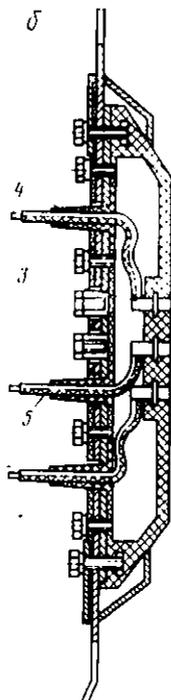
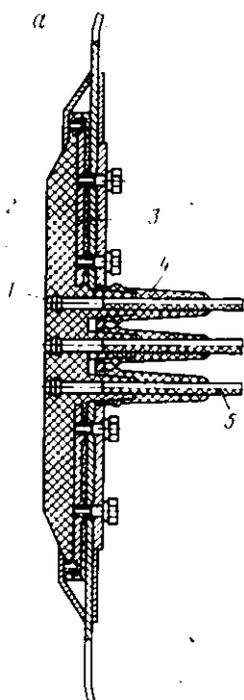


Рис. 34. Измерительные башмаки микрозондов:

*a* — жесткий; *б* — гидравлический

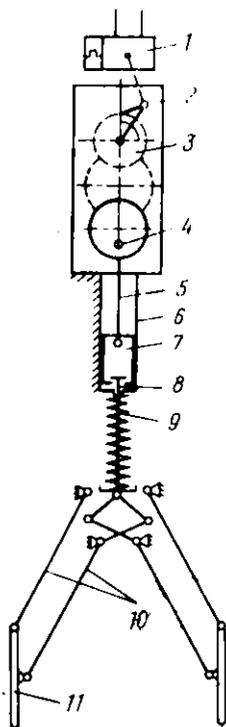


Рис. 35. Кинематическая схема управляемого прижимного устройства скважинного прибора Э-2

результатам измерения в жидкости известного удельного сопротивления.

Прижатие измерительных башмаков микрозондов к стенке скважины осуществляется неуправляемыми и управляемыми прижимными устройствами, которые обеспечивают более надежный и постоянный контакт измерительной установки с горными породами, а кроме того, улучшают проходимость скважинного прибора при спуске и позволяют сократить время на повторение исследования в заданном интервале.

На рис. 35 изображена кинематическая схема управляемого прижимного устройства скважинного прибора Э-2. В качестве двигателя прижимного устройства используется импульсный электромагнит 1, сочлененный с редуктором 2 через храповой механизм 3 одностороннего действия. Кривошип 4, расположенный на выходном валу редуктора, связан шатуном 5 с поршнем 7, который помещен в цилиндр 6. Шток 8, жестко связанный с поршнем, соединен с пружиной 9 и системой

рычагов 10, несущих башмаки 11 микрозонда. Все узлы, за исключением башмаков и системы рычагов, размещены в защитном кожухе, который заполнен кремнийорганической жидкостью и снабжен компенсатором давления.

При расположении кривошипа 7 в нижнем положении (как показано на схеме) шток 8 под действием пружины 9 переместится вниз, раскрыв рычаги 10, которые прижимают башмаки 11 к стенке скважины. В таком положении выполняются подъем прибора и измерение  $\rho_k$ . При изменении диаметра скважины шток свободно перемещается относительно поршня 7.

Для закрытия системы рычагов после проведения исследований в скважине или перед повторным спуском прибора с поверхности по кабелю подаются импульсы тока. Под действием этих импульсов якорь электромагнита совершает возвратно-поступательное перемещение, приводя в действие редуктор через храповой механизм. Кривошип постепенно из нижнего положения переходит в верхнее, перемещая шатуны, поршень и шток. Пружина при этом сжимается, а рычаги складываются. Приближение кривошипа к верхнему крайнему положению определяется по электрическому сигналу, передаваемому на поверхность от контактного механизма, связанного с кривошипом (на схеме не показан).

Соединение шатуна со штоком через поршень обеспечивает плавность раскрытия рычагов.

### Зонды бокового микрокаротажа

Зонд бокового микрокаротажа, как и обычный микрозонд, предназначен для изучения части разреза, непосредственно прилегающей к скважине, и отличается от него числом, формой и размерами электродов, размещенных на измерительном башмаке. Боковой микрокаротажный зонд, показанный на рис. 36, а, представляет собой систему из точечного (основной токовый)  $A_0$  и кольцевых (измерительные  $M$  и  $N$  и экранный  $A_0$ ) электродов. В боковой проекции такая установка эквивалентна семиэлектродному зонду бокового каротажа. Другой микрозонд (рис. 36, б) имеет два электрода ( $A_0$  и  $A_0$ ), имеющих вид концентрически расположенных металлических пластин, и соответствует трехэлектродному зонду бокового каротажа. Микрозонд, изображенный на рис. 36, в, отличается от показанного на рис. 36, б наличием рамочного электрода  $M$ , расположенного между основным  $A_0$  и экранным  $A_0$  электродами.

Преимущественное применение в отечественной аппаратуре БМК (КМБК-3, Э-2) получил двухэлектродный зонд.

Зонды бокового микрокаротажа, как и микрозонды, снабжены неуправляемыми или управляемыми прижимными устройствами. Коэффициент таких зондов также определяется экспериментально.

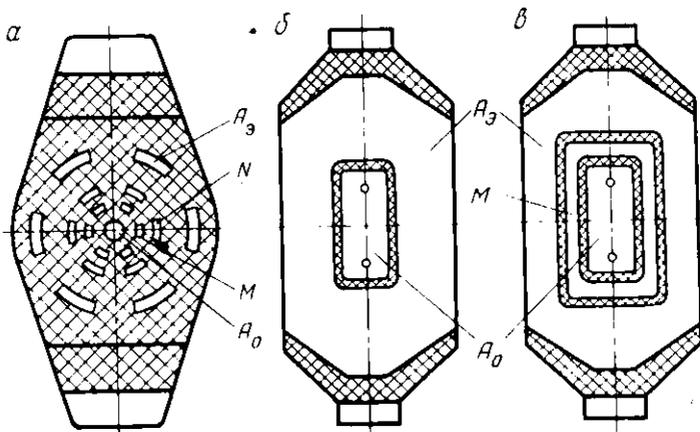


Рис. 36. Схемы измерительных башмаков зондов бокового микрокаротажа.

Зонд: а — четырехэлектродный, б — двухэлектродный, в — трехэлектродный

### Зонды для электромагнитных методов

В эту группу входят зонды индукционного и диэлектрического каротажа.

Индукционные зонды предназначены для измерения кажущейся удельной электропроводности горных пород путем создания в околоскважинном пространстве высокочастотного электромагнитного поля и исследования его параметров. В простейшем случае индукционный зонд состоит из генераторной и измерительной катушек, расположенных по одной линии на некотором расстоянии друг от друга. Через генераторную катушку (излучатель зонда) пропускается переменный ток частотой  $f$  несколько десятков килогерц, величина которого  $I$  сохраняется постоянной в процессе измерения. С помощью измерительной катушки (приемник зонда) измеряют величину э. д. с., наводимую вихревыми токами, которые индуцируются в окружающей среде и связаны с ее электропроводностью  $\sigma$ .

Если окружающая среда однородна и немагнитна, то величина регистрируемой э. д. с. определяется выражением [2]

$$e = - \frac{\alpha f^2 n_r n_n s_r s_n I}{L} \sigma = K_n \sigma, \quad (III.2)$$

где  $s_r$  и  $n_r$  — площадь и число витков генераторной катушки;  $s_n$  и  $n_n$  — площадь и число витков измерительной катушки;  $L$  — длина индукционного зонда — расстояние между серединами генераторной и измерительной катушек;  $K_n$  — коэффициент индукционного зонда.

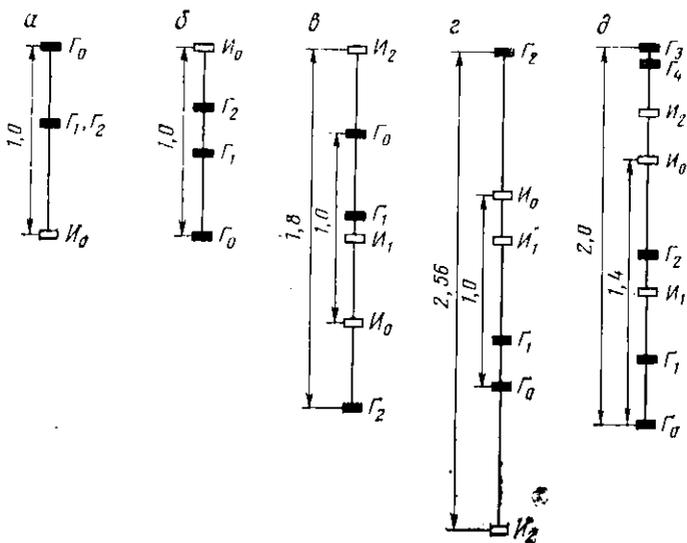


Рис. 37. Схемы индукционных зондов.

Зонд: а — 4И1 (аппаратура ПИК-1М), б — 4Ф1 (аппаратура ВНК-1М), в — 6Ф1 (аппаратура АНК-3, АНКМ), г — 6Э1 (аппаратура Э-3, Э-3М), д — 8И1,4 (аппаратура АНК-4);  $G_0$  и  $I_0$  — основные генераторная и измерительная катушки;  $G_1, G_2, G_3, G_4, И_1, И_2$  — фокусирующие генераторные и измерительные катушки

Как видно, индукционный каротажный зонд в принципе аналогичен индуктивному измерительному преобразователю трансформаторного типа.

Наибольшее распространение получили многокатушечные индукционные зонды (рис. 37), которые кроме главных (генераторной и измерительной) содержат дополнительные катушки, называемые фокусирующими. Количество таких катушек, взаимное расположение и число витков в них выбирают такими, чтобы скважина, зона проникновения и вмещающие породы оказывали минимальное влияние на результаты измерения и фиксируемое значение электропроводности было возможно ближе к удельной электропроводности породы. С помощью дополнительных катушек, кроме того, компенсируется э. д. с. прямого поля генераторной катушки.

Таким образом, фокусирующие катушки обеспечивают направленность действия индукционного зонда.

Степень фокусировки многокатушечного зонда оценивается отношением

$$K_{\phi} = e_{\text{МК}} / e_{\text{ДК}},$$

где  $e_{\text{МК}}$  — э. д. с. в однородной среде для многокатушечного зонда;  $e_{\text{ДК}}$  — э. д. с. в однородной среде для двухкатушечного зонда; образованного главными катушками многокатушечного.

Различают зонды со слабой ( $K_{\phi} > 0,3$ ) и сильной ( $K_{\phi} < 0,3$ ) фокусировкой.

Если фокусирующие катушки расположены симметрично относительно точки записи (середины расстояния между главными катушками), то индукционный зонд называется симметричным, в противном случае — несимметричным.

По расположению дополнительных катушек относительно главных различают зонды: а) с внутренней фокусировкой — дополнительные катушки расположены в пределах длины зонда (т. е. между главными катушками); б) с внешней фокусировкой — дополнительные катушки расположены за пределами длины зонда; в) со смешанной фокусировкой — дополнительные катушки расположены как в пределах, так и вне длины зонда.

Внешняя фокусировка позволяет улучшить вертикальную характеристику индукционного зонда, т. е. уменьшить влияние вмещающих пород на результаты измерения, и в меньшей степени — на его радиальную характеристику. Внутренней фокусировкой удается существенно уменьшить влияние скважины и зоны проникновения на результаты измерения, т. е. улучшить радиальную характеристику зонда.

Катушки обычно выполняются однослойными на общем стержне, так что диаметры и площади их витков одинаковы. Числа витков главных катушек в большинстве случаев также одинаковы.

На рис. 38 изображена конструкция индукционного зонда 6Э1 аппаратуры индукционного каротажа типа Э-3. Основу зонда составляет стержень 9 из стеклопластика, на котором размещены шесть катушек 7 — три генераторные ( $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_6$ ) и три измерительные ( $L_1$ ,  $L_4$  и  $L_5$ ). Расстояние между серединами главных катушек ( $L_2$  и  $L_5$ ), т. е. длина зонда, составляет 1 м. Катушки в генераторной и измерительной линиях зонда соединены последовательно; обе линии симметричны относительно «земли».

Каждая катушка состоит из двух секций. Фокусирующие катушки выполнены так, что общее число витков в них равно числу витков соответствующих главных катушек зонда. Этим обеспечивается равенство моментов всех катушек по вторичному магнитному полю вихревых токов в массе провода, а также равенство индуктивности и активного сопротивления катушек, что существенно снижает нулевой уровень зонда и стабилизирует его при значительных изменениях окружающей температуры.

В стержне 9 имеются пазы 8, в которые уложены соединительные провода, помещенные в статические экраны. Сверху все катушки обмотаны изолирующим слоем 5 в виде жгута из стеклоткани, пропитанного компаундом на основе мономера 4ФА. От агрессивного воздействия промывочной жидкости

в скважине зонд защищен тепло- и маслостойкой резиновой оболочкой 6.

Снизу зонд оканчивается хвостовиком 10, а сверху — промежуточным мостом 4, к которому крепится корпус предварительного усилителя 3 измеряемой э.д.с., снабженный разъемами 2

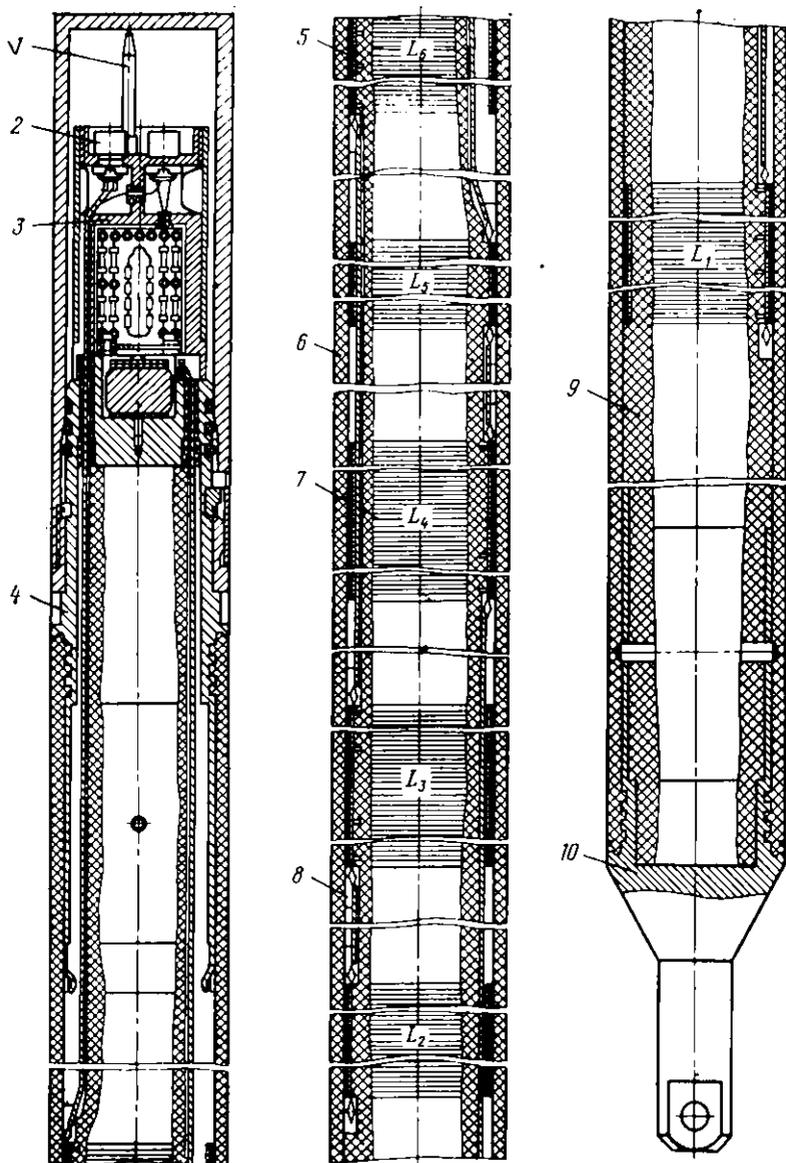


Рис. 38. Индукционный зонд аппаратуры Э-3

и направляющими 1. С помощью промежуточного моста индукционный зонд электрически и механически соединяется с электронным блоком скважинного прибора. Места соединения герметизируются резиновыми кольцами.

При исследовании скважин с диаметром более 200 мм, заполненных хорошо проводящей ( $\rho_c < 0,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) промывочной жидкостью, индукционный зонд снабжается центрирующими устройствами (аппаратура Э-3М).

Общая длина индукционного зонда 3,84 м, диаметр 73 мм. Зонд предназначен для исследования скважин глубиной до 7500 м с максимальной температурой 200 °С и гидростатическим давлением до 100 МПа.

Зонды волнового диэлектрического каротажа обычно включают в себя одну излучающую (генераторную) и две измерительные катушки. Поскольку в данном методе создается и изучается электромагнитное поле более высокой (десятки МГц) частоты, то для уменьшения помех в зонде предусматриваются специальные меры. Генератор, питающий излучающую катушку, и усилители высокой частоты, соединяемые с измерительными катушками, располагаются в непосредственной близости от зонда, образуя единую с ним конструкцию — зондовый блок. Измерительные катушки, представляющие собой маловитковые контуры, и усилители помещаются в электростатические экраны. Соединение катушек с усилителями осуществляется высокочастотными кабелями (фидерами).

### Скважинные резистивиметры

Резистивиметр представляет собой обычный зонд КС или индукционный зонд, предназначенный для измерения удельного сопротивления (удельной электропроводности) заполняющей скважину жидкости. В соответствии с назначением конструкция резистивиметра должна обеспечивать минимальное влияние горных пород, слагающих разрез скважины, и обсадной колонны на получаемые результаты. Это достигается соответствующим выбором размеров, формы и взаимного расположения элементов зонда, а также использованием экранирующих приспособлений.

На рис. 39 изображена конструкция скважинного резистивиметра, входящего в многоэлектродный зонд электрометрической аппаратуры КСП-2. Резистивиметр образован системой электродов, запрессованных в резиновый трубчатый корпус 1. В центре расположен токовый электрод 3, имеющий форму кольцевой пластины со сферической наружной поверхностью. Один из измерительных электродов 4 размещен внутри токового и изолирован от него изоляционным вкладышем 5. Другой измерительный электрод выполнен в виде шести дужек 2, расположенных по сферической поверхности, концентричной токо-

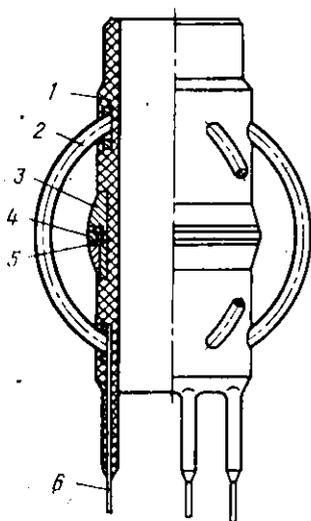


Рис. 39. Скважинный резистивметр

вому электроду. Выводы 6 электродов соединяются с соответствующими зондовыми проводами многоэлектродного зонда.

Индукционный скважинный резистивметр РИС-42, в отличие от описанного выше резистивметра, используют для бесконтактного измерения удельной электропроводности заполняющей скважину жидкости. Его измерительная установка представляет собой индуктивный преобразователь трансформаторного типа, состоящий из двух соосно расположенных тороидальных катушек. Внутри катушек проходит канал, который через окна в кожухе из непроводящего материала свободно заполняется жидкостью, находящейся в скважине.

Одна из катушек (генераторная) питается переменным током частотой 5 кГц, который создает в окружающей жидкости вихревые токи, направленные вдоль оси преобразователя. Пересекая витки другой (измерительной) катушки, эти токи индуцируют в ней э. д. с., пропорциональную удельной электропроводности жидкости. Обе катушки изолированы от жидкости и защищены экраном.

Индукционный резистивметр обеспечивает качественное измерение при наличии нефти и газа в исследуемой жидкости.

Ввиду небольших размеров измерительной установки коэффициенты резистивметров обоих типов определяют экспериментально при погружении в раствор известного удельного сопротивления.

## § 2. ЗОНДЫ ДЛЯ РАДИОМЕТРИИ СКВАЖИН

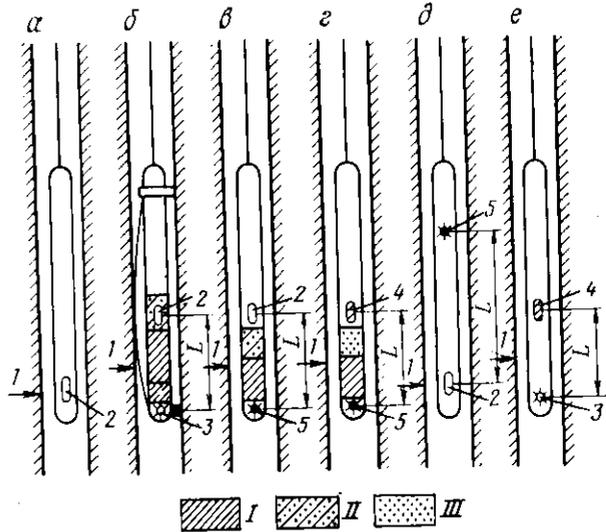
Схемы зондов, предназначенных для выполнения различных видов радиометрии скважин, изображены на рис. 40.

В общем случае зонд для радиометрии скважин состоит из источника (излучателя) радиоактивного излучения и приемника (детектора). Исключение составляют зонды для измерения общей интенсивности естественного гамма-излучения (гамма-каротаж) и его энергетических составляющих (спектрометрия гамма-излучения), в которых имеется только приемник радиоактивного излучения. Расстояние ( $L$ ) между серединами источника и приемника излучения называется длиной зонда.

Конструкция зонда должна обеспечивать [3]: 1) требуемую

Рис. 40. Схемы зондов для радиометрии скважин [17]:

*a* — ГК; *б* — ГГК;  
*в* — НГК и ИНГК;  
*г* — ННК и ИННК;  
*д* — нейтронного активационного каротажа; *е* — гамма-нейтронного каротажа;  
*1* — стальной экран; *II* — свинцовый экран; *III* — водородсодержащая среда;  
*1* — точка записи результатов измерения; *2* — детектор гамма-излучения; *3* — источник гамма-излучения; *4* — детектор нейтронов; *5* — источник нейтронов



точность и высокую производительность исследований; 2) герметизацию источника и приемника радиоактивного излучения во всем рабочем диапазоне температур и давлений; 3) направленность действия зонда (коллимирование) или фиксированное положение его по оси скважины; 4) экранирование в осевом направлении для исключения влияния источника излучения на приемник; 5) изменение в заданных пределах длины зонда, быстрое отсоединение и смену источника излучения.

Выбор типа и конструкции приемника определяется видом исследуемого радиоактивного излучения (гамма-кванты, нейтроны), его энергетическим спектром, геологическими условиями (мощность пластов, средний уровень излучения), условиями эксплуатации (температура окружающей среды и величина гидростатического давления) и другими факторами. В качестве приемников используют радиационные преобразователи различных видов — газоразрядные самогасящиеся, сцинтилляционные, пропорциональные. При измерении относительно малых интенсивностей гамма-излучения газоразрядные преобразователи вследствие их невысокой эффективности соединяют в группу от двух до шести штук. Иногда группируют и сцинтилляционные преобразователи (например, в аппаратуре ДРСТ-3). Для повышения термостойкости и термостабильности сцинтилляционные преобразователи термостатируются — помещаются в сосуд Дюара.

В качестве источников гамма-излучения в рассматриваемых зондах используют радиоактивные изотопы некоторых элементов, различающиеся по своим техническим (величина энергии и степень энергетической однородности испускае-

Т а б л и ц а 1

Характеристики источников гамма-квантов, применяемых в качестве излучателей зондов для радиометрии скважин

Изотоп элемента	Энергия гамма-квантов, МэВ	Гамма-активность 1 мКи, мг-экв. Ra	Выход гамма-квантов на один распад, %	Период полураспада	Область применения
<sup>60</sup> Co	1,33	1,57	100	5,27 года	Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГКП)
<sup>137</sup> Cs	0,662	0,37	82	30 лет	
<sup>203</sup> Hg	0,279	0,17	87	46,9 дня	Селективный гамма-гамма-каротаж (ГГКС)
<sup>76</sup> Se	0,138	0,19	18,7	125 дней	
<sup>76</sup> Se	0,268	0,19	63,5	125 дней	То же
<sup>170</sup> Tm	0,084	1,4 · 10 <sup>-4</sup>	37	129 дней	»
<sup>124</sup> Sb	0,60	1,18	100	53,7 дня	»
<sup>124</sup> Sb	1,71	1,18	45,7	53,7 дня	Гамма-нейтронный каротаж (ГНК) на бериллий
<sup>124</sup> Sb	2,11	1,18	9,9	53,7 дня	То же
<sup>24</sup> Na	2,76	2,26	100	15 ч	»
<sup>24</sup> Na	1,38	2,26	100	15 ч	Гамма-нейтронный каротаж (ГНК) на бериллий и дейтерий
					То же

мых гамма-квантов, наличие сопровождающего излучения и др.) и эксплуатационным (скорость распада и общий выход гамма-квантов, т. е. мощность) характеристикам (табл. 1). Скорость распада источников гамма-излучения определяет срок их службы, а общий выход гамма-квантов — статистическую точность результатов исследования. Обе эксплуатационные характеристики источников должны быть возможно большими.

Общий недостаток источников гамма-излучения — относительно низкая (не более 3 МэВ) энергия гамма-излучения.

Для создания в скважине нейтронных полей используют ампульные источники нейтронов и малогабаритные генераторы нейтронов. В источниках обоих типов выход нейтронов происходит за счет ядерных реакций, протекающих при бомбардировке ядер легких элементов (дейтерия, лития, бериллия, бора и др.) потоком элементарных частиц. Нейтронные источники различаются по общему выходу и энергетическому составу нейтронов, природе и интенсивности сопровождающего излучения и т. п.

В ампульных источниках для получения нейтронов наибольшее распространение получили ядерные реакции типа ( $\alpha, n$ ). В качестве альфа-излучателей используют радий, полоний или плутоний; мишенью обычно является бериллий, реже бор. Источник представляет собой порошкообразную смесь препаратов альфа-излучателя и мишени, помещенную в герметич-

ную ампулу. Выход нейтронов в основном зависит от способа приготовления источника (степени измельчения, чистоты вещества и других, трудно учитываемых факторов) и может колебаться в пределах нескольких десятков процентов при одних и тех же содержаниях альфа-излучателя и мишени. Срок службы (скорость распада) ампульных источников нейтронов определяется периодом полураспада альфа-излучателей, составляющим соответственно 24 360 лет для плутония, 1617 лет для радия и 138,3 дня для полония.

Наибольшее распространение в геофизической практике получили полониево-бериллиевые источники ввиду меньшей интенсивности гамма-излучения, сопровождающего выход нейтронов.

Для получения нейтронов невысоких энергий используют ядерные реакции типа  $(\gamma, n)$ , при которых мишенями служат изотопы  $^9\text{Be}$  и  $^2\text{H}$ , а гамма-излучателями — препараты искусственных и естественных радиоактивных изотопов, у которых энергия гамма-излучения выше пороговых значений энергии гамма-излучения мишеней (соответственно 1,67 и 2,23 МэВ) [5]. Гамма-нейтронные источники характеризуются меньшим выходом нейтронов по сравнению с источниками, основанными на реакции  $(\alpha, n)$ . Наибольшее практическое распространение при скважинных исследованиях получили сурьмяно-бериллиевые источники.

Характеристики некоторых ампульных нейтронных источников приведены в табл. 2.

Основные недостатки ампульных источников: 1) относительно

Таблица 2

Основные характеристики ампульных нейтронных источников

Источник	Ядерная реакция	Энергия нейтронов, МэВ	Примерный выход нейтронов в 1 с на 1 Ки	Период полураспада
Pu + Be	$^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$	До 11,0	$1,7 \cdot 10^6$	24 360 лет
Ra + Be	$^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$	До 13,0	$1,7 \cdot 10^7$	1 617 лет
Po + Be	$^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$	До 11,0	$1,9 \cdot 10^6$	138,3 дня
Rn + Be	$^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$	До 11,0	$1,5 \cdot 10^7$	3,82 дня
Ra + B	$^{11}\text{B} (\alpha, n) ^{14}\text{N}$	До 8,0	$6,7 \cdot 10^6$	1617 лет
Po + B	$^{11}\text{B} (\alpha, n) ^{14}\text{N}$	До 5,0	$9,0 \cdot 10^6$	138,3 дня
MsTh <sub>2</sub> + Be	$^9\text{Be} (\gamma, n) ^9\text{Be}$	0,827	$3,5 \cdot 10^4$	6,7 лет
<sup>88</sup> I + Be	$^9\text{Be} (\gamma, n) ^9\text{Be}$	0,16	$1,0 \cdot 10^6$	87 дней
<sup>124</sup> Sb + Be	$^9\text{Be} (\gamma, n) ^9\text{Be}$	0,024	$1,9 \cdot 10^6$	53,7 дня
<sup>140</sup> La + Be	$^9\text{Be} (\gamma, n) ^9\text{Be}$	0,62	$3,0 \cdot 10^3$	40,2 часа
<sup>24</sup> Na + Be	$^9\text{Be} (\gamma, n) ^9\text{Be}$	0,83	$1,3 \cdot 10^3$	15 часов
Ra + D <sub>2</sub> O	$^2\text{D} (\gamma, n) ^1\text{H}$	0,12	$1,0 \cdot 10^3$	1617 лет
MsTh <sub>2</sub> + D <sub>2</sub> O	$^2\text{D} (\gamma, n) ^1\text{H}$	0,197	$9,7 \cdot 10^4$	6,7 лет
<sup>88</sup> I + D <sub>2</sub> O	$^2\text{D} (\gamma, n) ^1\text{H}$	0,31	$3,0 \cdot 10^3$	87 дней
<sup>140</sup> La + D <sub>2</sub> O	$^2\text{D} (\gamma, n) ^1\text{H}$	0,15	$8,0 \cdot 10^3$	40,2 часа
<sup>24</sup> Na + D <sub>2</sub> O	$^2\text{D} (\gamma, n) ^1\text{H}$	0,22	$2,7 \cdot 10^6$	15 часов

невысокая энергия нейтронов, обуславливающая малую глубину исследования; 2) немонахроматичность испускаемых нейтронов; 3) наличие гамма-фона, сопровождающего выход нейтронов; 4) нестабильность во времени выхода нейтронов вследствие распада альфа- и гамма-излучателей; 5) опасность облучения обслуживающего персонала.

Получение нейтронов с помощью малогабаритного генератора основано на ядерных реакциях типа  $(d, n)$ , протекающих при бомбардировке мишени из легких элементов (дейтерий, тритий, бериллий, литий и др.) потоком ускоренных ионов дейтерия (дейтронов) или трития. Основной частью генератора является нейтронная трубка. Несмотря на значительное многообразие нейтронных трубок, разработанных в СССР и за рубежом, все они содержат общие элементы: ионный источник, ускоряющий зазор, тритиевую мишень и систему регулировки давления. Принципиальная схема одного из вариантов нейтронной трубки показана на рис. 41.

Трубка представляет собой стеклянный баллон, заполненный дейтерием. Электроны, испускаемые накаливаемым вольфрамовым катодом 2, ускоряются разностью потенциалов 200 В, приложенной между катодом и цилиндрическим анодом 4. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим по катушке 1 электромагнита, заставляет электроны двигаться по спиралеобразным траекториям, увеличивая эффективную длину их пробега. На электрод 5, в котором расположена мишень 6, подается переменное синусоидальное напряжение со вторичной обмотки высоковольтного трансформатора  $Tr$ . При отрицательном потенциале на электроде 5 ускоренные электроны начинают осциллировать (совершать колебательные движения) между высоковольтным электродом 5 и катодом 2, ионизируя нейтральные молекулы дейтерия. Образующиеся при этом положительные ионы дейтерия ускоряются электрическим полем высоковольтного электрода и, бомбардируя мишень из циркония или титана,

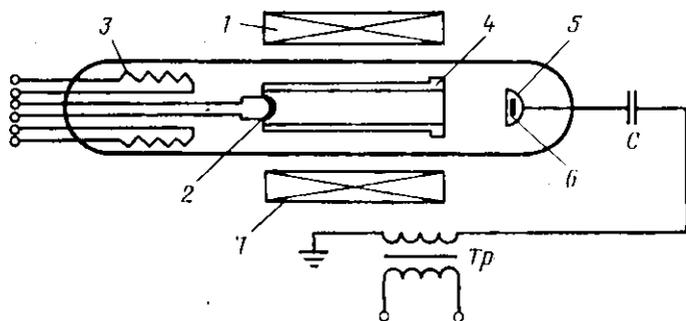


Рис. 41. Принципиальная схема ускорительной трубки

насыщенных тритием, генерируют быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ. При положительном значении потенциала на электроде 5 оциллиация электронов прекращается, и они ускоряются по направлению к высоковольтному электроду, обеспечивая электронную проводимость, свойственную кенотрону.

В промежутки времени, когда потенциал на электроде 5 положителен, конденсатор  $C$ , включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора  $Tr$ , заряжается почти до амплитудного значения напряжения электронным током трубки. Поэтому в моменты максимумов отрицательного напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $Tr$  потенциал электрода 5 почти вдвое превышает амплитудное значение высокого напряжения. Таким образом, потенциал на высоковольтном электроде пульсирует от небольшого положительного значения до почти удвоенного амплитудного напряжения отрицательной полярности. Это позволяет существенно упростить конструкцию высоковольтного трансформатора.

В отпаянных ионных приборах, к которым относится и нейтронная трубка, со временем происходит уменьшение давления вследствие ионной сорбционной откачки. Для поддержания требуемого давления в трубке используется натекатель 3, представляющий собой спираль из титановой проволоки, насыщенной дейтерием, или специальный контейнер из зернистого титана, насыщенного дейтерием, с подогревателем. При нагревании натекатель выделяет газ, компенсирующий уменьшение давления.

Для работы генератора нейтронов в импульсном режиме положительное напряжение на анод 4 трубки подается в виде прямоугольных импульсов от специального генератора, синхронизированного с высоковольтным трансформатором  $Tr$ . При длительности импульсов 50—100 мкс и частоте 400 Гц обеспечивается выход нейтронов до  $2 \cdot 10^7$  нейтр./с, составляя в среднем  $(2 \div 3) \cdot 10^6$  нейтр./с.

Основным преимуществом генераторов нейтронов, перед импульсными источниками является возможность получения больших потоков нейтронов высоких энергий с моноэнергетическим излучением, а также существенное улучшение безопасной работы обслуживающего персонала.

При проведении радиометрических исследований источник гамма-излучения или импульсный источник нейтронов размещают в камере специального зондового устройства, сочленяемого со скважинным прибором. Камера (рис. 42) состоит из прочного корпуса 1, имеющего с одной стороны замок для соединения со скважинным прибором, а с другой — отверстие с резьбой для ввинчивания вставки с источником. Капсула 2 с источником помещается в держатель 3, закрепленный в пробке 5, и фиксируется винтом 4. Герметизация камеры осуществляется с помощью резиновых колец 6.

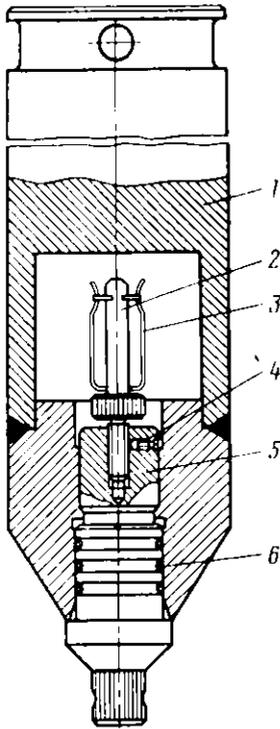


Рис. 42. Камера нейтронного источника аппаратуры ДРСТ-3

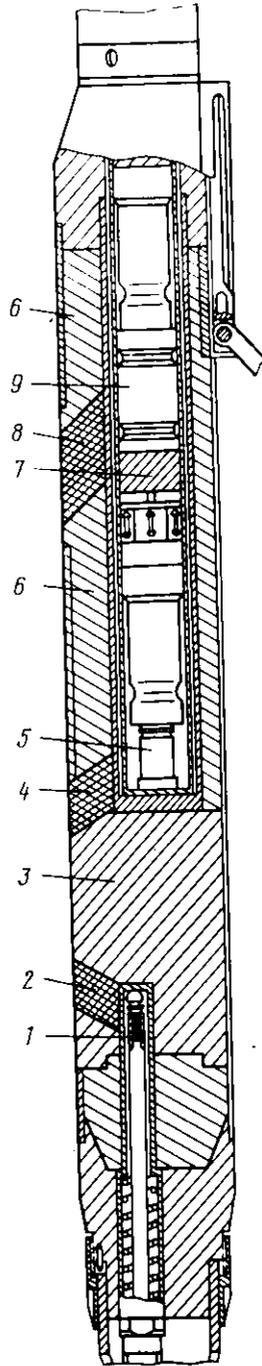


Рис. 43. Зондовая часть аппаратуры РГП-2

Малогобаритный генератор нейтронов размещают в отдельном блоке, соединяющемся с измерительным блоком скважинного прибора специальным переходником с штенсельным разъемом.

На рис. 43 показана конструкция зондовой части скважинного прибора, предназначенного для измерения рассеянного гамма-излучения двумя зондами ГГК различной длины с целью исключения влияния глинистой корки, неровностей стенки скважины и других факторов на результаты измерения объемной плотности горных пород. В качестве источника излучения  $I$  используют изотоп  $^{137}\text{Cs}$ ; приемниками служат сцинтилляционные преобразователи 5 и 9, удаленные соответственно на расстояния 155 и 360 мм от источника. Регистрируемое гамма-излучение коллимируется свинцовыми экранами 6 под углом  $45^\circ$  для большого зонда и  $60^\circ$  для малого. Поглощение мягкой компоненты обеспечивается комбинированными экранами из свинца и кадмия.

Излучение источника проходит в породу через коллиматор из вольфрама под углом  $60^\circ$ . Для устранения влияния прямого фона источника на приемники используют вольфрамовые экраны 3 и 7. В коллимационные окна 2, 4 и 8 запрессован полиэтилен. С помощью управляемого прижимного устройства многократного действия скважинный прибор вместе с зондовой частью прижимается стороной, на которой расположены коллимационные окна, к стенке скважины.

Конструкция зонда обеспечивает работоспособность при максимальной температуре окружающей среды  $+150^\circ\text{C}$  и гидростатическом давлении до 80 МПа.

### § 3. АКУСТИЧЕСКИЕ ЗОНДЫ

Акустические зонды предназначены для изучения упругих свойств окружающей среды путем наблюдения за характером распространения в ней упругих колебаний. С помощью акустических зондов определяют либо скорость распространения колебаний в горных породах (акустический каротаж по скорости), либо уменьшение энергии колебаний на определенном отрезке пути (акустический каротаж по затуханию). Наблюдения в большинстве случаев осуществляют над преломленными головными волнами.

Основными элементами акустического зонда являются излучатели и приемники упругих колебаний. По числу элементов различают двухэлементные, трехэлементные и многоэлементные зонды. Отдельную группу составляют акустические зонды, у которых излучатель возбуждает упругие колебания в виде узкого сфокусированного луча, вращающегося в горизонтальной плоскости. Излучатель и приемник в этих зондах могут быть разделены (двухэлементный зонд) или совмещены (одноэлементный зонд).

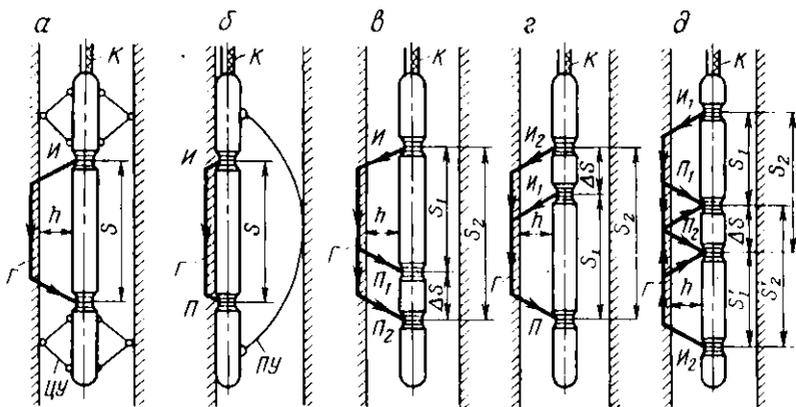


Рис. 44. Схемы акустических зондов  
Зонды: а и б — двухэлементные, в и з — трехэлементные, д — четырехэлементный

Двухэлементный акустический зонд (рис. 44, а, б) представляет собой спускаемую на геофизическом кабеле простейшую акустическую систему, состоящую из излучателя  $I$  и приемника  $II$  колебаний, разделенных акустическим изолятором. Характерной величиной зонда является его база  $S$  — расстояние между серединами излучателя и приемника. При определении скорости распространения колебаний в изучаемой среде фиксируется время, прошедшее с момента послышки излучателем импульса колебаний до момента прихода колебаний к приемнику. Характер происходящих при этом преобразований поясняется схемой, показанной на рис. 45, а. Излучатель 1 преобразует электрические импульсы, вырабатываемые генератором 2, в импульсы упругих колебаний, распространяющиеся в окружающем пространстве. Акустический импульс, прошедший через породу, преобразуется приемником 3 в электрический сигнал, поступающий на блок передачи информации 4, который

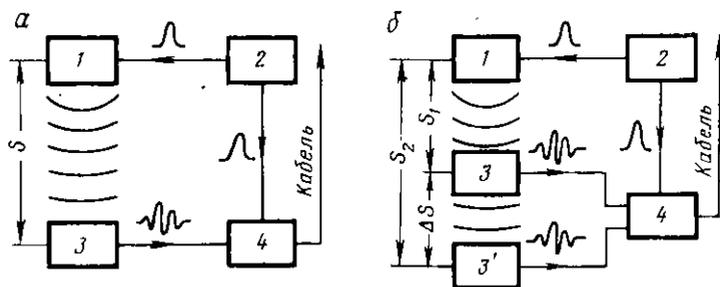


Рис. 45. Схемы, поясняющие работу двухэлементного (а) и трехэлементного (б) акустических зондов

видоизменяет сигнал в соответствии с выбранным способом передачи. Как видно, при работе акустического зонда происходит трансформация электрической энергии в механическую и обратно.

Из теории распространения сейсмических волн следует, что минимальное расстояние между излучателем и приемником, на котором головная волна приходит первой, может быть определено по формуле

$$S_{\min} = 2h \sqrt{\frac{1 + \sin i}{1 - \sin i}}, \quad (III.3)$$

где  $h$  — расстояние от элементов зонда до стенки скважины;  $i = \arcsin \frac{v_c}{v_n}$  — угол полного внутреннего отражения ( $v_c$  и  $v_n$  — скорости распространения упругих волн в промывочной жидкости и горной породе).

Время распространения этой волны на пути  $S_{\min}$

$$t_{\min} = \frac{S_{\min}}{v_n} + \frac{2h \cos i}{v_c}. \quad (III.4)$$

Таким образом, база двухэлементного зонда при работе на головных волнах должна быть достаточно большой, во всяком случае превосходить  $S_{\min}$ . Однако при этом следует иметь в виду, что значительное увеличение  $S$  нежелательно или невозможно из-за сравнительно небольшой мощности излучателя и заметного поглощения упругих колебаний на больших базах.

Размеры реальных двухэлементных зондов определяются их назначением и кинематическими характеристиками исследуемой среды. Поскольку диапазон изменения скорости упругих волн в большинстве горных пород составляет 1800—7000 м/с, базу двухэлементных зондов обычно выбирают 1,2—2,5 м. В зондах, предназначенных для контроля цементирования скважин, база составляет около 3,0 м. При существующих диаметрах скважин и собственной частоте излучателей и приемников 20—30 кГц на этом расстоянии наилучшим образом выражена связь между амплитудой колебаний, распространяющихся по колонне, и качеством цементирования колонны [4, 14].

Общее время распространения упругих колебаний складывается из времени их прохождения в породе и времени прохождения в промывочной жидкости:

$$t = \frac{S}{v_n} + \frac{2h}{v_c} \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v_n}\right)^2}. \quad (III.5)$$

Из выражения (III.5) следует, что для получения достоверных данных о скорости распространения колебаний в горных породах необходимо обеспечить неизменность положения зонда относительно стенки скважины путем его центрирования (см.

рис. 44, а) или прижатия к стенке (см. рис. 44, б). Тем не менее непостоянство диаметра скважины (наличие каверн) приводит к существенным погрешностям в определении измеряемых значений пластовой скорости  $v_n$ , поэтому двухэлементные зонды для установления этого параметра обычно не применяются.

Наибольшее распространение для этой цели получили трехэлементные зонды. Они представляют собой дифференциальные системы, которые при соответствующем расположении в скважине позволяют существенно уменьшить погрешность измерения интервального времени путем исключения времени распространения колебаний по промывочной жидкости. Трехэлементный зонд содержит один излучатель и два приемника колебаний (см. рис. 44, в) либо два излучателя и один приемник (рис. 44, г). В первом зонде измеряется время  $\Delta t$  распространения колебаний, излучаемых источником, на отрезке  $\Delta S$  между серединами приемников, называемом базой зонда. Преобразования сигналов, происходящие в этом случае, показаны на рис. 45, б. Излучатели  $I_1$  и  $I_2$  другого трехэлементного зонда осуществляют поочередную посылку акустических импульсов, которые после прохождения по породе воспринимаются приемником  $P$ . Разница во временах пробега колебаний  $\Delta t$  на участке  $I_1 I_2$ , определяет скорость распространения их в породе.

Действительно, поскольку

$$t_1 = \frac{S_1}{v_n} + \frac{2h \cos i}{v_c}, \quad \text{а} \quad t_2 = \frac{S_2}{v_n} + \frac{2h \cos i}{v_c},$$

то

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta S}{v_n}. \quad (\text{III.6})$$

Таким образом, при отсутствии значительных каверн, пустот и т. п. отмеченное трехэлементным зондом время не зависит от расположения его элементов относительно стенки скважины и зонд не нуждается в специальной ориентации в скважине. Тем не менее выражение (III.6) справедливо, пока

$$\frac{S_1}{v_n} + \frac{2h}{v_c} \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v_n}\right)^2} \leq \frac{S_1}{v_c}. \quad (\text{III.7})$$

В противном случае абсолютная погрешность в определении интервального времени

$$\Delta \dots \frac{2h}{v_c} \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v_n}\right)^2} - \frac{S_1}{v_c} \left(1 - \frac{v_c}{v_n}\right) \quad (\text{III.8})$$

возрастает с удалением зонда от стенки скважины и уменьшается пропорционально  $S_1$ .

В силу изложенного трехэлементные зонды, как и двухэлементные, нередко снабжаются прижимными *ПУ* или центрирующими *ЦУ* устройствами (см. рис. 44):

Расстояние  $S_1$  от излучателя до ближайшего приемника (или от приемника до ближайшего излучателя) трехэлементного зонда выбирают по тем же соображениям, что и базу двухэлементного зонда. Расстояние между приемниками (излучателями) устанавливают в соответствии с требуемой разрешающей способностью акустического зонда — чем меньше база  $\Delta S$ , тем более тонкие пласты могут быть отмечены при акустическом коротаже.

Дальнейшим развитием трехэлементного зонда является четырехэлементный. Он состоит (см. рис. 44, д) из двух излучателей и расположенных симметрично между ними двух приемников колебаний и представляет собой сочетание двух поочередно работающих трехэлементных зондов  $I_1 P_1 P_2$  и  $P_1 P_2 I_2$ . Регистрируемой величиной является полусумма интервальных времен, зафиксированных каждым из трехэлементных зондов. Это позволяет значительно уменьшить погрешности измерения, обусловленные наклоном зонда относительно оси скважины, резким изменением ее диаметра и наличием кавернозных участков в интервале исследований.

Известны конструкции и более сложных пяти-, шести- и восьмиэлементных зондов, но они не получили распространения.

Выбор излучателей упругих колебаний акустических зондов определяется не только их мощностью, частотным спектром излучаемых колебаний, электроакустическим к. п. д., но и рядом дополнительных требований, вытекающих из условий эксплуатации излучателей в скважинах.

Излучатель должен: 1) иметь небольшой наружный диаметр в соответствии с ГОСТом на скважинную геофизическую аппаратуру; 2) обладать работоспособностью при высоких температурах (до 250 °С) и гидростатических давлениях (до 200 МПа); 3) характеризоваться высокой абразивостойкостью, ударной прочностью и вибропрочностью; 4) обладать высокой надежностью и долговременной стабильностью; 5) потреблять небольшую мощность и обеспечивать частоту посылок акустических импульсов не менее 6 Гц.

Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют магнитоотрицательные излучатели цилиндрического типа (см. гл. II, § 3), которые с целью компенсации образующегося магнитного поля выполняются на двух сердечниках с обмотками, имеющими встречное включение.

Представляют интерес электрогидравлические излучатели, основанные на принципе электронского разряда в непроводящей жидкости. Они характеризуются большой акустической мощностью и широким спектром излучаемых колебаний с максимумом в области низких частот, что способствует существен-

ному увеличению глубины исследования акустического зонда. Однако небольшая частота посылок акустических импульсов и ряд других недостатков ограничивают применение электрогидравлических излучателей.

Основные требования к приемникам колебаний заключаются в следующем:

1) в высокой чувствительности, обеспечивающей неискаженный прием акустических сигналов; 2) в равномерности амплитудно-частотной характеристики во всей полосе применяемых частот (0,5—50 кГц).

Приемниками акустических зондов обычно служат цилиндрические и сферические пьезокерамические преобразователи (см. гл. II, § 6). Устройство пьезокерамического приемника упругих колебаний показано на рис. 46. Чувствительный элемент приемника в виде цилиндра 5 из керамики ЦТС-19 помещен в толстостенный корпус 1, заполненный маслом и закрытый крышкой 3. Герметизация внутренней полости корпуса осуществляется уплотнительными кольцами 2. Чувствительный элемент подключается к измерительной схеме с помощью контактного кольца 6 и проводов, проходящих через изолятор 7. Между крышкой 3 и чувствительным элементом 5 помещена изолирующая пластина 4.

Некоторые характеристики акустических зондов приведены в табл. 3.

Акустические зонды обычно выполняют в виде жесткой конструкции, объединяющей в себе не только излучатели и прием-

Таблица 3

Характеристики акустических зондов

Аппаратура	Зонд	Излучатели		Приемники		Частота посылок импульсов, Гц
		Тип	Собственная частота, кГц	Тип	Собственная частота, кГц	
СПАК-2М	$I_2 0,5 I_1 1,5 П$	МС	25	ПК	25	12,5
СПАК-3	$I_1 1,2 П_1 0,5 П_2 1,2 I_2$	МС	30	ПК	70	$16 \pm 2$
СПАК-4	$I_2 0,5 I_1 1,5 П$	МС	25	ПК	25	12,5
АКН-1	$П 0,4 I_1 1,5 I_2$	МС	5—20	ПК	0,5—50	6,25
	$П 2,5 I_1 1,0 I_2$	МС	5—20	ПК	0,5—50	6,25
	$П 1,5 I_1 0,5 I_2$	МС	25	ПК	0,5—50	6,25
«Звук-2»	$I 2,0 П_1 0,5 П_2$	МС	5—20	ПК	0,5—50	6,25
	$I 4,0 П_1 1,0 П_2$	МС	5—20	ПК	0,5—50	6,25
ЛСКУ	$I 4,0 П_1 2,0 П_2$	ЭГ	0,6—10,5	ПК	0,6—10,5	1,0
	$I 15,0 П_1 2,5 П_2$	ЭГ	0,6—10,5	ПК	0,6—10,5	1,0
АКЦ-2	$I 3,1 П$	МС	25	МС	25	12,5
АКЦ-4	$I 2,8 П$	МС	25	МС	25	25

Примечание. МС — магнитострикционный излучатель (приемник); ЭГ — электрогидравлический излучатель; ПК — пьезокерамический приемник.

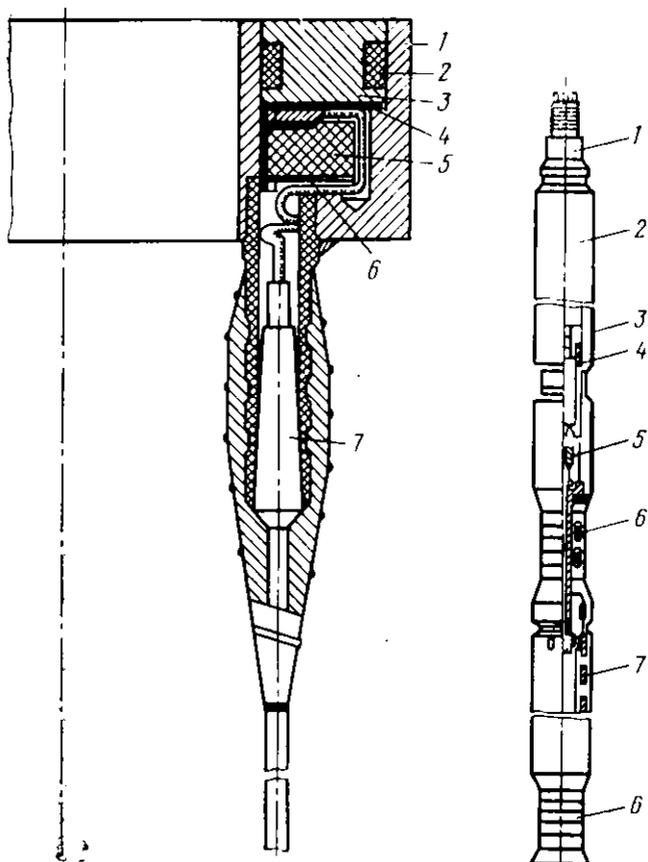
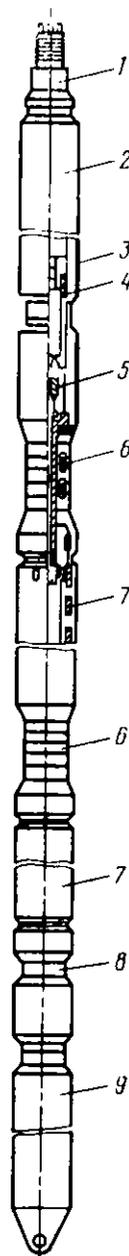


Рис. 46. Устройство пьезокерамического приемника скважинного прибора СПАК-2М



Рис. 47. Акустический зонд аппаратуры СПАК-2М



ники, но и электрически связанные с ними узлы измерительной схемы, т. е. в виде скважинного прибора.

Для предотвращения распространения упругих колебаний по корпусу прибора применяют акустические изоляторы трех типов: а) герметичный изолятор, являющийся одновременно контейнером электронной схемы и выполненный в виде стальной трубы, на внешней поверхности которой проточены кольцевые канавки для рассеивания ультразвуковой энергии; кроме того, внешняя поверхность трубы обрезинена; б) бесконтактные изоляторы, представляющие собой резиновые подушки между сочленяемыми металлическими частями корпуса скважинного прибора; в) разгруженный изолятор в виде толстостенной стальной трубы, поперек оси которой в шахматном порядке прорезаны сквозные пазы. Внутренняя и внешняя поверхности трубы покрыты резиной, заполняющей и пазы в ней.

Для уменьшения помех от толчков и вибраций, возникающих при перемещении прибора в скважине, центрирующие и прижимные устройства также обрезают. Иногда приборы снабжают резиновыми амортизаторами, выполняющими одновременно и роль центраторов.

Пример конструктивного оформления акустического зонда показан на рис. 47. Зонд включает в себя два магнитострикционных излучателя 6 и пьезокерамический приемник 8, разделенные между собой акустическими изоляторами 7 в виде трубы с прорезанными пазами. Генераторный блок, управляющий работой излучателей, расположен в герметичном кожухе 2, который сверху оканчивается унифицированной головкой 1 для подключения к геофизическому кабелю, а снизу — соединительным мостом со свечами-электропроводами 5 для соединения генераторного блока с излучателями и приемным блоком 9. Герметизация механических разъемных соединений обеспечивается резиновыми уплотнительными кольцами 4. Все металлические части зонда, как и изоляторы, снаружи покрыты слоем резины 3.

Четырехэлементный зонд имеет аналогичную конструкцию, однако нижняя его секция, содержащая один из излучателей, иногда делается съемной, что позволяет при необходимости превратить зонд в трехэлементный.

Возможны и другие конструктивные схемы выполнения акустических зондов, в частности, размещение приемников и излучателей вместе с соответствующими узлами измерительной системы в разных герметических кожухах, соединяемых отрезком кабеля. Такая конструкция позволяет легко изменить длину зонда и обеспечивает надежную акустическую изоляцию его приемной части от упругих колебаний, распространяющихся по корпусу.

#### § 4. ДАТЧИКИ КАВЕРНОМЕРОВ И ПРОФИЛЕМЕРОВ

Выше (см. гл. I, § 4) отмечалось, что датчиком называется конструктивная совокупность измерительных преобразователей, расположенных в непосредственной близости от изучаемого объекта.

Датчик прибора для измерения неэлектрической величины в общем случае включает предварительный и основной преобразователи.

Предварительный преобразователь обеспечивает согласование измеряемой величины с естественной входной величиной основного преобразователя, а также масштабное согласование пределов изменения входной величины с рабочим диапазоном основного преобразователя.

Основной преобразователь осуществляет преобразование своей естественной входной величины в электрический сигнал, в дальнейшем поступающий на блок передачи информации.

В устройствах, предназначенных для измерения диаметра скважины (каверномерах и профилемерах), в качестве предварительного преобразователя обычно используют механическую систему, состоящую из рычагов или шарниров, которые с помощью прижимного устройства прижимаются к стенке скважины. Изменение положения рычагов, происходящее при изменении диаметра скважины, передается основному преобразователю, на выходе которого возникает электрический сигнал, соответствующий величине диаметра скважины.

Устройство предварительных преобразователей каверномеров показано на рис. 48. В ромбовидном каверномере преобразователь выполнен в виде трех шарнирных систем 5, которые расположены через 120° и прижимаются к стенке скважины общей центральной пружиной 1. Одна из шарнирных систем снабжена фигурным кулачком 2, который перемещает шток 3, связанный с чувствительным элементом основного преобразователя 4.

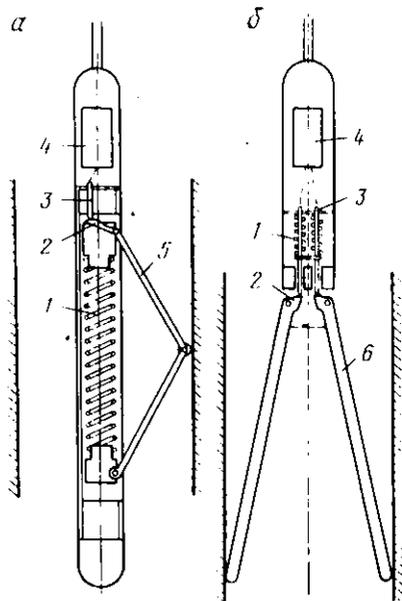


Рис. 48. Схемы предварительных преобразователей механических каверномеров

Преобразователь: а — ромбовидный, б — рычажный

Более широкое распространение получили каверномеры рычажного типа с предварительным преобразователем в виде четырех рычагов 6, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Концы длинных плеч рычагов прижимаются к стенке скважины пружинами 1 и изменяют свое положение в соответствии с изменением диаметра скважины. Короткое плечо каждого рычага имеет фигурный кулачок 2, который управляет перемещением штока 3, связанного с чувствительным элементом основного преобразователя.

Форма кулачка 2 в обоих предварительных преобразователях подобрана такой, чтобы между изменением положения рычага (шарнирной системы) и перемещением чувствительного элемента основного преобразователя была пропорциональная зависимость.

Преобразование изменения диаметра скважины в электрический сигнал принципиально может быть обеспечено с помощью любого из измерительных преобразователей, рассмотренных в гл. II, естественной входной величиной которого является линейное или угловое перемещение. В механических каверномерах для этой цели обычно используют реостатные (потенциметрические) и индуктивные преобразователи.

На рис. 49 показано устройство датчика рычажного каверномера с реостатным преобразователем. Здесь прижатие измерительных рычагов 1 к стенке скважины осуществляется пружинами 2, и движение каждого рычага происходит независимо от движения остальных. Перемещения всех рычагов складываются с помощью механического суммирующего устройства, состоящего из подвижных 4 и неподвижных 5 роликов, огибаемых тросиком 6. Подвижные ролики перемещаются вместе со штоками 3 при отклонении рычагов, неподвижные — вращаются на неподвижных осях, укрепленных на стойках. Один конец тросика закреплен на корпусе прибора, а другой — на барабане, размещенном на одной оси с ползунком реостата 8. Пружина 7 на оси барабана обеспечивает требуемое натяжение тросика и обратный ход ползунка реостата.

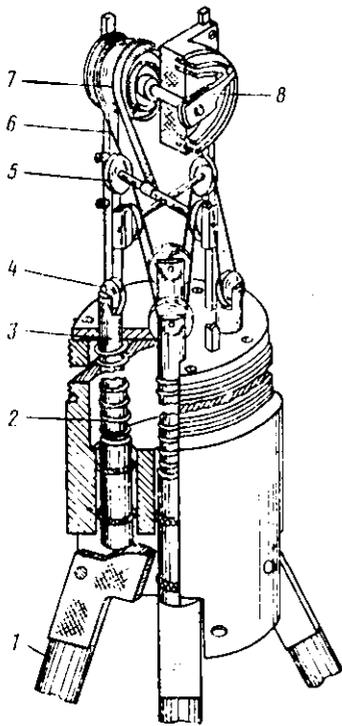


Рис. 49. Датчик рычажного каверномера с реостатным преобразователем

Поскольку все рычаги прижимаются к стенкам скважины с одинаковым усилием, они оказывают центрирующее действие на каверномер, так что его ось приблизительно совпадает с осью скважины, диаметр которой  $d_c$  соответствует диаметру окружности, проведенной через концы длинных плеч рычагов, т. е.

$$d_c = K(l_1 + l_2 + l_3 + l_4), \quad (\text{III.9})$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности;  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  и  $l_4$  — расстояния от конца длинного плеча каждого из рычагов до оси прибора.

Ростатный преобразователь обычно является чувствительным элементом потенциметрической либо мостовой схемы постоянного тока.

Рассмотренная конструкция в принципе может быть использована при изучении профиля скважины, т. е. изменения ее диаметра в разных направлениях. В этом случае датчик содержит два основных преобразователя, каждый из которых связан с перемещением пары измерительных рычагов, расположенных в одной плоскости. Сигналы с выходов преобразователей поступают в блок передачи информации, содержащий два измерительных канала (каверномеры-профиломеры СКП-1 и СКПД).

При использовании соответствующей рычажной системы возможно измерение диаметра в трех плоскостях и более.

Известны конструкции каверномеров, у которых каждый измерительный рычаг, перемещающийся независимо от остальных, механически связан с коллимированным источником гамма-излучения. Детектор, воспринимающий излучение от всех источников, является одновременно и суммирующим устройством, поэтому зарегистрированная им интенсивность гамма-излучения в определенном диапазоне является линейной функцией среднего диаметра скважины.

На точность преобразования датчиков механических каверномеров и профиломеров оказывают влияние следующие факторы.

1. Эксцентричное расположение прибора в скважине, обусловленное недостаточным прижимным усилием измерительных рычагов или шарнирных систем, наличие люфтов и зазоров в механических узлах и др.

2. Точность исполнения профиля кулачка, управляющего перемещением штока.

3. Точность преобразования основного преобразователя.

Увеличение прижимного усилия рычагов может быть достигнуто применением управляемых прижимных устройств. Степень влияния других факторов определяется тщательностью изготовления отдельных деталей, а также условиями эксплуатации приборов.

В последние годы разработаны устройства (скважинный акустический телевизор, акустический каверномер и профило-

мер), использующие бесконтактный (немеханический) способ измерения диаметра и сечения скважины [4].

Акустический каверномер позволяет получить форму стенки скважины по одной или нескольким вертикальным образующим, а профилемер и скважинный акустический телевизор — горизонтальные сечения скважины. В последнем случае акустический зонд дополняется датчиком азимута, управляющим работой генератора развертки электроннолучевой трубки, на экране которой отображаются результаты измерения.

## § 5. ДАТЧИКИ ИНКЛИНОМЕТРОВ

Пространственное положение любого участка скважины определяется его расстоянием от устья, зенитным углом и азимутом.

Зенитным углом называется угол между осью скважины и вертикалью, лежащей в плоскости искривления скважины.

Азимутом скважины называется угол между горизонтальной проекцией участка скважины, взятого в направлении увеличения глубины, и определенным направлением, например, направлением на магнитный север.

Таким образом, приборы, предназначенные для измерения искривления скважины, — и н к л и н о м е т р ы — должны содержать измерительные элементы, ориентированные относительно вертикальной плоскости и плоскости магнитного меридиана. В большинстве инклинометров датчики зенитного угла и азимута скважины объединены в общую конструктивную систему, в которой происходит преобразование измеряемых величин в вид, удобный для фиксации их численных значений. По способу отсчета значений зенитного угла и азимута скважины различают фотонклинометры и электрические инклинометры. В данном параграфе ограничимся рассмотрением электрических инклинометров с дистанционным измерением, получивших наибольшее распространение при геофизических исследованиях.

Основная часть электрического инклинометра — измерительная рамка (рис. 50), в которой размещены датчики азимута и зенитного угла. Ось рамки совпадает с главной (продольной) осью прибора, которая в момент измерения параллельна оси скважины. С помощью эксцентрично расположенного груза 18 центр тяжести рамки смещен с ее оси так, что рамка всегда устанавливается перпендикулярно к плоскости искривления скважины.

Предварительный преобразователь датчика азимута — бус-соль, состоящая из магнитной стрелки 14, вращающейся на подвижной оси 16, и пластмассового корпуса 5. Корпус укреплен в рамке на двух полуосях 20, благодаря чему ось стрелки под действием груза 6 всегда занимает вертикальное положение.

ние. Магнитная стрелка состоит из двух намагниченных стерженьков, закрепленных в колпачке 12 с агатовым подшипником, который насаживается на острие 13 подвижной оси 16.

Основной преобразователь датчика — реостатный измерительный преобразователь, выполненный в виде кольцевого реохорда 4, размещенного в корпусе 5 буссоли, с пружинными контактами 15 и токоподводящим кольцом 3. Пружинные контакты жестко соединены с магнитной стрелкой и изолированы от нее. Выводами реохорда и токоподводящего кольца служат гибкие проводники 21.

В момент измерения при смещении вниз оси 16 вместе со стрелкой пружинные контакты соединяют реохорд с токопрово-

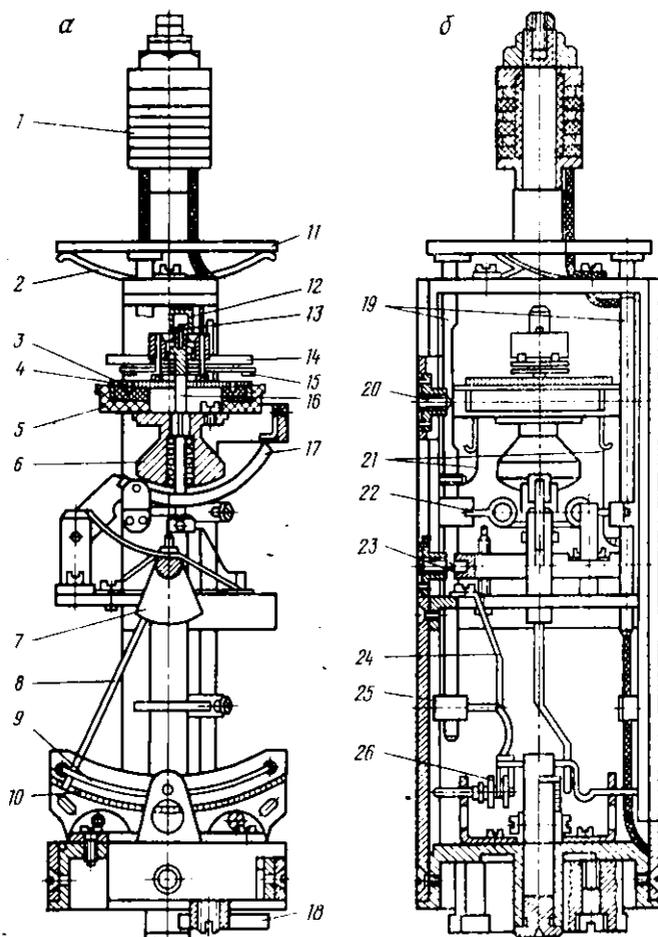


Рис. 50. Измерительная рамка инклинометра КИТ:  
 а — вид спереди; б — вид сбоку

дящим кольцом. Поскольку разрыв кольцевого реохорда приурочен к плоскости, перпендикулярной к плоскости рамки (т. е. к плоскости искривления скважины), угол между северным концом магнитной стрелки и участком разрыва реохорда равен магнитному азимуту отклонения оси прибора от вертикали. При этом сопротивление включенной части реохорда пропорционально азимуту скважины.

Предварительным преобразователем датчика зенитного угла служит отвес 7, закрепленный на оси 23. Плоскость качания отвеса перпендикулярна к плоскости рамки и совпадает с плоскостью искривления скважины. Основным преобразователем является реостатный измерительный преобразователь, состоящий из дугового реохорда 10, стрелки 8, играющей роль подвижного контакта, и токопроводящей дужки 9. При измерениях конец стрелки дужкой прижимается к реохорду. Сопротивление реохорда, включаемое в этом случае, пропорционально углу отклонения отвеса от вертикали, т. е. зенитному углу скважины.

Для фиксации датчиков азимута и зенитного угла в момент измерения используют механическую систему, приводимую в действие электромагнитом. Она состоит из нажимного кольца 11, возвратных пружин 2, двух толкателей 19, поводка 22, дугообразного рычага 17, дугообразной пружины 24 и муфточки 26, сцепленной с дужкой 9. Под действием электромагнита толкатели 19 смещаются вниз. При этом поводок 22, отклоняя книзу дугообразный рычаг 17, оттягивает подпружиненную ось буссоли, обеспечивая прижатие контактных пружин магнитной стрелки к реохорду и токопроводящему кольцу буссоли. Одновременно кулачок 25 освобождает пружину 24, которая перемещает муфточку 26, а вместе с ней и дужку 9, прижимающую стрелку 8 к реохорду угла.

Подключение выводов основных преобразователей к измерительной схеме (равновесному мосту постоянного тока) обеспечивается коллектором 1 с тремя контактными кольцами и двумя парами щеток.

Описанная конструкция инклинометрического датчика применена в большинстве типов электрических инклинометров, обеспечивающих измерение параметров искривления скважины в заданных точках ее ствола. При использовании в качестве основных измерительных преобразователей других типов (например, индуктивных или емкостных) принципиально можно обеспечить непрерывное измерение зенитного угла и азимута скважины в процессе непрерывного перемещения инклинометра (см. гл. VII, § 4).

Погрешность преобразования инклинометрических датчиков определяется точностью изготовления элементов конструкции, тщательностью регулировки и балансировки подвижных частей, а также точностью преобразования основных преобразователей.

## § 6. ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

В качестве чувствительных элементов скважинных термометров и термоэлектрических расходомеров обычно используют терморезисторы — резистивные измерительные преобразователи, изменение активного сопротивления которых определяется изменением интенсивности теплообмена с окружающей средой. В случае использования таких преобразователей при температурных измерениях их естественной входной величиной является температура изучаемой среды. Если терморезистор применяют для изучения скорости движения жидких и газообразных сред, то естественной входной величиной является величина сноса тепла, определяющая температуру, а следовательно, и сопротивление терморезистора. Таким образом, в обоих случаях отпадает необходимость в предварительном преобразовании измеряемой величины, и датчик электрического термометра и термоанемометра содержит только основной преобразователь — терморезистор.

Чувствительными элементами датчиков электрических термометров и термоэлектрических расходомеров служат медные, платиновые, вольфрамовые и полупроводниковые терморезисторы, являющиеся частью измерительной схемы и конструкции соответствующего скважинного прибора. Основным конструктивным параметром датчика является его тепловая инерция, характеризующая реакцию датчика на изменение исследуемой величины и определяемая временем, в течение которого датчик отреагирует на установленное изменение этой величины. Это время обычно называют постоянной времени датчика. Например, постоянная времени датчика термометра численно равна времени, в течение которого датчик, перемещенный из среды с температурой  $T_1$  в среду с температурой  $T_2$ , отметит 0,63 разности температур этих сред. Тепловая инерция датчиков зависит от многих факторов: конструкции чувствительного элемента, теплофизических свойств, температуры и скорости перемещения потока изучаемой среды относительно датчика и т. п.

Конструкция датчика должна обеспечить свободный доступ исследуемой жидкости к чувствительному элементу, защиту его от механических повреждений при перемещении прибора по скважине, а также возможное уменьшение тепловой инерции. Выполнение последнего условия, повышающего точность и производительность исследований, достигается: а) уменьшением массы и теплоемкости терморезистора и увеличением его поверхности; б) уменьшением массы и теплоемкости корпуса, в котором размещается терморезистор; в) тепловой изоляцией чувствительного элемента от остальных частей скважинного прибора.

С целью уменьшения массы и теплоемкости терморезистора и увеличения его поверхности стремятся увеличивать отношение длины проволочного терморезистора к его диаметру: как правило, это отношение составляет не менее 200. Такой прием к тому же позволяет уменьшить потери через теплопроводность токопроводящих проводников.

На рис. 51 показана конструкция датчика температуры скважинного электротермометра ТЭГ-60. Чувствительными элементами датчика являются два терморезистора 5 из медного провода типа ПЭТВ или ПНЭТ-ИМИД диаметром 0,03 мм. Намотка чувствительных элементов выполнена тремя секциями (рис. 52) и скручена в жгут диаметром около 1,0 мм, обвитый стеклонитью и покрытый лаком ПАК-1. Перед установкой в датчик терморезисторы в течение некоторого времени выдерживают при температуре 250 °С для просушки и предварительной «тренировки».

Каждый терморезистор помещен в медную трубку 4 (см. рис. 51), заполненную кремнийорганической жидкостью ПМС-50 для уменьшения тепловой инерции. Трубки снизу герметизированы заглушкой 7, а сверху впаиваны в нижний мост 2, имеющий резьбу для соединения датчика с корпусом электротермометра. Выводы терморезисторов подсоединены к контактам держателя 1. Теплоизоляция чувствительных элементов от корпуса датчика обеспечивается втулкой 6 из материала с низкой тепло-

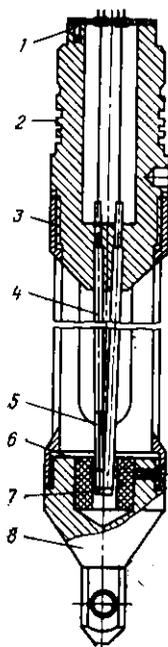
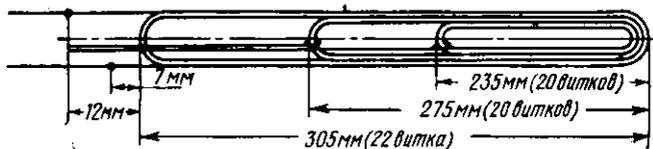


Рис. 51. Датчик температуры скважинного электротермометра ТЭГ-60.

Рис. 52. Схема намотки терморезистора скважинного электротермометра ТЭГ-60



проводностью. От механических повреждений чувствительные элементы защищены фонарем 3 с окнами для доступа промывочной жидкости. Снизу датчик оканчивается хвостовиком-пробкой 8.

Аналогичную конструкцию имеет датчик термомонокондуктивного расходомера СТД-2, который поочередно может использоваться для измерения температуры и объемной скорости жидкости в скважине.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

---

Измерительные и регистрирующие приборы вместе с некоторыми дополнительными устройствами образуют блок представления и обработки информации скважинной телеизмерительной системы.

Под представлением информации понимается преобразование ее в форму, удобную для восприятия и обработки. Преобладающую роль играет визуальное представление информации, т. е. отображение ее в виде наглядных и легко воспринимаемых символов и сигналов.

В настоящее время распространены три разновидности визуального представления информации — сигнализация, индикация и регистрация. Сигнализация имеет подчиненное значение и обычно используется в предупредительных и аварийных ситуациях.

Индикация — это представление измерительной информации о текущих значениях исследуемых величин, осуществляемое с помощью стрелочных или цифровых измерительных приборов.

Регистрация — запись в символической форме на материальном носителе значений измеряемых величин с целью их документирования, накопления и хранения. Регистрация обычно сопровождает процесс индикации и играет основную роль в представлении геофизической измерительной информации.

В зависимости от используемых символов регистрация делится на аналоговую и цифровую.

Аналоговая регистрация осуществляется геометрическими символами (в виде геометрического положения точки, длины отрезка и т. п.), отображающими численное значение измеряемой величины. Подобная форма регистрации широко применяется в геофизической практике и позволяет получить непрерывный график изменения контролируемого параметра в функции глубины скважины — каротажную диаграмму. Материальным носителем является бумага, протягиваемая соответственно перемещению скважинного прибора (зонда). Наибольшее распространение в настоящее время имеет оптический способ регистрации, при котором происходит изменение состояния вещества носителя (светочувствительной бумаги). Применяется также открытый способ регистрации с помощью держателей с пишущими вставками или чернильными перьями, печатающими стержнями и др.

Цифровая регистрация, осуществляемая физическими символами, — одно из основных средств ввода и хранения измерительной информации в оперативных и долговременных запоминающих устройствах ЭВМ, а также передачи ее по каналам связи в места сбора и обработки (например, в территориальные вычислительные центры). При использовании бумаги в качестве материального носителя измерительная информация, преобразованная в цифровой код, наносится в виде пробивок системы отверстий (перфокарты, перфоленты). Распространен метод электромагнитной регистрации, связанный с изменением магнитной индукции участков или элементов ферромагнитного носителя (магнитной ленты или проволоки) с помощью электромагнитной записывающей головки.

В ряде случаев информация регистрируется в виде цифр, букв или их комбинаций.

К регистрирующим устройствам, применяемым в скважинных телеизмерительных системах, предъявляется ряд требований:

- 1) высокая точность измерения и чувствительность;
- 2) достаточно широкий предел (диапазон) измерения;
- 3) быстродействие;
- 4) высокая надежность и достаточный срок службы;
- 5) быстрая готовность к работе, простота и удобство в обращении, безопасность в эксплуатации.

### § 1. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА ПРИ АНАЛОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

При аналоговой регистрации электрический сигнал на выходе блока приема информации имеет вид постоянного по знаку напряжения, численное значение которого пропорционально измеряемой величине. Для измерения этого напряжения применяют два способа.

Способ непосредственной оценки заключается в определении напряжения по измерительному прибору-индикатору  $\Gamma$ , подключаемому параллельно выходу блока приема информации скважинной телеизмерительной системы (рис. 53, а). Величиной, на которую непосредственно реагирует прибор, является ток, но поскольку величина тока пропорциональна приложенному напряжению, шкалу прибора градуируют в единицах напряжения. Численное значение напряжения находят по формуле

$$U = mn, \quad (IV.1)$$

где  $m$  — цена деления прибора, В/дел.;  $n$  — число делений, на которое отклонился указатель прибора-индикатора.

Для расширения предела измерения напряжения используют добавочные резисторы, включаемые последовательно с измерительным прибором  $\Gamma$ .

Способ непосредственной оценки характеризуется простотой и находит широкое применение, однако его точность определяется точностью используемых приборов-индикаторов и обычно не превышает 0,1 %.

Компенсационный способ основан на уравновешивании (компенсации) измеряемого напряжения известным падением напряжения на измерительном (эталонном) резисторе  $R_0$ . Принцип этого способа, относящегося к нулевым способам сравнения, поясняется упрощенной схемой, изображенной на рис. 53, б.

Измеряемое напряжение  $U$  через гальванометр  $\Gamma$  подводится к переменному резистору  $R_0$ . Резистор включен в электрическую цепь, по которой под действием э. д. с. источника  $E_k$  протекает строго определенный ток  $i_k$ . Величина этого тока устанавливается реостатом  $r$  и контролируется амперметром  $A$ . Перемещением ползунка резистора  $R_0$  добиваются нулевого показания гальванометра  $\Gamma$ . В этом случае напряжение  $U$  будет полностью скомпенсировано падением напряжения на участке  $R_k$  эталонного резистора  $R_0$ , т. е.

$$U = U_k = i_k R_k. \quad (IV.2)$$

Если пренебречь сопротивлением проводов, соединяющих источник  $E_k$  с эталонным резистором, внутренним сопротивлением амперметра  $A$  и сопротивлением реостата  $r$ , то выражение (IV.2) можно переписать в виде

$$U = \frac{E_k}{l_0} l_k = m l_k, \quad (IV.3)$$

где  $l_0$  — длина эталонного резистора;  $l_k$  — отклонение ползунка от начала эталонного резистора в момент компенсации;  $m = E_k/l_0$  — цена деления (постоянная по напряжению) резистора.

Изменение предела измерения напряжения в рассматриваемом способе обеспечивается изменением постоянной по напряжению, т. е. изменением величины тока  $i_k$  или сопротивления эталонного резистора  $R_0$  путем шунтирования последнего дополнительными резисторами.

Способы непосредственной оценки и компенсации могут быть применены и для измерения тока в различных участках электрической цепи путем подсоединения к шунту  $R_{ш}$ , последова-

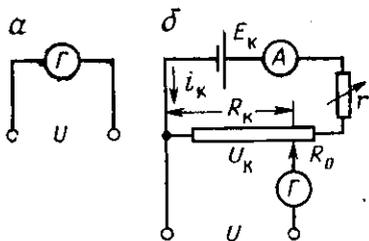


Рис. 53. Принципиальная схема измерения напряжения способом непосредственной оценки (а) и компенсационным способом (б)

схемой, изображенной на

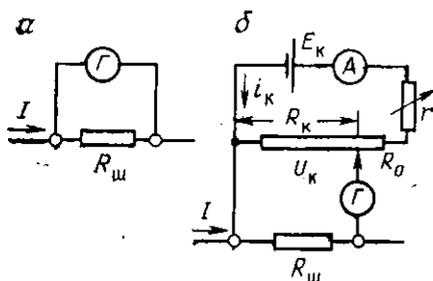


Рис. 54. Принципиальная схема измерения тока способом непосредственной оценки (а) и компенсационным способом (б)

тельно включенному в цепь (рис. 54). Величина тока, протекающего по цепи, определяется по формулам

$$I = \frac{mn}{R_{ш}}; \quad I = \frac{ml_k}{R_{ш}}. \quad (IV.4)$$

По сравнению со способом непосредственной оценки компенсационный способ обладает более высокой точностью, которая определяется чувствительностью нулевого индикатора  $\Gamma$  и точностью измерения компенсирующего напряжения  $U_k$ . При соответствующих условиях компенсационным способом можно измерять напряжение с погрешностью порядка сотых — тысячных долей процента, что значительно ниже погрешности способа непосредственной оценки.

Наиболее существенный недостаток способа непосредственной оценки — падение напряжения в измерительной цепи за счет протекания по ней тока. В этом случае показания  $U_r$  измерительного прибора  $\Gamma$  (см. рис. 53, а) будут уменьшены по сравнению с измеряемым напряжением  $U$  на величину

$$U_r = U \left( 1 - \frac{R_n}{R_n + R_r} \right), \quad (IV.5)$$

где  $R_n$  — сопротивление измерительной цепи;  $R_r$  — сопротивление измерительного прибора.

Из формулы (IV.5) следует, что при  $R_r \approx R_n$  и особенно при  $R_r < R_n$  погрешность измерения может достигать очень больших значений.

Тем не менее оба способа измерения напряжения приблизительно в равной степени используют в геофизической регистрирующей аппаратуре аналогового типа. Поскольку рассмотренные способы измерения основаны на преобразовании энергии измеряемого электрического сигнала в энергию перемещения подвижного механизма (указателя) прибора-индикатора, регистрирующие устройства, основанные на этих способах, являются электромеханическими приборами.

## § 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕРКАЛЬНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Из приборов непосредственной оценки в геофизической практике наибольшее распространение получили зеркальные гальванометры магнитоэлектрической системы, характеризующиеся

простотой конструкции, высокой точностью и чувствительностью, а также равномерностью шкалы. Принцип действия измерительного механизма гальванометра поясняется на рис. 55.

Гальванометр состоит из рамки, образованной несколькими витками провода и находящейся в постоянном магнитном поле. Плоскость витков рамки параллельна направлению магнитного поля. При протекании по рамке тока  $i$  на нее действует пара сил  $F$ , величина которых может быть определена по формуле

$$F = \omega l B i, \quad (IV.6)$$

где  $\omega$  — число витков рамки;  $l$  — активная длина одной стороны рамки;  $B$  — магнитная индукция в воздушном зазоре.

Силы создают вращающий момент  $M_i$ , поворачивающий рамку:

$$M_i = Fb = \omega l b B i = \omega s B i = \Phi i; \quad (IV.7)$$

здесь  $b$  — ширина рамки;  $s = lb$  — площадь рамки;  $\Phi = \omega s B$  — магнитный поток, сцепленный с витками рамки.

Вращению рамки препятствует противодействующий момент  $M_n$ , создаваемый упругими силами растяжек, на которых закреплена рамка. При небольших углах поворота рамки (в пределах упругих деформаций растяжек) величина этого момента

$$M_n = W \alpha, \quad (IV.8)$$

где  $\alpha$  — угол поворота рамки;  $W$  — удельный противодействующий момент, соответствующий единице угла поворота рамки и определяемый материалом и размерами растяжек.

Вращение рамки прекращается при равенстве вращающего и противодействующего моментов, т. е. при  $M_i = M_n$ . Тогда

$$\alpha = \frac{\Phi}{W} i. \quad (IV.9)$$

В зеркальных гальванометрах для определения угла поворота рамки используют зеркальце, укрепленное на одной из растяжек; на него посылается пучок света от осветителя. В этом случае (рис. 56) угол отраженного зеркальцем луча  $\alpha'$  вдвое превышает угол поворота рамки, т. е.

$$\alpha' = 2\alpha = 2 \frac{\Phi}{W} i. \quad (IV.10)$$

Обычно этот угол выражается в виде линейного отклонения  $a$  блика гальванометра по шкале прибора (осциллографа), т. е.

$$\alpha' = \frac{a}{L} = 2 \frac{\Phi}{W} i = S_{i_0} i, \quad (IV.11)$$

где  $L$  — оптический рычаг (расстояние от зеркальца до шкалы) осциллографа;  $S_{i_0}$  — чувствительность гальванометра по току.

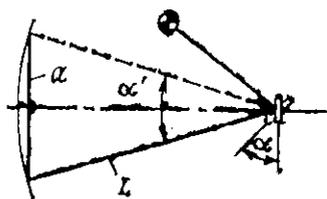
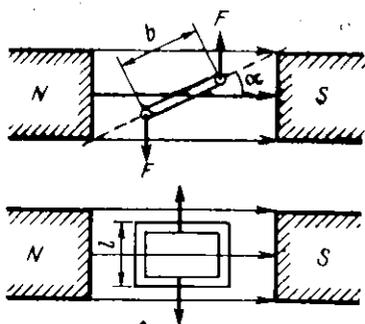


Рис. 56. Оптическая схема светолучевого осциллографа

Рис. 55. Принцип действия измерительного механизма магнитоэлектрического гальванометра

Из формулы (IV.11) следует, что чувствительность гальванометра — величина постоянная, определяемая конструктивными параметрами измерительного механизма (рамки, растяжек и магнитной системы).

Ток, протекающий по рамке,

$$i = \frac{1}{S_{i_0}} \alpha' = K_{i_0} \alpha', \quad (\text{IV.12})$$

где  $K_{i_0} = S_{i_0}^{-1}$  — постоянная гальванометра по току.

Чтобы по рамке протекал ток  $i$ , нужно к зажимам гальванометра приложить напряжение, равное

$$U = iR = K_{i_0} R \alpha' = K_{U_0} \alpha'; \quad (\text{IV.13})$$

здесь  $K_{U_0} = K_{i_0} R$  — постоянная гальванометра по напряжению;

$R$  — сопротивление цепи гальванометра, складывающееся из его внутреннего сопротивления  $R_r$  и сопротивления внешней цепи  $R_{вн}$ .

Величина, обратная  $K_{U_0}$ , т. е.

$$S_{U_0} = K_{U_0}^{-1} = \frac{2\Phi}{RW},$$

носит название чувствительности гальванометра по напряжению.

В практике промышленно-геофизических измерений обычно пользуются значениями постоянных по току и напряжению при фактическом оптическом рычаге светолучевого осциллографа. В этом случае постоянной гальванометра по току ( $K_i$  в мкА/см) называется величина тока в микроамперах, которую необходимо пропустить через рамку гальванометра, чтобы при оптическом рычаге осциллографа блик гальванометра отклонился по шкале осциллографа на 1 см; постоянной гальванометра по напряжению ( $K_U$  в мВ/см) называется величина напряжения в милливольтках, которую нужно приложить к зажимам гальванометра, чтобы при оптическом

рычаге осциллографа блик гальванометра отклонился по шкале осциллографа на 1 см.

В зеркальных гальванометрах некоторых типов измерительный механизм образован двумя взаимно перпендикулярными рамками. В этом случае как вращающий, так и противодействующий моменты создаются взаимодействием протекающих по рамкам токов  $i_1$  и  $i_2$  с постоянным магнитным полем. Направления этих токов выбирают такими, чтобы моменты, действующие на рамки, были противоположны по знаку. Тогда угол поворота подвижной части измерительного механизма будет зависеть от соотношения токов  $i_1$  и  $i_2$ :

$$\alpha = \varphi \left( \frac{i_1}{i_2} \right) \quad (\text{IV.14})$$

Подобные устройства, называемые логометрами, применяются для измерения отношения двух переменных величин (токов, напряжений и др.).

### § 3. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Выше были рассмотрены статические параметры гальванометра, но не излагались особенности перемещения рамки из одного положения в другое. Рамка гальванометра имеет определенную массу и геометрические размеры, влияющие на характер указанного перемещения. К тому же рамка испытывает воздействие со стороны окружающей среды, что в значительной степени определяет работу гальванометра в динамическом режиме. Так как для геофизических измерений в скважинах характерна непрерывная регистрация результатов при движении зонда или скважинного прибора, то наряду с определением статических параметров гальванометра важное значение имеет изучение его переходных процессов.

Помимо рассмотренных выше моментов сил, действующих на рамку зеркального гальванометра (вращающего момента  $M_i$  и противодействующего  $M_n$ ), на гальванометр действуют следующие моменты.

1. Момент  $M_c$  сопротивления окружающей среды (воздуха или жидкости) движению рамки, пропорциональный скорости ее движения:

$$M_c = -P_c \frac{d\alpha}{dt} \quad (\text{IV.15})$$

где  $P_c$ —коэффициент пропорциональности, возрастающий с увеличением вязкости среды и поверхности рамки.

2. Момент  $M_a$  электромагнитного торможения, возникающий в результате взаимодействия постоянного магнитного поля

магнитной системы гальванометра с магнитным полем тока  $i_n$ , индуцированного в рамке гальванометра при ее движении:

$$M_s = \Phi i_n. \quad (IV.16)$$

Величина индуцированного в рамке тока

$$i_n = \frac{e_n}{R}, \quad (IV.17)$$

где  $e_n$  — величина индуцированной э. д. с., зависящая от скорости движения рамки и определяемая выражением

$$e_n = - \frac{d\Phi}{dt} = - \Phi \frac{d\alpha}{dt}.$$

Тогда

$$M_s = - \frac{\Phi^2}{R} \frac{d\alpha}{dt} = - P_s \frac{d\alpha}{dt}, \quad (IV.18)$$

где  $P_s = \Phi^2/R$  — постоянная электромагнитного успокоения рамки, зависящая от конструкции измерительного механизма гальванометра и сопротивления измерительной цепи.

3. Момент  $M_n$ , связанный с неуравновешенностью подвижной системы гальванометра и в первом приближении пропорциональный углу поворота рамки:

$$M_n = \pm A\alpha, \quad (IV.19)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от тщательности балансировки подвижной системы.

Согласно известному закону механики (принципу д'Аламбера) сумма моментов внешних сил, действующих на тело при вращательном движении, равна произведению момента инерции  $J$  тела относительно оси вращения на угловое ускорение:

$$\sum_{k=1}^n M_k = J \frac{d^2\alpha}{dt^2}. \quad (IV.20)$$

Тогда, предполагая хорошую уравновешенность подвижной системы гальванометра ( $M_n=0$ ), можно записать:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_t - M_n - M_c - M_s,$$

или

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \Phi i, \quad (IV.21)$$

где  $P = P_c + P_s$  — постоянная успокоения гальванометра.

При  $i=0$  и  $P=0$

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + W\alpha = 0, \quad (IV.22)$$

откуда следует, что при отсутствии успокоения рамка гальвано-

метра будет совершать незатухающие периодические колебания с круговой частотой:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}. \quad (IV.23)$$

Частота свободных колебаний рамки (собственная частота)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W}{J}}, \quad (IV.24)$$

а период колебаний

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{W}}. \quad (IV.25)$$

Подобный режим возможен только теоретически, так как в реальном гальванометре всегда будет существовать успокоение рамки (воздушное, жидкостное, электромагнитное).

Введем безразмерный коэффициент

$$\beta = \frac{P}{2\sqrt{WJ}}, \quad (IV.26)$$

который будем называть степенью успокоения. В зависимости от значения этого коэффициента дифференциальное уравнение (IV.21) имеет три вида решения [11], определяющих характер движения рамки гальванометра из начального положения ( $\alpha = 0$ ) к положению равновесия ( $\alpha = \alpha_0$ ).

1. При  $\beta < 1$  (недоуспокоенный периодический режим)

$$\alpha = \alpha_0 \left[ 1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \left( \omega_0 t \sqrt{1-\beta^2} + \arctg \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}} \right) \right]. \quad (IV.27)$$

В этом случае рамка гальванометра прежде чем занять положение, соответствующее углу  $\alpha_0$ , совершит несколько периодических колебаний с амплитудой, уменьшающейся по экспоненте. При этом режиме частота колебаний (иногда ее называют резонансной частотой) рамки и, следовательно, период колебаний отличаются от частоты  $f_0$  и периода  $T_0$  собственных колебаний, а именно:

$$f = f_0 \sqrt{1-\beta^2}; \quad T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (IV.28)$$

2. При  $\beta > 1$  (переуспокоенный или аperiodический режим)

$$\alpha = \alpha_0 \left[ 1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2-1}} \operatorname{sh} \left( \omega_0 t \sqrt{\beta^2-1} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\beta^2-1}{\beta^2}} \right) \right]. \quad (IV.29)$$

В этом режиме рамка вначале быстро, а затем все медленнее приближается к положению  $\alpha_0$  и достигает его через теоре-

тически бесконечный промежуток времени. Практически же процесс считается законченным, когда рамка подойдет к этому положению с заданной степенью точности.

3. При  $\beta=1$  (критический режим)

$$\alpha = \alpha_0 [1 - e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t)]. \quad (IV.30)$$

В этом случае движение рамки определяется экспоненциальным законом.

На рис. 57, а приведены безразмерные переходные характеристики измерительного механизма гальванометра, т. е. зависимости  $\alpha/\alpha_0 = \varphi(\omega_0 t)$  при разных значениях  $\beta$ . Из кривых следует, что в гальванометрах со степенью успокоения  $\beta=0,6 \div 0,7$  движение рамки прекращается наиболее быстро. Вот почему это значение  $\beta$  следует считать наиболее оптимальным для быстрого успокоения измерительного механизма гальванометра.

При включении гальванометра в цепь переменного тока частоты  $\omega$  направленные вращающего момента, действующего на рамку, будет меняться с частотой изменения тока, в связи с чем рамка будет колебаться около нулевого положения. При этом ввиду своей инерционности рамка не будет успевать реагировать на изменение вращающего момента, вследствие чего ампли-

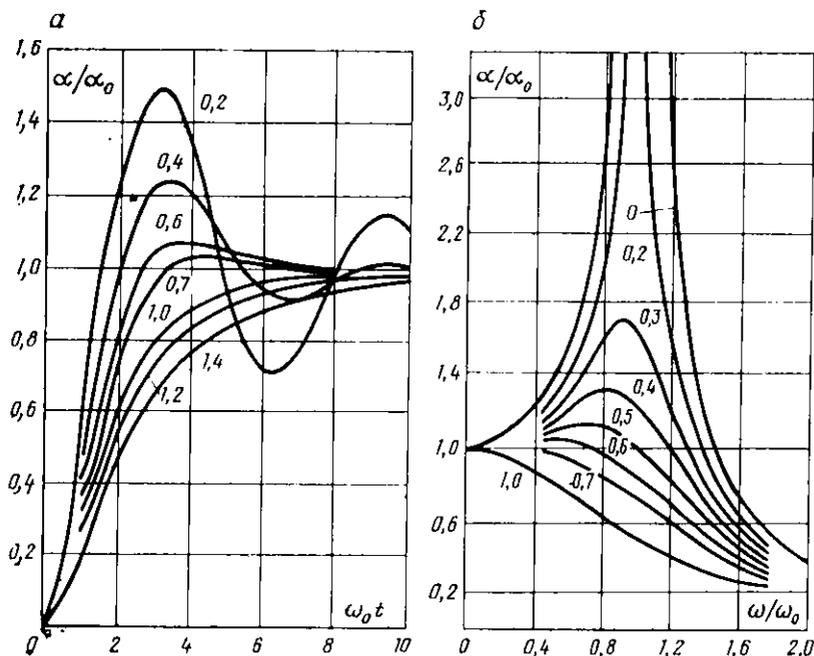


Рис. 57. Переходные (а) и частотные (б) характеристики магнитоэлектрического гальванометра  
Шифр кривых — значения  $\beta$

туда и фаза колебаний рамки не будут соответствовать амплитуде и фазе тока в цепи гальванометра. Несоответствие амплитуд называется динамической восприимчивостью гальванометра и определяется выражением

$$A = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\beta^2\eta^2}}, \quad (\text{IV.31})$$

где  $\eta = \omega/\omega_0$  — относительная частота тока в цепи гальванометра.

Семейство кривых  $A = \Psi(\eta, \beta)$ , называемых частотными характеристиками гальванометра, изображено на рис. 57, б. По кривым можно проследить процесс установления равновесного положения рамки для всех разобранных выше случаев ( $\beta = 0$ ,  $\beta = 1$ ,  $\beta < 1$  и  $\beta > 1$ ). Из кривых, в частности, следует, что наиболее благоприятный по равномерности вид имеют частотные характеристики при степени успокоения  $\beta = 0,6 \div 0,7$ , а частотные характеристики при степени успокоения  $\beta > 1/\sqrt{2} = 0,707$  вообще не имеют подъема [11].

В практике геофизических измерений  $\omega/\omega_0$  составляет около 0,05, поэтому множитель  $A$  можно не учитывать.

Фазовая погрешность гальванометра

$$\varphi = \text{arctg} \frac{2\beta\eta}{1-\eta^2}, \quad (\text{IV.32})$$

также невелика.

#### § 4. ВКЛЮЧЕНИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ СВЕТОЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Зеркальные гальванометры, устанавливаемые в измерительных каналах каротажных светолучевых осциллографов, должны характеризоваться определенными значениями степени успокоения и собственной частоты, обеспечивающими качественную регистрацию результатов измерения.

Выше было показано, что оптимальный переходный процесс гальванометра наблюдается при  $\beta = 0,6 \div 0,7$ . Обеспечить эту степень успокоения можно исходя из следующих соображений. Если пренебречь успокоением среды, в которой находится рамка гальванометра ( $P_c \ll P_s$ ), то для критического режима работы можно записать

$$\beta_{\text{кр}} = 1 = \frac{P_{\text{э.кр}}}{2\sqrt{WJ}} = \frac{\Phi^2}{2R_{\text{кр}}\sqrt{WJ}}.$$

В этом выражении  $R_{\text{кр}}$  представляет собой сопротивление измерительной цепи гальванометра в критическом режиме и называется критическим сопротивлением. Очевидно, что критическое сопротивление складывается из внутреннего сопротивления

( $R_r$ ) гальванометра и внешнего сопротивления, называемого внешним критическим ( $R_{вн\ кр}$ ).

Таким образом,

$$R_{кр} = \frac{\Phi^2}{2\sqrt{WJ}}, \quad (IV.33)$$

откуда следует, что наиболее просто критический режим работы гальванометра может быть обеспечен подбором соответствующего сопротивления внешней цепи.

Поскольку любая степень успокоения может быть выражена через критическое и действующее сопротивления цепи гальванометра

$$\beta = \beta_{кр} \frac{R_{кр}}{R} = \frac{R_{кр}}{R}, \quad (IV.34)$$

представляется возможным рассчитать значение  $R$  для степени успокоения, обеспечивающей оптимальный режим работы гальванометра. Для гальванометров, в которых рамка помещена в жидкость ( $P_c > 0$ ), в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

В работах [6, 7] указывается, что зеркальные гальванометры, предназначенные для регистрации данных каротажа, должны иметь резонансную частоту не более 3 Гц. Поскольку собственная частота гальванометров составляет 20—30 Гц, при установке их в измерительные каналы осциллографа должно быть предусмотрено соответствующее снижение частоты. Для снижения частоты колебаний измерительного механизма гальванометра следует, исходя из формулы

$$f = f_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W}{J}} \sqrt{1 - \beta^2},$$

уменьшить удельный противодействующий момент  $W$  растяжек или увеличить момент инерции  $J$  рамки либо степень успокоения  $\beta$ . Однако изменять конструкцию гальванометра нецелесообразно, ибо это приводит к снижению его виброустойчивости и нарушению балансировки. Нецелесообразно и увеличивать  $\beta$ , так как при этом повышается чувствительность гальванометра к помехам переменного тока [7].

Снизить резонансную частоту гальванометра наиболее просто можно на основе метода электромеханических аналогий. В соответствии с теорией этого метода подключение конденсатора параллельно рамке эквивалентно увеличению массы последней, а подключение катушки индуктивности — уменьшению удельного противодействующего момента растяжек. Тогда дифференциальное уравнение движения рамки (IV.21) с подключенным конденсатором  $C$  принимает вид

$$(J + C\Phi^2) \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \Phi i \quad (IV.35)$$

В этом случае собственная частота  $f_{0c}$  и критическое сопротивление  $R_{кр.с}$  гальванометра с подключенным конденсатором  $C$  будут определяться выражениями

$$f_{0c} = \frac{f_0}{\sqrt{1 + 4\pi f_0 R_{кр} C}}, \quad (IV.36)$$

$$R_{кр.с} = \frac{R_{кр}}{\sqrt{1 + 4\pi f_0 R_{кр} C}}. \quad (IV.37)$$

Величина емкости шунтирующего конденсатора (в мкФ) может быть определена по формуле

$$C = \frac{f_0^2 - f_{0c}^2}{4\pi f_0 f_{0c}^2 R_{кр}} 10^6, \quad (IV.38)$$

которая следует из выражения (IV.36).

Типовая схема включения зеркальных гальванометров в измерительный канал светолучевого осциллографа показана на рис. 58. Для расширения диапазона измерения обычно применяют последовательное включение трех гальванометров  $\Gamma_1 - \Gamma_3$ , чувствительность по току которых находится в соотношении  $1 : \xi : \xi^2$ , где  $\xi$  обычно равно 5. Это позволяет записывать одновременно три кривые измеряемого параметра в масштабах, различающихся в 5 раз.

Наличие дополнительных элементов (резисторов, конденсаторов), обеспечивающих нормальную работу гальванометров, приводит к тому, что через гальванометры проходит только часть тока измерительного канала. Поэтому для характеристики измерительного канала пользуются дополнительными параметрами — постоянными канала по току и напряжению.

Постоянной измерительного канала по току  $K_{тк}$  называется величина тока в канале, при которой блик гальванометра отклонится по шкале осциллографа на 1 см.

Постоянной измерительного канала по напряжению  $K_{ук}$  называется напряжение, поданное на вход канала, под воздействием которого блик гальванометра отклонится по шкале осциллографа на 1 см.

Постоянные измерительного канала по току и напряжению связаны с постоянными по току и напряжению гальванометра соотношениями

$$K_{тк} = qK_t, \quad (IV.39)$$

$$K_{ук} = qK_U = qK_t R, \quad (IV.40)$$

где  $q$  — коэффициент шунтирования гальванометра, показывающий, какая часть тока измерительного канала ответвляется на гальванометр;  $R$  — сопротивление измерительного канала.

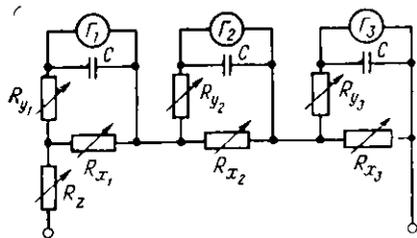


Рис. 58. Типовая схема включения зеркальных гальванометров в измерительный канал светолучевого осциллографа

С помощью конденсатора  $C$  снижается собственная частота каждого гальванометра до требуемого значения; резисторы  $R_x$  и  $R_y$  осуществляют установку необходимых величин  $q$  и  $\beta$ . Резистором  $R_z$  регулируется входное сопротивление  $R_0$  измерительного канала. Численные значения  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$  рассчитывают исходя из заданных величин  $K_i$ ,  $R_{кр}$  и  $R_{г}$  для каждого гальванометра, степени успокоения  $\beta$  гальванометров, коэффициента заглубления масштаба  $\xi$ , а также номинального значения постоянной измерительного канала по напряжению  $K_{Ук}$ , общего  $R$  и входного  $R_0$  сопротивлений канала.

Методика расчета величин  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$  приведена в работе [7].

Подобная схема включения гальванометров является наиболее распространенной; она применена в большинстве типов каротажных светолучевых осциллографов. Иногда (например, в осциллографе ФР-6) используют более простую, хотя и более критичную схему, отличающуюся от рассмотренной отсутствием резисторов  $R_{y1}$  и  $R_z$ .

## § 5. СВЕТОЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

### Общая характеристика

В практике геофизических измерений в настоящее время применяют светолучевые осциллографы И-015 и И-028; иногда используют также осциллограф И-017.

Осциллограф И-015 содержит четыре измерительных канала. Результаты измерения записываются на двух фотолентах, которые могут протягиваться как с одинаковыми, так и с разными скоростями в масштабах глубин 1 : 500, 1 : 200, 1 : 100, 1 : 50 и 1 : 20. Для записи кривых гальванометрами каждого измерительного канала отводится отдельная дорожка. В осциллографе предусмотрена возможность параллельного включения измерительных каналов, а также образования дополнительного канала с записью трех регистрируемых параметров на одной ленте. Наличие устройств, обеспечивающих смещение точек записи измеряемых величин и обеспечивающих оцифровку диаграмм в относительных глубинах скважины, позволяет получить диаграммы, не требующие дополнительной камеральной обработки.

Осциллограф И-028 содержит восемь измерительных каналов и лентопротяжной механизм, позволяющий одновременно

записывать результаты измерения на двух лентах шириной 200 мм, протягиваемых в различных масштабах глубин, либо на одной общей ленте шириной 400—430 мм. Во всех случаях запись кривых гальванометрами измерительных каналов осуществляется на отдельных дорожках. В осциллографе предусмотрена возможность построения в условных обозначениях литологического разреза скважины на фотоленте.

### Схема измерительных каналов

В измерительную схему осциллографа Н-015 включены 12 гальванометров, составляющих четыре измерительных канала по три гальванометра в каждом в соответствии с типовой схемой. Гальванометры первого и второго каналов записывают кривые на первой (левой) фотоленте, а гальванометры третьего и четвертого каналов — на второй (правой) фотоленте осциллографа.

Резисторы, обеспечивающие нормальный режим работы гальванометров, смонтированы на отдельных панелях шунтов, расположенных на передней стенке осциллографа. Доступ к шунтам возможен при открытии откидных дверей. Для проверки сопротивления переменных резисторов на панелях предусмотрены гнезда.

Каждый гальванометр имеет индивидуальный электрический корректор нуля, представляющий собой обычный мост, в одну диагональ которого включен гальванометр, а в другую — источник постоянного напряжения. Два плеча моста объединены в одном переменном резисторе, включенном в схему как реостат со средней точкой, соединенной с источником постоянного напряжения. Ручки переменных резисторов, регулирующих положение каждого из 12 гальванометров, выведены на переднюю стенку осциллографа. Включение корректоров нуля в измерительные каналы осуществляется выключателями, установленными на передней стенке осциллографа.

Измерительная схема осциллографа Н-028 характеризуется наличием 20 гальванометров, объединенных в восемь измерительных каналов. В каналах I, III, V и VII установлено по три гальванометра, а в каналах II, IV, VI и VIII — по два гальванометра. Каждый гальванометр имеет электрический корректор нуля, собранный по той же схеме, что и в осциллографе Н-015. Переменные резисторы, регулирующие работу гальванометров в измерительных каналах, вместе с электрическими корректорами нуля конструктивно объединены в два (по числу фотолент) измерительных блока. Управляют электрическими корректорами нуля с помощью клавишных переключателей, выведенных на лицевую панель.

## Блок гальванометров

Гальванометры, устанавливаемые в светолучевые осциллографы, имеют вид вставок, которые помещаются в магнитный блок.

Гальванометр М007 (рис. 59), устанавливаемый в магнитном блоке светолучевого осциллографа Н-015, состоит из корпуса и подвижной системы. Подвижная система образована рамкой 8, намотанной на роликах проводом диаметром 0,02 мм и закрепленной на двух растяжках 4 и 10 из платиново-серебряного сплава, что улучшает работу гальванометра при больших перегрузках. Растяжки одновременно используются в качестве токопроводов; они своими концами закреплены в полуотверстиях втулок 3 и 13. На верхней растяжке закреплено зеркальце 6.

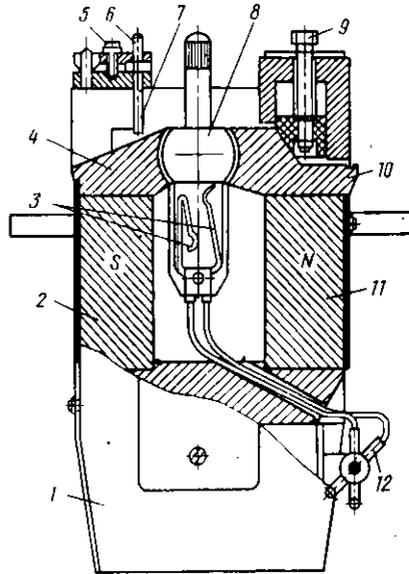
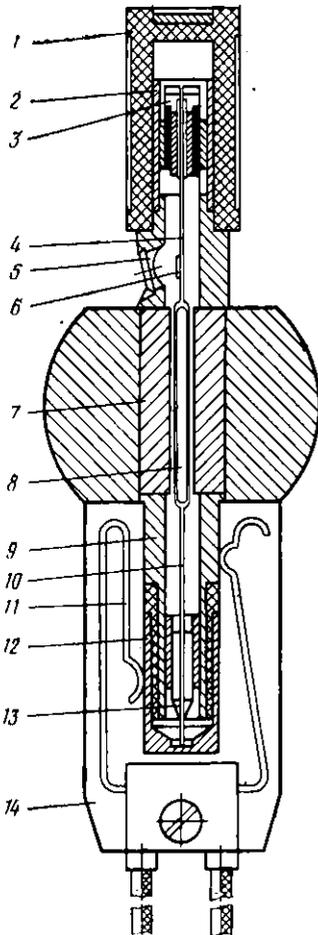


Рис. 60. Магнитный блок осциллографа Н-015

Рис. 59. Гальванометр М007 с полюсным вкладышем

Корпус 9 гальванометра выполнен в виде латунной трубки, в которую впаяны две полюсные вставки 7 и вклеена линза 5 для фокусировки светового луча, отражаемого зеркальцем гальванометра. В верхней части корпус закрыт латунной втулкой 2 и герметизирован пластмассовой головкой 1, с помощью которой гальванометр устанавливается в горизонтальной плоскости.

Корпус заполнен фторорганической жидкостью с плотностью, близкой к плотности измерительной системы. Это позволяет значительно повысить виброустойчивость гальванометра.

Контактными выводами гальванометра служат корпус 9 и изолированный от него наконечник 12, подсоединенный к втулке 13.

Гальванометр устанавливают в магнитный блок в стандартном полюсном вкладыше 14, обеспечивающем изоляцию гальванометра от магнитного блока, и включают в измерительную схему осциллографа через пружинные контакты 11.

Гальванометр МО07 выпускается в двух модификациях — МО07.1 и МО07.2, различающихся значениями постоянной по току (соответственно 0,5 и 0,75 мкА/см).

Аналогичную конструкцию имеет зеркальный гальванометр МО12, характеризующийся постоянной по току  $K_i = 0,45$  мкА/см.

В осциллографе Н-015 расположены два магнитных блока, каждый из которых рассчитан на установку шести гальванометров типа МО07 или МО12. Блок (рис. 60) собран из двух магнитов 2 и 11, магнитопровода 1, переднего полюса 4 и задних подвижных полюсов 10, между которыми находятся шесть вкладышей 8. Магнитная система с двух сторон поддерживается щеками. Подключают гальванометры к измерительной схеме с помощью пружинных контактов 3 при вставлении гальванометров до упора в гнезда магнитного блока.

Контакты выводятся к переходной колодке 12. Винты 9 служат для фиксации гальванометров после юстировки. Перед каждым гальванометром крепятся шторки 7 для ограничения отклонения светового блика. Шторки регулируются винтами 6 и фиксируются винтами 5.

Конструкция блока позволяет выполнять регулировку гальванометров в двух плоскостях: покачивание около горизонтальной оси и поворот вокруг вертикальной.

Осциллограф Н-028 содержит четыре магнитных блока, по устройству аналогичных блокам осциллографа Н-015. В каждом блоке установлены гальванометры МО07 и МО12 двух измерительных каналов.

### Оптическая система и электрическая схема

Оптическая система осциллографа в общем случае предназначена для выполнения следующих операций:

а) запись исследуемых процессов; б) визуальное наблюдение

ние; в) разграфка ленты вертикальными линиями; г) разграфка ленты горизонтальными линиями; д) нанесение на ленту марок времени и меток глубин; е) фотографирование на ленту показаний счетчика глубин; ж) запись результатов автоматической обработки измеряемых величин.

В осциллографе Н-015, как отмечалось выше, запись исследуемых процессов осуществляется на двух лентах шириной 200 мм, которые одновременно или раздельно приводятся в движение двумя лентопротяжными механизмами. Каждая лента разделена на две дорожки шириной 80 мм, между которыми имеется свободный промежуток. Запись кривых на каждой дорожке производится тремя последовательно включенными гальванометрами, которые освещаются индивидуальными осветителями. На рис. 61 показана половина оптической системы осциллографа Н-015, предназначенная для записи на второй ленте гальванометрами измерительных каналов III и IV. Для упрощения на схеме изображены только основные 1 и 2 гальванометры измерительных каналов.

Свет от лампы общего осветителя 6 проходит через составную линзу светоконденсора 7, сферическую линзу гальванометра и попадает на его зеркальце 8. Отразившись от зеркала,

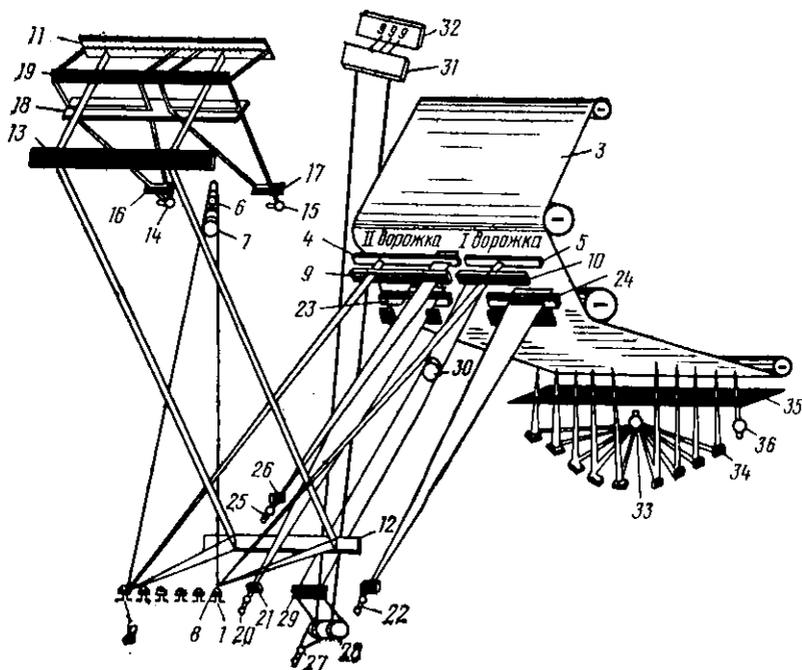


Рис. 61. Оптическая схема осциллографа Н-015

луч в виде вертикальной полоски света проходит через цилиндрическую линзу 4 (или 5) и фокусируется на фотоленте в виде световой точки. При движении фотоленты записывается кривая исследуемого процесса в функции глубины скважины.

С помощью винтового устройства цилиндрическая линза 5 против I дорожки может быть смещена вверх на расстояние до 22 мм по отношению к цилиндрической линзе 4 против II дорожки. Это позволяет в случае одновременной записи двух параметров учесть сдвиг точек записи до 11,0 м при регистрации в масштабе глубин 1 : 500 или до 4,4 м при регистрации в масштабе глубин 1 : 200.

Перед каждым блоком гальванометров установлена система шторок, а перед цилиндрическими линзами 4 и 5 — экраны-диафрагмы 9 и 10. Благодаря этим устройствам блоки гальванометров перемещаются только на своей дорожке. Система шторок регулируется таким образом, что запись основным гальванометром производится на всей ширине дорожки (0—80 мм), а вспомогательными — на интервале 5—80 мм.

Для наблюдения за перемещением бликов гальванометров используют визуальную шкалу 11, установленную на передней стенке крышки осциллографа. Часть световых лучей, отраженных от зеркалец гальванометров, отсекается зеркалом 12 и с помощью зеркала 13 направляется на визуальную шкалу. Суммарная длина луча от зеркальца гальванометра 8 до шкалы 11 равна оптическому рычагу осциллографа. Визуальная шкала подсвечивается осветителями 14 и 15. Свет из щелевых диафрагм 16 и 17 осветителей, пройдя через матовый экран 18, в виде рассеянного пучка отражается зеркалом 19 на визуальную шкалу.

Разграфка ленты вертикальными линиями, являющимися масштабными для регистрируемых величин, осуществляется специальным осветителем. Осветитель представляет собой тубус, в котором размещена лампа 33 и система из девяти зеркал 34. Свет от лампы 33 с помощью зеркал через девять точечных отверстий в стенке 35 тубуса попадает на фотоленту 3, которая при своем движении плотно прилегает к этой стенке. Против десятого отверстия установлена отдельная лампа 36, цепь которой периодически (через 30 с) разрывается. В результате при движении ленты экспонируется прерывистая линия, являющаяся отметкой времени.

Разграфка ленты горизонтальными линиями глубин осуществляется осветителями 20 и 22. Свет от каждой лампы, пройдя через щелевую диафрагму 21 в корпусе осветителя, попадает на цилиндрическую линзу 23 (или 24), фокусирующую его в узкую горизонтальную линию. Линии глубин наносятся на каждой дорожке через 2 м протяжки кабеля в скважине. Для удобства чтения диаграммы каждая пятая линия наносится более «жирной».

В средней части ленты через цилиндрическую линзу 4 от осветителя 25 с щелевой диафрагмой 26 наносится линия кабельной метки шириной 20—30 мм.

В осциллографе Н-015 предусмотрено нанесение цифровых отметок глубин на каждой фотоленте с помощью счетчика 28, фотообъектива 30, поворотного зеркала 29 и осветителя 27, смонтированных в светонепроницаемом кожухе. Через 50 м протяжки кабеля при вспышках ламп осветителя показания счетчика глубин проектируются на фотоленту между горизонтальными линиями глубин первой и второй дорожек. Одновременно с помощью зеркала 31 показания счетчика проектируются на экран 32 для визуального контроля.

Оптическая схема для записи на первой ленте осциллографа отличается от описанной тем, что смещение цилиндрической линзы записи осуществляется против I дорожки.

Оптическая схема осциллографа Н-028 (рис. 62) во многом аналогична схеме осциллографа Н-015. Как отмечалось выше, запись исследуемых процессов здесь осуществляется одновременно или раздельно на двух фотолентах шириной 200 мм или одной фотоленте шириной 400 мм (или фотокальке шириной

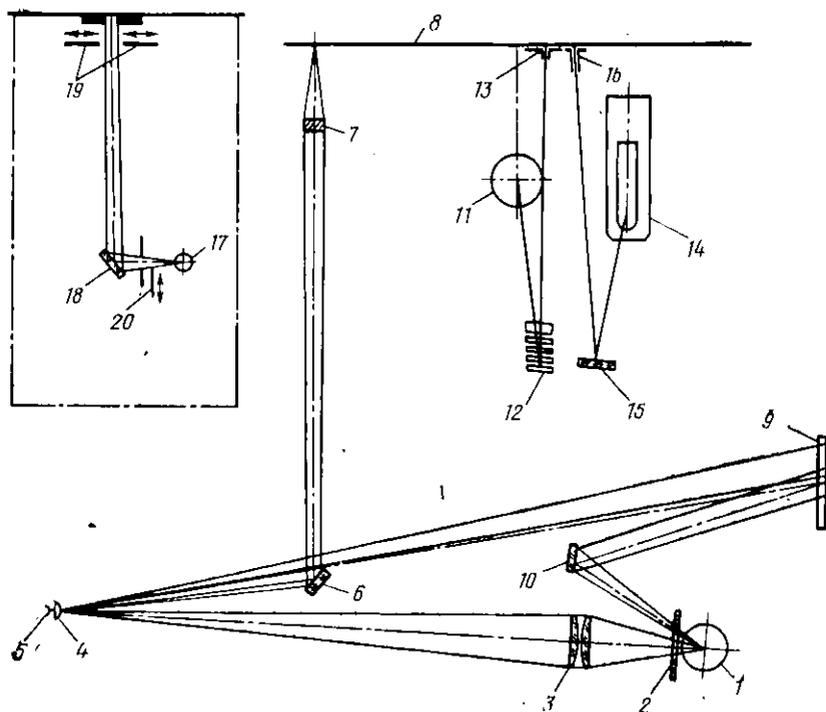


Рис. 62. Оптическая схема осциллографа Н-028

430 мм). Запись ведется на четырех дорожках различной ширины (три дорожки по 80 мм, одна — 95 мм). На каждой дорожке отмечаются показания пяти гальванометров, которые освещаются индивидуальными осветителями 1. Световые потоки от каждого осветителя проходят через конденсоры 3 и попадают на зеркальца гальванометров 5. Отразившись от зеркальца и пройдя через сферическую линзу 4, луч выходит в виде вертикальной полоски света. Часть светового луча отражается зеркалом 6, проходит через цилиндрическую линзу записи 7 и фокусируется на фотоленте 8 в виде световой точки. При движении ленты происходит запись исследуемых процессов.

На трех дорожках, где осуществляется запись гальванометрами III—VIII каналов, имеется возможность смещать точку записи вдоль фотоленты на расстояние до 50 мм.

Оставшаяся часть светового луча, отраженная от зеркальца гальванометра, попадает на визуальную шкалу 9. Подсветка шкалы обеспечивается лампой осветителя гальванометров, свет от которой, пройдя через красный светофильтр 2 и щель в корпусе осветителя, попадает на зеркало 10, а затем на визуальную шкалу.

Для нанесения вертикальных линий используется лампа 11, свет от которой попадает на зеркала 12 и, отразившись от них, достигает фотоленты через диафрагму 13, содержащую ряд узких щелей. Против крайних щелей установлены отдельные лампы (на схеме не показаны), служащие для нанесения прерывистых (через 30 с) линий отметки времени.

Горизонтальные линии глубин наносятся через каждые 2 м протяжки кабеля с помощью импульсной лампы 14. Световые вспышки попадают на зеркало 15 и через щелевую диафрагму 16 проектируются на фотоленту в виде узких линий. Каждая пятая линия экспонируется толще четырех предыдущих за счет яркой вспышки лампы.

Конструктивно магнитные блоки, осветители гальванометров, цилиндрические линзы записи, устройства визуального контроля и нанесения меток глубин объединены в четыре (по числу дорожек записи) светолучевых блока. Смещение точек записи при одновременной регистрации нескольких параметров осуществляется в отличие от осциллографа Н-015 перемещением относительно фотоленты всего светолучевого блока.

Устройства для нанесения горизонтальных и вертикальных линий, а также отметок времени конструктивно объединены в четыре блока регистрации.

В осциллографе Н-028, как и в Н-015, предусмотрены экспонирование на фотоленту показаний счетчика глубин и визуальный контроль показаний счетчика.

Отличительная особенность осциллографа Н-028 — наличие системы нанесения на фотоленту в условных обозначениях литологического разреза скважины при получении информации от

автоматического вычислительного устройства геофизической лаборатории. Для этого в оптической системе предусмотрен специальный блок, который содержит осветитель 17, зеркало 18, знакоформирующие шторки 19 и шторки 20, определяющие частоту нанесения индексов литологии. Работа шторок управляется специальным электромагнитом.

Электрическая схема осциллографов Н-015 и Н-028 содержит различные элементы управления цепями осветителей, сосредоточенными на отдельной панели управления. Кроме того, в осциллографах Н-015 и Н-028 имеется специальная электро-механическая система, позволяющая периодически выбирать погрешность нанесения линий глубин, связанную с несоответствием диаметра мерного ролика с диаметром кабеля, а также с проскальзыванием кабеля в процессе спуско-подъемных операций. Работа этой системы подробно описана в [6] и здесь не рассматривается.

### Лентопротяжный механизм

Лентопротяжный механизм осциллографа предназначен для перемещения фотоленты в соответствии с протяжкой кабеля и состоит из привода, коробки масштабов глубин, магазинной и приемной кассет, счетчика глубин и некоторых дополнительных устройств.

Приводом лентопротяжного механизма служит сельсин-приемник, электрически соединенный с сельсином датчика глубин.

С помощью коробки масштабов глубин обеспечивается перемещение фотоленты в одном направлении независимо от направления перемещения зонда (датчика) в скважине соответственно устанавливаемому масштабу глубин.

Кинематические схемы светолучевых осциллографов различаются числом лентопротяжных механизмов, их размещением, емкостью магазинной и приемной кассет и др. Управление работой лентопротяжных механизмов осуществляется с панели управления осциллографа.

На рис. 63 изображена кинематическая схема осциллографа Н-028. Схема включает привод, две коробки масштабов глубин, лентопротяжный механизм и два цифропечатающих счетчика. В качестве привода используется сельсин-приемник 1, приводимый в движение от сельсин-датчика, установленного в станции. Вращение от сельсина передается через группу шестерен 2 на механический выпрямитель, расположенный в правой коробке масштабов глубин 4. Механический выпрямитель обеспечивает передачу вращения и перемещение фотоленты независимо от направления вращения сельсина (спуск или подъем). Вращательное движение с выхода выпрямителя передается на правую 4 и левую 3 коробки масштабов глубин, соединенные карданными валами 5 и 6 и пружинной муфтой 7, управляемой ав-



томатически и соединяющей или разъединяющей коробки масштабов глубин.

С выходов коробок масштабов глубин вращательное движение передается на ведущие валы 8 и 9, которые, как и коробки масштабов глубин, соединены между собой пружинной муфтой 10, управляемой автоматически в зависимости от установленной приемной кассеты. При установке малых кассет (протягивание двух фотолент шириной 200 мм) ведущие валы 8 и 9 разъединяются, а коробки масштабов соединяются жестко. При таком положении каждый ведущий вал получает вращение от своей коробки масштабов глубин. При установке большой приемной кассеты (протягивание фотоленты шириной 400 мм или фотокальки шириной 430 мм) ведущие валы соединяются жестко, а коробки масштабов глубин разъединяются, и вращение ведущего вала происходит только от правой коробки масштабов 4. Валы 11 и 12 приемных кассет получают вращение от ведущих валов через группы шестерен 13 и 14 и фрикционные муфты 15 и 16, которые обеспечивают постоянную подмотку фотолент в процессе их протягивания.

Для индикации движения и указания остатка ленты в магазинных кассетах на ведущих валах установлены секции планетарных механизмов 17 и 18. Индикация движения происходит вращением дисков 19 и 20 с «шахматной» окраской, выведенных на переднюю панель осциллографа. Сюда же выведены лимбы 21 и 22, указывающие на количество оставшейся ленты в кассетах.

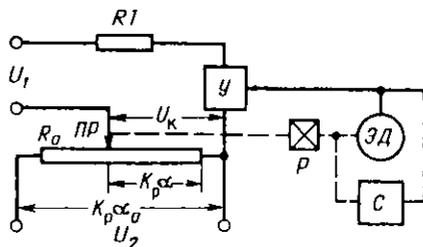
Приводом цифропечатающих счетчиков 23 и 24 являются сельсины-приемники 25 и 26, которые электрически связаны с сельсином-датчиком и механически через систему шестерен приводят в движение счетчики 27 и 28. Показания последних фотографируются на фотоленту. Для ручной коррекции показаний счетчиков на переднюю панель осциллографа выведены рукоятки управления 29 и 30.

Визуальное наблюдение глубины спуска скважинного прибора (зонда) осуществляется по механическому счетчику 31, связанному с сельсином-приемником через пару шестерен. От этого же сельсина вращается фотодиодный датчик 32, который управляет работой импульсных ламп горизонтальной разметки фотолент.

## § 6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА

Автоматические потенциометры основаны на компенсационном способе измерения и используются в промыслово-геофизической практике для измерения различных физических величин и регистрации полученных результатов в виде каротажной диаграммы. Принципиальная схема автоматического потенциометра изображена на рис. 64.

Рис. 64. Принципиальная схема автоматического потенциометра



На вход потенциометра подается напряжение  $U_1$ , подлежащее измерению, а на вход компенсирующего устройства (реохорда  $R_0$ ) — другое напряжение  $U_2$ , часть которого  $U_k$ , снимаемая с ползунка реохорда  $ПП$ , направлена навстречу измеряемому. Разность напряжений  $\Delta U = U_1 - U_k$ , называемая напряжением небаланса, подается на вход усилителя  $У$  и после усиления — на электродвигатель  $ЭД$ . Под действием усиленного напряжения небаланса ротор электродвигателя вращается, перемещая ползунок, связанный с ним через редуктор  $Р$ . Направление вращения ротора двигателя выбирается таким, чтобы ползунок двигался в сторону уменьшения напряжения небаланса. В момент компенсации ( $\Delta U = 0$ ) вращение ротора прекращается, и положение ползунка, пропорциональное углу поворота ротора, характеризует значение измеряемой разности потенциалов. Таким образом, усилитель  $У$  играет роль нуля-органа автоматического потенциометра.

С ползунком реохорда механически связано пишущее устройство, отмечающее на диаграмме значение  $U_1$  в момент компенсации.

Напряжение небаланса, подаваемое на вход усилителя  $У$ , в общем случае определяется выражением [7]

$$\Delta U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_1 - U_k) = \xi (U_1 - U_k), \quad (\text{IV.41})$$

где  $R_1$  — сопротивление измерительной цепи;  $R_2$  — входное сопротивление усилителя;  $\xi$  — коэффициент деления.

Величина компенсирующего напряжения может быть рассчитана по формуле

$$U_k = \frac{U_2}{K_p \alpha_0} K_p \alpha = m K_p \alpha = m_d \alpha, \quad (\text{IV.42})$$

где  $K_p$  — коэффициент передачи редуктора;  $\alpha$  — угол поворота ротора электродвигателя относительно нулевого положения;  $\alpha_0$  — угол, на который должен повернуться ротор электродвигателя, чтобы ползунок переместился на всю длину реохорда;  $m = U_2 / K_p \alpha_0$  — постоянная реохорда по напряжению;  $m_d = U_2 / \alpha_0$  — постоянная по напряжению, приведенная к оси ротора двигателя.

Следовательно,

$$\Delta U = \xi (U_1 - m_d \alpha). \quad (IV.43)$$

В положении компенсации  $\Delta U = 0$  и

$$U_1 = m_d \alpha_k, \quad (IV.44)$$

где  $\alpha_k$  — угол поворота ротора электродвигателя в положении компенсации.

С учетом выражения (IV.42) можно записать

$$\alpha_k = \frac{U_1}{m_d} = \frac{U_1}{U_2} \alpha_0. \quad (IV.45)$$

Как видно, угол поворота ротора электродвигателя в момент компенсации не зависит от коэффициента деления и определяется лишь соотношением напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

С учетом коэффициента передачи  $K_p$  редуктора и работы спрямляющего механизма потенциометра выражение (IV.45) можно преобразовать, заменив величины  $\alpha_k$  и  $\alpha_0$  соответствующими отрезками реохорда  $R_0$ .

Выражение (IV.45) показывает, что автоматический потенциометр может работать в следующих модификациях.

1. При  $U_2 = \text{const}$

$$\alpha_k = C_1 U_1. \quad (IV.46)$$

2. При  $U_1 = \text{const}$

$$\alpha_k = C_2 U_2^{-1}. \quad (IV.47)$$

3. При  $U_1 = \text{var}, U_2 = \text{var}$

$$\alpha_k = C_3 \frac{U_1}{U_2}. \quad (IV.48)$$

Характер движения подвижной системы автоматического потенциометра к положению компенсации зависит от величины напряжения небаланса. При малых значениях  $\Delta U$ , когда еще не превзойден предел чувствительности усилителя  $U$ , подвижная система не реагирует на сигнал небаланса. Это так называемая зона нечувствительности, которая определяется, с одной стороны, трением подвижных частей системы потенциометра, а с другой — чувствительностью усилителя.

Если обозначить через  $\Delta U_{\text{min}}$  минимальное напряжение на входе усилителя, достаточное для трогания подвижной системы потенциометра, то зона нечувствительности может быть выражена следующим образом:

$$U_{\text{зн}} = \frac{2\Delta U_{\text{min}}(R_1 + R_2)}{R_2} = \frac{2}{\xi} \Delta U_{\text{min}}. \quad (IV.49)$$

Величина  $\Delta U_{\text{min}}$  может быть рассчитана через коэффициент усиления усилителя и момент трения  $M_T$  при трогании подвиж-

ной системы, приведенный к оси ротора двигателя:

$$\Delta U_{\text{min}} = \frac{M_{\tau}}{K_{\text{дм}} K_{\gamma}}, \quad (\text{IV.50})$$

где  $K_{\text{дм}}$  — коэффициент передачи двигателя по моменту, т. е. коэффициент пропорциональности между пусковым моментом двигателя и управляющим напряжением на его обмотке.

Относительная погрешность в результатах измерения, вызванная наличием зоны нечувствительности, представляет собой отношение  $U_{\text{зн}}$  к напряжению  $U_{\text{шк}}$ , соответствующему всей шкале прибора. Разделив обе части равенства (IV.49) на  $U_{\text{шк}}$  и сделав необходимые преобразования, получим

$$\varepsilon = \frac{U_{\text{зн}}}{U_{\text{шк}}} = \frac{2M_{\tau}}{K_{\text{дм}} K_{\gamma} \xi U_{\text{шк}}}. \quad (\text{IV.51})$$

Поскольку для определенного типа автоматического потенциометра величины  $M_{\tau}$ ,  $K_{\text{дм}}$  и  $\xi$  постоянны, относительная погрешность, обусловленная наличием зоны нечувствительности, как это следует из формулы (IV.51), уменьшается с ростом коэффициента усиления  $K_{\gamma}$  и при измерениях в более широком диапазоне (т. е. с ростом шкалы прибора или увеличением постоянной по напряжению).

При отклонении от положения компенсации, выходящем за пределы зоны нечувствительности, наблюдается пропорциональная зависимость между напряжением небаланса и моментом, развиваемым электродвигателем, а следовательно, — угловой скоростью движения ротора. Эта зона имеет сравнительно небольшую протяженность и носит название зоны пропорциональности.

Наконец, за пределами зоны пропорциональности ( $\Delta U > U_{\text{з пр}}$ ) ротор двигателя вращается с максимальной скоростью, не зависящей от величины напряжения небаланса.

Поскольку момент инерции подвижных частей автоматического потенциометра, приведенный к оси ротора двигателя, достаточно велик, то, достигнув положения компенсации, ротор двигателя (а следовательно, и ползунок реохорда) по инерции повернется дальше. При этом напряжение небаланса изменит свой знак, и двигатель будет тормозиться противотоком. Остановившись, ротор двигателя начинает вращаться в обратном направлении, вновь по инерции проскакивая положение равновесия, и т. д. Таким образом, прежде чем занять необходимое положение, ползунок совершит несколько колебательных движений с затухающей амплитудой.

Режим работы автоматического потенциометра при прочих равных условиях (постоянный момент инерции, момент трения и др.) зависит от величины зоны пропорциональности — чем уже эта зона, тем труднее обеспечить успокоение системы. В связи с этим необходимо подобрать оптимальную ширину зоны про-

порциональности и сохранять ее при различных условиях работы потенциометра. Выбор необходимой ширины зоны пропорциональности может быть обеспечен изменением коэффициента усиления усилителя  $У$ , однако значительное уменьшение коэффициента усиления приводит к увеличению зоны нечувствительности потенциометра.

Для успокоения (демпфирования) подвижной системы и получения оптимальных переходных характеристик в систему автоматического потенциометра должен быть введен сигнал, пропорциональный угловой скорости движения ротора электродвигателя. Напряжение с выхода источника этого сигнала  $С$  (см. рис. 64) подается на электродвигатель в противофазе по отношению к напряжению небаланса. При необходимости демпфирующий сигнал может быть предварительно усилен усилителем  $У$ .

### § 7. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА

Из сказанного выше следует, что автоматический потенциометр представляет собой нелинейную электромеханическую систему со 100 %-ной отрицательной обратной связью. Тем не менее при выводе уравнения движения ротора электродвигателя будем предполагать, что в системе автоматического потенциометра отсутствуют нелинейные элементы, рассчитанные в основном на улучшение его помехоустойчивости.

Принципиальная схема потенциометра, показанная на рис. 64, может быть представлена в виде, изображенном на рис. 65. Управляющее напряжение, подаваемое на электродвигатель, представляет собой разность между усиленным напряжением небаланса и напряжением, пропорциональным угловой скорости движения ротора двигателя  $U_{\omega}$ :

$$U_y = K_y \Delta U - U_{\omega} = K_y \Delta U - K_{\omega} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (\text{IV.52})$$

где  $K_{\omega}$  — коэффициент передачи демпфирующего устройства;  $\omega = d\alpha/dt$  — угловая скорость движения ротора электродвигателя.

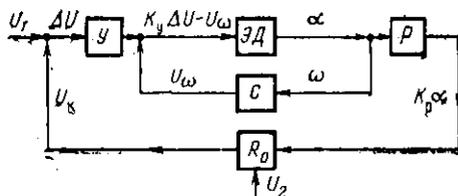
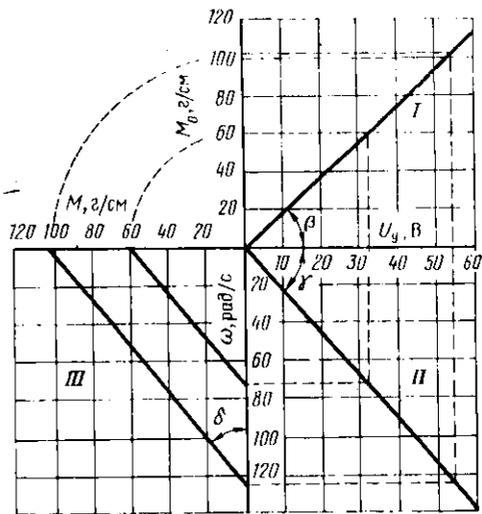


Рис. 65. Структурная схема автоматического потенциометра

Рис. 66. Характеристики электродвигателя 2АСМ-50:

*I* — пусковая —  $M_0 = f(U_y)$ ;  
*II* — скоростная —  $\omega_0 = f(U_y)$ ;  
*III* — механические —  $\omega = \Psi(M)$



С учетом выражения (IV.43) формула (IV.52) принимает вид

$$U_y = \xi K_y U_1 - \xi K_y m_d \alpha - K_\omega \frac{d\alpha}{dt}. \quad (IV.53)$$

Величина момента, развиваемого ротором электродвигателя под воздействием управляющего напряжения, может быть получена из характеристик электродвигателя (рис. 66). Механические характеристики двигателя, показанные в квадранте *III*, представляют собой зависимости угловой скорости движения ротора  $\omega$  от момента на его валу  $M$  и в первом приближении — это семейство прямых линий, шифром которых является напряжение  $U_y$ . В зависимости от величины  $U_y$  характеристики смещаются параллельно друг другу и могут быть описаны уравнением

$$\frac{M}{M_0} + \frac{\omega}{\omega_0} = 1, \quad (IV.54)$$

откуда

$$M = M_0 - \frac{M_0}{\omega_0} \omega. \quad (IV.55)$$

Величины  $M_0$  и  $\omega_0$  могут быть найдены соответственно из пусковой (квадрант *I*) и скоростной (квадрант *II*) характеристик электродвигателя:

$$M_0 = \frac{M_{0II}}{U_{yII}} U_y = K_{дм} U_y; \quad (IV.56)$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_{0н}}{U_{yн}} U_y = K_{д\omega} U_y, \quad (IV.57)$$

где  $M_{0н}$ ,  $\omega_{0н}$  и  $U_{yн}$  — соответственно номинальный пусковой момент, номинальная угловая скорость двигателя на холостом ходу и номинальное управляющее напряжение;  $K_{дм} = M_{0н}/U_{yн} = \text{tg} \beta$  — коэффициент передачи двигателя по моменту;  $K_{д\omega} = \omega_{0н}/U_{yн} = \text{tg} \gamma$  — коэффициент передачи двигателя по скорости. После подстановки (IV.56) и (IV.57) в (IV.55) имеем

$$M = K_{дм} U_y - \frac{K_{дм}}{K_{д\omega}} \omega = K_{дм} U_y - P_d \frac{d\alpha}{dt}, \quad (IV.58)$$

где  $P_d = \frac{K_{дм}}{K_{д\omega}} = \frac{M_{0н}}{\omega_{0н}} = \text{tg} \delta$  — коэффициент успокоения электродвигателя.

Воспользовавшись (IV.53), получим

$$M = \xi K_{дм} K_y U_1 - (P_d + K_{дм} K_\omega) \frac{d\alpha}{dt} - \xi K_{дм} K_y m_d \alpha = M_{U_1} - M_\omega - M_\alpha, \quad (IV.59)$$

где  $M_{U_1}$  — момент, развиваемый ротором электродвигателя под воздействием измеряемого напряжения  $U_1$ ;  $M_\omega$  — тормозящий момент, пропорциональный угловой скорости движения ротора электродвигателя;  $M_\alpha$  — момент, развиваемый ротором электродвигателя под воздействием компенсирующего напряжения.

Учитывая принцип д'Аламбера, получим

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + (P_d + K_{дм} K_\omega) \frac{d\alpha}{dt} + \xi K_{дм} K_y m_d \alpha = \xi K_{дм} K_y U_1 \quad (IV.60)$$

или

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W \alpha = \xi K_{дм} K_y U_1, \quad (IV.61)$$

где  $P = P_d + K_{дм} K_\omega$  — постоянная успокоения автоматического потенциометра;  $W = K_{дм} K_y \xi m_d$  — удельный противодействующий момент потенциометра.

Уравнение (IV.61) имеет тот же вид, что и уравнение движения рамки гальванометра (IV.21), поэтому его решения и сделанные при их анализе выводы справедливы для системы автоматического потенциометра. В частности,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}} = \sqrt{\frac{\xi K_{дм} K_y m_d}{J}}; \quad (IV.62)$$

$$f = f_0 \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Степень успокоения системы автоматического потенциометра

$$\beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}} = \frac{P_d + K_{д\omega}K_{\omega}}{2\sqrt{J\xi K_{дм}K_y m_d}} \quad (IV.63)$$

или

$$\beta = \frac{P_d}{2\sqrt{JK_{дм}}} \frac{1 + K_{д\omega}K_{\omega}}{\sqrt{\xi K_y m_d}} = A \frac{1 + B}{\sqrt{\xi K_y m_d}}, \quad (IV.64)$$

где  $A = P_d/2\sqrt{JK_{дм}}$  и  $B = K_{д\omega}K_{\omega}$  — величины, постоянные для определенного типа автоматического потенциометра.

Как видно, степень успокоения тем больше, чем больше величина демпфирующего сигнала, и тем меньше, чем больше произведение  $\xi K_y m_d$ . Если при любых изменениях  $K_y$  и  $m_d$  произведение  $\xi K_y m_d$  остается постоянным, то режим работы автоматического потенциометра не меняется. Следовательно, для обеспечения нормального режима работы потенциометра должно всегда соблюдаться соотношение

$$\xi K_y = \frac{D}{m_d} = \frac{D}{U_2} \alpha_0, \quad (IV.65)$$

где  $D$  — постоянное число, при котором степень успокоения соответствует выбранной.

Из выражения (IV.65) также следует, что если, меняя  $m_d$  или  $U_2$ , одновременно изменять коэффициент деления  $\xi$  так, чтобы произведение  $\xi K_y$  не менялось, то и степень успокоения потенциометра останется постоянной.

В работе [7] показано, что при отсутствии внешнего демпфирующего сигнала собственная частота подвижной системы автоматического потенциометра  $f_0 = 3,1$  Гц, а собственная степень успокоения  $\beta_0 = 0,243$ . Увеличение степени успокоения до  $\beta = 0,6$  с целью получения оптимальных переходных характеристик осуществляется с помощью отдельного источника демпфирующего сигнала, в качестве которого могут выступать тахогенератор, связанный с электродвигателем, или некоторые RC-звенья.

## § 8. ДВУХКАНАЛЬНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИОМЕТР ПАСК-8

Двухканальный электронный автоматический потенциометр ПАСК-8 предназначен для регистрации результатов измерения при промышленно-геофизических исследованиях. Измеряемое напряжение на вход каждого канала подается соответственно через гнезда I и II (рис. 67).

Ниже приводится описание принципиальной электрической схемы первого измерительного канала потенциометра. Принципиальная схема второго канала аналогична первому.

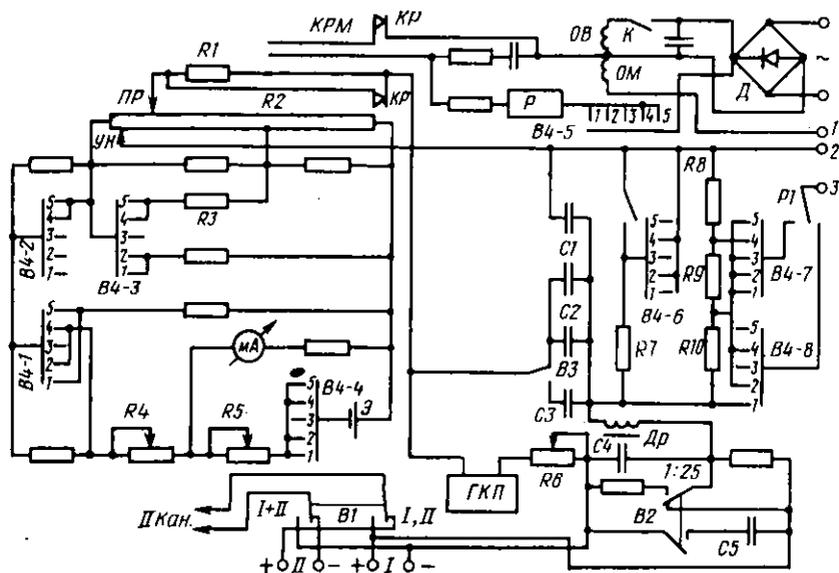


Рис. 67. Принципиальная электрическая схема автоматического потенциометра ПАСК-8

Реохорд  $R_2$  питается от элемента Э.

В потенциометре предусмотрена возможность установки двух видов шкал — линейной и масштабной. При линейной шкале постоянная по напряжению одинакова по всей длине реохорда; в случае масштабной шкалы постоянная по напряжению на основной (80 мм) и дополнительной (64 мм) частях реохорда различается. В последнем случае основная часть реохорда шунтируется дополнительным резистором  $R_3$  такой величины, что постоянная по напряжению основной части реохорда становится в 5 раз меньше, чем дополнительной части.

Установка требуемой шкалы и изменение предела измерения потенциометра (скачкообразное изменение постоянной по напряжению реохорда) обеспечивается переключателем  $B_4$  «Предел измерения» на пять положений (табл. 4). Предусмотрена плавная регулировка постоянной по напряжению с помощью реостата  $R_5$ .

Для того чтобы при переходе с одного предела измерения на другой не менялся режим работы потенциометра (т. е. степень успокоения), с помощью того же переключателя  $B_4$  на входе нуля-органа включается та или иная секция делителя напряжения  $R_8, R_9, R_{10}$ .

При работе на масштабных шкалах в момент попадания ползунка  $ПР$  на дополнительную часть реохорда (с постоянной по напряжению в 5 раз большей, чем на основной части) замы-

Таблица 4

Значения постоянных по напряжению и падения напряжения на участках реохорда для различных позиций переключателя В4 (см. рис. 67)

Позиция переключателя В4		Численное значение постоянной по напряжению, мВ см		Общее падение напряжения при максимальной постоянной по напряжению, мВ	
Номер позиции	Название	На основной (80 мм) части реохорда	На дополнительной (64 мм) части реохорда	На основной части реохорда	На всем реохорде
1	20 Л	0,5—2,5	0,5—2,5	20	36
2	100 Л	2,5—12,5	2,5—12,5	100	180
3	Выкл.	—	—	—	—
4	100 М	2,5—12,5	12,5—62,5	100	500
5	20 М	0,5—2,5	2,5—12,5	20	100

каются контакты КРМ, включается реле Р переключателя масштабов, которое своими контактами производит соответствующее переключение на делителе напряжения.

Резистор R7 установлен для сохранения постоянной величины входного сопротивления нуля-органа при переходе с одного предела измерения на другой.

С помощью ползунка реохорда УН устанавливается нуль прибора.

Если при поддержании напряжения на реохорде вращать ручку реостата R4 «Умножить» в пределах от «1» до «0,2», то постоянная по напряжению реохорда будет пропорционально изменяться. Для сохранения неизменной чувствительности схемы с реостатом R4 связан потенциометр R2 (см. рис. 68), регулирующий коэффициент усиления нуля-органа.

С помощью выключателя В2 («Делитель») напряжение, вводимое в измерительную цепь, может быть уменьшено в 25 раз. Схема делителя составлена таким образом, чтобы вход потенциометра оставался всегда включенным на одно и то же сопротивление (900 Ом). Для того чтобы характеристика измерительного канала оставалась неизменной, при включении выключателя В2 перед делителем включается конденсатор С5, равный по емкости конденсатору С4.

Конденсаторы С1—С4 и дроссель Др образуют фильтр, выполняющий две функции:

- защиты входа потенциометра от помех переменного тока;
- создания необходимого режима успокоения потенциометра, обеспечивающего его наилучшую частотную характеристику.

Реостатом R6 «Демпфер» можно изменять степень успокоения прибора. С помощью переключателя В3 можно заменить конденсатор С3 на конденсаторы С1 и С2, что необходимо при регистрации ПС.

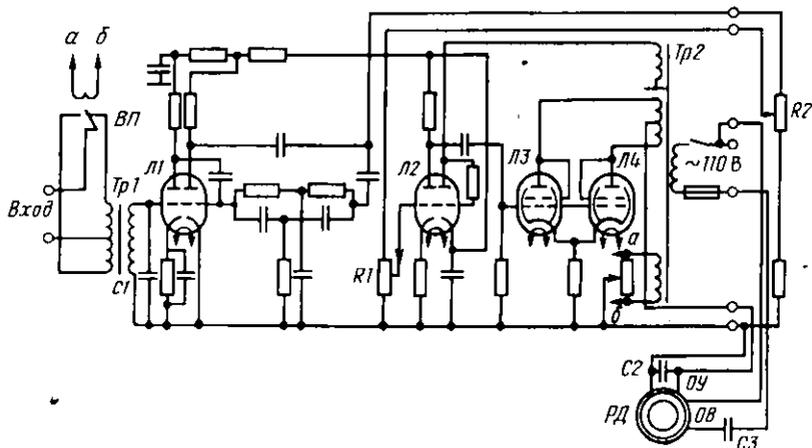


Рис. 68. Принципиальная электрическая схема нуля-органа автоматического потенциометра ПАСК-8

Переключатель  $B1$  дает возможность включать параллельно оба канала, что обеспечивает запись одного параметра в двух (на линейных шкалах) или в четырех (на масштабных шкалах) масштабах регистрации.

Контакты  $KP$  размыкаются, когда каретка пишущего устройства дойдет до края шкалы. При этом в измерительную цепь канала включается резистор  $R1$  и выключается реле переключения масштабов. Это обеспечивает параллельную работу обоих каналов без взаимного влияния.

Разность между измеряемым и компенсирующим напряжениями с делителя  $R8-R10$  через гнезда 2 и 3 подается на нуль-орган. На входе нуля-органа установлен вибропреобразователь  $B1$ , к подвижному контакту которого и средней точке трансформатора  $Tr1$  (рис. 68) подводится напряжение небаланса. Со вторичной обмотки трансформатора  $Tr1$ , настроенной с помощью конденсатора  $C1$  на частоту 50 Гц, напряжение поступает на трехкаскадный усилитель низкой частоты, собранный на двух лампах  $Л1$  и  $Л2$  типа 6Н2П. Вторая половина лампы  $Л2$  выполняет функцию выпрямителя, с которого снимается напряжение для питания анодов лампы усилителя. Второй каскад усиления (правая половина лампы  $Л1$ ) имеет селективную отрицательную обратную связь, защищающую усилитель от помех промышленной частоты, попадающей на его вход. Усилитель имеет регулятор усиления, выполненный в виде потенциометра  $R1$ , включенного в сетку лампы третьего каскада, и дополнительный, упомянутый выше, регулятор усиления  $R2$ , вынесенный из блока усилителя.

Преобразованное в переменный ток и усиленное напряже-

ние небаланса подается на выходной каскад, собранный на лампах ЛЗ и Л4 и управляющий работой реверсивного электродвигателя РД.

Реверсивный электродвигатель содержит две обмотки: обмотку возбуждения (ОВ) и управляющую обмотку (ОУ). Обмотка возбуждения подключена к сети через конденсатор СЗ, который вместе с индуктивностью обмотки образует резонансный контур, настроенный на частоту 50 Гц. Поэтому ток в этой обмотке совпадает по фазе с напряжением в сети.

Ток в управляющей обмотке благодаря общей ее индуктивности сдвинут на 90° относительно напряжения сети. Конденсатор С2, шунтирующий обмотку, повышает избирательность обмотки к переменной составляющей тока частоты 50 Гц.

Оси обмоток сдвинуты в пространстве на 90°. В этом случае при подаче на одну из обмоток переменного тока, сдвинутого на 90° относительно тока в другой обмотке, образуется вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой короткозамкнутый ротор. При изменении фазы тока в одной из обмоток направление вращения ротора изменится на обратное. Это можно пояснить следующим образом.

Пусть токи в обмотке возбуждения и управляющей обмотке соответственно равны

$$i_x = I \sin \omega t \text{ и } i_y = I \sin(\omega t - \pi/2), \quad (IV.66)$$

где  $I$  — амплитуда тока;  $\omega$  — круговая частота;  $t$  — время.

Поскольку магнитный поток в обмотке пропорционален протекающему по ней току, то потоки в обмотке возбуждения и управляющей обмотке будут соответственно

$$\Phi_x = \Phi \sin \omega t \text{ и } \Phi_y = \Phi \sin(\omega t - \pi/2) = -\Phi \cos \omega t, \quad (IV.67)$$

где  $\Phi$  — амплитуда магнитного потока.

Учитывая пространственный сдвиг между обмотками на 90°, получим, что общий магнитный поток обмоток

$$\Phi_0 = \sqrt{\Phi_x^2 + \Phi_y^2} = \Phi, \quad (IV.68)$$

т. е. имеет постоянную амплитуду. Направление этого потока может быть охарактеризовано углом вектора  $\Phi_0$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_x}{\Phi_y} = -\operatorname{tg} \omega t \text{ и } \alpha = -\omega t. \quad (IV.69)$$

Как видно, угол  $\alpha$  увеличивается пропорционально времени. Следовательно, в данном случае происходит вращение магнитного поля  $\Phi_0$  в направлении против часовой стрелки (об этом свидетельствует знак «—»).

Изменение знака напряжения небаланса приводит к изменению направления тока в управляющей обмотке, т. е.

$$i_y = I \sin(\omega t + \pi/2). \quad (IV.70)$$

В этом случае  $\alpha = \omega t$ , т. е. направление вращения магнитного поля, а следовательно, вращение ротора электродвигателя изменится на противоположное.

В потенциометре имеется реле времени, состоящее (рис. 67) из синхронного электродвигателя (на схеме не показан), на оси которого закреплен кулачок; с ним связана контактная группа *K*, работающая на замыкание. Когда кулачок замкнет контактную группу, что происходит каждые 30 с, включается на несколько секунд обмотка *OB* отметчика времени. От выпрямителя *D* питаются также обмотки меткоотбивателя *OM* и реле *PI* переключателя масштабов.

В схему потенциометра входят также градуированный (*ГКП*) и не градуированный компенсаторы поляризации, при необходимости включаемые в любой из каналов.

Потенциометр имеет два лентопротяжных механизма, которые обеспечивают одновременную или раздельную протяжку двух разграфленных диаграммных лент в масштабах глубин 1:20, 1:50, 1:100, 1:200 и 1:500 для одного механизма и 1:200, 1:500, 1:1000, 1:2000 и 1:5000 — для другого.

Помимо потенциометра ПАСК-8 при геофизических измерениях находят применение электронные потенциометры общетехнического назначения ЭПП-09МЗ и ЭППВ-60МЗ, на базе которых изготовлены аналоговые регистраторы автоматических газокаротажных станций, а также потенциометр КСП-4 в качестве регистратора для геофизических и геохимических исследований в процессе бурения скважины.

## § 9. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Общий недостаток всех рассмотренных выше регистрирующих приборов — трудность ввода результатов измерения, представленных в виде диаграмм, в вычислительную машину для последующей обработки.

В этом отношении весьма удобны многоканальные регистраторы с ферромагнитным носителем (магнитная лента, проволока), получающие в последние годы все более широкое применение. При аналоговой магнитной записи используют различные виды модуляции — амплитудную, частотную или фазовую. Регистрация сигналов на магнитную ленту в аналоговом виде широко распространена для записи звука и телевизионных изображений, но для записи измерительной информации ее применяют крайне редко из-за нестабильности коэффициента передачи канала «запись—воспроизведение» и др. Кроме того, аналоговые регистраторы не всегда обеспечивают необходимую точность, быстродействие, помехоустойчивость.

Указанные недостатки отсутствуют при цифровой регистрации результатов измерения. Цифровая регистрация также об-

ладает рядом дополнительных методических преимуществ, например, помехоустойчивой передачей на большие расстояния по различным каналам связи как по геофизическому кабелю, так и по радиоканалам; при большей многоканальности — регистрации дополнительных параметров, позволяющих учитывать погрешности и исправлять искажения в каналах связи; записью быстроменяющихся величин, в том числе и результатов измерения приборами, работающими в импульсном режиме. Важное преимущество цифрового представления информации — удобство непосредственного ввода ее в ЭВМ. Этим самым обеспечиваются автоматизация и большая производительность процесса обработки и интерпретации результатов геофизических исследований скважин; повышение геологической эффективности, т. е. при применении более сложных и точных физико-математических моделей изучаемого разреза, большего количества вариантов методов интерпретации более детальный анализ промыслово-геофизических данных; исключение ошибок, связанных с недостаточной квалификацией интерпретаторов. Но цифровые регистраторы сложнее, дороже, поэтому рационально применять их в многоканальном варианте, при этом используется много общих блоков и узлов.

При цифровой регистрации промыслово-геофизических данных должны выполняться следующие основные условия [8].

1. Совокупность цифровых значений должна достаточно точно характеризовать изменение геофизических величин. Необходимо обеспечить возможность определения геофизических параметров  $a_i$  и соответствующих им глубин  $z_i$  с точностью, не меньшей, чем при ручной интерпретации. Чтобы обеспечить качество измерений при цифровой регистрации, динамический диапазон измерения следует выбрать равным 75—80 дБ.

2. Объем числового материала, представляющего кривые геофизических параметров, должен быть возможно меньшим. Это требование связано с ограниченной пропускной способностью каналов связи и входных устройств ЭВМ.

3. Полученные цифровые данные должны обеспечивать воспроизведение кривых геофизических параметров как можно более простыми устройствами.

### Дискретизация и восстановление информации

Для цифровой регистрации и дальнейшей интерпретации с помощью ЭВМ результатов промыслово-геофизических исследований скважин необходимо прежде всего перейти от аналоговых величин, получаемых большинством датчиков скважинных приборов, к последовательности чисел  $a_i$ , представляющих величины измеряемых параметров на дискретных глубинах  $z_i$ . Значения геофизических параметров отсчитывают с постоянным или переменным интервалом глубин, называе-

мым шагом квантования (дискретизации) по глубине, в зависимости от которого различают равномерную и неравномерную систему квантования.

В равномерной системе квантования глубины можно не фиксировать, а определять по порядковому номеру цикла записи  $i$ :

$$z_i = z_1 - i\Delta, \quad (\text{IV.71})$$

где  $z_1$  — глубина начальной точки записи;  $\Delta$  — шаг квантования по глубине.

Цифровая запись результатов измерения при равномерной системе квантования имеет вид

$$a_1, a_2, \dots, a_i, \dots \quad (\text{IV.72})$$

При цифровой регистрации без записи глубины  $z_i$  вследствие неточности синхронизации преобразования могут возникать погрешности в определении глубин. Для уменьшения этих погрешностей последовательность чисел  $a_i$  разбивают на интервалы (зоны), границы которых определяют по независимым от системы синхронизации меткам глубин через 10, 20 или 40 м перемещения кабеля в скважине. Глубины точек, к которым относятся зафиксированные числа  $a_i$ , находят по формулам

$$z_i = z_n - i'\Delta; \quad (\text{IV.73})$$

$$z_i = z_1 - (n-1)z_n - i'\Delta, \quad (\text{IV.74})$$

где  $i'$  — номер точки внутри зоны;  $n$  — номер метки;  $z_n$  — интервал глубин, соответствующий расстоянию между метками на кабеле;  $z_n$  — глубина метки.

При коррекции глубин по меткам погрешность, возникающая из-за неточности синхронизации, снижается во столько раз, во сколько полный интервал геофизических исследований скважины больше интервала  $z_n$ .

Равномерная дискретизация находит широкое применение, особенно при многоканальной информации. Это объясняется тем, что алгоритмы дискретизации и восстановления сигналов, а также соответствующая аппаратура достаточно просты. При правильном выборе шага квантования на основе теоремы Котельникова возможно точное восстановление информации. Однако вследствие использования при выборе шага квантования априорных сведений о разрезе скважины иногда возникает значительная избыточность отсчетов. Для уменьшения количества чисел  $a_i$  в массиве выбирают максимальный шаг квантования, при котором отклонение построенной по цифровым отсчетам кривой от исходных данных не превышает допустимой погрешности геофизических измерений.

При проведении электрометрии в нефтяных и газовых скважинах оптимальная величина шага квантования по глубине установлена равной 0,1—0,2 м [8, 15]. С учетом этого преобра-

зование данных геофизических исследований скважин на нефтяных и газовых месторождениях наиболее часто выполняют с  $\Delta=0,2$  м. Для детальных исследований скважин, например, при бурении на уголь и твердые полезные ископаемые, применяют меньший шаг дискретизации по глубине ( $\Delta=0,05$  м).

Неравномерная система квантования отличается тем, что цифровые данные регистрируются с неодинаковым (переменным) шагом квантования по глубине.

Иногда для решения определенных задач из всего массива цифровых данных выделяют отсчеты, приуроченные к какому-либо характерным точкам, например экстремальным значениям, в некоторых случаях приуроченным к границам пластов.

Таким образом, при неравномерной системе квантования шаг дискретизации неодинаков для различных видов геофизических исследований, поэтому в каждой точке кроме измеряемых параметров необходимо регистрировать и глубины.

Цифровая запись при неравномерной системе квантования имеет следующий вид:

$$a_1, z_1; a_2, z_2; \dots; a_i, z_i. \quad (IV.75)$$

Неравномерное квантование осуществляют по методикам программируемой или адаптивной дискретизации, т. е. в соответствии с установленной заранее программой работы или в зависимости от текущего изменения преобразуемых параметров. Неравномерная дискретизация может выполняться с интервалами, кратными некоторому фиксированному элементарному шагу, или с интервалами, длительность которых меняется непрерывно. Методы адаптивной дискретизации, а также восстановления исходного сигнала базируются на приближающих функциях, например алгебраических полиномах, значения которых в точках отсчетов совпадают с преобразуемыми данными. Наиболее часто применяются полиномы нулевой и первой степени; в этих случаях различают соответственно ступенчатую и линейную аппроксимацию.

При адаптивной дискретизации результатов промыслово-геофизических исследований скважин величины параметров преобразуют в цифровой код  $a_i$  с заданным минимальным постоянным шагом квантования по глубине (обычно  $\Delta_j=0,0625$  м) и сравнивают с ожидаемыми числами  $\bar{a}_i$ . При выполнении условия сравнения значение  $a_i$  полагают равным  $\bar{a}_i$  и регистрируют. Ожидаемые числа получают способами ступенчатой и линейной аппроксимации, т. е. в предположении постоянства измеряемой величины или линейного изменения этой величины. При ступенчатой аппроксимации значения  $a_i$  отсчитываются лишь в том случае, если они превышают зарегистрированный ранее отсчет  $a_{i-1}$  на некоторую постоянную величину  $\varepsilon$ , т. е. если удовлетворяется условие

$$|a_i - a_{i-1}| > \varepsilon. \quad (IV.76)$$

В случае линейной аппроксимации физическая величина  $a_i$  фиксируется в точке  $i$ , в которой фактическое значение  $a_i$  отличается от ожидаемого значения  $a_i$  на заданную величину  $\varepsilon$ , т. е.

$$|a_i - \bar{a}_i| = |a_i - (a_{i-1} + j\Delta a_j)| > \varepsilon, \quad (\text{IV.77})$$

где  $\Delta a_j$  — разность величин двух первых преобразований в интервале дискретизации;  $j$  — порядковый номер минимального шага квантования  $\Delta_j$ .

Число регистрируемых значений, получаемых при неравномерной системе квантования способами ступенчатой или линейной аппроксимации, в 1,2—2,5 раза меньше числа значений при равномерном расположении точек по глубине [8].

Однако следует отметить, что при использовании системы неравномерного квантования усложняется как регистрирующая, так и воспроизводящая многоканальная аппаратура, что вызывает повышение требований к ней. Это обусловлено тем обстоятельством, что каждое слово (т. е. запись показаний в одной точке разреза скважины) в этом случае несет в себе большую информацию, чем при использовании равномерной системы квантования. Такое уменьшение информации может привести в случае потери даже одного слова к искажению представлений о геологическом объекте. В связи с этим неравномерная дискретизация получила распространение только при перезаписи цифровых данных на базе для передачи их по каналам связи в вычислительный центр.

Уплотнение информации при перезаписи на геофизической базе осуществляется адаптирующимся уплотнителем цифровых данных УПДА-1, применяемым в аппаратуре АСОРК [8]. В уплотнителе УПДА-1 используется в зависимости от спектрального состава сигнала на участке преобразования переменный шаг дискретизации по глубине. Шаг дискретизации выбирают путем комбинации двух систем предсказания: ступенчатой и линейной аппроксимации. Используют промежуточную систему кодирования информации с коррекцией всех однократных ошибок в кодовой группе. Скорость перезаписи информации одного канала со сжатием данных до 10 000 м/ч.

### Способы представления цифровой промыслово-геофизической информации

Информация о параметрах исследуемых скважин в цифровом виде может поступать непосредственно на ЭВМ, входящую в комплект геофизической измерительной лаборатории. Однако в некоторых случаях организовать непрерывный во времени процесс обработки непосредственно на скважине невоз-

можно или нецелесообразно. Поэтому в наземный комплект лаборатории чаще включают устройства запоминания и регистрации, которые дают возможность накапливать информацию на промежуточном носителе в виде, удобном для дальнейшего ввода и обработки на ЭВМ.

В процессе проведения геофизических исследований необходимо обеспечить вывод информации в виде, удобном для визуального наблюдения и чтения оператором, а в некоторых случаях — для последующей обработки или представления в качестве официального документа (например, протокола испытаний). Это можно осуществить при использовании устройств индикации и печатающих устройств.

Таким образом, в комплекте геофизической измерительной лаборатории могут быть три типа устройств вывода информации из аналого-цифровых преобразователей: устройства отображения, регистрации в виде, удобном для чтения, и промежуточные накопители информации.

Наиболее удобным средством отображения информации являются устройства с использованием электроннолучевой трубки или цифровое табло, составленное из электронных знаковых элементов. В некоторых случаях, например в акустической аппаратуре АКР, ИФКД, выполняют документирование непосредственно со средств отображения информации.

Для регистрации информации в виде, удобном для чтения, применяют механические и немеханические печатающие устройства. Цифропечатающие регистраторы относятся к устройствам невысокого быстродействия. Они предназначены главным образом для документирования измерительной информации. Результаты измерений, регистрируемые ими на бумаге в виде десятичных чисел, затем при использовании считывают визуально.

В информационных измерительных системах промышленной геофизики в некоторых случаях результаты измерений печатаются на бумажной ленте с помощью цифропечатающих машин (ЦПМ), которые могут подключаться непосредственно к цифровым вольтметрам и частотомерам. Цифропечатающие машины, выпускаемые отечественной промышленностью, обеспечивают регистрацию на бумажной ленте двух 11-разрядных строк в секунду.

В качестве промежуточного носителя для накопления (регистрации) информации удобно использовать перфоносители, на которые информация наносится в виде пробивок на бумажной ленте и карте, и различные магнитные носители: магнитная лента, диск, барабан, проволока и т. д. Из перечисленных носителей информации в настоящее время наиболее широко применяют магнитные ленты, перфоленты и перфокарты.

Накопление информации на перфокарты обычно производится в стационарных условиях. Для автоматической регистра-

ции результатов измерений, как правило, применяют бумажные перфоленты. Накопление информации на перфоленте более удобно; оно дешевле и проще в обслуживании. Перфораторы относятся к регистрирующим устройствам среднего быстродействия. Из серийных устройств регистрации информации на перфоленту, применяемых в промыслово-геофизической практике, хорошо зарекомендовал себя перфоратор ПЛ-150, установленный в преобразователе-регистраторе ПЛК-6; он обеспечивает скорость перфорирования до 150 строк в секунду. Строка, перпендикулярная к оси ленты, представляет собой двоичную кодовую комбинацию; единицам соответствует наличие, а нулям — отсутствие пробивок (круглых отверстий) на соответствующих позициях строки. В зависимости от ширины используемой бумажной ленты строки могут содержать пять-восемь позиций.

Для считывания перфолент и ввода данных в ЭВМ служат устройства, в которых преобразование пробивок на ленте в электрические импульсы осуществляется линией фотодиодов и осветительной лампой с оптикой (на просвет). Скорость считывания перфолент достигает 1500 строк в секунду.

Большие объемы информации могут быть накоплены на магнитном носителе (магнитной ленте), поскольку плотность записи информации на магнитной ленте существенно превышает плотность записи на перфоленте. При периодическом освобождении магнитного носителя от накопившейся в нем информации (например, при передаче ее в ЭВМ для дальнейшей обработки, а также при перезаписи информации в другое запоминающее устройство с целью длительного хранения) можно снизить требования к емкости системы записи на магнитную ленту. Цифровая магнитная запись, кроме прочих преимуществ, обеспечивает практически неограниченное быстродействие. В цифровой магнитной записи используется намагничивание участков поверхности носителя до насыщения. Запись информации может выполняться либо последовательно (вдоль одной дорожки), либо параллельно-последовательно (в виде поперечных строк). Число позиций в строке равно числу параллельных дорожек записи.

Для последующего ввода данных в ЭВМ удобно использовать 12,7-миллиметровую магнитную ленту; при этом применяется такой способ записи и размещения информации на ленте, чтобы обеспечивалась совместимость формата записи со стандартными средствами вычислительной техники (ПМЛ по ГОСТ 14127-69). В этом случае записанные ленты могут непосредственно обрабатываться современными ЭВМ. Реализуемая при этом плотность записи достигает 32 девятиразрядных строк на миллиметр ленты, что обеспечивает накопление на одной стандартной 750-метровой катушке  $10^8$  двоичных знаков и более.

## Методы аналого-цифрового преобразования

Для цифровой регистрации геофизическую информацию прежде всего следует преобразовать в цифровой вид. Такое преобразование выполняют с помощью аналого-цифровых преобразователей, входящих в состав скважинного прибора, наземной панели или регистратора. Наибольшее распространение получил последний вариант.

Аналого-цифровые преобразователи классифицируют по способам получения цифрового эквивалента и принципам работы измерительной части. По способу получения цифрового эквивалента различают преобразователи считывания, последовательного счета и поразрядного уравнивания. В преобразователях считывания и последовательного счета могут быть применены как методы прямого преобразования, так и различные варианты метода уравнивания, например, следящего или развертывающего.

В преобразователях считывания цифровой эквивалент определяется путем преобразования аналогового сигнала в геометрическую координату кодирующей маски.

Преобразователи последовательного счета основаны на преобразовании измеряемой величины в пакет электрических импульсов, число которых подсчитывается счетчиком.

Преобразователи применяют для измерения частоты, длительности, временного интервала или фазы, а также для измерения напряжения, тока или сопротивления. Например, в полуавтоматическом преобразователе диаграмм типа Ф001 аналоговый сигнал преобразуется в фазу напряжения.

В преобразователях последовательного счета с прямым измерительным преобразованием (например, Ф001) в каждом цикле импульсы тока с генератора эталонной частоты на определенное время, пропорциональное измеряемой величине, через управляемый ключ поступают в счетчик. Количество импульсов, зафиксированное счетчиком, пропорционально кодируемой величине.

В преобразователях последовательного счета с развертывающим измерительным преобразованием в начале каждого цикла преобразования запускается генератор линейно изменяющегося компенсирующего напряжения. Одновременно через орган сравнения импульсы высокостабильного генератора начинают поступать в счетчик. В момент компенсации, когда преобразуемое напряжение  $U_x$  равно компенсирующему напряжению  $U_k$ , орган сравнения изменяет свое положение, и доступ импульсов в счетчик прекращается. С выхода счетчика снимается цифровой эквивалент, соответствующий  $U_x = U_k$ , т. е. число импульсов, поступивших в счетчик, пропорционально преобразуемому напряжению  $U_x$ .

По окончании цикла развертки компенсирующего напряжения с блока синхронизации поступают импульсы на считывание цифрового эквивалента и сброс счетчика. Далее процесс повторяется. Более точными являются аналогичные преобразователи со ступенчато-линейным компенсирующим напряжением, например, применяемые в аппаратуре ПЛК-6.

Принцип действия рассмотренных выше преобразователей основан на методе, при котором последовательно изменяется на единицу младшего разряда уровень компенсирующего напряжения и посредством сравнения каждый раз определяется, находится ли преобразуемая величина на данном уровне или нет.

Этот метод неэффективен как имеющий большое число операций сравнения (а следовательно, и низкого быстродействия), необходимых для определения цифрового эквивалента резко изменяющейся величины.

Количество операций сравнения можно сократить, применив аналого-цифровые преобразователи поразрядного уравнивания. Принцип действия аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания, применяемого в промыслово-геофизических регистраторах, показан на рис. 69. В состав аналого-цифрового преобразователя входят источник эталонных напряжений, компаратор, коммутаторы каналов и разрядов, регистр и генератор тактовых импульсов.

Компаратор 6 сравнивает величины входных сигналов  $I_1, I_2, I_3, I_4$  с эталонными сигналами  $I_0$ . Коммутатор каналов 5 вырабатывает сигналы для возбуждения магнитных модуляторов компаратора и переключения каналов записи. Регистр разрядов 18—22, состоящий из  $n$  триггеров  $T$  и линий задержки  $\Delta t$ , осуществляет набор и запоминание цифрового кода, полученного в результате преобразования. Коммутатор разрядов 16 через ключи 12—14 подключает калиброванные резисторы 9—11 к источнику эталонного сигнала 15. Дешифратор 7 предназначен для воспроизведения на аналоговом регистраторе 8 кривой по цифровым данным.

Преобразователь работает следующим образом. Измеряемые гальванометрами светолучевого осциллографа токи  $I_1—I_4$  через входные фильтры 1—4 поступают на входы магнитных модуляторов компаратора. Преобразование измеряемых сигналов в цифровой код и его запись осуществляют с помощью синхроимпульсов, вырабатываемых генератором тактовых импульсов 23. Последовательность тактовых импульсов синхронно связана с движением зондов или скважинных приборов посредством датчика глубин 24.

При поступлении от генератора первого синхроимпульса коммутатор разрядов 16 управляет ключом 12 первого разряда таким образом, что приводит его в состояние «включено». При этом на эталонную обмотку магнитного модулятора поступает

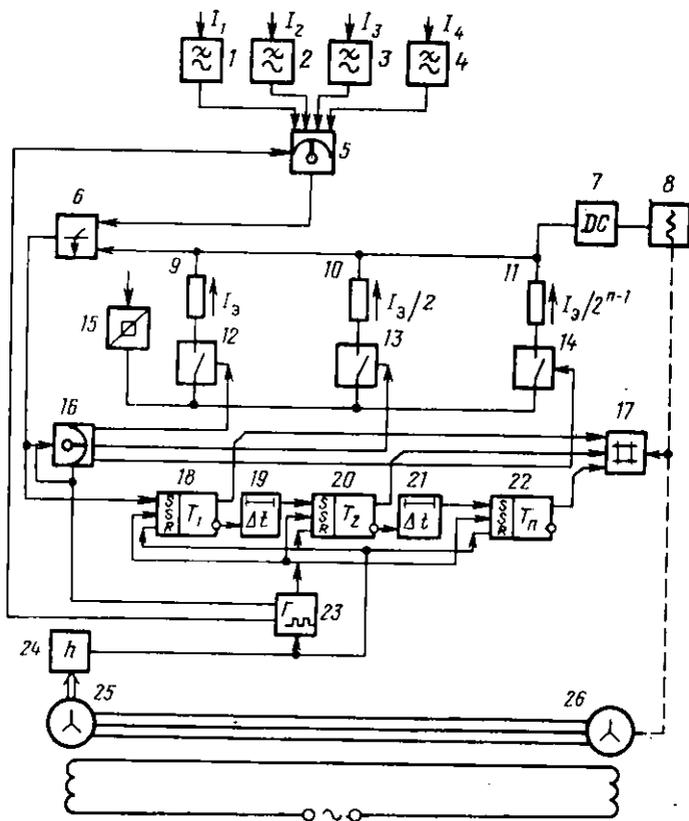


Рис. 69. Структурная схема аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания

ток  $I_0$ , пропорциональный весу старшего разряда. Происходит сравнение измеряемого тока  $I$  с эталонным током  $I_0$ ; если  $I > I_0$ , то ключ первого разряда остается в первоначальном положении «Включено» и в старшем разряде кода числа формируется единица; если ситуация противоположна, то ключ устанавливается в положение «Выключено» и в соответствующем разряде кода формируется нуль. При подаче следующего синхроимпульса коммутатор разрядов устанавливает второй ключ  $13$  в положение «Включено», что приводит к увеличению тока через эталонную обмотку на величину  $I_0/2$ . Если измеряемый ток больше тока в эталонной обмотке модулятора ( $I > I_0 + I_0/2$ ) или  $I > 0 + I_0/2$ , то разряд не изменяет своего состояния «единицы». Подобно описанному определяется состояние всех разрядов регистра. В результате операции сравнения в регистре  $18-22$  образуется число, пропорциональное величине измеряемого тока.

После окончания преобразования в одном канале компаратор с помощью коммутатора 5 переключается на другой канал, в котором происходит аналогичный цикл преобразования. Таким образом, преобразование аналог — код происходит последовательно во всех каналах. Магнитная лента регистратора непрерывно протягивается лентопротяжным механизмом, связанным с сельсином-датчиком 25, установленным на блок-балансе.

#### **§ 10. ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ-РЕГИСТРАТОРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Цифровую регистрацию промыслово-геофизических данных применяют с целью интерпретации на ЭВМ и выполняют либо в процессе подготовки диаграмм для ввода их в ЭВМ, либо в процессе геофизических исследований скважин. Несмотря на несомненные преимущества второго способа, заключающиеся в его оперативности, большей точности, во многих случаях необходимо выполнять обработку диаграмм старого фонда для их ввода в ЭВМ. Кроме того, необходимо преобразовывать в цифровую форму ряд вспомогательных материалов: карты, графики, номограммы, по которым ведется интерпретация промыслово-геофизических данных, а также диаграммы в тех случаях, когда цифровая запись на скважине нецелесообразна или не может быть выполнена.

Поскольку основным и наиболее сложным объектом преобразования является геофизическая диаграмма, то содержащаяся в ней информация в процессе преобразования не должна существенно искажаться, а цифровые преобразователи-регистраторы должны быть многоканальными с большим динамическим диапазоном.

Должны соблюдаться [8]: а) автоматическая регистрация масштаба записи; б) ввод цифровых данных в ЭВМ стандартными устройствами; в) возможность изменения скорости протяжки диаграмм в зависимости от спектрального состава преобразуемой кривой; г) надежный и оперативный контроль результатов преобразования; д) автоматическая регистрация служебной информации: характерных точек, интервалов обработки и др. При этом приведенная погрешность преобразования ординат должна составлять не более 2 %, шага квантования по глубинам — 0,5 % при обязательной регистрации меток глубин.

В настоящее время разработаны и серийно выпускаются промышленностью как специализированные, так и общетехнические полуавтоматические и автоматические устройства кодирования графической информации.

В промыслово-геофизической практике в основном получили распространение полуавтоматические преобразователи

как наиболее простые в обслуживании и надежные в работе. Эти преобразователи не требуют для обработки специально подготовленных кривых (вычерченных без разрывов с равной толщиной линий и разным цветом в случае пересекающихся графиков).

### **Полуавтоматические преобразователи геофизической информации**

В полуавтоматических преобразователях считывание ординат кривых производится с участием оператора, который обводит указателем следящего устройства исходный график. Обычно используют два способа слежения за преобразуемой кривой. В первом из них диаграмму неподвижно закрепляют на планшете с двухкоординатным позиционным устройством, указатель которого перемещает оператор вдоль кривой. Перемещения указателя по координатным осям  $x$  и  $y$  преобразуются соответствующими датчиками в электрические сигналы, которые затем кодируются по командам оператора.

Основное преимущество двухкоординатной следящей системы — универсальность ее использования: она пригодна для оцифровки диаграмм, многомерных графиков, карт.

Во втором способе диаграмма автоматически перемещается лентопротяжным механизмом, а оператор прослеживает кривую с помощью позиционного указателя, перемещаемого в направлении, перпендикулярном к движению ленты.

Работа оператора по прослеживанию кривой в направлении одной ординаты менее напряженна, более производительна, что при относительной простоте (простота временного согласования работы оператора и перфорирующих устройств) и небольших размерах преобразователя позволяет более оперативно обрабатывать достаточно длинные промыслово-геофизические диаграммы.

В настоящее время в Советском Союзе для преобразования геофизических диаграмм в цифровую форму широко применяется полуавтоматический преобразователь Ф001. С помощью этого преобразователя обрабатывают кривые, записанные осциллографическим или другим способом на бумаге шириной до 200 мм.

Скорость движения диаграммы 1; 2; 4 и 8 м/ч. Преобразование кривой происходит через одинаковый интервал, равный 0,5; 1,0 и 2,0 мм. Шаг дискретизации и скорость движения диаграммы в зависимости от сложности кривой устанавливает оператор. Погрешность преобразования ординат кривой не превышает 2 %, шаг дискретизации выдерживается с погрешностью не более 0,5 %.

Принцип действия преобразователя показан на рис. 70. Цифровое преобразование осуществляется по схеме диа-



он закрывает ключ 11 и исключает возможность прохождения следующих старт-импульсов. Триггер 12 открывает ключ 13, при этом импульсы генератора эталонной частоты 14 начинают поступать на динамический вход двоичного счетчика 9. Счетчик заполняется до поступления стоп-импульса, который с помощью триггера 12 закрывает ключ 13.

Показания электронного счетчика поступают в программное устройство 15, где дополняются кодами меток и характерных точек; эти коды вырабатываются устройствами считывания характерных точек 19 и меток глубины 20, состоящими из осветителей и фотодиодов. Устройства вырабатывают импульсы при прохождении соответствующих отверстий на диаграмме против отметок, сделанных интерпретатором при подготовке диаграмм к оцифровке.

Контроль за преобразованием выполняют по индикаторным лампам электронного счетчика. Регистрация осуществляется с помощью перфораторов 16 и 17 на перфоленду или перфокарты.

Совокупность цифровых данных в одной точке составляет слово, которое состоит из пяти строк перфоленды. Три строки составляют восьмиразрядный двоичный код ординаты кривой, одна строка — код масштаба (два разряда) и код признака характерной точки (один разряд), и еще одна строка — код признака конца слова. Цифровые данные на перфоленде могут быть разделены на зоны с помощью отметок начала и конца ее. Образец записи информации на перфоленде приведен на рис. 71.

При необходимости регистрации на перфокарты перфоратор 17 (см. рис. 70) подключают к программному устройству через согласующую приставку 18. На перфокарте слово состоит из одной строки. Номера слов соответствуют номерам точек преобразуемой кривой.

Преобразователь Ф001 позволяет кодировать данные для ввода в ЭВМ «Минск-22», «Минск-32», БЭСМ-4 и М-222.

### Автоматические преобразователи

Несмотря на отмеченные выше преимущества, полуавтоматические преобразователи не позволяют оперативно обрабатывать геофизические диаграммы. Постоянный рост потока информации (связанный с увеличением числа исследуемых сква-

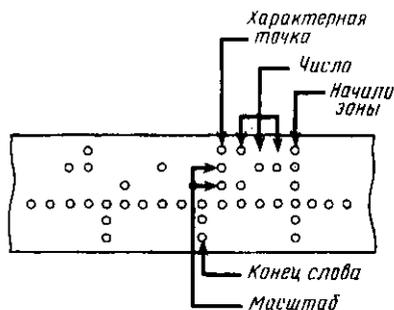


Рис. 71. Образец записи на перфоленду преобразователем Ф001

жин, их глубиной, а также с решением более сложных задач с полным комплексом геофизических исследований скважин) требует массовой подготовки получаемых материалов для ввода в ЭВМ, что возможно только с применением автоматических преобразователей.

Степень автоматизации тех или иных технических устройств зависит от специфики условий их применения, соотношения сложности технического решения и ожидаемых результатов эксплуатации, экономического эффекта от внедрения. Автоматизация заключается в передаче устройству ряда функций, выполняемых оператором. В данном случае прежде всего передаются либо преобразователю, либо ЭВМ функции опознавания кривой, т. е. выделения на диаграмме полезной информации. Использование логических возможностей ЭВМ для этой цели при интерпретации осуществлялось, например, в вычислительном центре «Атлантик рифайнинг» [8]. В преобразователе помимо пересекающихся геофизических кривых считывались линии сетки и имеющиеся на диаграмме темные пятна. Специальная программа обработки позволила выделить полезную информацию, которая в данном случае составляла лишь 10 %. Недостаток данного метода заключается также в малой универсальности программ, во многом зависящих от свойств преобразуемых кривых геофизических параметров.

Специфика информации, получаемой в результате исследования скважин, требует оценки качества преобразования, обработки надписей, служебных меток, записей нескольких измеряемых величин на одной диаграммной ленте, которые могут пересекаться и не пересекаться. Увеличение логических возможностей самого преобразователя для выполнения указанного комплекса операций приводит к усложнению его конструкции, а следовательно, к уменьшению надежности.

При современном состоянии техники целесообразно оптимальное сочетание различных способов повышения степени автоматизации, а также представление исходного графического материала в виде, содержащем в себе простые информативные признаки, по которым с помощью воспринимающего элемента положение кривой различалось бы на уровне шумов, образованных окружающим запись фоном. Таким признаком в общетехнических устройствах обычно является цвет. Используя спектральные характеристики воспринимающего элемента, наиболее просто удается решить задачу автоматического опознавания пересекающихся разноцветных кривых.

В автоматических преобразователях отбор данных, относящихся к преобразуемой кривой, осуществляется в процессе просмотра диаграммы перемещающимся определенным образом световым или электронным лучом. Изменение коэффициента отражения светового потока при переходе луча от фонового поля носителя к элементам описываемой диаграммы



ханизмом 1, который обеспечивает пошаговое перемещение ленты. Равномерный шаг квантования выбирают по глубине исходя из требований восстановления непрерывной кривой. Скорость движения ленты определяется требованием неизменности ординаты кривой в течение времени, необходимого для ее кодирования.

Сканирование луча задается генератором 3, обеспечивающим шаговое перемещение сканирующего механизма 2 и управляемым от общего с измерительным устройством генератора тактовых импульсов 8; в этом случае нестабильность тактовых импульсов не влияет на погрешность измерения.

Разновидностью этого способа является использование генератора тактовых импульсов, выполненного в виде фотоэлектронного блока, фиксирующего прохождение перед ним шкалы с нанесенными на ней рисками.

Измерительное устройство содержит фотоприемники 4—6, выдающие импульсы: при пересечении линии начала измерений ( $H$ ), при пересечении анализируемой кривой (импульс отсчета  $O$ ) и при пересечении линии конца цикла измерений (импульс  $K$ ). Линии начала и конца измерения могут наноситься на графике или (наиболее часто) воспроизводиться в сканирующем устройстве. В счетчике 11 накапливается количество импульсов, пропорциональное значению измеряемой ординаты. Система заполнения счетчика 11 во многом аналогична применяемой в аппаратуре Ф001, рассмотренной ранее, и содержит высокостабильный генератор импульсов 9 и управляемые триггером 7 электронные ключи 10, 13. Результат выдается после пересечения сканирующим лучом кривой и регистрируется перфоратором 12. Импульс конца цикла измерений подготавливает все узлы системы к измерению последующей ординаты.

Измерительные системы, предназначенные для последовательного измерения нескольких пересекающихся кривых, работают аналогичным образом. Схема усложняется, если необходимо получить несколько результатов измерения. Значения ординат могут отсчитываться от общей базовой (начальной) линии либо для каждой кривой от своей базовой линии. В таких системах часто предусматриваются выборочное преобразование любой кривой, изменение масштаба измерения, установка цветочных фильтров на фотоприемники для выделения кривых соответствующих цветов, проверка правильности работы.

В табл. 5 приведены характеристики некоторых типов автоматических преобразователей общетехнического назначения. Однако не все они могут быть успешно использованы для обработки геофизических диаграмм. Например, применяющийся в промыслово-геофизической практике преобразователь «Силуэт» наряду с преимуществами имеет недостатки, заключающиеся: 1) в необходимости вычерчивания кривых с соблюдением жестких требований к толщине и равномерности линий;

Т а б л и ц а 5

Основные характеристики автоматических преобразователей диаграмм [23]

Технические характеристики	«Силуэт»	ПГ-1	МАСК	АСМО	АСРК
Число кривых	2	10	6	15	30
Расшифровка пересекающихся кривых	Нет	Нет	Алгоритмическая	Алгоритмическая	Аппаратурная
Скорость измерений ординат в секунду	12	2	300	1500	2400
Погрешность измерения ординат	2 %	1,5 %	0,5 мм	0,1 мм	0,1 мм
Ширина носителя, мм	35—305	35	100; 120; 200	120; 200; 240; 305	До 305
Толщина линий графика, мм	0,2; 0,5	0,12	0,2	0,2	0,2
Шаг квантования вдоль ленты, мм	0,5; 1,0; 2,5; 5,0	0,5; 1,0; 2,0	0,4; 0,8; 1,6	0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0	0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0

Примечания: 1. Разрешающая способность автоматических преобразователей изменяется от 0,4 до 0,8 мм. 2. Все автоматические преобразователи имеют шаговое движение ленты (за исключением «Силуэта») и оптико-механическое сканирование (у «Силуэта» используется видикон).

2) в невозможности считывания кривых непосредственно с осциллограмм, полученных светолучевым осциллографом; 3) в громоздкости преобразователя и сложности его обслуживания.

Для увеличения его функциональных возможностей в тресте Татнефтегеофизика разработана приставка «Масштаб-4», дополняющая схему основного устройства. Эта приставка предназначена для преобразований кривых в четырех масштабах записи при оцифровке промыслово-геофизических диаграмм и контроля качества автоматического преобразования. В устройстве предусмотрено возможность регистрации меток глубины для точной привязки к глубине оцифрованного промыслово-геофизического материала.

## § 11. ЦИФРОВЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Преобразование геофизической измерительной информации в цифровой код может быть осуществлено как в скважинном приборе, так и на поверхности. Создание скважинных аналого-цифровых преобразователей представляет собой весьма сложную, но технически разрешимую задачу. Например, проектируемые в настоящее время системы передач геофизической информации с кодо-импульсной модуляцией предполагают расположение аналого-цифрового преобразователя в скважинном приборе.

Широкое развитие в настоящее время получили цифровые преобразователи, предназначенные для работы в наземной аппаратуре геофизических лабораторий. В отличие от скважинных преобразователей такие устройства могут быть построены практически без ограничений по функциональным возможностям при сохранении высокой надежности.

В цифровых регистраторах геофизических лабораторий (дополнительно к требованиям, сформулированным в § 9) должны осуществляться контроль качества преобразования и регистрации, дублирование цифровой регистрации аналоговой, достаточно высокое быстродействие, синхронизация аналого-цифрового преобразователя и регистратора с движением прибора в скважине, согласование данных разных каналов по глубине и высокая надежность работы в полевых условиях.

В соответствии с требованиями проведения комплексных измерений регистратор должен быть многоканальным (иметь не менее десяти каналов). Желательно предусмотреть возможность использования непрерывной регистрации стандарт- и нуль-сигналов, характеризующих режим работы скважинной аппаратуры. Качество цифровой регистрации можно оценивать путем сопоставления воспроизведенных данных с первичными диаграммами, записанными аналоговым регистратором.

Цифровые регистраторы могут подключаться параллельно или последовательно гальванометрам светолучевого осциллографа. Для того чтобы чувствительность последнего значительно не снижалась (особенно на первом пределе измерения), входное сопротивление цифрового преобразователя в случае их параллельного включения должно быть не менее 6 кОм, а при последовательном включении — не более 60 Ом.

Скорость преобразования и регистрации цифровых данных должна соответствовать скорости геофизических измерений (ни в коем случае не снижать последнюю). При скорости 3600—4000 м/ч и шаге квантования 0,1—0,2 м быстродействие многоканального цифрового регистратора должно достигать 160—200 преобразований в секунду (на каждый канал 10—20 преобразований в секунду). Кроме того, статические и динамические характеристики цифрового регистратора должны быть не хуже таковых аналогового регистратора.

Цифровой регистратор обычно состоит из входного блока, преобразователя аналог—код, собственно регистрирующего устройства и в некоторых случаях блока уплотнения информации.

Преобразование промыслово-геофизических сигналов, имеющих большой диапазон изменения, можно выполнять с помощью схем: без переключения коэффициента усиления (масштаба); с автоматическим переключением масштаба и с использованием функциональной шкалы преобразования. При использовании последней схемы относительная погрешность

преобразования распределяется равномерно по всему диапазону, а плотность записи информации максимальна. Наиболее просто такая схема реализуется с помощью логарифмического усилителя, устанавливаемого во входном блоке. Чувствительность, входное сопротивление, степень подавления помех цифрового регистратора в значительной степени также зависят от входного блока.

Высокую чувствительность преобразователя можно получить как непосредственным преобразованием измеряемого сигнала, так с помощью предварительной амплитудной модуляции его с последующим усилением и демодуляцией.

В схемах преобразования аналог—код используются как метод поразрядного уравнивания (преобразователь ПМЗ-3, П-055), так и метод последовательного счета (ПЛК-4, ПЛК-6).

Преобразователь аналог—код типа ПЛК-6 предназначен для преобразования в цифровой код аналоговых сигналов, получаемых с измерительных панелей геофизических лабораторий, для цифровой регистрации их на перфоленту.

Преобразователь позволяет одновременно регистрировать шесть параметров с динамическим диапазоном 66 дБ и порогом чувствительности 35 мкВ. Погрешность преобразования не превышает 1 %. Преобразование и регистрация данных производятся с постоянным шагом квантования по глубине 0,05; 0,1; 0,2 и 0,4 м.

В геофизической лаборатории ПЛК-6 включается параллельно гальванометрам светолучевого осциллографа и может функционировать совместно с ним или раздельно.

Структурная схема преобразователя изображена на рис. 73. В преобразователе применено временное разделение каналов. Входные медленно меняющиеся (0—1,5 Гц) сигналы  $U_1—U_6$  поступают на амплитудные модуляторы 1—6, на вторые входы которых с генератора 7 поступает напряжение несущей частоты 150 Гц. Промодулированные сигналы после усиления усилителями переменного тока 8—13 выпрямляются фазочувствительными демодуляторами 14—20 и сглаживаются фильтрами 21—26. Использование фазочувствительного выпрямления позволяет значительно повысить чувствительность и помехоустойчивость преобразователя. После фильтров сигналы поступают через переключатель каналов 27 поочередно на масштабирующее устройство аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В состав масштабирующего устройства входят масштабный усилитель 31 и переключатель масштабов 28.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой код осуществляется циклическим восьмизрядным аналого-цифровым преобразователем с обратной связью по методу последовательного счета. Двоичный счетчик 37 заполняется импульсами частотой 250 кГц, поступающими через управляемый триггером 34 электронный ключ 35 от генератора счетных импульсов 36.

Состояние триггера 34 определяется нуль-органом 29, в котором сравниваются измеренный сигнал и ступенчато меняющееся напряжение, вырабатываемое генератором 30.

Масштабирующее устройство работает следующим образом. Если значение преобразуемого сигнала превосходит допустимую величину для первого поддиапазона, то счетчик 37 переполняется и триггер 40 опрокидывается, вызывая переключение масштаба, вследствие чего входной сигнал будет поступать на нуль-орган 29 аналого-цифрового преобразователя не через усилитель 31, а минуя его, и цифровой код, соответствующий ему,

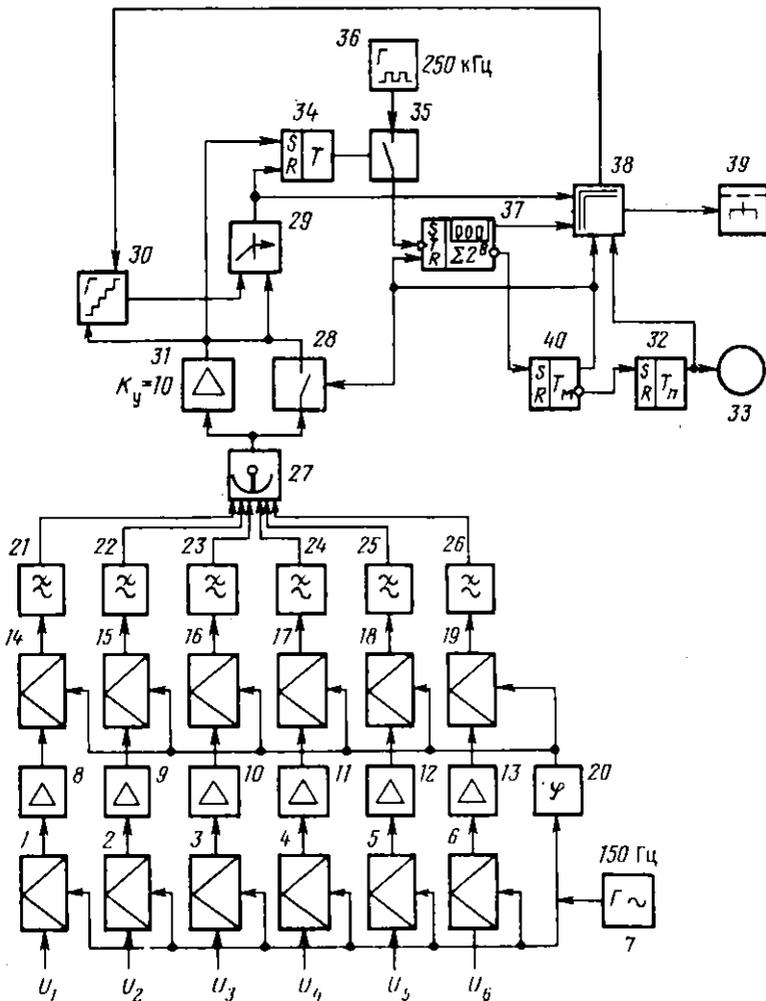


Рис. 73. Структурная схема преобразователя ЦЛК-6

будет представлен кодом масштаба 10:1. В том случае, если величина преобразуемого сигнала превысит допустимое значение и для второго поддиапазона, то опрокинется триггер перегрузки 32; на перфоленте будут зарегистрированы нулевой код и код масштаба. В блоке контроля перегрузки в этом случае формируется соответствующий сигнал перегрузки, поступающий на световой индикатор 33.

После аналого-цифрового преобразователя код сигнала вместе с кодом масштаба и кодом метки глубины через программное устройство 38 поступает на перфоратор 39 типа ПЛ-150.

Формат записи информации применительно к ЭВМ «Минск» устанавливается в зависимости от режима работы преобразователя (одно-, двух-, четырех- или шестиканального). Вследствие ограниченной длины машинного слова формат записи на перфоленте при одновременной регистрации по шести каналам представляется комбинацией форматов записи при двух- и четырехканальных режимах работы.

После регистрации информации в одном измерительном канале переключатель 27 подключает аналого-цифровой преобразователь к следующему каналу.

В состав преобразователя входят также блоки контроля преобразования и скорости, которые контролируют правильность работы любого канала по аналоговому или цифровому эквивалентам преобразуемой информации и соответствие быстродействия перфоратора скорости измерений (частоте запуска преобразователя). В случае появления несоответствия между этими скоростями необходимо изменить шаг квантования промыслово-геофизической информации по глубине. Преобразователь ПЛК-6 имеет блок выделения экстремальных значений с аналоговым и цифровым выходом. Конструктивно преобразователь выполнен на сменной панели и может быть вставлен в стенд измерительной лаборатории.

Более совершенные преобразователи промыслово-геофизических данных используют в цифровом регистраторе типа «Триас» и аппаратуре цифровой регистрации АЦРК-2 «Тюмень».

Аппаратура АЦРК-2 «Тюмень» предназначена для работы в комплекте со станцией АКС/Л-7, преобразования аналоговых сигналов в процессе геофизических исследований скважин в цифровой код и регистрации его на магнитную ленту.

Аппаратура состоит (рис. 74) из входного согласующего блока 1 с коммутатором каналов, аналого-цифрового 2 и цифро-аналогового 3 преобразователей, формирователя-преобразователя кода 4, накопителя на магнитной ленте 5, панели управления 6 и устройства набора и ввода постоянных параметров 7. Запись осуществляется в функции глубины скважины по командам датчика глубин 8.

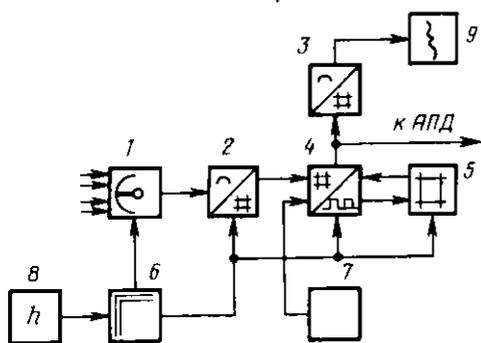


Рис. 74. Структурная схема аппаратуры АЦРК-2 «Тюмень»

В режиме записи сигналы с выходов измерительной панели геофизической лаборатории поступают на входы согласующего блока 1, где усиливаются и в соответствии с командами панели управления 6 поочередно подаются на преобразователь напряжение—код 2. Полученные цифровые сигналы поступают на буферное запоминающее устройство (формирователь-преобразователь кода) 4, где преобразуются в восьмизрядные комбинации — байты. После окончания цикла преобразования сигналов в одной точке скважины накопленная информация (блок записи) регистрируется в накопителе на магнитной ленте 5. Размер блока записи, который формируется в преобразователе кода 4, составляет 16 байтов.

В процессе записи с помощью цифро-аналогового преобразователя 3 закодированная информация может быть восстановлена в аналоговом виде и просмотрена на осциллографе 9. Для регистрации на магнитной ленте служебной информации в аппаратуре предусмотрена возможность ввода в буферное устройство соответствующих кодов с помощью блока набора и ввода постоянных параметров 7.

В режиме воспроизведения информация поступает из накопителя на магнитной ленте 5 в блок формирования и преобразования кода 4, а затем подается на внешние цифровые устройства: цифро-аналоговый преобразователь 3, ЭВМ или аппаратуру передачи цифровых данных по каналам связи (АПД) типа «Волна» или «Акорд-1200».

Цифровой регистратор «Триас» предназначен для записи на магнитную ленту геофизических данных в цифровом коде и может быть использован с измерительными лабораториями, а также в системах обработки геофизической информации на основе ЭВМ ЕС. Регистратор представляет собой специализированную систему сбора данных, построенную на основе интерфейса.

Стандартным интерфейсом информационно-измерительных, управляющих и вычислительных систем называют совокупность логических, программных, электрических, конструктивных усло-

вий и технических средств, обеспечивающих сопряжение и взаимодействие функциональных единиц (элементов, блоков, приборов).

Логические условия определяют последовательность прохождения сигналов, необходимую для обеспечения заданного алгоритма функционирования системы; электрические условия — сопряжение схемных элементов (выходное и входное сопротивление, коэффициенты нагрузки).

Конструктивные условия определяют способы взаимного вещественного сопряжения функциональных единиц: типы разъемных соединений, виды и способы прокладки кабельных или проводных связей и шин и их максимально допустимую длину.

Под техническими средствами стандартного интерфейса понимают интерфейсные карты или платы, содержащие согласующие устройства.

В регистратор (рис. 75) входят: пятнадцатиканальный аналого-цифровой преобразователь 4, корректируемый счетчик глубины 3, контролер 1, пятнадцатиканальный цифро-аналоговый преобразователь 6, блок индикации 5, накопитель на магнитной ленте 2, блок связи с аппаратурой передачи данных 7.

Связь регистратора с измерительной лабораторией осуществляется как по аналоговым входам аналого-цифрового преобразователя, входу счетчика глубин, так и по выходам цифро-аналогового преобразователя. В регистраторе можно осуществлять следующие режимы работы, контроль, контроль с записью на магнитную ленту, запись заголовка в начале массива данных, запись проверки нулей, запись проверки калибровки, запись данных, запись заголовка в конце массива данных, поиск записи и воспроизведение. При всех операциях возможен контроль путем воспроизведения аналоговой кривой во время записи. Цифровая индикация и преобразование информации в аналоговую форму могут осуществляться как до записи на магнитную ленту, так и после воспроизведения.

Регистратор обеспечивает при шаге квантования по глубине 0,1 или 0,01 м запись на одной кассете до 2000 м разреза скважины. Максимальная скорость регистрации достигает 2700 м/ч.

В табл. 6 приведена сравнительная характеристика цифровых регистраторов.

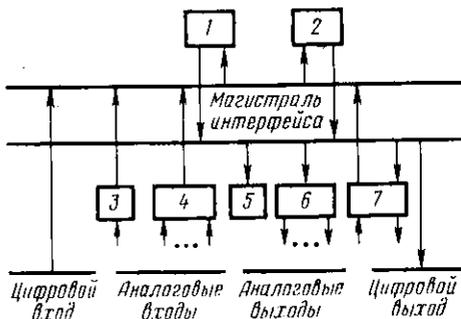


Рис. 75. Блок-схема цифрового регистратора «Триас»

## Основные характеристики цифровых регистраторов геофизических лабораторий

Технические характеристики	ПЛК-6	ПМЗ-3	АЦРК-2 «Тюмень»	«Триас»	АЦРК НО55
Носитель информации	Перфолента	Магнитная лента	Магнитная лента	Магнитная лента	Магнитная лента
Число каналов преобразования	6	4	8	16	8
Порог чувствительности	35 мкВ	0,1 мкА	25 мкВ	100 мкВ	30 мкВ
Динамический диапазон, дБ	66	66	80	78	78
Погрешность преобразования, %	1	3	1	$\pm [0,2 \pm 0,01 \times \times \left( \frac{U_n}{U_x} - 1 \right)]$	$\pm [0,03 \pm 0,02 \times \times \left( \frac{U_n}{U_x} - 1 \right)]$
Возможности передачи информации по каналам связи	По проводным каналам	Возможность передачи не предусмотрена	Предусмотрена передача с помощью аппаратуры «Волна-2», «Аккорд-1200»	В состав устройства включен блок связи с аппаратурой передачи данных «Аккорд»	Предусмотрен ввод цифровой информации в устройство по каналу связи
Дополнительная функция	Выделение экстремумов параметров	—	—	Регистрация волновых картин акустического и спектров радиоактивных методов исследования скважин	Возможна запись информации, получаемой не одновременно, а в разные циклы исследования скважины

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

---

### § 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И УСТРОЙСТВО ГЕОФИЗИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Геофизический кабель объединяет в себе механическую и электрическую линии связи между скважинным прибором или зондом и наземными блоками геофизической аппаратуры. С помощью кабеля осуществляются спуско-подъемные операции со скважинными приборами, питание их электрическим током, передача измерительной информации в наземные блоки, а также определение глубин при геофизических исследованиях скважин.

В соответствии с этими функциями геофизический кабель должен удовлетворять следующим требованиям: 1) иметь высокую механическую прочность, позволяющую выдерживать собственную массу, массу скважинных приборов и грузов, а также перегрузки, возникающие при возможных прихватах скважинных приборов или при изменении скорости их перемещения в скважине; характеризоваться высокой абразивной износостойчивостью; 2) обладать хорошими электрическими характеристиками, позволяющими обеспечивать высокую точность результатов измерения физических величин в скважинах; 3) не иметь остаточных удлинений и не раскручиваться при натяжении в скважине.

Многожильные геофизические кабели, кроме того, должны быть геометрически симметричны во избежание возникновения индуктивных помех.

В процессе эксплуатации на кабель действуют повышенная температура, давление, он испытывает также воздействие нефти, газа и агрессивных компонентов, содержащихся в промысловой жидкости. Качественное выполнение геофизических исследований возможно лишь в тех случаях, когда внешние условия не приводят к существенным изменениям механических и электрических характеристик кабеля.

Геофизические кабели включают следующие элементы: а) одну или несколько токопроводящих жил; б) изоляционное покрытие; в) защитную оболочку.

Геофизические кабели, выпускаемые отечественной промышленностью, классифицируются по характеру защитной оболочки (кабели в оплетке из волокнистого материала, в шланговой оболочке, в проволочной броне), числу токопроводящих жил (од-

ножилые, трехжилые, семижилые, радиочастотные), типу изоляционного покрытия и нагревостойкости (до 90, 180 и 250 °С). Шланговые и оплетенные кабели в настоящее время применяются только для исследования неглубоких скважин различного назначения. При исследовании глубоких нефтяных и газовых скважин в основном используют бронированные кабели, обладающие по сравнению с кабелями в шланге и оплетке более высокой механической прочностью, большим удельным весом, способствующим хорошей проходимости их в скважинах, заполненных тяжелой и вязкой промысловой жидкостью; меньшим диаметром, позволяющим размещать на лебедке самоходного подъемника большее количество кабеля и тем самым исследовать скважины значительной глубины.

Конструкция бронированных кабелей показана на рис. 76. В зависимости от типа кабеля токопроводящие жилы скручены из медных проволок или выполнены биметаллическими (скрученными между собой стальными и медными проволоками). Каждая жила изолирована несколькими слоями специальной резины или пластмассы (фторопласт, полиэтилен). Жилы многожильных кабелей скручены между собой, а пространство между ними заполнено хлопчатобумажной пряжей для придания скрутке цилиндрической формы. Поверх скрученных жил или слоя изоляции (для одножильных кабелей) уложена оплетка из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом.

Наружная оболочка кабеля (броня) выполняет несколько функций: защищает жилы кабеля от механических повреждений, служит основным грузонесущим элементом, определяющим разрывную прочность кабеля, и дополнительной токопроводящей линией. Обычно ее изготавливают из двух повивов (слоев) стальной оцинкованной проволоки, уложенных во избежание раскручивания в противоположных направлениях.

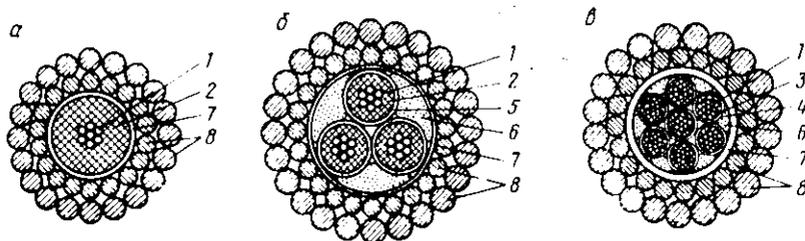


Рис. 76. Устройство бронированных геофизических кабелей

Кабель: а — одножильный; б — трехжильный; в — семижильный; 1 — жила; 2—5 — изоляция жилы; 6 — заполнение из волокна; 7 — оплетка (подушка под броню); 8 — проволоки брони

Таблица 7

Общие характеристики бронированных геофизических кабелей

Марка кабеля	Номинальный наружный диаметр, мм	Номинальная расчетная масса 1 км, кг	Строительная длина, тыс. м	Тип изоляции
КГ1-24-180	6,3	195	3,5—5,0	Фторопласт 40Ш
КГ1-53-180	9,2	345	5,0—6,0	То же
КГ3-67-180	12,1	499	5,0—6,0	»
КГ7-68-180	12,5	602	5,0—6,0	»
КГ1-66-250	10,0	677	7,5	Фторопласт 4 МБ
КГ1-59-220	9,9	407	6,0—7,0	То же
КГ1-59-250	9,9	395	7,0	Фторопласт 4 и 4Д
КГ3-78-250	14,1	671	7,0	То же
КГ1-24-90	6,3	178	3,2—5,0	Полиэтилен
КГ1-53-90	9,4	361	3,5—5,5	»
КГ7-68-90	19,5	517	3,5—5,5	»
КГ3-59-90	10,6	422	3,5—5,5	»

Основные характеристики наиболее распространенных типов геофизических бронированных кабелей приведены в табл. 7.

## § 2. ПЕРВИЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Особенности электрического питания скважинных приборов или зондов и качество передачи измерительной информации определяются электрическими параметрами геофизического кабеля, которые оказывают существенное влияние на выбор измерительной схемы, способ питания скважинной части телензиметрической системы, вид передачи электрических сигналов в наземные блоки аппаратуры и др.

Электрические параметры характеризуют свойства единицы длины (1 км) кабеля как электрической линии связи. К первичным параметрам относятся: а) активное сопротивление токопроводящих жил  $R$ , Ом/км; б) индуктивность  $L$ , Г/км; в) емкость  $C$ , Ф/км; г) электропроводность изоляции  $G$ , См/км.

### Активное сопротивление токопроводящих жил

Активное сопротивление жилы как проводника электрического тока определяется материалом, из которого она выполнена, геометрическими (длинной, сечением) и конструктивными (характером скрутки проволок) особенностями.

Сопротивление километрового отрезка жилы кабеля, изготовленной из медных проволок, может быть рассчитано по формуле

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (\text{V.1})$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление меди;  $S$  — сече-

ние жилы (суммарное сечение всех проволок, скрученных в жилу);  $m$  — коэффициент, характеризующий увеличение длины проволок за счет их скрутки.

Сопротивление биметаллической жилы рассчитывается как общее сопротивление параллельно включенных медных  $R_M$  и стальных  $R_{ст}$  проволок, из которых она скручена:

$$R = \frac{R_M R_{ст}}{R_M + R_{ст}} \quad (V.2)$$

Окружающая температура способствует увеличению сопротивления токопроводящих жил. Расчеты показывают [1], что при температуре порядка 150—200 °С активное сопротивление жил кабеля возрастает на 40—60 % по сравнению с их значениями, измеренными на поверхности. Обычно сопротивление жил  $R_T$ , измеренное при любой температуре  $T$ , приводят к температуре 20 °С в соответствии с формулой

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - 20)], \quad (V.3)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления материала проволок.

Увеличение частоты тока, проходящего по кабелю, приводит к возрастанию активного сопротивления токопроводящих жил (рис. 77), что можно объяснить следующими причинами. При прохождении переменного тока как вне жилы, так и внутри ее, возникает переменное магнитное поле, по отношению к которому не все части жилы находятся в одинаковых условиях. Центральная часть жилы охвачена всеми линиями магнитной индукции, а периферийная часть — только линиями, проходящими вне жилы. Поскольку при изменении тока в проводнике изменяется и магнитный поток, то в проволоках, составляющих жилу, возникают индуцированные э. д. с., величина которых тем больше, чем больше магнитный поток, сцепленный с жилой, т. е. чем

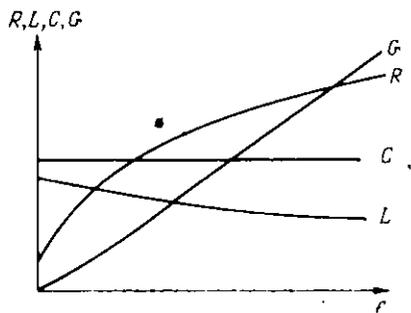


Рис. 77. Зависимость первичных электрических параметров ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$ ) геофизических кабелей от частоты тока  $f$

ближе к центру жилы расположена проволока. Поэтому плотность тока в центральных проволоках меньше, чем у поверхности жилы. На высоких частотах эта разница достигает столь больших значений, что плотность тока во всех частях жилы, за исключением небольшого поверхностного слоя, можно считать практически равной нулю. Неравномерное распределение плотности тока по сечению жилы носит название поверхностного эффекта. Интенсивность его

проявления возрастает также при увеличении радиуса жилы, магнитной проницаемости и удельной электропроводности материала проволок.

Величина  $R$  определяет тепловые потери в кабеле при прохождении электрического тока, поэтому необходимо, чтобы она была как можно меньше.

### Индуктивность

Под индуктивностью геофизического кабеля понимается отношение потокосцепления  $\Phi$ , связанного с кабелем, к величине тока  $I$ , протекающего по нему:

$$L = \Phi / I, \quad (V.4)$$

Индуктивность зависит от материала жил, брони кабеля и конструкции кабеля. Если жила и броня изготовлены из одного и того же металла, имеющего удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и магнитную проницаемость  $\mu$ , то для одножильного кабеля индуктивность может быть рассчитана по формуле

$$L = \left[ \frac{100}{\pi} \sqrt{\frac{\mu \rho}{f}} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \frac{D}{d} \right] 10^{-4}, \quad (V.5)$$

где  $f$  — частота проходящего по кабелю тока;  $d$  и  $D$  — диаметры жилы и брони кабеля.

Индуктивность одножильного кабеля, у которого жила и броня изготовлены из разных металлов, рассчитывается по формуле

$$L = \left[ \frac{100}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_1 \rho_1}{f}} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \frac{D}{d} \right] 10^{-4}, \quad (V.6)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — магнитная проницаемость материала жилы и брони кабеля;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — удельное электрическое сопротивление материала жилы и брони кабеля.

При повышенной частоте тока индуктивность одножильного бронированного кабеля может быть вычислена по формуле для коаксиальных кабелей:

$$L = 2 \ln \frac{D}{d} 10^{-4}. \quad (V.7)$$

Использование формул (V.5) — (V.7) для расчета индуктивности многожильных кабелей приводит к получению результатов, заниженных на 25—30 % по сравнению с измеренными, поскольку индуктивность многожильного кабеля складывается из внутренней индуктивности (жил кабеля)  $L_{в}$  и наружной, между-жильной индуктивности  $L_{н}$ :

$$L = L_{в} + L_{н}. \quad (V.8)$$

С увеличением частоты переменного тока в кабеле в результате уплотнения тока у периферии токопроводящих жил проис-

ходит уменьшение напряженности магнитного поля внутри жил и как следствие — уменьшение индуктивности кабеля (см. рис. 77). При частотах более 5—10 кГц индуктивность практически не изменяется.

Индуктивности бронированных кабелей, спущенных в скважину и намотанных на барабан лебедки, почти не различаются.

### Емкость

Под электрической емкостью кабеля обычно понимают отношение заряда  $Q$ , внесенного на токопроводящую жилу, к потенциалу  $U$ , до которого зарядилась эта жила под воздействием заряда:

$$C = Q/U. \quad (V.9)$$

Емкость кабеля зависит от диэлектрических свойств изолирующих материалов, толщины слоя изоляции, а также от внешних условий (температуры и давления). Например, емкость одножильного бронированного кабеля с однородным диэлектриком определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \frac{D}{d}}, \quad (V.10)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;  $D$  — внешний диаметр жилы по изоляции;  $d$  — диаметр токопроводящей жилы по металлу.

Общая емкость многожильного кабеля складывается (рис. 78) из частичных емкостей между каждой из жил кабеля (1—3) и его броней (оплеткой) и емкостей между каждой парой жил. Ввиду сложности расчета численные значения отдельных составляющих емкостей и их комбинаций для многожильных кабелей определяют экспериментально.

Емкость кабеля мало изменяется в зависимости от частоты передаваемого тока (см. рис. 77), а также от температуры и давления. Заметное изменение емкости наблюдается лишь при длительном пребывании кабеля в скважине и связано главным образом с изменением диэлектрических свойств материала изолятора.

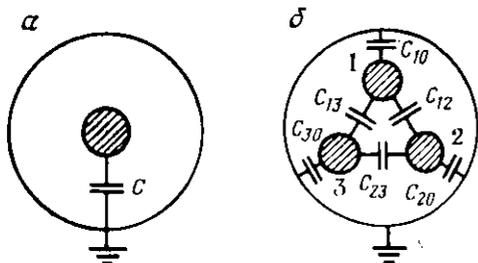


Рис. 78. Схема емкостей в одножильном (а) и трехжильном (б) геофизических кабелях

## Проводимость изоляции жил кабеля

Проводимость изоляции определяет потери энергии в изоляции токопроводящих жил кабелей.

Все электроизоляционные материалы характеризуются определенными значениями проводимости изоляции. В идеальном случае проводимость изоляционных материалов равна нулю; у реальных изоляционных материалов проводимость на единицу длины кабеля изменяется в соответствии с формулой

$$G = G_0 + G_f = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (\text{V.11})$$

где  $G_0$  — проводимость изоляции при постоянном токе;  $G_f$  — проводимость изоляции при переменном токе;  $\omega$  — круговая частота тока;  $\delta$  — угол диэлектрических потерь;  $R_{из}$  — сопротивление изоляции.

Величина  $R_{из}$  представляет собой отношение приложенного к изоляции жилы напряжения постоянного тока  $U$  (в В) к току утечки (в А), т. е.

$$R_{из} = \frac{U}{I_y} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}, \quad (\text{V.12})$$

где  $R_V$  — объемное сопротивление изоляции, численно определяющее препятствие прохождению тока в толще изоляции;  $R_S$  — поверхностное сопротивление, определяющее препятствие прохождению тока по поверхности изоляции.

Существуют формулы для расчета сопротивления изоляции жил различных кабелей. Например,  $R_{из}$  (в МОм·км) сухого одножильного кабеля может быть рассчитано по формуле [1]

$$R_{из} = \frac{\rho_V}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} 10^{-11}, \quad (\text{V.13})$$

где  $\rho_V$  — удельное объемное сопротивление изоляции;  $r_1$  — радиус жилы из скрученной проволоки;  $r_2$  — радиус изолированной жилы.

Сопротивление изоляции жил кабеля, находящегося в скважине, уменьшается под влиянием температуры и давления. Это уменьшение определяется изменением электрофизических характеристик изоляционных материалов. В частности, при повышенной температуре удельное сопротивление электроизоляционных материалов уменьшается в соответствии с выражением

$$\rho = \rho_0 e^{\left(A + \frac{B}{T}\right)}, \quad (\text{V.14})$$

где  $\rho_0$ ,  $A$  и  $B$  — постоянные для данного материала;  $T$  — абсолютная температура, К.

Резиновая изоляция, кроме того, быстро стареет в условиях повышенных температур — начинает растрескиваться и кро-

питься. В связи с этим геофизические кабели с резиновой изоляцией невозможно использовать в условиях глубоких скважин с температурой выше 130—140 °С. Изоляционные материалы, применяемые в термостойких кабелях (фторопласт марок 40Ш, 4Д, 4М, полиэтилен), сохраняют свои изоляционные свойства при высоких температурах (180—250 °С).

Изменение сопротивления изоляции жил кабелей под влиянием температуры можно определить расчетным путем или экспериментально; рассчитать увеличение проводимости изоляции при возрастании давления трудно.

Изоляционные свойства геофизических кабелей существенно зависят от срока их эксплуатации. Если, например, сопротивление изоляции новых кабелей при спуске в скважину с температурой около 100 °С уменьшается от нескольких тысяч мегаом-километров до десятков, то для кабелей, бывших в эксплуатации, это уменьшение происходит до 8—10 МОм·км и ниже.

Низкая электропроводность (высокое сопротивление) изоляции жил кабеля — одно из необходимых условий получения точных результатов при геофизических исследованиях скважин.

Рассмотрение первичных электрических параметров геофизических кабелей показывает, что они не зависят от напряжения и передаваемого тока, а определяются лишь конструкцией кабеля, свойствами используемых в нем материалов, частотой тока и условиями эксплуатации. В процессе геофизических исследований различные отрезки кабеля находятся в неодинаковых условиях, т. е. испытывают разное по длине кабеля воздействие давления и температуры. В общем случае это приводит к изменению первичных параметров отдельных частей кабеля в зависимости от их расположения в скважине. Однако первичные параметры бронированных кабелей мало изменяются в указанных выше условиях, в связи с чем такие кабели с достаточной степенью точности можно считать однородными электрическими линиями, в которых распределение первичных параметров по длине равномерно и непрерывно. В этом случае геофизический кабель можно уподобить колебательному контуру, составленному из сосредоточенных элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $G$ , включенных, как показано на рис. 79.

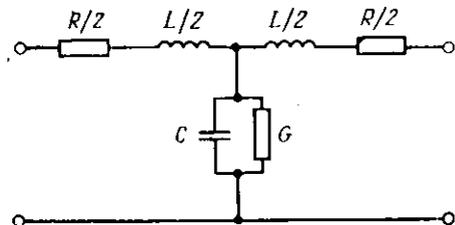


Рис. 79. Эквивалентная электрическая схема одножильного бронированного кабеля

Таблица 8

## Электрические параметры геофизических кабелей

Марка кабели	Сопротивление жилы, Ом км	Сопротивление изоляция, МОм км	Ем- кость <sup>1</sup> , мкФ км	Индук- тив- ность <sup>1</sup> , мГ км	Волновое сопро- тивле- ние <sup>1</sup> , Ом км	Коэффициент затухания <sup>1</sup> , Нп км	
						$f$ 30 кГц	$f$ 50 кГц
КГ1-24-180	34	500	0,2	4,70	55	0,64	0,93
КГ1-53-180	27	10 000	0,11	1,80	77	0,40	0,50
КГ3-67-180	27	10 000	0,11	1,60	76	0,40	0,54
КГ7-68-180	34	500	0,14	1,90	50	0,60	0,70
КГ1-59-250	19	500	0,13	1,40	64	0,40	0,55
КГ3-78-250	19	500	0,13	—	69	—	0,42
КГ1-24-90	34	100	0,09	0,81	79	0,51	0,65
КГ1-53-90	37	100	0,11	1,45	108	0,70	0,90
КГ3-59-90	34	100	0,10	0,99	89	0,90	0,93

<sup>1</sup> Значения приведены для цепи кабеля между жилой и броней.

В данной схеме параметры  $R$  и  $L$  образуют суммарное характеристическое сопротивление  $Z=R+j\omega L$ , а параметры  $C$  и  $G$  — суммарную электропроводность кабеля по отношению к токам утечки (здесь  $\omega$  — круговая частота тока).

Данные о первичных электрических параметрах бронированных геофизических кабелей приведены в табл. 8.

### § 3. ВТОРИЧНЫЕ (ВОЛНОВЫЕ) ПАРАМЕТРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Передача энергии по кабелю осуществляется в виде электромагнитной волны тока (напряжения), распространяющейся в изоляционном слое. Токпроводящие жилы кабеля являются направляющими электромагнитного поля. Электрические свойства кабелей по отношению к передаваемой высокочастотной электромагнитной энергии обычно характеризуются вторичными (волновыми) параметрами. Сведения о вторичных параметрах геофизических кабелей совершенно необходимы при разработке скважинной аппаратуры, в которой информация об измеряемых величинах передается в виде электрических сигналов повышенной частоты (многоканальная аппаратура с частотным разделением каналов, аппаратура с частотной и частотно-импульсной модуляцией, радиометрическая аппаратура для спектрометрии излучений и др.).

Вторичные электрические параметры кабелей являются функциями первичных параметров и частоты передаваемого тока (напряжения).

## Волновое сопротивление

Под волновым сопротивлением понимается сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной кабельной линии без отражения:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (V.15)$$

Как видно, величина волнового сопротивления не зависит от длины кабеля, она характерна для определенного типа кабеля и постоянна в любой точке цепи.

Волновое сопротивление может быть определено экспериментально по результатам измерения входных сопротивлений кабеля в режимах холостого хода  $Z_{xx}$  и короткого замыкания  $Z_{кз}$ :

$$Z_c = \sqrt{Z_{xx} Z_{кз}}. \quad (V.16)$$

С увеличением частоты тока волновое сопротивление монотонно убывает, а начиная с частоты  $f \approx 20$  кГц остается практически постоянным (рис. 80).

Из теории однородных проводных линий связи следует, что стационарный процесс распространения волн напряжения, т. е. отсутствие отражений в линии, устанавливается лишь при нагрузке кабеля на волновое сопротивление  $Z_c$ . Если обозначить выходящее сопротивление источника и входное сопротивление приемника электромагнитной энергии, установленных на концах кабеля, соответственно через  $Z_{и}$  и  $Z_{п}$ , то наиболее полную (без отражения) передачу энергии по кабелю от источника к приемнику можно будет осуществлять лишь при  $Z_{и} = Z_{п} = Z_c$ .

В неоднородных линиях и при несогласованных нагрузках в местах электрических несогласованностей возникают отраженные волны, и часть энергии возвращается к началу линии. Передаваемая энергия при несогласованной нагрузке значительно меньше, чем при согласованной.

Соотношение между энергией, поступающей к приемнику, и энергией, отраженной от него, характеризуется коэффициентом отражения

$$\rho = \frac{Z_{п} - Z_c}{Z_{п} + Z_c}. \quad (V.17)$$

При согласованной нагрузке ( $Z_{п} = Z_c$ ) коэффициент отражения равен нулю, и энергия полностью поглощается приемником. При коротком замыкании ( $Z_{п} = 0$ ) и режиме холостого хода, когда цепь

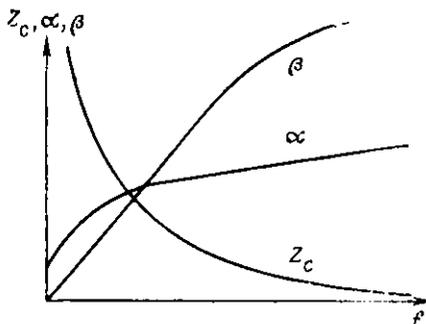


Рис. 80. Зависимость вторичных электрических параметров геофизических кабелей ( $Z_c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) от частоты тока  $f$

изолирована на конце ( $Z_n = \infty$ ), коэффициенты отражения равны соответственно  $-1$  и  $+1$ . В случае, когда  $0 < Z_n < \infty$ , но не равно  $Z_c$ , за счет несогласованности лишь часть энергии будет воспринята приемником.

Из сказанного следует, что для наиболее полной передачи энергии по кабелю из скважинных приборов в наземные блоки геофизической аппаратуры необходимо тщательное согласование передающих и воспринимающих элементов аппаратуры с волновым сопротивлением кабеля.

### Коэффициенты распространения, затухания и фазы

Электромагнитная энергия при распространении по кабелю уменьшается по величине вследствие потерь на нагревание жил и поляризацию молекул изоляции.

Если обозначить напряжение, ток и мощность в начале кабельной линии соответственно через  $U_0$ ,  $I_0$  и  $P_0$ , а значения этих же параметров в конце линии через  $U_l$ ,  $I_l$  и  $P_l$ , то будут справедливы следующие соотношения:

$$\frac{U_0}{U_l} = e^{\gamma l}; \quad \frac{I_0}{I_l} = e^{\gamma l}; \quad \frac{P_0}{P_l} = e^{2\gamma l}, \quad (V.18)$$

где  $l$  — протяженность кабельной линии.

Величина  $\gamma$  характеризует интенсивность уменьшения электромагнитной энергии, передаваемой по кабелю, и называется коэффициентом (постоянной) распространения. С первичными электрическими параметрами кабеля коэффициент распространения связан следующим образом:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \beta + j\alpha. \quad (V.19)$$

В соответствии с этим выражением формулы (V.18) можно переписать в виде

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^{\beta l} \cdot e^{j\alpha l}; \quad \frac{P_0}{P_l} = e^{2\beta l} \cdot e^{2j\alpha l}. \quad (V.20)$$

Модуль этих выражений ( $e^{\beta l}$ ) отражает уменьшение абсолютного значения напряжения, тока или мощности электромагнитной волны на участке кабеля длиной  $l$ , а величина  $\beta$  характеризует степень затухания энергии на единице длины кабеля и называется коэффициентом затухания.

Если прологарифмировать обе части уравнений (V.20), то получим

$$\beta l = \ln \left| \frac{U_0}{U_l} \right| = \ln \left| \frac{I_0}{I_l} \right| = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_l}$$

или

$$\beta = \frac{1}{l} \ln \left| \frac{U_0}{U_l} \right| = \frac{1}{l} \ln \left| \frac{I_0}{I_l} \right| = \frac{1}{2l} \ln \frac{P_0}{P_l}. \quad (V.21)$$

Затухание измеряется в неперах (Нп) или децибеллах (дБ) на 1 км. Затухание, соответствующее 1 Нп, происходит в кабельной линии длиной 1 км, у которой ток и напряжение в начале линии больше по величине, чем ток и напряжение в конце линии, в 2,718 раза ( $e=2,718$ ). Затухание в децибеллах рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{20}{l} \lg \frac{U_0}{U_l} = \frac{20}{l} \lg \frac{I_0}{I_l} = \frac{10}{l} \lg \frac{P_0}{P_l} \quad (V.22)$$

Если геофизический кабель является однородным и нагружен на волновое сопротивление, то величина  $\beta$  характеризует собственное затухание кабеля. В неоднородных кабельных линиях  $\beta$  определяет рабочее затухание, т. е. собственное затухание кабеля и затухание из-за неоднородности его электрических характеристик.

Коэффициент затухания возрастает при увеличении частоты передаваемого тока (см. рис. 80). В наибольшей степени это проявляется при  $f > 10 \div 20$  кГц. Для бронированных кабелей затухание мало зависит от того, намотан ли кабель на барабан лебедки или спущен в скважину.

Уменьшение затухания может быть достигнуто путем уменьшения  $R$  (т. е. увеличением диаметра токопроводящих жил или применением медных жил), уменьшения  $G$  (применением изоляционных материалов с повышенными электроизоляционными свойствами), уменьшения  $C$  (увеличением толщины слоя изоляции) и увеличения  $L$  (обычно достигаемого искусственным путем).

Мнимая часть выражений (V.20), т. е.  $e^{j\alpha l}$ , характеризует изменение угла вектора тока или напряжения на участке кабельной линии длиной  $l$ , а параметр  $\alpha$  называется коэффициентом фазы (фазовой постоянной) и измеряется в радианах или градусах на 1 км длины кабеля. При увеличении частоты передаваемого тока происходит увеличение  $\alpha$  (см. рис. 80).

Таким образом, коэффициент распространения  $\gamma$  характеризует изменение передаваемого тока (напряжения) одновременно как по абсолютной величине, так и по фазе на 1 км длины кабеля и является важным параметром, определяющим кабель как электрическую линию связи.

В практике частотные характеристики кабелей нередко оценивают с помощью величины  $U_l/U_0$ ,  $I/I_0$  или  $P_l/P_0$ , называемых коэффициентами передачи и соответствующими по напряжению, току или мощности. Бронированные кабели характеризуются уменьшением коэффициентов передачи при возрастании частоты тока в кабеле, наиболее резко проявляющемся при частотах более 10 кГц.

Данные о вторичных электрических параметрах геофизических кабелей приведены в табл. 8.

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ И СТАНЦИИ

---

### § 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИИ И СТАНЦИИ

Промыслово-геофизические исследования выполняют с помощью измерительных, вычислительных и регистрирующих устройств, указывающих и контрольных приборов, спуско-подъемного оборудования, источников электропитания и вспомогательных приспособлений, объединяемых под общим названием автоматической каротажной станции.

Станции, выпускаемые отечественной промышленностью, различаются по назначению, комплексу выполняемых исследований и глубинам обслуживаемых скважин. Станции в основном самоходны и смонтированы на двух автомобилях повышенной проходимости. В этом случае совокупность измерительной аппаратуры, контрольных приборов и источников электропитания, смонтированных на автомобиле, носит название геофизической измерительной лаборатории, а автомобиль с установленным спуско-подъемным оборудованием и вспомогательными устройствами называется самоходным подъемником.

Несамоходные станции, лаборатории и подъемники монтируются в помещениях, расположенных на скважинах, или в контейнерах, доставляемых транспортными средствами к месту работ.

В станциях, предназначенных для исследования неглубоких скважин, измерительная аппаратура и спуско-подъемное оборудование смонтированы на одном автомобиле. Устанавливаемые здесь регистраторы обладают повышенной устойчивостью к толчкам и вибрациям, неизбежно возникающим при работе спуско-подъемного оборудования.

Для исследования скважин, расположенных в труднодоступных условиях, применяют станции в виде переносного комплекта, доставляемого к месту работы любыми транспортными средствами, а также ручную.

Станции, предназначенные для исследования морских скважин, монтируют на судах плавучих буровых установок в специализированных контейнерах, которые вместе с оборудованием буровых служб устанавливают на индивидуальных основаниях.

В настоящее время в СССР выпускают следующие виды станций и измерительных лабораторий, предназначенных для проведения:

1) комплекса геофизических исследований в нефтяных, газовых, угольных и рудных скважинах — универсальные станции ЛЦК-10, АКС/Л-7, СК-1, АЭКС-1500, АКС-65-П;

2) геохимических исследований и изучения режима бурения скважин — газокаротажные станции АГКС-4АЦ, АГКС-5/АГИС-2;

3) технологических процессов бурения, прогнозирования аномально высоких давлений, управления режимом бурения скважин — станции параметров бурения АСПБ, Геотест;

4) геофизических исследований по контролю за разработкой месторождений и изучению технического состояния скважин станции — АИСТ, АСТРА;

5) работ с испытателями пластов — самоходная полевая лаборатория СПЛ;

6) прострелочно-взрывных работ — лаборатория перфораторной станции ЛПС;

7) магнитометрии и радиометрии в скважинах железорудных месторождений — станция «Карьер»;

8) геофизических исследований и контроля технического состояния скважин, бурящих на воду, — станция СКВ-69;

9) инженерно-геологических изысканий — пенетрационно-каротажные станции.

В данном учебном пособии рассматриваются только универсальные станции, предназначенные для геофизических исследований нефтяных, газовых, угольных и рудных скважин.

В зависимости от глубины исследования скважин и преимущественной области применения выделяют универсальные станции следующих типов: СК-1 — для исследования скважин глубиной до 1000 м, пробуренных на уголь, рудные ископаемые, а также гидрогеологических и инженерно-геологических скважин; СК-2 — для исследования скважин глубиной до 2000 м на нефть, газ, уголь и рудные ископаемые; СК-4 — для исследования скважин глубиной до 4000 м на нефть и газ, а также опорных скважин; СК-С — для исследования сверхглубоких скважин на нефть, газ и опорных скважин.

Разработку геофизических лабораторий и станций ведут с учетом внедрения в практику работ новых методов исследования, что обеспечивается проектированием комплекса наземной аппаратуры как системы, которая может развиваться и пополняться по мере разработки и внедрения новых скважинных приборов.

Универсальные геофизические измерительные лаборатории и станции по типу применяемого регистрирующего устройства подразделяются на аналоговые и цифровые. Аналоговые станции в зависимости от комплекса методов геофизических исследований и глубины скважины должны быть укомплектованы четырех- или восьмиканальными регистраторами с динамическим диапазоном не менее 66 дБ. Цифровые измери-

тельные лаборатории и станции должны обеспечивать одновременно проведение измерений и регистрацию восьми параметров с динамическим диапазоном не менее 80 дБ и шагом квантования по глубинам 0,05; 0,1 и 0,2 м. Разрабатываются компьютеризированные лаборатории и станции, в которых все операции по подготовке и проведению измерений, регистрации и обработке автоматизированы и осуществляются по заданным программам с помощью ЭВМ.

## § 2. АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ И СТАНЦИИ

Аналоговые измерительные лаборатории и станции наиболее широко применяются в практике геофизических исследований скважин. Они различаются по своим техническим возможностям, что связано с их назначением, условиями применения, а также общим уровнем измерительной техники, соответствующим периоду их разработки. Из аналоговых лабораторий и станций, выпускающихся в разное время отечественной промышленностью, в настоящее время используются станции АЭКС-1500, АКС/Л-7, СК-1 и АКС-65-П. Подробное описание измерительных схем и конструктивного оформления перечисленных устройств приведено в соответствующих технических инструкциях, а также в работах [6, 7]. В данном разделе ограничимся анализом основных особенностей лабораторий (станций) с точки зрения используемых телеизмерительных систем.

### Измерительная аппаратура станции АЭКС-1500

Станция АЭКС-1500 предназначена для исследования скважин глубиной до 1500 м. В лабораторном отделении станции установлен аппаратный стенд, состоящий из следующих блоков и панелей (рис. 81): силового блока, блока выпрямителя 1; пульсаторно-токовой панели 2—6; двухканального автоматического потенциометра 7, 8 типа ПАСК-8 и контрольной панели 9. В комплект станции входят лебедка с кабелем 11, зонды 10, датчики глубин 12 и натяжения кабеля 13.

Типовое соединение блоков аппаратуры на примере одновременного измерения КС и ПС показано на рис. 81. Коммутация измерительных каналов и источников питания для выполнения тех или иных видов исследования осуществляется с помощью соединения штекерами соответствующих гнезд пульсаторно-токовой панели 6 и регистрирующего прибора.

Кажущееся сопротивление горных пород измеряют по системе интенсивности переменного тока (напряжения). Для питания электродов А и В используют переменный пульсирующий ток (5—25 Гц), получаемый путем преобразования из постоян-

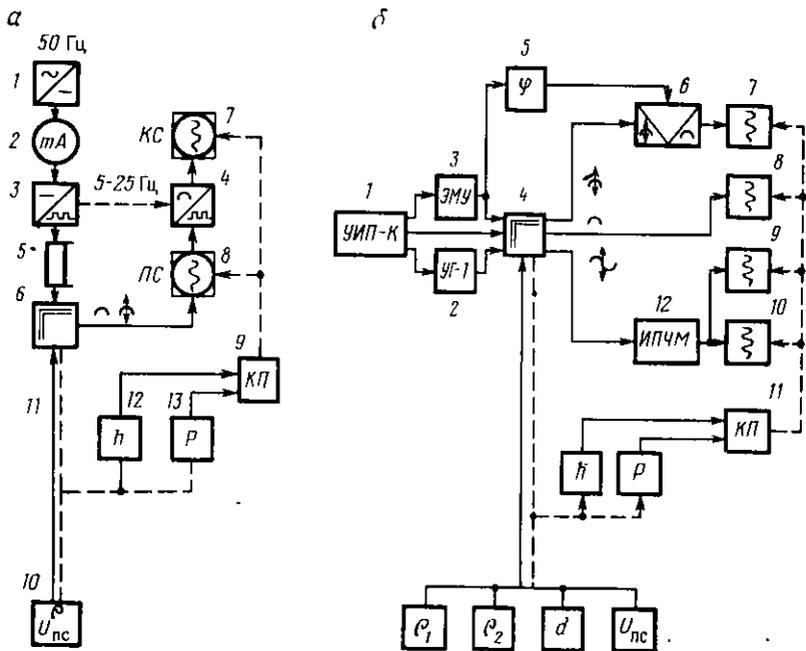


Рис. 81. Блок-схемы геофизических лабораторий с аналоговыми регистрами:

а — АЭК; б — АКС/Л-7

ного с помощью токового переключателя специального электро-механического преобразователя — пульсатора. Необходимую величину тока устанавливают путем изменения напряжения источника питания или сопротивления токовой цепи и контролируют по миллиамперметру 2. В токовую цепь включены контрольные шунты 5, используемые для измерения величины тока и градуирования измерительных каналов.

Разность потенциалов в измерительной цепи выпрямляется измерительным переключателем пульсатора, который в момент изменения направления тока в цепи токовых электродов изменяет полярность подключения измерительных электродов  $M$  и  $N$  к регистрирующему прибору.

Температуру, диаметр и искривление скважин измеряют по системе интенсивности постоянного тока, источником которого служит выпрямитель станции. Результаты измерения регистрируют с помощью двухканального автоматического потенциометра ПАСК-8 (см. гл. IV, § 8).

Технические возможности станции позволяют проводить ограниченный комплекс исследований в неглубоких скважинах структурного бурения, гидрогеологических и взрывных скважинах при

сейсморазведочных работах. Комплекс геофизических исследований скважин, выполняемых станцией, на практике часто расширяют (например, выполняют исследования методами радиометрии, расходометрии и др.), применяя ряд скважинных приборов, источников питания, не входящих в основной комплект лаборатории.

### Измерительная лаборатория АКС/Л-7

Лаборатория АКС/Л-7 (рис. 81, б) является комплексной измерительной лабораторией, позволяющей с помощью отдельного подъемника осуществлять измерения в скважинах на однопровольном, трехпроводном и семипроводном геофизическом кабеле.

Аппаратурный стенд лаборатории включает следующие панели и блоки: источник постоянного тока УИП-К (1); генератор УГ-1 (2); панель управления электромашинным усилителем 3; измерительную панель 4—6; светолучевой осциллограф П-028 (или П-015) 7—10; контрольную панель 11.

Предусмотрено размещение в аппаратурном стенде унифицированных панелей ИПЧМ 12 и ПР4-III, а также других панелей, предназначенных для отдельных видов исследования (например, термометрии).

За пределы аппаратурного стенда внесен электромашинный усилитель ЭМУ-5А.

Унифицированные источники электропитания и унифицированные измерительные панели в сочетании с совершенным типом регистратора обеспечивают производство работ практически всеми известными геофизическими методами с использованием типовых скважинных приборов.

В зависимости от измеряемого физического параметра и используемого кабеля измерительную схему лаборатории (рис. 81, б) выполняют на основе различных телеизмерительных систем.

Кажущееся удельное сопротивление горных пород на многопроводном кабеле измеряют по системе интенсивности переменного тока (напряжения). Электропитание токовых электродов зонда осуществляется переменным синусоидальным током частотой 6—8 Гц от электромашинного усилителя, управляемого с помощью отдельной панели 3 лаборатории. Разность потенциалов  $\Delta U_{КС}$ , снимаемая с измерительных электродов, выпрямляется фазочувствительным выпрямителем 5, 6, установленным в измерительной панели. В случае использования трехпроводного кабеля возможна одновременная регистрация двух кривых — КС и ПС, а при использовании семипроводного — трех кривых КС зондами разной длины и кривой ПС.

Измерение на однопроводном бронированном кабеле выполняют на основе телеизмерительной системы с частотным разделением каналов и частотной модуляцией. В этом случае источником электропитания схемы служит унифицированный генератор УГ-1,

вырабатывающий переменный ток частотой 300 Гц (или 400 Гц). Для обработки поступающей из скважины измерительной информации используют унифицированную измерительную панель ИПЧМ. Таким образом, не только измеряют КС обычными зондами (аппаратура типа КСП), но и выполняют измерения проводимости горных пород (АИК), диаметра и профиля скважины (СКП-1) и другие операции.

При проведении радиометрии применяют систему передачи информации в импульсной форме с разделением каналов путем полярной и амплитудной дискриминации, которую осуществляют с помощью унифицированной панели 1Р4-1П.

Измерение температуры в скважинах с помощью электротермометров ТЭГ или Т-4 выполняют на основе частотной телеизмерительной системы с использованием отдельной наземной панели.

В последних двух случаях электропитание схемы осуществляется от унифицированного источника постоянного тока УИП-К. Этот же источник используется и при некоторых других измерениях (например, при инклинометрии).

Для записи результатов измерения служит светолучевой осциллограф Н-028 или Н-015 (см. гл. IV, § 5).

### **Измерительная аппаратура станции СК-1**

Автоматическая каротажная станция СК-1 предназначена для выполнения геофизических исследований в скважинах глубиной до 1000 м и смонтирована на шасси автомобиля ЗИЛ-131. Аппаратурный стенд станции СК-1 образован теми же панелями, что и стенд лаборатории АКС/Л-7, и отличается от него лишь компоновкой, поэтому различные геофизические параметры измеряются на основе тех же телеизмерительных систем, которые использованы в лаборатории АКС/Л-7.

### **Измерительная аппаратура станции АКС-65-П**

Переносная автоматическая каротажная станция АКС-65-П рассчитана на проведение комплекса измерений совместно с подъемником любого типа. Конструктивно комплект измерительной аппаратуры оформлен в виде трех отдельных компактных блоков — светолучевого осциллографа, блока питания и токово-пульсаторного блока, что позволяет применять эту аппаратуру для исследования скважин в труднодоступных районах.

Измерительная схема станции АКС-65-П во многом аналогична схеме станции АЭКС-1500. Так, при измерении кажущегося сопротивления горных пород (рис. 82) по системе интенсивности переменного тока питание электродов зонда осуществляется переменным током частотой 5—25 Гц, который преобразуется из постоянного с помощью релейного пульсатора.

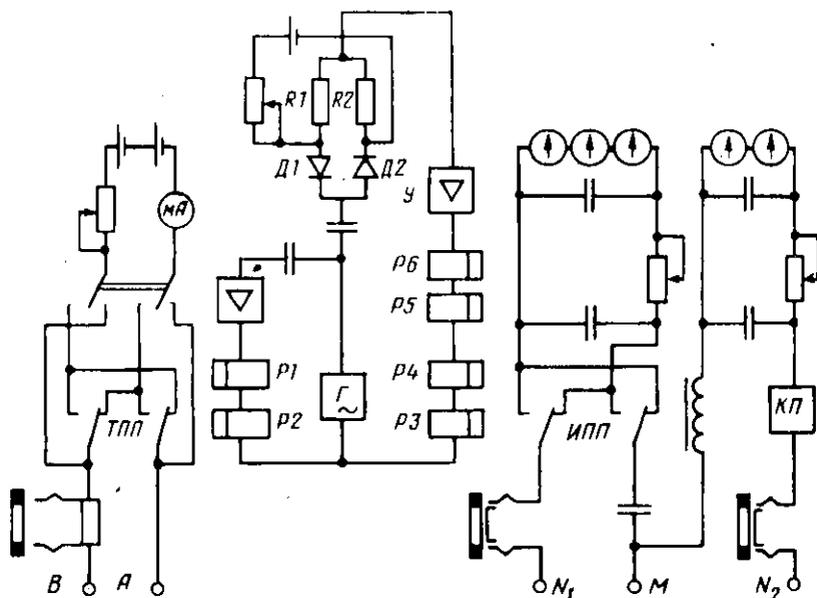


Рис. 82. Измерительная схема станции АКС-65-П

Пульсатор станции АКС-65-П представляет собой управляемые от общего электронного генератора  $\Gamma$  двухпозиционные переключатели полярности, выполненные на контактах поляризованных реле  $P1-P6$ . Реле  $P3-P6$  измерительной цепи в отличие от  $P1-P2$  подключены к генератору через диодный ограничитель ( $D1, D2, R1, R2$ ), который пропускает на усилитель мощности  $У$  вершины периодов синусоиды, вырабатываемой генератором. Контакты  $ИПП$  измерительной цепи срабатывают с некоторым опозданием и выключаются несколько раньше  $ТПП$  токовой цепи; тем самым наводки в измерительной цепи от переходных процессов токовой цепи не выпрямляются, т. е. обеспечивается уменьшение влияния индуктивных помех, возникающих при работе с трехжильным кабелем.

При измерении по системе интенсивности постоянного тока релейный пульсатор и фазочувствительный выпрямитель из схемы выключаются. Схемы трех измерительных каналов станции имеют много общих черт со схемами каналов лаборатории АКС/Л-7.

Электропитание аппаратуры станции АКС-65-П осуществляется от автономных источников (батарей, аккумуляторов) либо от сети переменного тока напряжением 127 или 220 В с помощью блока питания.

Для регистрации результатов измерения служит трехканальный светолучевой осциллограф Н-017, в котором применены те

же гальванометры и магнитные блоки, что и в И-015. Схема и устройство осциллографа во многом аналогичны описанным в § 5 гл. IV. Для обеспечения автономности осциллографа и возможности его самостоятельного использования в его конструкцию включены элементы регулирования постоянных по напряжению измерительных каналов и осветительных цепей, а также комбинированный компенсатор поляризации.

### § 3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

Необходимость решения промыслово-геофизических задач для более сложных геологических условий требует увеличения комплекса исследований и повышения качества измерений путем улучшения технических параметров измерительных лабораторий — чувствительности, диапазона регистрации, быстродействия и др. В процессе измерений должна быть обеспечена возможность оперативной оценки качества материалов, например, с помощью непрерывной регистрации контрольных параметров, что требует увеличения числа одновременно измеряемых величин. Перечисленные задачи могут быть успешно решены с помощью цифровой регистрации промыслово-геофизических данных и их обработки на ЭВМ.

Обработка и комплексная интерпретация промыслово-геофизической информации на ЭВМ может осуществляться одновременно с регистрацией в процессе измерения или же после него путем воспроизведения записанной ранее на носитель информации. Таким образом, по полноте решаемой задачи могут найти применение цифровые измерительные геофизические лаборатории двух типов: 1) лаборатории для цифровой регистрации результатов измерения и частичной оперативной их обработки на скважине с помощью специализированного вычислительного устройства; 2) лаборатории, осуществляющие непосредственную связь с ЭВМ, устанавливаемой в станции, либо передающие цифровые данные по каналам связи в вычислительный центр.

При интерпретации геофизических данных с помощью вычислительного устройства, входящего в комплект станции и имеющего ограниченную память, согласование информации по глубинам обычно проводят синхронно с обработкой в процессе или после проведения измерений.

Цифровые лаборатории обоих типов должны быть также оснащены аналоговым регистратором, предназначенным для регистрации исходных геофизических данных, а также результатов оперативной интерпретации в виде кривых и литологической колонки.

К таким высокопроизводительным измерительным лабораториям, отвечающим современному развитию науки и техники, может быть отнесена отечественная лаборатория ЛЦК-10, которая обеспечивает работу с одно-, трех- и семижильным кабелем;

она рассчитана на проведение полного комплекса промыслово-геофизических исследований и частичную оперативную обработку измерительной информации непосредственно на скважине. В процессе измерения лаборатория станции может обеспечить одновременную регистрацию до восьми параметров в аналоговой или цифровой формах.

Блок-схема лаборатории изображена на рис. 83.

Аппаратура лаборатории ЛЦК-10 смонтирована в виде стенда, состоящего из трех стоек: 1) унифицированных панелей скважинных телеизмерительных систем; 2) аналоговой регистрации; 3) цифровой регистрации и обработки геофизических данных.

Отдельно смонтирована стойка с блоком питания, включающим силовой трансформатор, стабилизированный выпрямитель и блоки питания скважинных приборов 2 и 3.

В стойке телеизмерительных систем устанавливаются следующие унифицированные панели (УП):

УПАМ (5) — с амплитудной модуляцией (АМ) сигнала, например пульт электрического каротажа типа ПКМК для работы с трех- и семижильным кабелем;

УПКИМ (4) — с кодо-импульсной модуляцией (ИСКИМ);

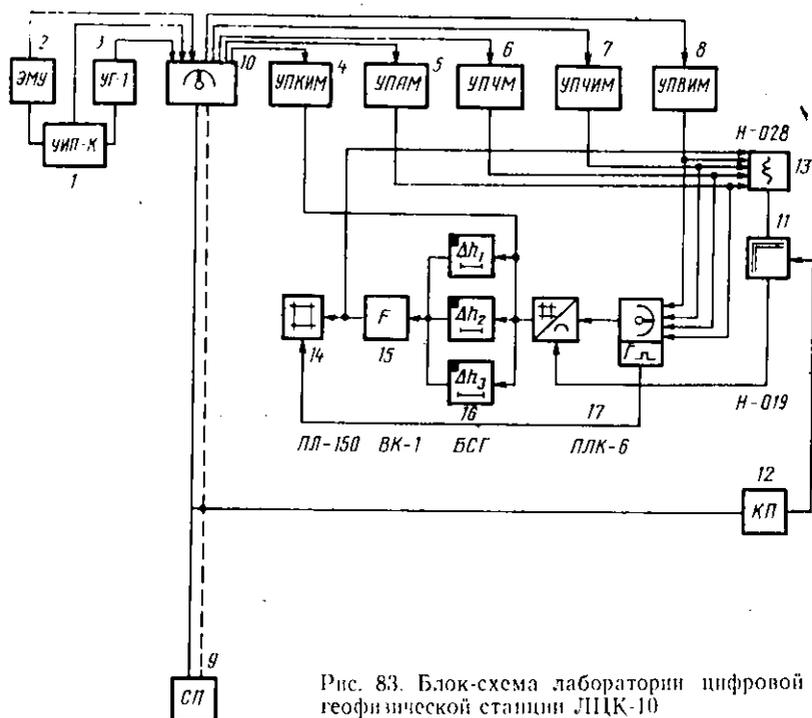


Рис. 83. Блок-схема лаборатории цифровой геофизической станции ЛЦК-10

УПЧМ (6) — с частотной модуляцией (ЧМ); измерительная панель частотной модуляции типа ИПЧМ-2А;

УПЧИМ (7) — с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ); четырехканальный пульт радиоактивного каротажа типа ИПРКУ-А или IP4-III;

УПВИМ (8) — с время-импульсной модуляцией (ВИМ); панель акустического каротажа типа АНК-А.

В стойке станции предусмотрены две ячейки под сменные панели, где могут быть установлены панели для измерения температуры, диаметра скважины и др. Со скважинным прибором (9) наземные панели телесистемы связаны через пульт коммутации 10.

Исследование скважин методами электрометрии может быть осуществлено в зависимости от производственных условий, наличия в комплекте станции тех или иных скважинных приборов с использованием различных телеизмерительных систем. Одновременное измерение восьми параметров может быть выполнено: а) с частотным разделением четырех каналов и временным разделением двух каналов внутри каждого частотного канала; б) с частотным разделением четырех каналов и с уплотнением каждого двумя поднесущими частотами; в) с временным разделением всех каналов, при котором передача данных осуществляется двоичным кодом.

В последнем варианте (ИСКИМ) измеренные аналоговые сигналы в скважинном устройстве с помощью поразрядного взвешивания преобразуются в цифровой двоичный код. Динамический диапазон телесистемы — 12 двоичных разрядов, частота опроса каналов — 6,25 Гц.

Панель электрометрии на многожильном кабеле предназначена для записи трех кривых КС и ПС.

Универсальная панель радиометрии скважин содержит четыре измерительных канала и предназначена для работы со всеми основными типами скважинной аппаратуры. Каналы разделяются по амплитуде и полярности передаваемых импульсов. В панели число импульсов, поступившее за определенное время, преобразуется в двоичный код, а затем уже в аналоговую величину, поступающую для регистрации на светолучевой осциллограф. Такая система преобразования импульсов обеспечивает большую точность измерения по сравнению с традиционными системами, содержащими в своем составе интегрирующие цепи.

Для аналоговой записи промыслово-геофизических данных используется восьмиканальный светолучевой осциллограф 13 типа Н-028 (см. гл. IV, § 5).

Регистрация результатов промыслово-геофизических исследований в масштабах глубин и корректировка зарегистрированной информации с помощью кабельных меток обеспечивается пультом управления 11 Н-019 осциллографа, который через конт-

рольную панель 12 связан с датчиком глубин и магнитным меткоуловителем.

В стойке цифровой регистрации и обработки геофизических данных размещаются цифровой регистратор (14, 16, 17) (Н-055 или ПЛК-6), вычислитель 15 и контрольная панель 12. Описание регистратора ПЛК-6 приведено в гл. IV, § 10.

Вычислитель ВК-1 предназначен для обработки и оперативной интерпретации геофизической информации непосредственно на скважине в процессе или после измерений по данным, зарегистрированным цифровым регистратором. Проинтерпретированные данные выводятся на аналоговый регистратор Н-028.

При регистрации результатов измерения в станции ЛЦК-10 происходят следующие преобразования цифровой и аналоговой информации. При проведении геофизических исследований скважин датчики скважинного прибора вырабатывают аналоговые сигналы. Часть сигналов (например, радиометрии, ПС и др.) передается по кабелю в аналоговом виде — такой способ проще и в большинстве случаев обеспечивает необходимую точность. В наземной аппаратуре преобразователем аналог — код цифрового регистратора аналоговые сигналы преобразуются в цифровой код. Сигналы радиометрии в двоичном коде получают в панели ИПРКУ.

При использовании кодо-импульсной телеизмерительной системы ИСКИМ кодо-импульсные сигналы получают непосредственно в скважинном приборе и передают по кабелю на поверхность.

Цифровая информация, включая и кодо-импульсные сигналы, поступившие в ИСКИМ, после согласования по глубинам записывается цифровым регистратором. В процессе регистрации можно совместить точки записи пяти параметров в интервале глубины скважины до 10 м. Затем вся информация поступает на регистр вычислителя для оперативной интерпретации. В результате в цифровом виде получают величины пористости, нефтегазонасыщенности и другие параметры, а также литологические коды, которые управляют системой шторок светолучевого осциллографа Н-028. В результате на диаграммной ленте записывается литологическая колонка. На вход осциллографа могут быть поданы также аналоговые сигналы, поступившие с датчиков.

Синхронизация работы отдельных блоков системы осуществляется с панели управления. С помощью сигналов глубины, поступающих с этой панели, осуществляются разграфка диаграммной ленты горизонтальными линиями, управление печатанием цифровых отметок глубин и согласованием данных по глубине при цифровой регистрации.

#### § 4. КОМПЬЮТИЗИРОВАННЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ

Для более полной автоматизации измерений и выдачи заключений о результатах геофизических исследований скважин необходимо применение цифровых лабораторий и станций, которые обеспечивали бы непосредственную связь с ЭВМ, устанавливаемую в станции, либо передачу цифровых данных по каналам связи в вычислительный центр.

В этом случае ЭВМ можно передать следующие функции, выполняемые сегодня оператором и интерпретаторами: а) оперативную обработку и комплексную интерпретацию промыслово-геофизических данных; б) контроль процесса измерения, передачи и обработки информации, а также управление спуско-подъемными операциями; в) изменение режимов работы скважинного прибора, наземной аппаратуры и спуско-подъемного оборудования, а также, возможно, и изменение комплекса исследований непосредственно в процессе измерений, если это диктуется изменением геолого-геофизической обстановки.

Одной из первых попыток создания такой современной станции с мини-ЭВМ является компьютеризованная станция фирмы «Герхард Оуэн» (США). В этой станции передача данных по кабелю к наземным блокам осуществляется в аналоговом виде или цифровым двоичным кодом, вырабатываемым скважинным аналого-цифровым преобразователем. Цифровые данные на поверхности поступают на магнитный регистратор и мини-ЭВМ, которая по специальным программам обрабатывает поступающую информацию. Запись в аналоговом виде обработанной информации осуществляется лазерным регистратором.

Наличие мини-ЭВМ помимо обработки промыслово-геофизической информации позволяет осуществлять автоматическую калибровку скважинного прибора и высококачественный контроль данных.

Структурная схема станции изображена на рис. 84. Скважинный прибор содержит серию датчиков 1 геофизических параметров, электрические схемы аналоговых преобразователей 2, коммутатор 3 и аналого-цифровой преобразователь 4.

По линии связи (геофизическому кабелю) 5 сигналы в цифровом виде передаются в наземную аппаратуру лаборатории. Цифровые данные после передачи по кабелю записываются во внутреннюю память компьютера, затем поступают на аналоговый (лазерный) и цифровой 8 регистраторы, а также устройство промежуточного отображения информации — дисплей 17. Кроме того, наземная аппаратура лаборатории содержит панель управления 7, источник питания и др.

Панель управления служит для загрузки в память машины программ обработки, соответствующих «вычисляющих программ», находящихся в кассетной картотеке. Блок контроля па-

цели управления позволяет осуществлять все операции контроля и индикации, необходимые на этапах подготовки аппаратуры к работе, калибровки и непосредственно измерений. В блок контроля входит клавишный вычислитель, используемый для ввода или запроса различных данных системы в цифровой форме.

Цифровой регистратор используется для записи на магнитных лентах геофизических данных и окончательных результатов их обработки.

Лазерный регистратор имеет десять каналов измерения и предназначен для записи в аналоговом виде как аналоговых величин, так и цифровых данных, поступающих из скважинного прибора и полученных в результате обработки компьютером.

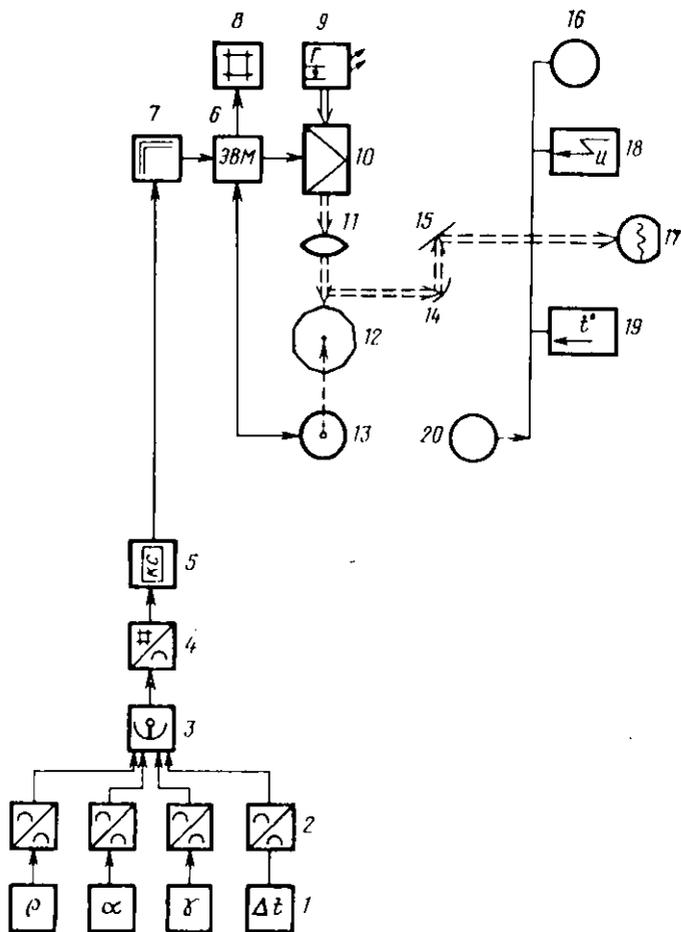


Рис. 84. Структурная схема станции фирмы «Герхард Оуэн»

В отличие от применявшихся ранее регистраторов в нем отсутствует ряд элементов, которые обуславливают основные погрешности измерений и неудобство в работе: гальванометры, механические модулирующие устройства, задерживающие цепочки для сдвига записи по глубине. На пульте управления регистратором нет большого количества ручек, тумблеров и других механических элементов, присущих применяемым в настоящее время аналоговым регистрам. В процессе записи возможно непосредственное наблюдение кривых либо на дисплее, либо на самопроявляющейся пленке.

Регистратор включает в себя маломощный лазер 9, модулятор 10, микропроцессор 6, систему линз и зеркал 11, 14, 15, сканирующее устройство 12, лентопротяжный механизм 16 и систему проявления пленки (18, 19).

Применяемый в регистраторе гелий-неоновый лазер выпускается серийно и, благодаря сроку службы плазменной трубки более чем 10 000 рабочих часов, обеспечивается относительно недорогой источник излучения. Пленка не требует защиты от света и приемной кассеты и может заряжаться на свету. Засвечивание и окрашивание пленки электростатическое. Пленка перед записью заряжается высоковольтным источником напряжения 18. К точкам пленки, которые экспонировал лазерный луч, притягиваются окрашивающие частицы. Стойкость изображения обеспечивается после выпаривания растворителя (изопара или фреона) нагретым потоком воздуха 19.

Двойная ахроматическая система линз фокусирует луч в пятно диаметром 0,125 мм. Этот сфокусированный луч затем преобразуется в сканирующий с помощью вращающегося скоростным двигателем 13 сканера — двенадцатигранного зеркала 12, который заставляет пробегать лазерный луч поперек пленки. Пленка передвигается на 0,1 мм шаговым двигателем 20; затем информация наносится на следующую строку.

Акусто-оптический модулятор 10 под контролем компьютера направляет луч в систему в точно определенное время, чтобы в процессе развертки сканирующим устройством на ленте была поставлена точка. Система точек после проявления образует практически непрерывную кривую. При необходимости более четкого разделения кривых, записываемых регистратором, по программе обработки данных может быть осуществлена запись любыми штриховыми линиями, используемыми, в частности, для изображения литологического разреза скважины. Погрешность преобразования лазерного регистратора  $\pm 0,02\%$ .

Максимальное число кривых, которое можно зарегистрировать с помощью регистратора, ограничивается только физическими размерами пленки.

Главная часть регистратора — микропроцессор, который позволяет обрабатывать восьмиразрядные двоичные числа с возможностью обращения к оперативной памяти.

Компьютер преобразует сигналы, поступающие из скважинного прибора, в том числе и аналоговые, в специальные коды, и хранит их в памяти. После того как оператор включает готовность записи, центральный пульт управления компьютера приступает к выполнению своих функций: запускает все системы, снимает показания о положении забоя, дает команды на преобразование аналогового сигнала в цифровой код, управляет работой системы постановки точек для каждой кривой, осуществляет выбор шкалы линейной или логарифмической. Он также вводит поправки на смещение каждой диаграммы и масштаб записи, обеспечивает контроль за должным нанесением линий глубин через каждые 10 м и меток времени через 1 мин, заставляет шаговый двигатель продвигаться со скоростью, выбираемой с учетом скорости передвижения прибора в скважине.

В описываемой системе измерение осуществляется под программным контролем, который стал возможен в связи с использованием компьютера как основного блока вычислений и контроля. Программа представляет собой строго определенную последовательность указаний, позволяющих компьютеру управлять всей информационно-измерительной системой. Постоянно применяемые варианты программ хранятся в кассете и могут сообщаться в память машины перед каждым исследованием скважины.

Под контролем компьютера по командам оператора осуществляются такие операции, как калибровка всей измерительной системы, включая скважинный прибор, выдача сигналов о сбоях в программе и др.

Система выполнена так, что оператор может легко изменить программу записи в соответствии с техническими условиями, которые могут изменяться от одного интервала измерения к другому, например, изменить режим работы, масштаб записи регистратора, чтобы записанная кривая оптимально отражала измеряемые параметры.

В заключение необходимо отметить, что несмотря на возможность организации большого числа каналов (20) обычно используют комплексную аппаратуру на пять-шесть параметров.

#### **§ 5. АППАРАТУРА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ ЦИФРОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН**

Процесс обработки промыслово-геофизической информации при выполнении полного комплекса геофизических исследований в одной скважине не заканчивается этапом комплексной интерпретации. Далее цифровые данные должны быть переданы в крупные вычислительные центры, где осуществляется их сводная интерпретация по месторождению или отдельным регионам,

т. е. для управления геологоразведочными работами в АСУ «Геология».

Передача цифровой информации, прежде всего при проведении геофизических исследований в труднодоступных районах Крайнего Севера, в морских скважинах и т. п., должна быть осуществлена по каналам связи, так как обеспечит оперативность выдачи заключений, позволит сократить время простоя скважин.

Таким образом, в комплекте цифровой лаборатории необходимо иметь аппаратуру для передачи данных по каналам связи в вычислительный центр. Такая аппаратура по скорости передачи информации подразделяется на низкоскоростную, среднескоростную и высокоскоростную.

Передача данных по телеграфной сети выполняется низкоскоростной аппаратурой с быстродействием 50—100 бод<sup>1</sup>. Время передачи по телетайпу результатов измерений в скважине в зависимости от комплексов и интервала исследования при равномерной системе квантования составляет 10—30 ч.

Для обмена информацией между промыслово-геофизической конторой и вычислительным центром достаточно обеспечить быстродействие 600—1200 бод. Передача информации в технике с такой скоростью осуществляется по телефонным каналам связи. Для высокоскоростной передачи могут быть использованы специальные широкополосные радиорелейные линии связи.

Для передачи сообщений со скважины могут быть использованы только радиоканалы; при этом достаточно организовать радиосвязь скважина — промыслово-геофизическая контора (экспедиция, трест). Далее в территориальный вычислительный центр информация может быть передана по более помехоустойчивым проводным или радиорелейным линиям.

Такой вариант предпочтительнее, так как несмотря на большую оперативность прямой передачи скважина — вычислительный центр она не требует применения коротковолновых радиоканалов. Качество такой передачи в большой степени зависит от мощности передатчика, типа антенных и метеорологических условий. Достоверность передачи цифровой информации коротковолновым каналом (без использования систем защиты от ошибок) на скоростях свыше 200 бод колеблется от  $10^{-2}$  до  $10^{-4}$  ошибок на 1 дв. ед.

---

<sup>1</sup> Бод — единица скорости передачи дискретных сигналов, характеризующая пропускную способность канала связи. Для беспauseной передачи, если сигнал содержит элементы одинаковой длины, скорость передачи в бодах соответствует максимальному числу элементарных посылок в секунду, т. е. численно равна скорости передачи информации в дв. ед/с. Если сигнал содержит элементы разной длины, то скорость передачи в бодах подсчитывается по формуле  $v = 1/\tau_{\text{min}}$ , где  $\tau_{\text{min}}$  — длительность самого короткого элемента сигнала (импульса или интервала).

Способы повышения достоверности передачи техническим путем (введение решающей обратной связи, применение дуплексного радиооборудования, увеличение числа подканалов и использование многократных методов модуляции) значительно усложняют аппаратуру. Повышение достоверности может быть получено при применении специальных кодов, обеспечивающих не только защиту от искажений, но и автоматическое восстановление переданной информации [13, 20, 23]. В устройствах передачи данных для ЭВМ ЕС применяется восьмиразрядный код КОИ-8. Кроме того, эта задача может быть решена путем двух- или трехкратной передачи данных с автоматической сверкой их в ЭВМ, что возможно только при малой загрузке каналов связи и сравнительно небольших массах данных.

Необходимо также учитывать, что при прямой передаче данных со скважины затруднен контроль за качеством исходных цифровых данных, а оформление служебной документации и ее передача требуют наличия в составе промыслово-геофизической партии квалифицированного специалиста.

При двухступенчатой передаче (скважина — промыслово-геофизическая контора — вычислительный центр) на первом этапе (скважина — промыслово-геофизическая контора) используются высококачественные УКВ-линии (дальностью 50—100 км), на втором — проводные или радиорелейные линии. Применение двухступенчатого способа связи с ВЦ позволяет устранить указанные недостатки прямой передачи, кроме того, информация может быть соответствующим образом преобразована, дополнена данными, полученными в предыдущих циклах исследования скважин.

Первым отечественным типом серийной аппаратуры передачи данных, позволяющих как осуществлять прямую передачу по коротковолновому радиоканалу во время исследования скважин, так и работать в стационарных условиях — передавать информацию в вычислительный центр из геофизического предприятия с использованием телефонного канала или радиорелейной линии, является аппаратура «Север».

В настоящее время разработана аппаратура для передачи по каналам связи цифровой промыслово-геофизической информации с баз геофизических предприятий в пункты обработки, а также для обмена информацией между ними. Наиболее совершенной является серийно выпускаемая аппаратура типа «Волна», которая по сравнению с аппаратурой «Луч», «Аккорд-1200» обеспечивает вдвое большую скорость передачи информации по телефонным каналам проводных и радиорелейных линий связи, передачу данных по телефонным каналам коротковолновых линий радиосвязи со скоростью до 2400 дв. ед./с.

Аппаратура типа «Волна» (рис. 85) является многоканальной аппаратурой с решающей обратной связью «без ожидания». Комплект аппаратуры состоит из передатчика и приемника

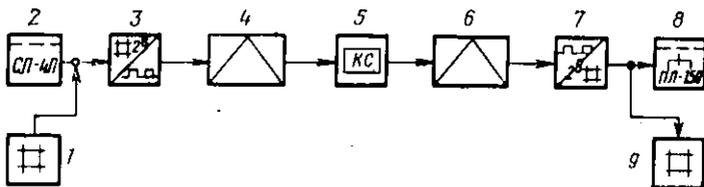


Рис. 85. Блок-схема аппаратуры передачи данных типа «Волна»

с входными и выводными устройствами, устройствами защиты от ошибок и преобразования сигналов.

Ввод информации осуществляется непосредственно без промежуточного преобразования с восьмидорожковых перфолент или девятидорожковых магнитных лент с помощью считывающего устройства 2 типа СП-4П или стандартного накопителя на магнитной ленте 1 (НМЛ). Выходными устройствами 8, 9 являются перфоратор ПЛ-150 или стандартный НМЛ.

Информация по каналу связи 5 передается блоками. Каждый блок состоит из 32 параллельных восьмиразрядных кодовых комбинаций — байтов. Для повышения помехоустойчивости передачи в приемнике и передатчике применены устройства защиты от ошибок 3, 7, в которых осуществляются кодирование информации и локализация ошибок по подблокам. Вероятность ошибки передачи информации с использованием устройства защиты снижается с  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ .

Устройства преобразования сигналов 4, 6 (помимо своего прямого назначения) позволяют использовать для передачи информации бесподстроечные коротковолновые радиостанции «Полоса-2» или «Роддик».

В США применяется ряд систем для передачи геофизической информации, в частности, фирмой «Плюмберже» они используются для связи скважин в Северном море.

Передача данных со скважины на базовые станции обычно производится сразу после проведения геофизических исследований со скоростью 600 бод однополосным передатчиком мощностью 300—500 Вт с направленной антенной. Частота радиопередачи 1,5—4 МГц. Так как дальность радиосвязи не превышает расстояния в 360 км, то передача осуществляется через промежуточный пункт (станции морского радио Северного моря).

Связь промежуточного пункта с базовыми станциями осуществляется по телефону. Для передачи между базовыми станциями используют международную телефонную систему, которая иногда включает и спутниковую связь. Скорость передачи по телефонным каналам обычно равняется 1200 бод.

В вычислительный центр данные передаются либо со скважины, либо с базовой станции. Обработанные данные с вычислительного центра могут быть переданы на любую базовую

станцию или другой вычислительный центр, а также в управления нефтяных компаний.

Система позволяет использовать промышленно-геофизические данные как при цифровой, так и при аналоговой регистрации. Формат записи цифровых данных на магнитной ленте соответствует формату, принятому в ЭВМ. Шаг дискретизации по глубине скважины 15 см. За один цикл исследований выполняется опрос до 22 измеряемых параметров.

При удалении морских скважин от пункта обработки до 100—150 км для передачи данных используют комплекс аппаратуры ДАРТ, в котором выход аналого-цифрового преобразователя в процессе исследований подключается к передатчику, нагруженному на УКВ-линию связи; аппаратура также хорошо работает с телефонной линией связи.

Структурная схема аппаратуры ДАРТ изображена на рис. 86.

Комплекс аппаратуры включает в себя устанавливаемые на скважина устройства преобразования измеряемых в скважине сигналов в цифровой код и передачи их по каналу связи и устройства для приема переданных данных, преобразования их для записи на аналоговых регистраторах в принятом масштабе глубин.

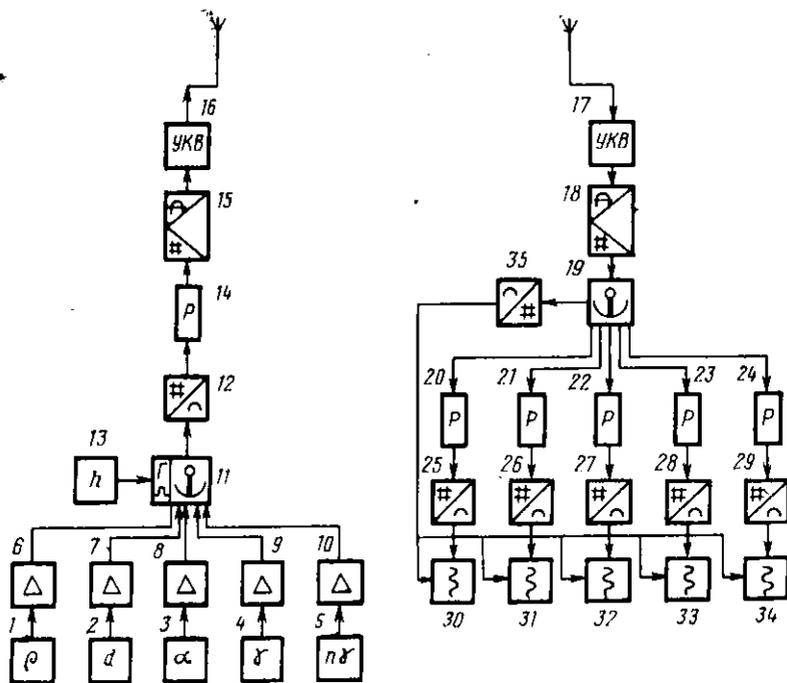


Рис. 86. Структурная схема аппаратуры ДАРТ

Сигналы с выхода схемы телеизмерения геофизических параметров 1—5 подаются на усилители 6—10. С помощью коммутатора 11 вход аналого-цифрового преобразователя 12 поочередно подключается к выходам усилителей и датчику глубин 13; коды глубин передаются отдельным словом. С выхода аналого-цифрового преобразователя двоичные коды поступают на регистр памяти 14, а затем на модулятор 15 и УКВ-передатчик 16.

В вычислительном центре сигналы принимаются УКВ-приемником 17, преобразуются дешифратором 18 в двоичный код и с помощью селектора 19 распределяются по соответствующим измерительным каналам на регистры памяти 20—24. Далее цифро-аналоговые преобразователи 25—29 преобразуют коды в напряжения постоянного тока, записываемые гальванометрами 30—34 многоканального регистратора. Лентопротяжный механизм регистратора синхронизируется с движением скважинного прибора с помощью следящей системы, которая включает в себя датчик глубин 13 канал связи и цифро-аналоговый преобразователь 35. Принятый в аппаратуре ДАРТ режим работы позволяет осуществлять воспроизведение информации в реальном масштабе времени.

Под скважинной геофизической аппаратурой понимают совокупность измерительных устройств, предназначенных для определения различных физических параметров в скважинах. В состав аппаратуры в общем случае (см. гл. I, § 3) входят скважинный прибор и наземные блоки, соединяемые геофизическим кабелем. Поскольку скважинная аппаратура эксплуатируется совместно с геофизическими лабораториями и станциями, основные узлы лабораторий и станций входят в состав телеизмерительной системы скважинной аппаратуры и обеспечивают ее нормальную работу. В частности, запись результатов измерения скважинной аппаратурой, ее электропитание, а также контроль процесса измерения осуществляют с помощью соответствующих устройств геофизической лаборатории (станции).

Одним из основных требований при разработке скважинной геофизической аппаратуры, вытекающих из условий ее эксплуатации, является максимальное упрощение части измерительной схемы, опускаемой в скважину в процессе исследований. Увеличение числа токопроводящих жил геофизического кабеля позволяет упростить скважинный прибор, повысить его надежность и долговечность, улучшить метрологические характеристики аппаратуры, просто разделить питающие и измерительные цепи. Например, при проведении электрометрии на многожильном кабеле в скважину опускают только зонд, а остальные части измерительной схемы располагают на поверхности. В то же время для измерения кажущегося сопротивления пород на одножильном кабеле необходимо размещать часть измерительной схемы в скважинном приборе, опускаемом в скважину вместе с зондом.

При уменьшении числа токопроводящих жил кабеля в общем случае усложняется измерительная схема аппаратуры и возрастает необходимость размещения части ее в скважине. Такой путь построения аппаратуры диктуется следующими соображениями. Для нормальной работы зондов или датчиков некоторых типов геофизической аппаратуры требуется электропитание, которое невозможно или нецелесообразно подавать с поверхности по кабелю (высокое напряжение, большая величина или частота тока). Источник питания в этом случае рациональнее размещать в непосредственной близости от зонда или датчика, т. е. в скважинном приборе. Сигнал, поступающий с датчика или приемника зонда, часто имеет небольшую мощность или вид, неудобный для передачи по кабелю, поэтому возникает необходимость соответствующего преобразования

сигнала с помощью устройств, сосредоточенных в скважинном приборе. Выходные параметры этих устройств должны быть согласованы с электрическими параметрами геофизического кабеля, что нередко вызывает дополнительные усложнения схемы.

Таким образом, в большинстве случаев измерительная схема геофизической аппаратуры включает две части, одна из которых располагается в скважинном приборе, а другая — на поверхности.

Кроме того, особенности построения схем отдельных видов геофизической аппаратуры связаны с характером питания скважинного прибора, зонда или датчика. При этом всегда стремятся к минимальному расходу мощности в скважинном приборе и уменьшению потерь в кабеле.

Реальные схемы скважинных приборов дополняются устройствами, обеспечивающими создание физического поля в горных породах и скважине, измерение и преобразование информации, градуировку телеизмерительной системы аппаратуры, контроль стабильности ее работы и т. п. Каждую из указанных задач можно решить с помощью функционального узла, т. е. конструктивно и схематически завершенного устройства.

Использование функциональных узлов в качестве базы для построения приборов — одна из характерных черт метода проектирования аппаратуры, получившего уже достаточное распространение в радиоэлектронике, — метода функционального проектирования. Основные идеи этого метода положены в основу создаваемой в геофизическом приборостроении системы агрегатного комплекса средств геофизических приборов (АСГП).

## **§ 1. АППАРАТУРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СКВАЖИН**

В данном параграфе ограничимся рассмотрением принципов построения электрометрической аппаратуры, использующей в качестве линии связи одножильный бронированный кабель и выполненной на основе обобщенной структурно-функциональной схемы скважинной телеизмерительной системы (см. гл. I, § 3).

### **Общие принципы построения аппаратуры**

Токовые электроды зондов электрометрической аппаратуры питаются стабильным переменным током синусоидальной или импульсной формы. Переменный ток обычно передается по кабелю от источников, расположенных на поверхности, а иногда генерируется в скважинном приборе. На основании положений, изложенных в предыдущей главе, частота тока питания электродов зондов при работе на одножильном кабеле выбирается равной 300—400 Гц.

Характеристики переменного электромагнитного поля измеряют методами индукционного и диэлектрического каротажа.

Индукционный каротаж заключается в измерении напряженности магнитного поля вихревых токов, индуцированных в породах магнитным полем зонда частотой 10—50 кГц. Диэлектрический каротаж основан на измерении напряженности или фазы высокочастотного (десятки мегагерц) магнитного поля. В связи с этим аппарата индукционного и диэлектрического каротажа включает соответствующие генераторы высокочастотных колебаний, располагающиеся в скважинном приборе.

При разработке и эксплуатации аппаратуры необходимо учитывать специфику применяемых зондов.

Так, специфика комплекса бокового каротажного зондирования (БКЗ) состоит в использовании выносного зонда, располагающегося на изолированном участке бронированного кабеля длиной порядка 15 м («коса»). При этом, как правило, не допускается электрическое соединение оплетки кабеля с корпусом скважинного прибора (применяется изолированный подвес).

В аппаратуре бокового каротажа необходимо применять «косу» повышенной длины (минимум 25 м) для размещения на достаточном удалении обратного измерительного электрода ( $N_{\infty}$ ). Оплетка кабеля используется в качестве токового электрода ( $B$ ), и соединение ее с корпусом прибора недопустимо.

Для измерения потенциалов собственной поляризации (ПС) следует применять отдельный неполяризующийся (свинцовый) электрод. На расстоянии нескольких метров от электрода недопустимы присутствие заземленных металлических масс и корродирующих деталей. Это необходимо соблюдать с целью исключения шунтирования потенциала ПС и влияния э. д. с. гальванокоррозии.

Сигнал информации, поступающий с измерительных электродов зондов БКЗ, БК, МБК, имеет вид амплитудно-модулированного напряжения, величина которого пропорциональна кажущемуся сопротивлению горных пород, а несущая частота соответствует частоте тока питания токовых электродов. Дальнейшие преобразования сигнала определяются особенностями телеизмерительной системы, положенной в основу построения электрометрической аппаратуры.

Высокочастотный сигнал с измерительных катушек индукционных зондов обычно также модулируется по амплитуде (частотой 400 Гц) перед последующими преобразованиями.

Напряжение  $U_{\text{ПС}}$  передается к наземной регистрирующей аппаратуре, как правило, без каких-либо дополнительных преобразований.

### **Обобщенная функциональная схема электрометрической аппаратуры**

Электрометрия нефтяных и газовых скважин в настоящее время основана на боковом каротажном зондировании, предусматривающем измерение КС несколькими зондами различной

длины. Для обработки материалов БКЗ необходимо также иметь информацию об удельном сопротивлении промывочной жидкости и диаметре скважины в исследуемом интервале разреза.

С целью сокращения времени на производство работ и повышения точности получаемых результатов необходимо, чтобы весь комплекс БКЗ был выполнен за ограниченное число спуско-подъемных операций. В настоящее время для приведения БКЗ и стандартной электрометрии используют комплексную аппаратуру, выполненную на основе многоканальной телензиметрической системы с частотным разделением каналов и частотной модуляцией. Данная система (рис. 87) содержит четыре высокочастотных и один гальванический каналы связи, что позволяет за одну спуско-подъемную операцию обеспечить одновременную регистрацию, например, четырех кривых кажущегося сопротивления различными зондами и кривой потенциала ПС.

Питание скважинного прибора и токовых электродов зондов осуществляется переменным током частотой 300 Гц (или 400 Гц) от генератора БП 1, установленного на поверхности. В зависимости от размеров зондов (зонды БКЗ, микрозонды, резистивиметр) в качестве токового могут быть использованы электроды  $A_1$ ,  $A_2$  или  $A_3$ .

Сигналы информации с измерительных электродов  $M_1N_1$ — $M_4N_4$  зондов поступают на входные трансформаторы  $Tr1$ — $Tr4$ , с помощью которых приводятся на каждом из имеющихся пределов измерения к одинаковому уровню (0—2,1 В). Пройдя через многопозиционный переключатель 14, сигналы поступают на частотные модуляторы 15. Здесь несущие частоты 7,8; 14,0; 25,7 и 45,0 кГц<sup>1</sup> модулируются измеряемыми сигналами, после чего суммируются на общем резисторе  $R_0$ , усиливаются по мощности усилителем 16 и поступают на центральную жилу кабеля ЦЖК через фильтр верхних частот 17. Второй жилой для сигнала служит оплетка кабеля ОК.

Поскольку токовый электрод  $A_2$  (или  $A_3$ ) связан по постоянному току непосредственно с центральной жилой кабеля, его используют одновременно для измерения разности потенциалов ПС. Таким образом, канал ПС совмещен с токовой цепью скважинного прибора.

Многопозиционный переключатель 14 обеспечивает переключение комплектов зондов, изменение пределов измерения, а также калибровку схемы по нуль-сигналу при закорачивании входов частотных модуляторов и по стандарт-сигналу, когда с помощью трансформатора  $Tr6$  на входы модуляторов подается напряжение, снимаемое с эталонного резистора  $R_3$ . Изме-

<sup>1</sup> Могут быть использованы и другие комбинации частот, например, 5,0; 11,5; 23,5 и 45,0 кГц.

нение позиций переключателя осуществляется с помощью схемы коммутации (на рис. 87 не показана) по команде с поверхности.

Входные цепи электронных ламп скважинного прибора питаются от выпрямителя БП 19, включенного в цепь токового электрода через трансформатор *Тр7*. Для питания накальных цепей ламп используются отдельные обмотки НЛ этого трансформатора или применяется дополнительный трансформатор.

Для разделения переменного тока питания скважинного прибора, высокочастотных сигналов информации и разности потенциалов ПС служат фильтры 18.

На поверхности модулированные высокочастотные сигналы выделяются фильтром верхних частот 3. Необходимый уровень сигнала поддерживается attenuатором, выполненным по схеме делителя напряжения на резисторах *R1—R3*. Резистор *R2* со ступенчатым переключением позволяет разделить сигнал, поступающий на вход схемы, в отношениях от 1:1 до 1:100. Раз-

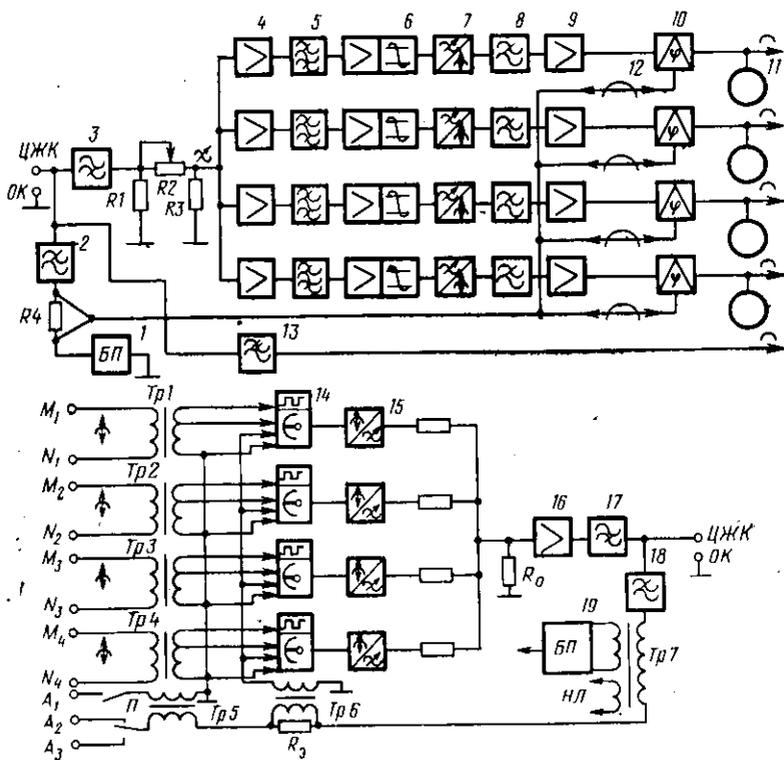


Рис. 87. Обобщенная функциональная схема аппаратуры электрометрии скважин

деление сигналов по измерительным каналам осуществляется системой параллельно включенных полосовых фильтров 5. Для развязки последних используются усилители 4.

Система усилитель-ограничитель 6 — частотный детектор 7 вместе с фильтром нижних частот 8 каждого канала образует демодулятор ЧИМ-сигналов. В усилителе-ограничителе происходит преобразование синусоидальных частотно-модулированных колебаний в сигналы, имеющие вид прямоугольных импульсов постоянной амплитуды. Частота следования импульсов пропорциональна амплитуде напряжения, снимаемого с соответствующих измерительных электродов зондов. Частотный детектор осуществляет преобразование ЧИМ-сигнала в напряжение, пропорциональное частоте следования импульсов. В результате выделяется переменная составляющая частоты 300 Гц (или 400 Гц), амплитуда которой пропорциональна значению входного сигнала.

С выхода частотного детектора переменное напряжение через фильтр нижних частот 8 подается на измерительный усилитель 9, а затем — на фазочувствительный выпрямитель 10. Последний позволяет обеспечить стабильность нуля, высокий рабочий диапазон и помехоустойчивость системы по отношению к индуктивным и емкостным наводкам. Опорное напряжение для работы фазочувствительного выпрямителя подается с резистора  $R_4$ , включенного в цепь питания скважинного прибора. Согласование фаз выпрямленного и управляющего напряжений осуществляется регулятором фазы 12.

Выпрямленное напряжение подается в соответствующий измерительный канал регистрирующего прибора. Для контроля работы системы служат миллиамперметры 11, включенные на выходе каждого канала. Сигнал ПС через фильтр 13 поступает непосредственно на вход регистратора. Фильтр 2 препятствует проникновению высокочастотного напряжения и сигнала ПС в цепь генератора 1.

Возможен также вариант телеизмерительной системы, в котором используется комбинированное питание скважинного прибора: токовые электроды  $A_1$ ,  $A_2$  или  $A_3$  питаются переменным, а электронная схема — постоянным током. В этом случае скважинный прибор может быть упрощен, однако исключается возможность одновременного измерения кажущегося сопротивления и ПС.

Рассмотренная телеизмерительная система может быть применена не только для проведения электрометрических исследований, но и для работы с различными датчиками, включающими резистивные, индуктивные и другие преобразователи. Питание датчиков осуществляется от токовой цепи непосредственно или через трансформатор  $Tr_5$ ; выходы подключаются к частотным модуляторам.

## Технико-эксплуатационные характеристики и особенности образцов электрометрической аппаратуры

В практике геофизических исследований скважин применяется несколько типов электрометрической аппаратуры, различающихся видом используемого поля, устройством зондов, особенностями конструкции и электрической схемы, технико-эксплуатационными характеристиками. В ряде случаев аппаратура предназначена для одного метода (например, БКЗ или ИК). Многие образцы аппаратуры разработаны для комплекса электрометрических исследований (БКЗ + БК, БК + ИК).

Принципиальные схемы электрометрической аппаратуры выполнены на базе рассмотренной выше телеизмерительной системы с частотным разделением каналов и частотной модуляцией. Это дало возможность наземную часть аппаратуры сделать в виде унифицированного блока, который может эксплуатироваться с рядом скважинных приборов. Таким блоком является серийно выпускаемая измерительная панель частотной модуляции ИПЧМ, структурная схема которой полностью соответствует наземной части скважинной телеизмерительной системы, показанной на рис. 5. При работе с отдельными скважинными приборами панель дополняют соответствующим блоком управления, который одновременно обеспечивает согласование выходных параметров скважинного прибора с входными параметрами унифицированной панели.

Разработан унифицированный блок частотной демодуляции Б-1, работающий совместно с унифицированным блоком управления Б-2. Электрическая схема блока Б-1 принципиально не отличается от схемы панели ИПЧМ.

Наряду с панелью ИПЧМ в настоящее время применяют унифицированную измерительную панель ИПЧМ-2, которая обеспечивает одновременное преобразование в напряжение постоянного тока до четырех частотно-модулированных сигналов и измерение отношения амплитуд двух сигналов постоянного тока. Кроме того, панель позволяет обрабатывать до восьми информационных сигналов при частотно-временном разделении каналов.

В комплект панели включены два специальных блока: блок имитатора ЧМ-сигналов и блок согласования. Первый блок предназначен для имитации сигналов, аналогичных поступающим со скважинных приборов, что дает возможность проверять работоспособность панели в различных режимах измерения. Блок согласования предназначен для согласования работы панели ИПЧМ-2 с блоками управления скважинных приборов, которые были разработаны ранее для работы с панелью ИПЧМ.

В табл. 9 приведены сравнительные характеристики панелей ИПЧМ, ИПЧМ-2 и Б1.

Таблица 9

Основные характеристики унифицированных измерительных панелей электрометрической аппаратуры

Техническая характеристика	ИПЧМ	ИПЧМ-2	Б-1
Число частотных каналов	4	4	4
Несущие частоты, кГц	7,8; 14; 25,7; 45	7,8; 14; 25,7; 45	7,8; 14; 25,7; 45
Поднесущая частота, Гц	300—400	300—400	300
Динамический диапазон входных ЧМ-сигналов	25	33	—
Число каналов измерителя отношений амплитуды двух сигналов постоянного тока	—	2	—
Нелинейность передаточной характеристики, %	3	3	3
Диапазон измерения отношений амплитуд сигналов постоянного тока	—	От 0,5 : 1 до 500 : 1	—
Величина напряжения на выходе панели, мВ	250	1000	5000
Спротивление нагрузки, Ом	100	1200	2000

Для электрометрии скважин чаще всего применяют комплексный скважинный прибор КСП. Модификации этого прибора КСП-1, КСП-М, КСП-2 и КСП-3. Все они основаны на применении телеизмерительной системы с частотной модуляцией и частотным разделением каналов. В КСП-3 осуществляется, кроме того, и временное разделение каналов, что обеспечивает проведение исследования скважин методом бокового каротажного зондирования за одну спуско-подъемную операцию.

Аппаратура КСП-3 рассчитана на работу с каротажными станциями, снабженными регистраторами, обеспечивающими одновременную регистрацию восьми параметров. При работе с трехжильным кабелем может регистрироваться и диаграмма ПС. Регистрация ПС при работе с одножильным кабелем проводится за отдельный спуск.

Аппаратура (рис. 88) состоит из скважинного прибора, включающего телеизмерительный блок *I* и зонд *II*, и блока управления *12* для согласования скважинного прибора с унифицированной панелью частотной модуляции ИПЧМ-2 *13*.

Зонд включает токовый электрод *A* и семь пар измерительных электродов  $M_1N_1—M_7N_7$ . Электродом *B* служит оплетка кабеля. Телеизмерительный блок питается постоянным стабилизированным током 0,4 А от унифицированного источника УИП-К, зонд — стабилизированным переменным током 0,475 А частотой 400 Гц от унифицированного генератора УГ-1.

Электрод  $ПС_1$  (для записи потенциала собственной поляризации) подключается непосредственно к одной из жил трех-

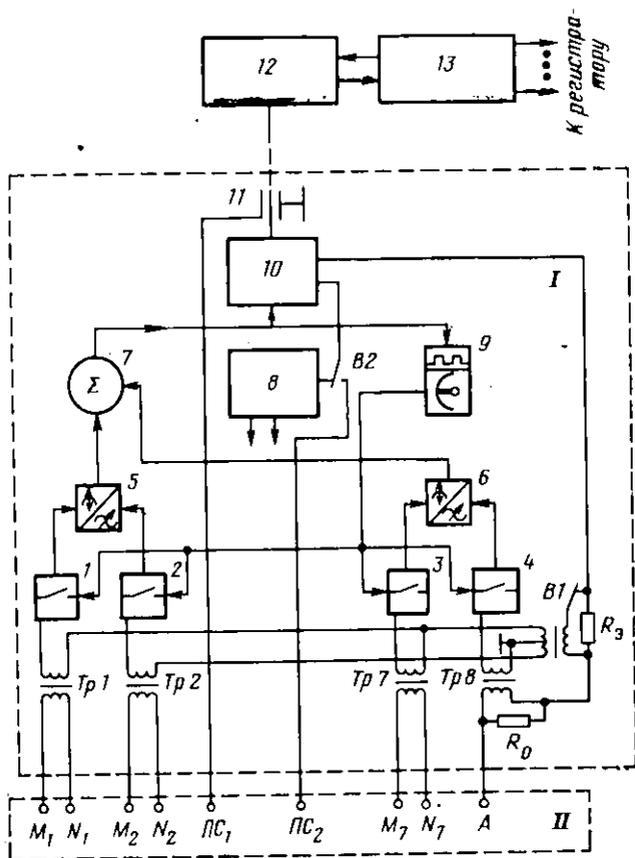


Рис. 88. Функциональная схема аппаратуры КСП-3

жильного кабеля  $11$ , а электрод  $PC_2$  — к центральной жиле одножильного кабеля через контакты переключателя  $B2$  при обеспеченном скважинном приборе.

Напряжения с электродов  $M_1N_1—M_7N_7$  и напряжение, пропорциональное току питания (с резистора  $R_0$ ), поступают на входные трансформаторы  $Tr1—Tr8$ , коэффициент трансформации которых подбирают таким образом, чтобы при стабилизированном токе питания электрода  $A$  амплитуды измеряемых напряжений на выходе трансформаторов были пропорциональны величинам КС.

С выходов трансформаторов  $Tr1—Tr8$  информационные сигналы поступают на ключи, каждая пара которых (например,  $1, 2$  или  $3, 4$ ) попеременно подключает выходы одного из двух трансформаторов к модулятору  $5$  или  $6$ . Частота переключения  $12,5$  Гц задается коммутатором  $9$ .

В аппаратуре имеются четыре частотных модулятора и восемь ключей (на блок-схеме показаны только два модулятора и четыре ключа). На каждый модулятор приходят два сигнала, разделенные во времени. С выходов модуляторов частотно-модулированные сигналы поступают на смеситель 7 и усиленные по мощности подаются по кабелю на вход блока управления 12. Разделительные элементы 10 защищают усилитель мощности от питающего напряжения и предотвращают шунтирование высокочастотных сигналов несущих частот низкоомной цепью питания электрода А. Электронная часть скважинного прибора питается постоянным током через блок 8.

Для установки масштабов записи КС в аппаратуре предусмотрено такое положение стандарт-сигнала, при котором переключателем В1 на входы ключей подается напряжение с каллибровочного резистора  $R_n$ , включенного последовательно в цепь питания электрода А.

Блок управления 12 служит для подачи питания на скважинный прибор, управления его работой, разделения токов питания и информационных сигналов, передачи на измерительную панель ИПЧМ-2 13 частотно-модулированных сигналов, формирования коммутирующего напряжения и синхронизирующего импульса для коммутатора 9 скважинного прибора, а также для временного разделения сигналов на выходе панели ИПЧМ-2 и подачи их на регистратор.

При выполнении трехэлектродного бокового каротажа используются комплексные приборы АБКТ и Э-1, которые являются последними серийными моделями. Они обеспечивают также проведение бокового каротажного зондирования и запись диаграмм потенциала собственной поляризации ПС. Полный комплекс исследований осуществляется за четыре цикла (за четыре спуско-подъемные операции).

Рассмотрим работу аппаратуры Э-1 по функциональной схеме (рис. 89).

Ток питания частотой 300 Гц подается по кабелю (ЦЖК—ОК), проходит через дроссель  $D_p$ , первичную обмотку трансформатора ТР7 блока питания 6, цепь подготовительного реле Р2, нормально замкнутый контакт В5, реле Р1, эталонный резистор  $R_n$ . Далее в зависимости от цикла измерения ток через плату переключателя В4 поступает на токовый электрод А зонда БКЗ или на экраный электрод А, зонда бокового каротажа.

В цикле стандартной электрометрии сигналы с измерительных электродов МВ (на схеме показано три пары электродов) подаются на входные трансформаторы Тр1, Тр2 и Тр3. Со вторичных обмоток трансформаторов сигналы через платы В1 и В3 переключателя поступают на модуляторы 2 и 4, а через плату В2 и предварительный усилитель 1 — на модулятор 3. Модуляторы осуществляют преобразование амплитудно-модулированных в частотно-модулированные сигналы с несущими частотами

7,8; 14 и 25,7 кГц. Просуммированные сигналы усиливаются в усилителе 5 и через конденсатор  $C$  подаются по жиле кабеля в наземную часть телеизмерительной системы. Сигналы для записи трех кривых КС получаются в наземном блоке  $B1$  в результате преобразований, которые аналогичны описанным при пояснении работы обобщенной схемы (см. рис. 87).

Трансформатор  $Tr6$  совместно с резистором  $R_3$  образуют схему стандарт-сигнала.

В цикле бокового коротажа ток через катушку  $B4$  переключателя поступает на экранные электроды  $A_6$  зонда. Центральный электрод  $A_0$  соединен с экранным через шунт малого сопротивления ( $\sim 0,01$  Ом), роль которого выполняет приведенный к первичной обмотке трансформатора  $Tr5$  резистор  $R_ш$ . При таком подключении все три электрода зонда оказываются под одним потенциалом. Это обуславливает фокусировку тока центрального электрода. Потенциал экранных электродов относительно удаленного электрода  $N_{уд}$  трансформатором  $Tr4$  приводится к необходимому уровню и через катушку переключателя  $B3$  подается на модулятор 4. Сигнал, пропорциональный току центрального электрода, снимается с трансформатора  $Tr5$  и поступает через катушку переключателя  $B1$  на модулятор 2 или через катушку переключателя  $B2$  на усилитель 1 и далее на модулятор 3. Использование для измерения тока центрального электрода двух каналов позволяет увеличить диапазон измерения. В дальнейшем преобразование сигналов происходит так же, как и в цикле БКЗ. С выхода блока частотной демодуляции  $B1$  сигналы поступают в блок логарифмического преобразования  $B4$ . С блока  $B4$  сигнал в виде постоянного тока подается на регистратор и записывается в логарифмическом масштабе.

Переключатель  $B1-B4$  позволяет калибровать измерительные каналы по стандарт- и нуль-сигналам, подключать к ним зонды стандартной электрометрии или переходить на измерение зондом бокового коротажа, выбирать необходимые пределы измерения. Для этого с поверхности подается импульс

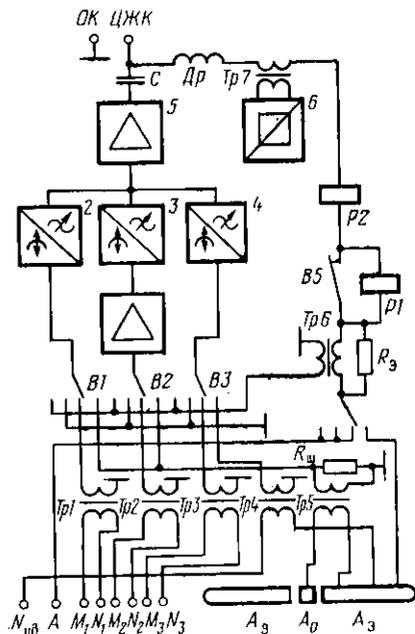


Рис. 89. Функциональная схема аппаратуры Э-1

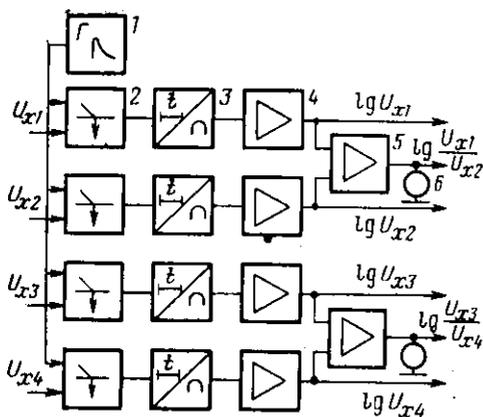


Рис. 90. Функциональная схема блока логарифмических преобразователей Б4

постоянного тока. Под действием этого импульса подготовительное реле  $P2$ , размыкая контакт  $B5$ , включает в цепь тока обмотку исполнительного реле  $P1$ , которое осуществляет перевод контактов переключателя в соседнее положение. Напряжение стандарт-сигнала снимается с эталонного резистора  $R_3$ . В положении нуль-сигнал входные цепи замыкаются на корпус.

Блок логарифмического преобразования  $B4$  (рис. 90) предназначен для преобразования напряжений постоянного тока в сигналы, пропорциональные логарифму этих напряжений и логарифму отношения двух напряжений.

Для получения сигнала, пропорционального логарифму входного напряжения, его предварительно преобразовывают во временной интервал (рис. 90 и 91).

Генератор экспоненциального напряжения  $1$  периодически за время  $T_n$  подготавливается к рабочему циклу. Затем в течение временного интервала  $T_p$  формируется экспоненциально падающее напряжение  $U_s = U_0 e^{-t/T_s}$ . Это напряжение подается на один из входов сравнивающего устройства  $2$ . На это же устройство подается входное напряжение  $U_x$ . Начиная с момента совпадения  $t_x$  напряжений  $U_x$  и  $U_s$ , устройство  $2$  вырабатывает

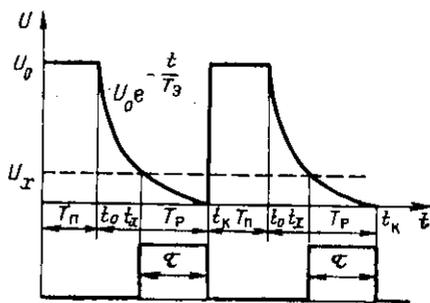


Рис. 91. Пояснение принципа работы логарифмических преобразователей

импульс длительностью  $\tau$ . Интервал времени  $\tau$  пропорционален логарифму входного напряжения:

$$\tau = T_p + T_s \ln \frac{U_x}{U_0}.$$

Блок 3 выполняет преобразование промодулированного по логарифмическому закону времени интервала  $\tau$  в напряжение, т. е. напряжение на его выходе пропорционально логарифму входного сигнала  $U_x$ .

Усилитель 4 служит для согласования высокоомного выхода блока 3 с последующими цепями.

Суммирующий усилитель 5, подключенный к выходам двух каналов логарифмического преобразователя, осуществляет в логарифмической форме операцию деления двух информационных сигналов  $U_{x1}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x3}$ ,  $U_{x4}$ . Прибор 6 служит для контроля за работой преобразователя.

Для проведения микрокаротажа выпускают аппаратуру типа МДО-3, МБК, Э-2 и МБКУ. Комплексная аппаратура бокового микрокаротажа типа МБКУ и Э-2 отличается от аппаратуры МБК наличием управляемого прижимного устройства с электроприводом (см. гл. III, § 1).

Рассмотрим более подробно принцип работы и особенности аппаратуры МБКУ. Аппаратура МБКУ предназначена для исследования скважин методом микробокового каротажа двухэлектродным зондом (см. рис. 36) с одновременным измерением диаметра скважины. Аппаратура рассчитана на работу с серийными геофизическими лабораториями, оснащенными измерительной панелью ИПЧМ (или ИПЧМ-2) и унифицированным источником питания УИП-К (УВК-1).

Аппаратура состоит из скважинного прибора и блока управления, соединенных одножильным бронированным кабелем. Скважинный прибор содержит электронный и электромеханический блоки.

Благодаря действию автокомпенсационного усилителя (АКУ), потенциалы центрального и экранного электродов равны, поэтому ток центрального электрода  $I_0$  в породе распространяется перпендикулярно к поверхности зонда и стенке скважины в виде тонкого пучка. Расхождение этого пучка происходит на расстоянии от стенки скважины, определяемом размером зонда, толщиной и сопротивлением глинистой корки и соотношением сопротивлений пласта и промывочной жидкости.

На результат измерения  $\rho_k$  мало влияют сопротивление промывочной жидкости и глинистая корка (толщиной до 10—15 мм); они влияют только на отношение величины экранного тока к основному. Для данного зонда это отношение может изменяться от 50 в однородной среде и пресной промывочной жидкости до  $10^5$  в высокоомном пласте и соленой промывочной жидкости.

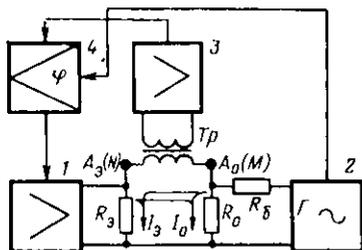


Рис. 92. Эквивалентная схема автокомпенсатора

При глинистой корке толщиной более 15 мм в результате измерения вводят поправки по соответствующим палеткам.

Принцип работы автокомпенсатора поясняется эквивалентной схемой (рис. 92). Центральный электрод  $A_0$  питается переменным током  $I_0$  от генератора 2. Стабильность тока  $I_0$  обеспечивается включением в цепь центрального электрода  $A_0$  высокоомного балластного резистора  $R_6$ , по величине во много раз превышающего изменение сопротивления пород  $R_0$  против электрода  $A_0$ . Питание экранного электрода осуществляется от выходного каскада автокомпенсационного усилителя 1 током  $I_3$ . Последний имеет ту же частоту и фазу, что и ток  $I_0$ .

Величина тока  $I_3$  непрерывно регулируется таким образом, чтобы разность потенциалов между экранным и центральным электродами сводилась к нулю. Эта разность потенциалов передается трансформатором  $Tr$  на входной каскад 3 автокомпенсационного усилителя, выпрямляется фазочувствительным детектором 4 и управляет сигналом выходного каскада 1.

Функциональная схема аппаратуры МБКУ изображена на рис. 93.

Блоки 1, 2, 3 и 4 составляют схему автокомпенсатора. Потенциал  $U_0$ , измеряемый между экранным электродом  $A_0$  и корпусом прибора, подается в телеизмерительную систему через переключатель 6. Датчик измерения диаметра скважины 5 питается от генератора 2 током около 1,5 мА частотой 400 Гц. Напряжение, снимаемое с датчика, через переключатель 6 подается в телеизмерительную систему.

В качестве телеизмерительной системы используется двухканальная АМ—ЧМ-система с частотным разделением каналов, в состав которой входят два преобразователя 8 и 9 с частотной модуляцией. Несущие частоты преобразователей 7, 8 и 14 кГц. С выхода преобразователей сигналы поступают на сумматор 7 и через конденсатор  $C$  — в кабель 10. Одновременно на сумматор 7 подается напряжение частоты 400 Гц, снимаемое с генератора 2; оно является опорным сигналом для фазочувствительных детекторов панели ИПЧМ 14.

Электронная схема скважинного прибора питается через блок управления 13 постоянным стабилизированным током

300 ± 10 мА от выпрямителя УИП-К 15. Для питания двигателя 12 электрохимического блока используется ток промышленной частоты. Блок автоматики и коммутации 11 обеспечивает многократное управление работой двигателя (раскрытие — закрытие), а также автоматическое отключение его в конечных положениях рычажной системы.

Скважинный прибор может работать в следующих режимах: «Раскрытие», «Закрытие», «Нуль-сигнал», «Стандарт-сигнал» и «Измерение». Коммутация указанных режимов осуществляется путем кратковременного разрыва цепи питания скважинного прибора и повторного ее восстановления.

В режиме «Нуль-сигнал» переключатель 6 закорачивает первичные обмотки трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ . В режиме «Стандарт-сигнал» первичная обмотка трансформатора  $Tr1$  подключается с помощью переключателя 6 к отдельной обмотке генератора 2; напряжение для канала измерения диаметра скважины снимается с генератора 2. В режиме «Измерение» на трансформатор  $Tr1$  подается напряжение, пропорциональное величине кажущегося удельного сопротивления, а на первичную обмотку трансформатора  $Tr2$  — сигнал с датчика измерения диаметра, пропорциональный диаметру скважины.

В блоке управления 13 наземной части аппаратуры размещены органы управления скважинным прибором, блок

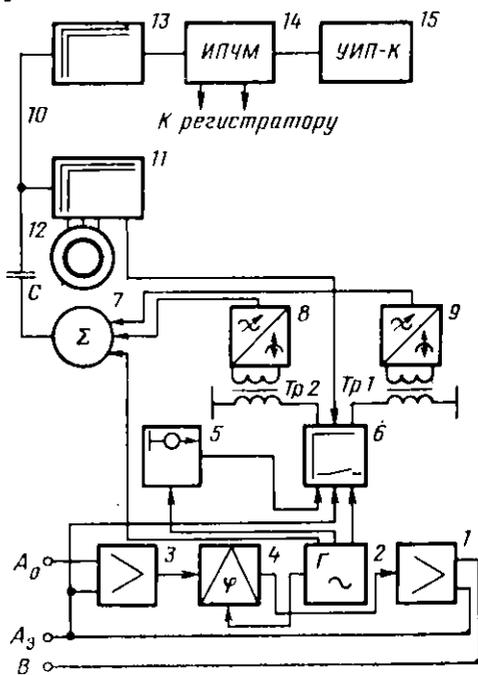


Рис. 93. Функциональная схема аппаратуры МБКУ

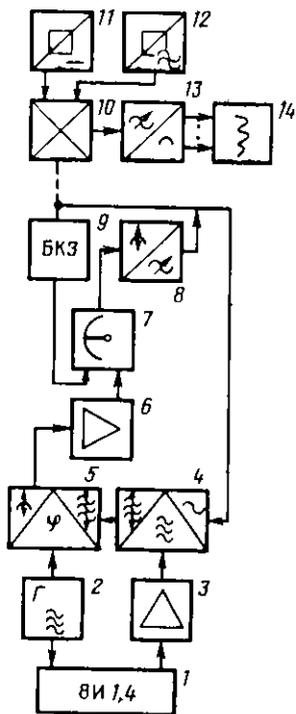


Рис. 94. Функциональная схема аппаратуры АИК-4

фильтров, усилитель опорного напряжения, элементы коммутации и питания прибора. Панель ИПЧМ 14 преобразует ЧМ-сигналы каналов в постоянное напряжение, регистрируемое осциллографом геофизической лаборатории.

Электромеханический блок МБКУ состоит из рычажной системы и привода, который служит для управления этой системой, а также элементов, служащих для преобразования величины диаметра скважины в электрический сигнал.

Для проведения индукционного каротажа в настоящее время применяют несколько типов аппаратуры (ПИК-1М, АИК-3, Э-3 и др.), различающихся используемым зондом, электрической схемой и конструкцией, а также эксплуатационными характеристиками. Наиболее совершенной является комплексная аппаратура типа АИК-4, в которой применен зонд 8И1,4 (см. рис. 37, д) с односторонней внешней фокусировкой, имеющей большую глубину исследования. Кроме индукционного каротажа аппаратура обеспечивает проведение БКЗ и стандартной электрометрии.

Полный комплекс измерений аппаратурой осуществляется за четыре спуско-подъема скважинного прибора при использовании одножильного кабеля и за три спуско-подъема при использовании трехжильного кабеля.

Аппаратуру АИК-4 эксплуатируют совместно с геофизическими лабораториями, оснащенными унифицированными источниками питания (УИП-К, УГ-1) и унифицированной панелью ИПЧМ. Функциональная схема аппаратуры изображена на рис. 94. Питание скважинного прибора осуществляется постоянным током от выпрямителя УИП-К 11 и переменным током частотой 300 Гц от генератора УГ-1 12.

Генераторные катушки индукционного зонда 1 питаются переменным током частотой 20 кГц от генератора 2. Вторичное электромагнитное поле вихревых токов возбуждает в измерительных катушках зонда сигнал, который поступает на усилитель высокой частоты 3. Усиленный сигнал ВЧ модулируется по амплитуде модулятором 4, который питается переменным напряжением частотой 300 Гц. Модулированный сигнал через катодный повторитель подается на фазочувствительный детектор 5, управляемый генератором 2. Детектор преобразует высокую

Таблица 10

## Технико-эксплуатационные характеристики аппаратуры для электрометрических исследований скважин

Технические характеристики	КСП-1	Э-1	МБКУ	Э-3М	ЛИК-4
Пределы измерения, Ом·м: зонды БКЗ резистивиметр зонды БК остальные зонды уста- новки	200; 1000 20 — 200; 1000; 5000 —	200; 1000; 5000 — 2000; 10 000 — —	— — 0,2—200 — —	— — — 0,2—200; 1—1000 — 1—100; 0,5—50	1—5000 0,1—20 — — — 10—2000
Основная погрешность изме- рения, %:	—	$\pm \left( 5 + 0,1 \frac{X_k}{X} \right)$	—	—	$\pm \left( 4 + 0,1 \frac{X_k}{X} \right)$
зонды БКЗ	—	10	Не более 15	—	—
зонды БК	—	—	—	$\pm \left( 5 + 0,2 \frac{X_k}{X} \right)$	$\pm \left( 5 + 0,2 \frac{X_k}{X} \right)$
зонды ИК	—	0,03	0,03—2	—	—
Минимально допустимое со- противление промысловой жид- кости при боковом каротаже, Ом·м	—	—	—	—	—
Максимальная допустимая температура окружающей сре- ды, К:	423 268—323	473 —	423 263—323	473 263—323	423 263—323
скважинный прибор наземная панель					

Примечание.  $X_k$  — верхний предел измерения для данной позиции;  $X$  — значение измеряемой величины

частоту сигнала в напряжение низкой частоты. Фаза опорного напряжения детектора подбирается таким образом, чтобы детектировалась активная составляющая сигнала. После детектирования низкочастотные колебания усиливаются усилителем 6 и поступают на переключатель рода работ 7.

Измерительные электроды  $M$  и  $N$  зондов БКЗ, установленные на многоэлектродном зонде 9, подключены к соответствующим измерительным трансформаторам. В зависимости от рода работы (цикла измерений) выходы измерительных трансформаторов и выход канала ИК подключаются с помощью переключателя 7 к входу телеизмерительной системы с частотной модуляцией и частотным разделением каналов 8. Сигнал по кабелю поступает на блок управления 10 и далее — на панель ИПЧМ 13. С выхода панели ИПЧМ сигналы подаются на регистратор 14 геофизической лаборатории.

Для контроля работы аппаратуры имеются режимы «Нуль-сигнал» и «Стандарт-сигнал».

Скважинный прибор конструктивно выполнен в виде трех соединенных разъемных частей: индукционного зонда, электронного блока и многоэлектродного зонда БКЗ. Индукционный зонд заключен в корпус из непроводящего и немагнитного материала, заполненный кремнийорганической жидкостью и снабженный компенсатором давления.

В табл. 10 приведены технико-эксплуатационные характеристики некоторых типов аппаратуры.

### Основные базовые каскады аппаратуры

Поскольку основной телеизмерительной системой в электрометрической аппаратуре является система АМ—ЧМ, базовыми будут электронные узлы и блоки, обеспечивающие техническую реализацию этой системы.

Частотные модуляторы в аппаратуре строятся по одинаковой схеме (рис. 95) и различаются типами применяемых электронных ламп, а также типами и номиналами резисторов и конденсаторов.

Модулятор собран по схеме симметричного мультивибратора с положительным напряжением на управляющих сетках. При отсутствии сигнала на входе модулятора генерируются колебания несущей частоты  $f_0$ , определяемой величинами  $C1$ ,  $R5$ ,  $C2$ ,  $R4$ .

Измеряемый сигнал поступает на вход схемы через резистор  $R1$ . Усиленный лампой  $L1$  сигнал снимается со средней точки нагрузки ( $R2$  и  $R3$ ) и подается на управляющие сетки мультивибратора, собранного на лампах  $L2$  и  $L3$ .

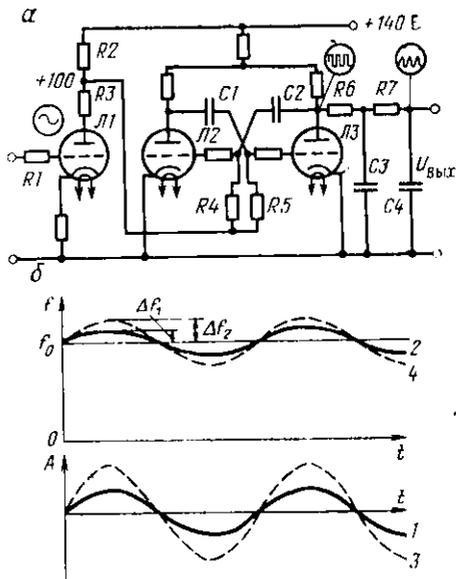
Частота модулированного колебания описывается формулой

$$f = f_0 + \Delta f \cos 2\pi Ft,$$

где  $f_0$  — несущая частота;  $\Delta f$  — девнация частоты;  $F$  — частота модулирующего сигнала;  $t$  — время.

Рис. 95. Принципиальная схема частотного модулятора (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б):

1, 3 — разные амплитуды модулирующего сигнала;  
2, 4 — соответствующие изменения частоты модулирующего сигнала



Девiation частоты пропорциональна амплитуде входного сигнала (рис. 95, б) и составляет 10,5 % при входном напряжении 2,1 В. Предварительный усилитель (Л1) работает как ограничитель сверху и снизу при входных сигналах более 2,1 В. Прямоугольные импульсы мультивибратора с анода лампы Л2 поступают на RC-фильтр нижних частот (R6, C3, R7, C4). На выходе фильтра сигнал имеет форму, близкую к синусоидальной.

Частота генерируемых колебаний при заданных номиналах элементов схемы определяется формулой

$$f = k \frac{U_c}{U_a},$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $U_c$  — напряжение на сетках ламп Л2 и Л3;  $U_a$  — напряжение на анодах ламп Л2 и Л3.

При отсутствии входного сигнала  $U_c = U_0$ , где  $U_0$  — напряжение на сетках ламп Л2 и Л3, определяемое режимом работы лампы Л1. При этом

$$f_0 = k \frac{U_0}{U_a}.$$

При поступлении входного сигнала частота мультивибратора

$$f = k \frac{U_0 + U_{\sim}}{U_a} = k \frac{U_0}{U_a} + k \frac{U_{\sim}}{U_a} = f_0 + \Delta f,$$

где  $U$  — усиленный входной сигнал.

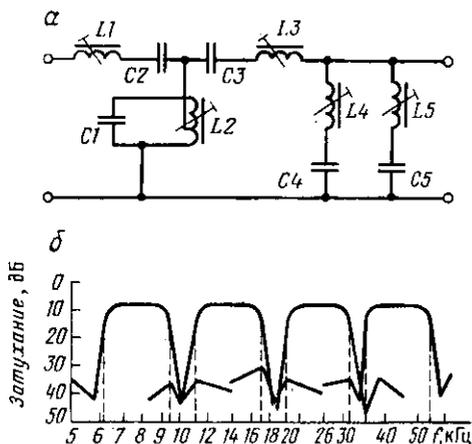


Рис. 96. Принципиальная схема полосовых фильтров (а) и их характеристики (б) в панели ИПЧМ-2

Пунктирными линиями выделены полосы пропускания фильтров

Динамический диапазон (определяемый отношением частоты  $f$  при максимальном значении  $U_{\sim} = 2,1$  В к нестабильности частоты при отсутствии сигнала) рассмотренного модулятора составляет примерно 60 дБ.

Полосовые фильтры панели ИПЧМ используются для частотного разделения сигналов информации, поступающих из скажонных приборов. Схема каждого фильтра (рис. 96, а) включает четыре последовательных контура ( $L_1, C_2$ ;  $L_3, C_3$ ;  $L_4, C_4$ ;  $L_5, C_5$ ) и один параллельный ( $L_2, C_1$ ). Резонансная частота контуров  $T$ -образного звена (индуктивности  $L_1, L_2, L_3$ ) равна средней частоте фильтра; режекторные контуры (индуктивности  $L_4, L_5$ ) настроены на частоты бесконечного затухания ( $f_{\infty 1}$  и  $f_{\infty 2}$ ) в соответствии с табл. 11, в которой приняты следующие обозначения:  $f_0$  — несущая частота канала;  $f_1, f_2$  — соответственно нижняя и верхняя частоты среза фильтра;  $f_{cp} = \sqrt{f_1 f_2}$  — средняя частота фильтра;  $f_{\infty 1}, f_{\infty 2}$  — соответственно нижняя и верхняя частоты бесконечного затухания фильтра.

Демодуляторы ЧМ — АМ всех каналов в панели ИПЧМ-2 выполнены по одинаковой схеме (рис. 97); они различаются только номиналами элементов одновибратора, которые зависят от несущей частоты.

Амплитудный дискриминатор выполнен на операционном усилителе Э1 и транзисторе Т1. Схема срабатывает при величине входного сигнала более 11 мВ (рис. 98, а, б). Значительный коэффициент усиления схемы (порядка 100 000) позволяет получить из синусоидального напряжения прямоугольные сигналы с крутыми фронтами (рис. 98, в) при изменении уровня входного сигнала в пределах 11—13 мВ.

Одновибратор Э2 запускается остроконечными положительными импульсами, получаемыми на дифференцирующей це-

Таблица 11

Характеристические частоты (в кГц) полосовых фильтров панели ИПЧМ-2

Параметр фильтра	Каналы				Параметр фильтра	Каналы			
	1	2	3	4		1	2	3	4
$f_0$	7,8	14	25,7	45	$f_2$	9,5	17	31,5	54,9
$f_{ср}$	7,6	13,7	25,3	44	$f_{\infty 1}$	5,65	10,2	18,8	33
$f_1$	6,1	11	20,2	35,1	$f_{\infty 2}$	10,2	18,4	34	59

почке  $C1R1$  (рис. 98, г). Длительность возбуждения одновибратора (рис. 98, д) определяется конденсатором  $C2$ , величина которого определяется значением несущей частоты данного канала.

Сформированные по длительности импульсы отрицательной полярности стандартизируются по амплитуде импульсным усилителем  $T2$ , работающем в ключевом режиме (рис. 98, е).

Фильтр нижних частот выполнен на  $RC$ -элементах ( $R2-R5$ ,  $C3-C6$ ). На выходе фильтра выделяется информационный низкочастотный сигнал (рис. 98, ж), который усиливается в усилителе низкой частоты ( $\mathcal{E}3$ ,  $T3$ ,  $T4$ ) с трансформаторным выходом ( $Tr1$ ).

Шунтирующие конденсаторы  $C8-C9$  уменьшают уровень паразитного высокочастотного сигнала. С этой же целью введена глубокая отрицательная обратная связь по высокой частоте через конденсатор  $C7$ . Коэффициент усиления  $УНЧ$  может регулироваться (в пределах 20 %) переменным резистором  $R7$ . Тер-

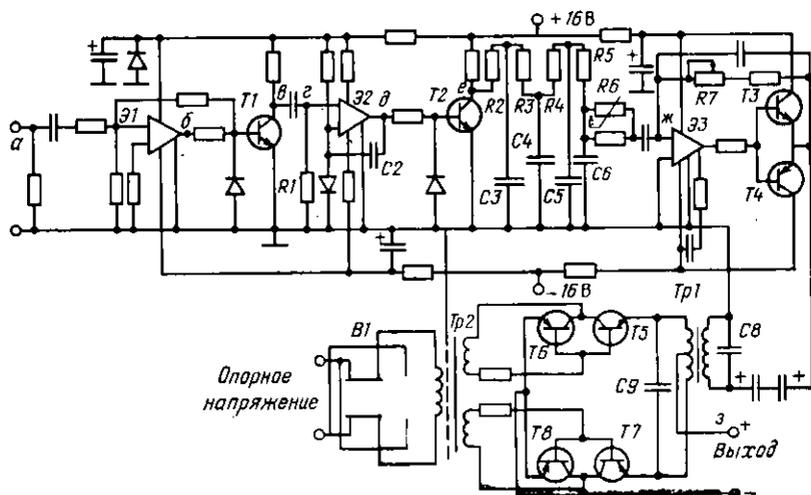


Рис. 97. Принципиальная схема демодулятора и фазового детектора панели ИПЧМ-2

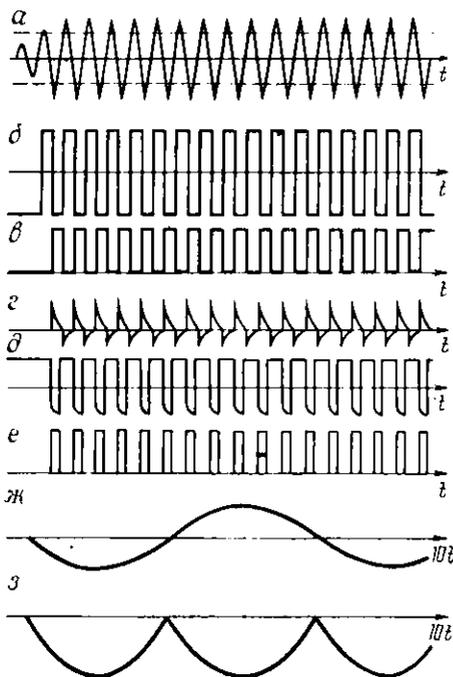


Рис. 98. Временная диаграмма работы демодулятора и фазового детектора панели ИПЧМ-2

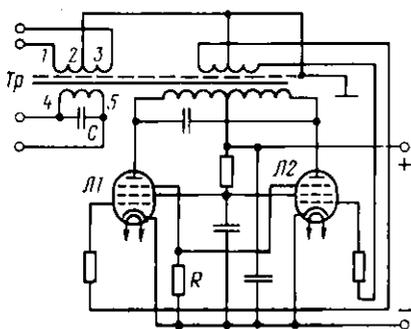


Рис. 99. Генератор высокой частоты в аппаратуре индукционного каротажа

морезистор  $R6$  служит для температурной коррекции коэффициента усиления.

Фазовый детектор (см. рис. 97) выполнен на двух управляемых ключах ( $T5$ ,  $T6$  и  $T7$ ,  $T8$ ). Управление ключом осуществляется противофазным напряжением, снимаемым с обмоток трансформатора опорного напряжения  $Tr2$ . Такая схема фазового детектора позволяет осуществлять двухполупериодное фазочувствительное выпрямление информационного сигнала (рис. 98, в). Изменение фазы опорного напряжения осуществляется переключателем  $B1$ .

Генератор высокой частоты (50 кГц в аппаратуре АИК-3 и 20 кГц — в аппаратуре АИК-4), предназначенный для питания генераторных катушек индукционного зонда, обычно выполняется по двухтактной схеме с трансформаторной обратной связью на лампах  $Л1$  и  $Л2$  (рис. 99). К обмотке 4, 5 трансформатора  $Tr$  подключается линия питания индукционного зонда, а с обмотки 1-3 снимается опорное напряжение фазочувствительного детектора и напряжение стандарт-сигнала. Резистором  $R$  регулируется степень возбуждения генератора. Частота генерации определяется колебательным контуром, состоящим из катушек генераторной линии зонда и конденсатора  $C$ .

## § 2. АППАРАТУРА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К скважинной аппаратуре для акустических исследований относят устройства, предназначенные для измерения характеристик поля упругих колебаний. Такое поле либо возбуждают с заданной периодичностью в скважине и окружающих породах, либо оно возникает в скважине при различных гидро- или термодинамических явлениях [4]. Зонд акустической аппаратуры включает источники и приемники упругих колебаний, которые разделены акустическими изоляторами (см. гл. III). Электронная схема обеспечивает синхронизацию, генерирование, усиление, передачу по кабелю, регистрацию и первичную обработку поступающих из скважины электрических сигналов.

### Общие принципы построения аппаратуры

Аппаратура акустического каротажа представляет собой цепь последовательно включенных преобразователей, в которых происходит трансформация электрической энергии в механическую и обратно, усиление поступающих электрических сигналов, передача их по кабелю и регистрация [4]. С информационной точки зрения элементы цепи, по которым проходит сигнал  $f(t)$ , являются электроакустическим трактом (ЭАТ) передачи (рис. 100, а). Каждый элемент этого тракта вносит свои изменения в сигнал  $f(t)$  в соответствии с переходными характеристиками элементов ЭАТ (рис. 100, б-д). Изменения сигнала, вносимые акустической частью тракта (горная порода), зависят от изучаемой среды и являются полезной информацией. Поэтому их необходимо передать к регистратору с минимальными искажениями. Сигнал искажается в таких элементах тракта, как приемник, кабель из-за узкой полосы пропускания этих элементов. Знание амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик элементов тракта позволяет корректировать искажения спектров сигнала на отдельных участках. Таким образом, чтобы получаемые сигналы были не искажены и информативны, следует применять оптимальные электроакустические преобразователи (излучатели и приемники), акустические изоляторы и электронные схемы и узлы.

Для корректной оценки частотных свойств изучаемого объекта необходимо, чтобы излучатель был широкополосным с равномерной плотностью спектра во всем исследуемом диапазоне частот. В случае узкополосного излучателя основная энергия его излучения должна лежать в области частот, где сигнал наиболее сильно реагирует на изучаемые характеристики среды. Для хорошего разрешения волновой картины по отдельным группам воли излучение должно быть кратковременным. Чтобы не вносить искажений в электрический сигнал приемника, тракт

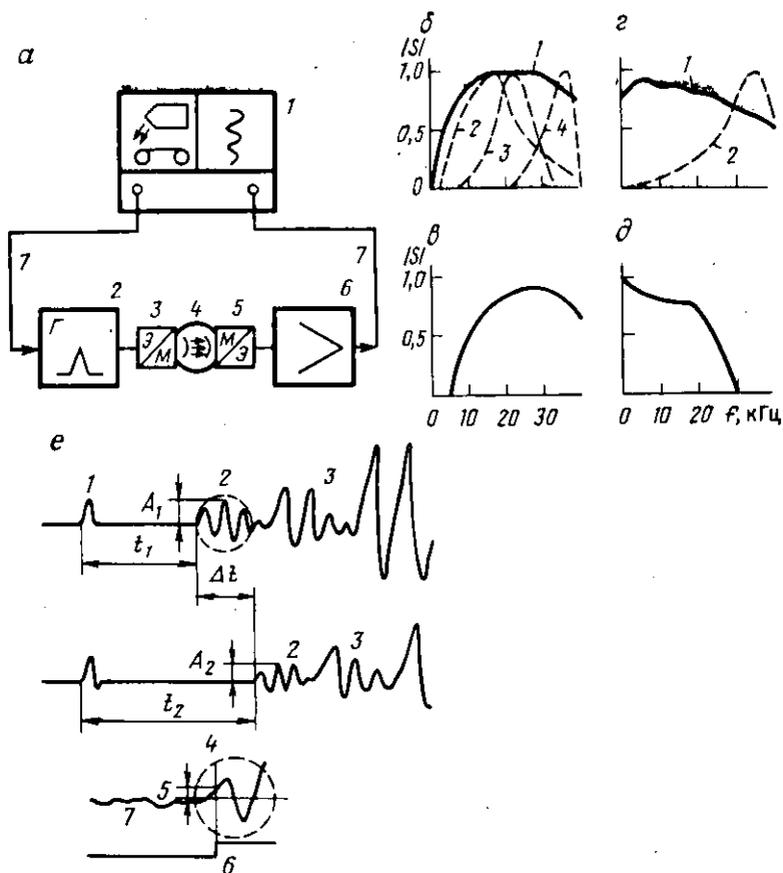


Рис. 100. Схема электроакустического тракта передачи информации при акустическом каротаже и характеристики, поясняющие прохождение сигналов в нем (по О. Л. Кузнецову):

*a* — схема ЭАТ (1 — регистратор; 2 — генератор запускающих импульсов; 3 — преобразователь электрической энергии в механическую; 4 — изучаемая среда; 5 — преобразователь механической энергии в электрическую; 6 — усилитель; 7 — линия связи); обобщенные нормированные характеристики элементов ЭАТ: б — спектр излучаемого упругого импульса; (1 — широкополосный излучатель; 2—4 — узкополосные излучатели), *в* — амплитудно-частотные характеристики скважины, *г* — амплитудно-частотные характеристики приемника (1 — широкополосный приемник, 2 — узкополосный приемник) *д* — АЧХ кабеля; *е* — измеряемые параметры акустического сигнала (1 — момент излучения; 2 — группа продольных волн; 3 — группа поперечных волн; 4 — момент выделения первого вступления; 5 — уровень выделения первого вступления; 6 — нормированный сигнал вступления; 7 — помеха)

преобразования, передачи и регистрации информации должен иметь достаточно большой динамический диапазон и быть относительно широкополосным.

В наземных блоках используются три вида регистрации электрического сигнала, соответствующего полю упругих колебаний в точке среды, где расположен приемник [4].

1. Запись результатов измерения и вычислений отдельных параметров сигнала в виде аналоговых кривых или в виде последовательности цифр с заданным шагом по глубине.

2. Запись визуальной картины волнового поля по разрезу скважины в координатах глубина — время. На записи отмечаются моменты перехода сигнала через заданный порог — получаются фазокорреляционные диаграммы (ФКД).

3. Запись полного сигнала (фотооптическая, магнитная аналоговая или магнитная цифровая) для его последующей машинной или ручной обработки.

В соответствии с этим телеизмерительной системой аппаратуры акустического каротажа обеспечивается передача полного сигнала приемника упругих колебаний и, как правило, не используется преобразование первичного сигнала путем его модуляции.

### Обобщенная блок-схема аппаратуры

Независимо от модификаций акустического каротажа аппаратура включает скважинный прибор, содержащий акустический зонд, и наземные регистрирующие и обрабатывающие блоки.

В скважинном приборе размещаются приемо-излучающие преобразователи, изолированные друг от друга и от стенок охранный кожуха; преобразователи акустически связаны с окружающей средой (см. гл. III). Наиболее распространенными являются трехэлементные акустические зонды.

На рис. 101 приведена обобщенная блок-схема аппаратуры акустического каротажа и показаны сигналы в различных блоках, отмеченных цифрами на блок-схеме. Измеряемые аппаратурой параметры сигнала показаны на рис. 100, е.

Условимся называть сигналом первого канала сигнал, пришедший к приемнику  $P$  от ближнего излучателя  $I_1$ , а сигналом второго канала — пришедший от дальнего излучателя  $I_2$ . Время между моментами посылок акустического импульса излучателями  $I_1$  и  $I_2$  и приходом первого вступления головной волны обозначим через  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно по первому и второму каналу; амплитуды первых колебаний головных волн по обоим каналам обозначим через  $A_1$  и  $A_2$  (см. рис. 100, е). Измеряя эти величины, можно вычислить интервальное время  $\Delta t = t_2 - t_1$  и показатель затухания  $\alpha = \frac{1}{l} \lg A_1/A_2$  где  $l$  — расстояние между одноименными элементами (на приведенной блок-схеме — излучателями).

Работа аппаратуры АК заключается в следующем [4].

Излучатели  $I_1$  и  $I_2$  поочередно излучают акустические импульсы 1, 2, возбуждаемые генераторами  $G1$  и  $G2$ . Частота следования запускающих импульсов задается схемой управления

генераторами УГ. В момент начала излучения каждого импульса от Г1 и Г2 через схему суммирования  $\Sigma$  и кабель в наземную панель подается синхроимпульс 3. Синхроимпульсы первого и второго излучателей (каналов) отличаются (например, полярностью). Акустические колебания от излучателя, проходя в исследуемой среде, воспринимаются приемником П и преобразуются в электрический сигнал 4. Принятый сигнал после усиления усилителем У1 подается в кабель через схему суммирования. В наземной аппаратуре синхросигнал и сигнал информации, пройдя схему согласования СС, попадают в блок выделения синхроимпульса ВСИ и усилитель У2. На выходе ВСИ появляется нормализованный импульс момента излучения 6,

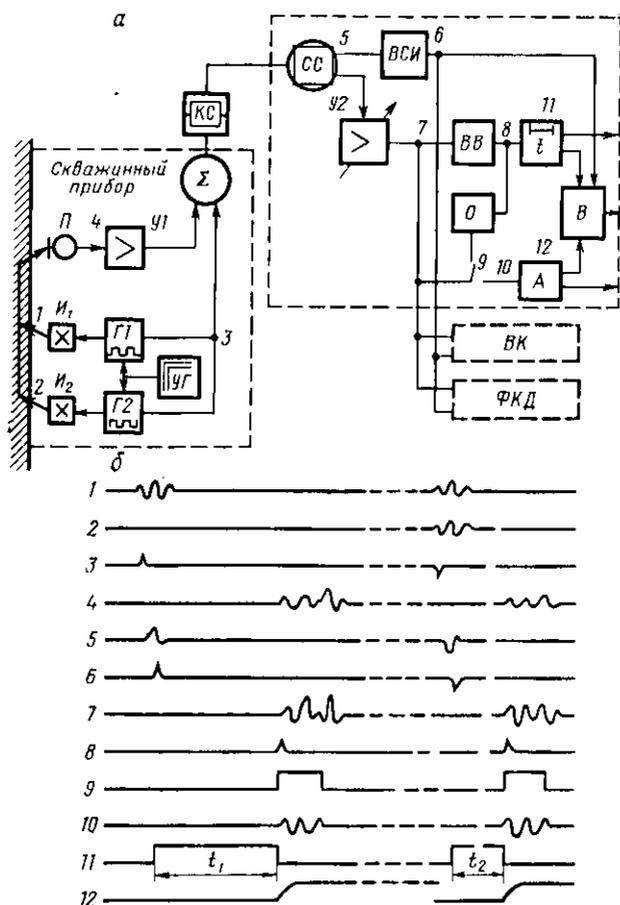


Рис. 101. Обобщенная функциональная схема аппаратуры для акустических исследований (а) и сигналы в различных блоках (б)

используемый для начала отсчета времени  $T$  и для запуска внешних блоков записи фазокорреляционных диаграмм ФКД и волновых картин ВК, связанных с измерением времени. Усилитель  $У2$  за счет регулировки усиления позволяет получить на выходе необходимую амплитуду сигнала  $7$ , подаваемого на внешние блоки и на блок выделения вступления  $ВВ$ . Этот сигнал формирует нормализованный импульс  $8$  в тот момент, когда параметры сигнала соответствуют заданным величинам (в простейшем случае — это превышение амплитуды сигнала заранее установленного порогового уровня, как показано на рис. 100,  $e$ ). Нормализованный импульс  $8$  с блока  $ВВ$  поступает на блок измерения времени  $t$   $11$ . Одновременно этот же импульс используется в схеме временного окна  $O$  для пропускания через ключ  $9$  трех — четырех периодов сигнала  $10$ , подаваемого на измеритель амплитуды  $A$   $12$ . Аналогичная последовательность работы аппаратуры наблюдается и после срабатывания второго излучателя. Величины  $t$  и  $A$  поступают на осциллограф для регистрации и на вычислитель параметров  $\Delta t = t_2 - t_1$  и  $\alpha$ . С вычислителя электрические сигналы, отражающие величины  $\Delta t$  и  $\alpha$ , также подаются на регистратор.

На рис. 102 изображена блок-схема одноканального регистратора фазокорреляционных диаграмм [4]. Запись ведется на фотоноситель, который перемещается со скоростью, пропорциональной скорости передвижения зонда в скважине. Изображение сигнала с экрана электроннолучевой трубки ЭЛТ проектируется на фотопоситель через оптическую систему. На отклоняющую систему ЭЛТ подают напряжение  $2$  с генератора развертки  $\Gamma$ , обеспечивающего отклонение электронного луча по горизонтали. Начало развертки синхронизируется каждым синхронимпульсом  $1$ . На модулятор яркости ЭЛТ

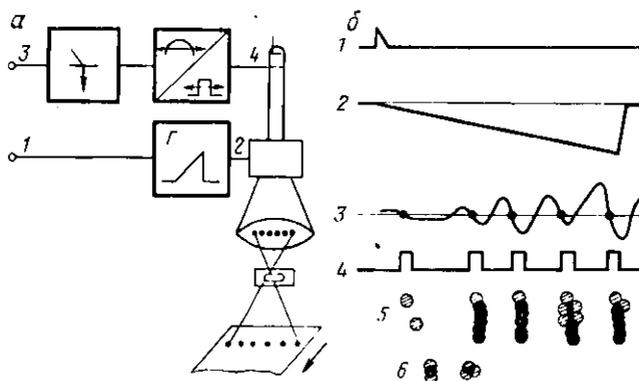


Рис. 102. Блок-схема устройства для записи фазокорреляционных диаграмм ( $a$ ) и сигналы в отдельных блоках и на фотоносителе ( $b$ )

сигнал 4 подается от формирователя стандартных импульсов. Последний соединен с пороговой схемой, вырабатывающей импульсы только при уменьшении (возрастании) сигнала 3 и пересечении им заданного уровня порога, т. е. один раз за период колебания. В результате на экране ЭЛТ при каждом поступлении сигнала появляются светящиеся точки 5, проектируемые на фотоноситель. Скорость движения носителя такова, что изображение точки, проектируемое в виде небольшого круга, ложится частично на место, куда проектировалась точка при записи предыдущего сигнала (см. рис. 102, б, в).

Регулировкой яркости световой точки на экране ЭЛТ и изменением режима проявления фотоносителя можно получить заданную плотность изображения (почернение).

Регистратор волновых картин позволяет выборочно с заданным шагом по глубине путем фотографирования с экрана ЭЛТ записывать на фотоноситель полные сигналы, поступающие с обоих каналов (см. рис. 100, е).

Характеристики регистраторов фазокорреляционных диаграмм и волновых картин приведены в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Характеристики регистраторов ФКД и ВК

Регистратор	Полоса частот, кГц	Длительность развертки, мс	Задержка развертки, мс	Длительность метки, мкс	Шаг съемки, м	Вид регистрации
АСКУ	0,6—10,5	3, 4; 6; 8	—	200; 400	—	ВК
АКР	10—50	—	—	2; 5; 20; 50; 100; 500; 1000	0,25; 0,5; 1,0; 2,0	ВК
ЛАК-2	10—50	0,7; 1,5; 3,0	0,1; 0,5	25; 50; 100	—	ФКД
«Звук»-2 *	0,5—40	0,5; 1,2; 5; 10	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1	20; 50; 100; 500; 1000; 5000	0,25; 0,5; 1,0; 2,0	ВК ФКД
ИФКД	0,5—50	0,5; 1,0; 2,0	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0	1/20 **	—	ФКД

\* Для регистрации волновых картин использован серийный осциллограф.

\*\* Длительность меток (в мкс) соответствует 1/20 длительности развертки (в мкс).

## Технико-эксплуатационные характеристики и особенности серийных образцов аппаратуры

Применяемые типы аппаратуры акустического каротажа работают в различных диапазонах частот акустических сигналов (от сотен герц до нескольких мегагерц).

По частотному диапазону<sup>1</sup> аппаратуру можно подразделить на следующие виды [4]: 1) скважинный акустический телевизор — работает на частотах 1—2 мГц; 2) акустический каверномер и профилемер — работают на частотах 100—500 кГц; 3) прижимные акустические микрозонды — используют частоты 50—500 кГц; 4) аппаратура на головных волнах (СПАК, АКЦ) — использует частоты 20—50 кГц; 5) низкочастотная широкополосная аппаратура («Звук-2» и АНК-1) — работает на частотах 5—20 кГц; 6) аппаратура межскважинного прозвучивания — использует частоты 0,5—10 кГц; 7) аппаратура для акустических исследований в процессе бурения — принимает колебания с частотой ниже 120—150 Гц.

Рассмотрим работу скважинного прибора и временного пульта аппаратуры СПАК-4 (рис. 103).

Аппаратура СПАК-4 работает с одножильным бронированным кабелем.

Ток питания с частотой 50 Гц поступает по кабелю 10 в блок 8, на выходе которого формируются импульсы с частотой повторения 25 Гц. В блоке 7 происходит деление на два указанной последовательности импульсов. На каждом из выходов блока 7 появляются импульсы с частотой 12,5 Гц, запускающие поочередно генераторы токовых импульсов 4 и 5. Каждый из генераторов нагружен на обмотку магнитострикционного излучателя. Магнитострикционные преобразователи 1 и 2 излучают в окружающую среду с частотой 12,5 Гц серии упругих колебаний. Поскольку запускающие импульсы сдвинуты по фазе на 180°, временной сдвиг между сериями составляет 40 мс. Собственная частота излучателей и приемника составляет около 25 кГц.

Упругие колебания, пройдя в окружающей среде путь, соответствующий зондовому расстоянию, воспринимаются пьезокерамическим приемником 3 и преобразуются в электрические сигналы. Усиленные в усилителе 6 сигналы через фильтр 9 поступают в кабель 10. Сюда же подаются синхриимпульсы от генераторов 4 и 5. Синхриимпульс, соответствующий моменту срабатывания ближнего к приемнику излучателя, имеет отрицательную полярность, а синхриимпульс, соответствующий моменту срабатывания дальнего излучателя, — положительную полярность.

<sup>1</sup> Имеются в виду частоты основной энергии излучения.

Поступающий на временной пульт (узлы 11—34) сигнал после прохождения через фильтр 11 попадает в блок селекции синхроимпульсов 13, а также на предварительный усилитель 12. С выхода усилителя 12 сигнал может быть подан в блок 20, а также на гнездо 32 для передачи в амплитудный блок (на схеме не показан).

Селектор 13 выделяет синхроимпульсы, поступающие в блок делителя 18, где вырабатываются прямоугольные импульсы чередующейся полярности, подаваемые на коммутатор 22. Коммутатор обеспечивает подачу измерительного сигнала на цепи интегратора 23, выполняющего раздельную регистрацию  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t$ . Импульсы делителя 18 используются для обеспечения первого опрокидывания измерительного триггера 16. Второе опрокиды-

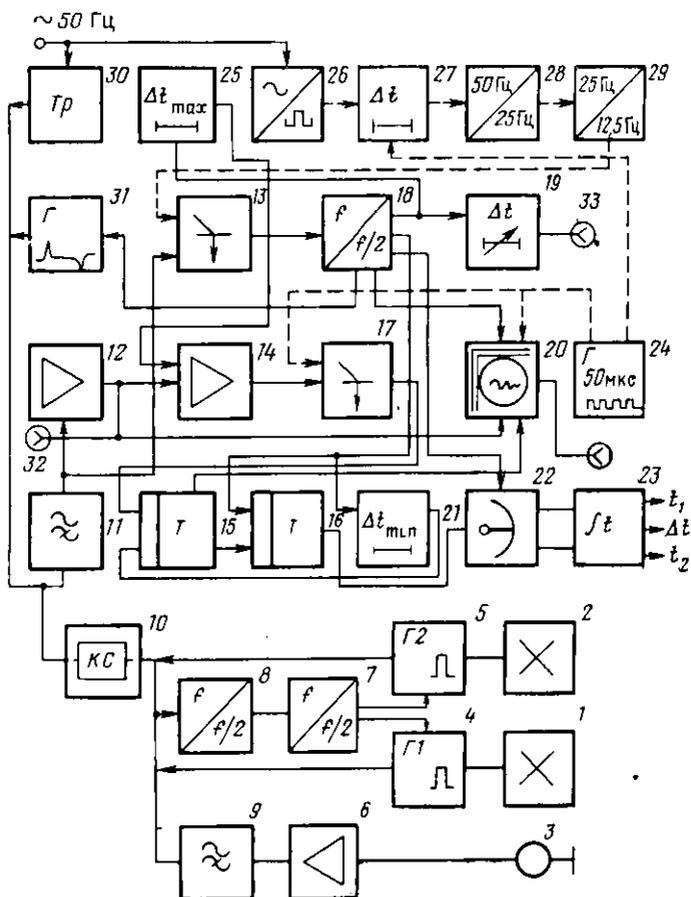


Рис. 103. Функциональная схема скважинного прибора и временного пульта аппаратуры СПАК-4

вание триггера 16 осуществляется от промежуточного триггера 15 в момент срабатывания его от импульса, поступающего с порогового устройства 17. Пороговое устройство выдает импульс запуска при поступлении на его вход усиленного (усилителями 12 и 14) до определенного уровня сигнала информации. Схема блокировки 21 срабатывает от импульсов делителя 18, соответствующих работе излучателей в скважинном приборе. По истечении минимального измеряемого времени прихода волны к приемнику схема блокировки 21 вырабатывает импульс для опрокидывания промежуточного триггера 15 (подготовки его к работе). Таким образом, схема блокировки 21 совместно с промежуточным триггером 15 обеспечивает защиту измерительного триггера 16 от помехи, находящейся в интервале между моментом возбуждения излучателей и началом диапазона измеряемых времен.

Импульсы измерительного триггера 16, имеющие длительность  $t_1$  и  $t_2$ , поступают на интегратор 23. При этом, как уже отличалось, коммутатор 22 обеспечивает раздельное измерение указанных длительностей. На выходе интегратора 23 имеются выходные сигналы, соответствующие величинам  $t_1$ ,  $t_2$  и  $\Delta t$ . Эти сигналы подаются на аналоговый регистратор.

Если по какой-либо причине сигнал информации на выходе усилителя 12 отсутствует, второе опрокидывание измерительного триггера 16 и срабатывание всей измерительной системы обеспечивается импульсом, вырабатываемым в блоке 25 (схема фиксации гидроволны). Запуск схемы задержки в блоке 25 осуществляется в начале каждого цикла измерений.

Блок управления визуальным контролем 20 формирует на выходе (гнездо 34) волновую картину (или последовательность импульсов кварцевого генератора 24) от дальнего и ближнего излучателей с нанесенными на нее метками от фронтов промежуточного триггера, соответствующих заднему фронту импульса схемы блокировки и второму опрокидыванию измерительного триггера (в моменты  $t_1$  и  $t_2$ ). Указанные сигналы могут наблюдаться с помощью осциллографа, запуск которого может осуществляться с гнезда 33. При этом происходит сдвиг сигналов от двух излучателей по вертикали, что позволяет наблюдать их одновременно без применения двухлучевого осциллографа. Схема задержки 19 позволяет перемещать волновую картину на экране осциллографа по горизонтали в пределах 100—1500 мкс, что дает возможность изучать информационный сигнал более детально.

В режиме калибровки (на рис. 103 цепи сигналов показаны пунктирными линиями) роль синхроимпульсов скважинного прибора выполняют импульсы, формируемые из сетевого напряжения 50 Гц в блоке 26. Задержанные схемой 27 импульсы поступают на делители 28 и 29. Фронты импульсов делителя 29, следующие с частотой 12,5 Гц, имитируют разнополярные им-

пульсы скважинного прибора и поступают на селектор 13. Функции информационного сигнала в режиме калибровки выполняет сигнал кварцевого генератора 24 (последовательность импульсов с периодом 50 мкс). Второе опрокидывание промежуточного и измерительного триггеров осуществляется первым импульсом кварцевого генератора, следующим после импульса схемы блокировки 21. Для синхронной работы кварцевого генератора и всей измерительной системы при калибровке схема задержки синхроимпульсов 27 управляется кварцевым генератором. Один из импульсов кварцевого генератора, время поступления которого предшествует моменту самостоятельного формирования заднего фронта импульса схемы задержки 27, вызывает досрочное формирование заднего фронта, совпадающее с моментом поступления указанного импульса кварцевого генератора. Этим обеспечивается жесткая привязка измерительных цепей к импульсам кварцевого генератора, что позволяет использовать его высокую стабильность при установке калибровочных временных интервалов.

Силовой трансформатор пульта 30 обеспечивает питанием скважинный прибор.

В режиме работы пульта со скважинным прибором СПАК-2М работают те же блоки, что и в режиме калибровки, за исключением кварцевого генератора. Генератор пусковых импульсов 31 запускается от делителя 18 и генерирует импульсы чередующейся полярности с периодом повторения 80 мс (12,5 Гц). Указанные импульсы вместе с током питания поступают по кабелю в скважинный прибор.

В комплект аппаратуры СПАК-4 входит пульт измерения амплитуды аппаратуры СПАК-2М. При этом измерение амплитуды осуществляется аналогично рассмотренному выше (см. рис. 101).

Аппаратура «Парус» предназначена для исследования в рудных и угольных скважинах и отличается от СПАК-2 уменьшенными размерами зонда, повышенным диапазоном излучаемых частот и меньшей термостойкостью.

Аппаратуру АКЦ (АКЦ-1, АКЦ-2, АКЦ-4) применяют для определения высоты подъема цемента в затрубном пространстве и оценки механических характеристик его контактов на границах с обсадной колонной и горной породой. В аппаратуре АКЦ использован двухэлементный зонд; измеряется амплитуда волны по колонне  $A_K$  в фиксированном временном окне, а также амплитуда волны по породе  $A_D$  и время первого вступления волны  $T_D$ .

Аппаратура «Звук-2» позволяет измерять следующие кинематические и динамические параметры акустического сигнала: времена  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t$  и время реверберации акустического сигнала; амплитуды  $A_1$ ,  $A_2$   $\lg A_1/A_2$  продольных волн; амплитуды  $A_1$ ,  $A_2$  поперечных волн, а также волн по колонне и гид-

роволны. В аппаратуре предусмотрены регистрация фазокорреляционных диаграмм по обоим каналам и фоторегистрация волновых картин.

Акустическая аппаратура АНН-1 [4] включает два разных широкополосных зонда и рассчитана на работу с унифицированной наземной панелью АНК-1.

В табл. 13 приведены характеристики серийной аппаратуры. Аппаратура скважинного акустического телевизора (САТ-1) работает на отраженных волнах при высоких частотах излучения, обеспечивающих возбуждение и прием узконаправленного акустического луча. Вращение луча в горизонтальной плоскости позволяет детально исследовать поверхность стенки скважины и ее геометрию. Разрешающая способность аппаратуры приближается к длине волны излучателя. Амплитуда принятого отраженного сигнала определяется акустическим волновым сопротивлением стенки скважины и затуханием сигнала в жидкости, заполняющей скважину.

Таблица 13

Технические и метрологические характеристики аппаратуры для акустических исследований

Технические или метрологические характеристики	СПАК-2М	СПАК-4	«Парус»	«Звук-2»
Пределы измерения:				
$T_1$ , мкс	300—1300	220—900	—	—
$T_2$ , мкс	360—1600	290—1150	—	250—3000
$\Delta T$ , мкс	60—300	70—250	—	60—600
$A_1$ , дБ	—	30	—	60
$A_2$ , дБ	—	30	—	60
$\lg A_1/A_2$ , дБ	30	30	30	60
Максимальный выходной ток каналов при нагрузке 800 Ом, мкА:				
$T_1, T_2$	40	40	7	—
$A_1, A_2$	—	50	50	—
$\Delta T$	30	30	4	—
$\lg A_1/A_2$	30	30	30	—
Нелинейность каналов, %:				
$T_1, T_2, \Delta T$	1,5	1,5	—	—
$A_1, A_2$	—	10	—	—
Погрешность логарифмического преобразования, дБ	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	1,5	—
Максимальная погрешность измерений наземной аппаратурой, %	—	—	2—3	—
Диаметр исследуемых скважин, мм	130—300	130—300	76—120	130—300
Максимальная скорость каротажа, м/ч	—	—	700	1200
Основная погрешность измерений, %:				
$T_2, \Delta T$	—	—	—	$\pm 1,5$
$A_1, A_2, \lg A_1/A_2$	—	—	—	$\pm 5,0$

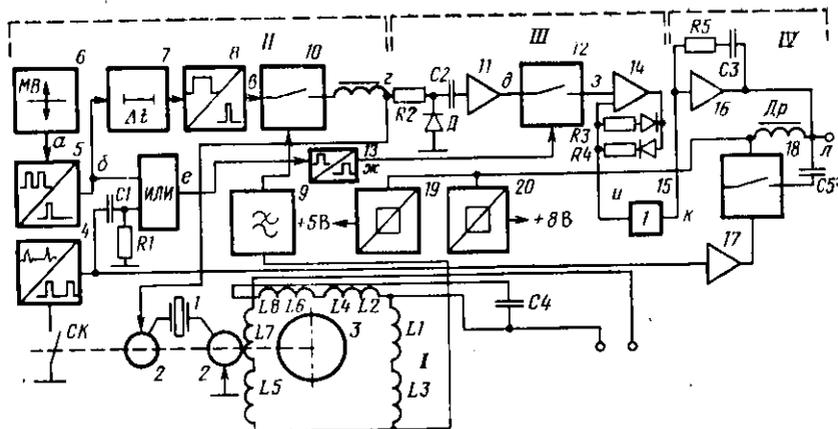


Рис. 104. Функциональная схема скважинного прибора аппаратуры САТ-1

Скважинный прибор (рис. 104) аппаратуры САТ-1 состоит из следующих основных блоков: акустического отсека I, включающего механизм вращения 3 ультразвукового преобразователя 1; блока электроники, включающего блок формирователей импульсов II, блок усилителя-детектора III и блок усилителя выходных сигналов и источников питания IV.

Ультразвуковой преобразователь 1 выполнен из пьезокерамики. Он закреплен на обойме, вращаемой индукционным механизмом 3, состоящим из магнитопроводящего яра и восьми катушек  $L1-L8$ . Обойма с преобразователем вращается на двух подшипниках. Электрическое соединение преобразователя 1 осуществляется через коллектор 2, состоящий из двух колец и двух щеток. На торце коллектора имеется штифт для включения синхроконтakta СК при каждом обороте преобразователя.

Для гашения ультразвуковых импульсов, излучаемых внутренней стороной преобразователя, под преобразователем расположен демпфер. Отсек имеет компенсатор давления и связан с внешней средой посредством резиновой (акустически прозрачной) оболочки.

Основная обмотка двигателя 3 имеет отвод от средней точки, который используется для подачи управляющего тока возбуждения на ультразвуковой преобразователь 1 от наземной панели. Фазосдвигающая обмотка соединена с одним концом основной обмотки непосредственно, а с другим — через фазосдвигающий конденсатор  $C4$ .

В блоке формирователей импульсов II имеются генератор тактовых импульсов 6, формирователи импульсов возбуждения 8, синхриимпульсов 4 и импульсов клапанноровки 5. Длитель-

ность последних устанавливается в зависимости от диаметра скважины.

Блок III включает в себя усилитель высокой частоты 11, схему клапанирования импульса излучения 12 и детектор 14.

В блоке IV имеются усилители мощности видеопульсов 16 и синхроимпульсов 17, 18. В этом блоке размещены источники питания 19 (+8В) и 20 (+5В), ток на которые поступает через дроссель Др.

Электронная схема смонтирована на трех печатных платах и выполнена с использованием транзисторов и интегральных схем.

Наземная панель аппаратуры САТ-1 состоит из блоков (рис. 105): селекции сигналов V; формирования сигналов VI; аналоговой памяти VII; питания кинескопа VIII; развертки IX и кинескопа X; питания XI.

Блок V содержит селектор входных импульсов 21, формирователи начала развертки 22 и меток глубины 23. Блок VI включает в себя схему аналоговой памяти 25 и формирователь управляющих импульсов 24. Блок VII имеет схему широтно-импульсного модулятора 27 и схему автоматической 26 и ручной 28 установки оптимального уровня возбуждения.

В блоке питания кинескопа VIII размещена схема модулятора яркости 29, схема генератора высоковольтного напряжения и выпрямителя для питания кинескопа. Блок IX имеет генератор пилообразного тока 31 и усилитель мощности 30, охваченный глубокой отрицательной обратной связью по току отклоняющих катушек L9. Последние являются нагрузкой усилителя 30.

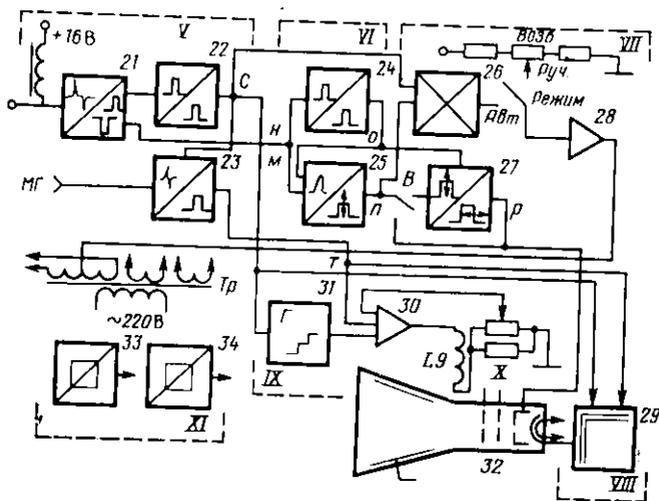


Рис. 105. Функциональная схема наземной панели аппаратуры САТ-1 (продолжение рис. 104)

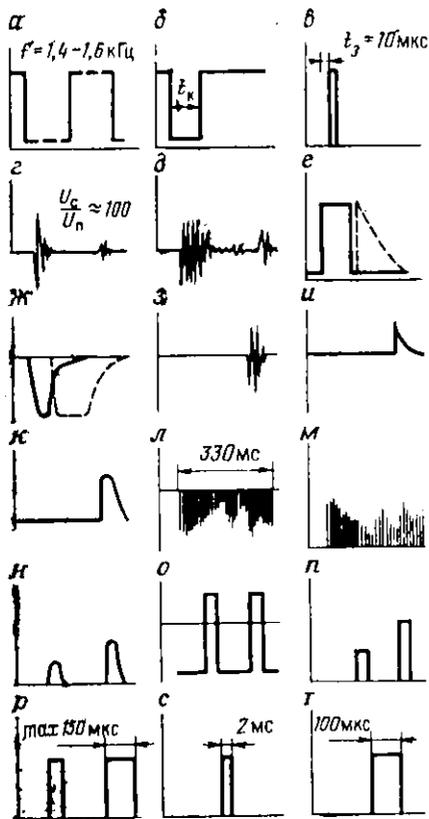


Рис. 106. Временные диаграммы работы аппаратуры САТ-1

грамме (рис. 106), где изображены идеализированные осциллограммы в точках функциональной схемы, обозначенных буквами (а—т, ..., см. рис. 104 и 105). Этими же буквами обозначены осциллограммы на рис. 106.

Задающий генератор б представляет собой мультивибратор МВ, частота автоколебаний которого лежит в диапазоне 1,4—1,6 кГц (рис. 106, а). Импульсы генератора поступают на вход формирователя импульсов клапанной 5. Длительность импульсов клапанной  $t_k$  (рис. 106, б) равна 40 или 80 мкс и устанавливается в зависимости от диаметра скважины.

Импульс клапанной задерживается схемой задержки 7 на 10 мкс и поступает на схему формирования зондирующих импульсов 8. Длительность сформированного импульса равна 0,6 мкс (рис. 106, в):

Напряжение питания ключа 10 снимается со средней точки

Блок X содержит кинескоп 32 (6ЛК1Б) с элементами его регулировки и управления. Блок XI включает в себя элементы, обеспечивающие питание аппаратуры: силовой трансформатор Тр, выпрямители, фильтры, стабилизаторы 33, 34.

Фоторегистратор аппаратуры САТ-1 предназначен для регистрации изображения с экрана кинескопа на фотопленку шириной 61,5 мм. Фоторегистратор выполнен в виде самостоятельного блока и включает объектив и лентопротяжный механизм, заключающиеся в светонепроницаемый корпус. Лентопротяжный механизм обеспечивает регистрацию со скоростью, пропорциональной скорости подъема скважинного прибора, в масштабах глубин 1:50, 1:100 и 1:200. Объектив обеспечивает запись изображения с экрана кинескопа в масштабе 1:2.

Скважинный прибор аппаратуры САТ-1 имеет центра- торы фонарного типа.

Рассмотрим работу аппаратуры по временной диа-

катушек механизма вращения акустического преобразователя и проходит через фильтр 9.

Зондирующий импульс (рис. 106, *г*) через коллектор 2 поступает на пьезокерамический ультразвуковой преобразователь 1. Отраженный акустический сигнал принимается тем же преобразователем. Электрический сигнал через демпферное устройство ( $R2, C2, D$ ) поступает на усилитель высокой частоты 11. Отношение  $U_3/U_{от} \approx 100$  (где  $U_3$  — амплитуда зондирующего импульса,  $U_{от}$  — амплитуда отраженного сигнала). Усилитель высокой частоты 11 представляет собой резонансный усилитель ( $f_{рез} = 1$  МГц) с полосой пропускания  $\Delta f = 120$  кГц. С выхода усилителя (рис. 106, *д*) сигнал поступает на схему клапанирования 12. Здесь происходит клапанирование помехи и зондирующего импульса. Схема 12 запирается импульсом клапанировки или синхрои́мпульсом, которые поступают через схему ИЛИ (рис. 106, *е*) и схему клапанирования 13 (рис. 106, *ж*). Предварительно импульсы одновибратора 4 дифференцируются цепочкой  $C1, R1$ . Синхрои́мпульс может закрыть схему 12 во время прохождения через нее одного-двух отраженных сигналов, но это не сказывается на потере информации, поскольку за один оборот пьезоэлектрического излучателя получается один синхрои́мпульс, в то время как за тот же интервал излучатель посылает и принимает 400—500 сигналов.

С выхода ключа 12 сигнал (рис. 106, *з*) поступает на вход пикового усилителя-детектора 14. Детектор представляет собой усилитель, охваченный отрицательной обратной связью (через резисторы  $R3, R4$ ), и истоковый повторитель 15. Сигналы на выходе усилителя и истокового повторителя показаны на осциллограммах, изображенных на рис. 106, *и, к*.

С выхода истокового повторителя 15 видеои́мпульс (рис. 106, *к*) поступает на усилитель мощности 16, охваченный отрицательной обратной связью ( $R5, C3$ ). Усиленные по мощности видеои́мпульсы отрицательной полярности (рис. 106, *л*) поступают на кабель.

Для формирования импульса синхронизации служит схема, подавляющая «дребезг» синхроконтакта. Она содержит одновибратор 4, усилитель 17 и ключ 18, при включении которого конденсатор  $C5$  разряжается на кабель. В результате в кабеле появляется импульс положительной полярности амплитудой около 8 В (см. рис. 106, *л*).

Сигнал в виде отрицательных видеои́мпульсов информации и положительных синхрои́мпульсов поступает по кабелю в наземную панель.

В блоке селекции сигналов  $V$  схемой 21 осуществляется разделение сигналов. Синхрои́мпульс формируется схемой 22 (рис. 106, *с*). В блоке  $V$  схемой 23 формируются также метки глубин от датчика  $МГ$ . Импульс  $МГ$  (рис. 106, *т*) формируется после окончания обратного хода генератора пилообразного

тока 31 и используется в блоке развертки IX для смещения луча кинескопа к краю экрана и в блоке питания кинескопа VIII для высвечивания луча с помощью схемы 29.

Из блока селекции сигналов V видеосигнал поступает в блок формирования сигнала VI (на осциллограмме рис. 106, и дана картина видеоимпульсов, поступающих в течение одной строки, на осциллограмме рис. 106, н показаны два отдельно взятых видеоимпульса). Схема 24 формирует импульсы заданной длительности (рис. 106, о), которые поступают на схему 25. На эту же схему поступают сигналы информации. На выходе схемы 25 появляется импульс, нормированный по длительности и пропорциональный по амплитуде входному сигналу (рис. 106, п).

Нормализованный видеосигнал (см. рис. 106, л) поступает на схему широтно-импульсной модуляции 27, на выходе которой формируется сигнал, длительность которого пропорциональна амплитуде входного сигнала. Такой порядок работы соответствует режиму широтно-импульсной модуляции.

Когда переключатель В переводится в нижнее положение, тогда сигнал (амплитудно-модулированный), минуя схему широтно-импульсной модуляции 27, поступает на модуляцию кинескопа. Поскольку зависимость яркости луча кинескопа от амплитуды входных сигналов не пропорциональная, т. е. при изменении малых значений амплитуды входного сигнала яркость луча кинескопа остается практически постоянной (происходит поглощение акустических теней), диаграмма в режиме амплитудно-импульсной модуляции получается контрастной.

В блоке аналоговой памяти VII размещена схема автоматического регулирования уровня возбуждения пьезоэлектрического излучателя. Переключение тумблера «Режим» в положение «Авт» позволяет автоматически поддерживать уровень тока возбуждения пьезоэлектрического преобразователя таким, чтобы амплитуда максимальных отраженных сигналов при каждом обороте преобразователя оставалась постоянной. В этом режиме на регистрируемой диаграмме сглаживаются незначительные неровности и изменение диаметра скважины и четко выделяются места полного поглощения зондирующего сигнала (трещина, нарушение колонны, перфорационное отверстие). Переключение тумблера в положение «Руч» позволяет оператору установить уровень тока возбуждения пьезоэлектрического излучателя на определенный уровень резистором «Возб».

Блок развертки состоит из управляемого синхроимпульсами (рис. 106, с) генератора пилообразного напряжения 31 и усилителя мощности 30. Усиленное напряжение генератора 31 подается на отклоняющую систему L9 кинескопа 32.

Так как скважинный прибор перемещается по оси скважины с постоянной скоростью, то площадки на стенке сква-

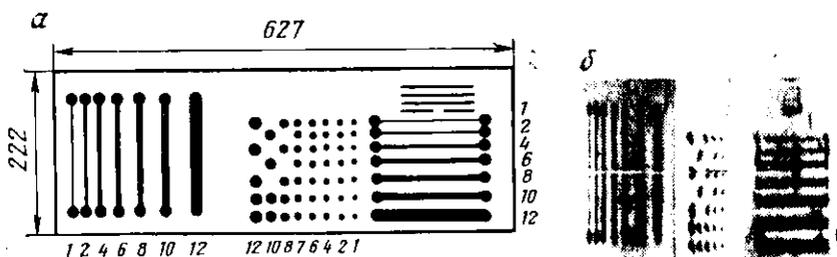


Рис. 107. Пример фотографии, получаемой аппаратурой САТ-1:

а — развертка трубы, в которой выполнены отверстия и щели (цифры указаны размеры отверстий и щелей в мм); б — изображение того же участка трубы

жны, на которые попадают ультразвуковые импульсы, образуют винтовую линию, шаг которой определяется как скоростью подъема прибора, так и скоростью вращения пьезоэлектрического преобразователя.

Качество получаемых фотографий определяется максимальной разрешающей способностью аппаратуры по глубине и периметру изображения. Максимальная разрешающая способность аппаратуры САТ-1 по обеим координатам приблизительно одинакова и составляет около 2 мм при одиночных дефектах, но реализуется только при одинаковых масштабах записи по координатам.

На рис. 107 изображены чертеж развертки макета обсадной колонны и фотография того же участка, полученная аппаратурой САТ-1. В обсадной колонне высверлены щели и отверстия различных размеров. Съемка проведена при скорости подъема прибора 20 м/ч. На фотографии видно, что четкость изображения для отверстий и щелей менее 4 мм уменьшается. Размеры узких щелей и отверстий малого диаметра искажаются. С увеличением скорости подъема прибора разрешающая способность регистрации горизонтальных щелей и отверстий падает. При заданной частоте вращения преобразователя в скважинном приборе 3—4 об/с скорость перемещения прибора в скважине должна быть около 15 м/ч. В связи с тем что серийные каротажные подъемники имеют минимальную скорость 60 м/ч, разрешение фотографий САТ-1 по вертикали может быть около 6 мм.

Аппаратура САТ-1 позволяет исследовать скважины диаметром 125—300 мм, глубиной до 4000 м, углом наклона скважины не более 15° при максимальном гидростатическом давлении 60 МПа и температуре до 120 °С. Ствол скважины может быть заполнен глинистым раствором (но без утяжелителей и газовых пузырьков) с плотностью до 1,25 г/см<sup>3</sup>, а также водой любой минерализации или нефтью. Разрешающая способность телевизора падает с увеличением удельного веса глинистого раствора.

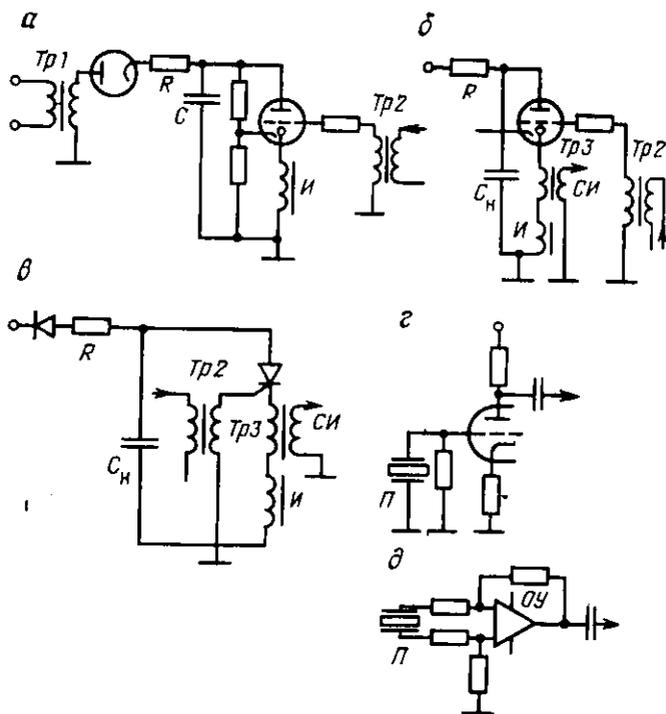


Рис. 108. Базовые каскады аппаратуры акустического каротажа:  
 а, б, в — схемы импульсного генератора; г, д — схемы присоединения пьезокерамического преобразователя к электронным цепям

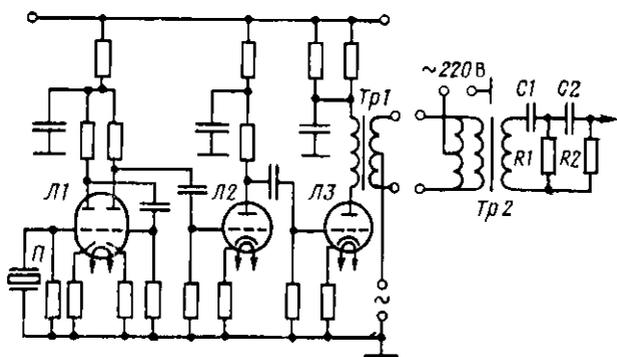


Рис. 109. Схема усилителя скважинного прибора

## Основные базовые каскады аппаратуры

Рассмотрим базовые каскады и характерные особенности электронных узлов аппаратуры акустического каротажа.

В схеме импульсного генератора используется разрядник с малым внутренним сопротивлением. На рис. 108, *а, б, в* приведены типовые схемы импульсного генератора [4]. При температурах до 100—120 °С в качестве разрядников применяют тиристоры, а при более высоких — арктроны.

Конденсатор-накопитель  $C_n$  заряжается от повышающей обмотки трансформатора  $Tr1$  через выпрямитель и зарядный резистор  $R$ . Поджиг разрядника осуществляется импульсом синхронизации, подаваемым через отдельный трансформатор  $Tr2$ . Для получения импульса момента излучения  $СИ$  используется дополнительный трансформатор  $Tr3$ , включенный последовательно с магнетострикционным излучателем  $И$ .

В схеме входного каскада используют малошумящие электронные лампы или транзисторы. На рис. 108, *г, д* показаны типовые схемы присоединения пьезокерамического преобразователя  $П$  к электронным цепям. Схема должна быть хорошо защищена от помех. С целью подавления синфазных помех целесообразно использовать операционный усилитель  $ОУ$  с дифференциальным включением (рис. 108, *д*).

Для усиления сигналов пьезокерамического приемника в аппаратуре СПАК и АКЦ используется усилитель, схема которого показана на рис. 109. Сигнал приемника  $П$  усиливается по напряжению тремя каскадами усиления на лампах  $Л1, Л2$ . Лампа  $Л3$  работает в трансформаторном усилителе мощности. С выходной обмотки трансформатора  $Tr1$  сигнал по кабелю поступает на симметрирующий трансформатор  $Tr2$  панели управления. Вторичная обмотка  $Tr2$ , а также цепочки  $C1-R1$  и  $C2-R2$  образуют фильтр с частотой среза 20 кГц. Напряжение питания 220 В подается по двум жилам и броне кабеля.

### § 3. АППАРАТУРА ДЛЯ РАДИОМЕТРИИ СКВАЖИН

К скважинной радиометрической аппаратуре относят устройства, предназначенные для измерения плотности потока ионизирующих частиц или квантов, а также активности источника излучения в скважине. В состав аппаратуры входит зонд (см. гл. 3), включающий источники (ампульные или управляемые) и детекторы излучения. Источники и детекторы разделены рассеивающими и (или) поглощающими фильтрами и размещены на определенном расстоянии, составляющем длину зонда.

## Общие принципы построения аппаратуры

Первичным измерительным преобразователем в схеме радиометрической аппаратуры является детектор излучения, преобразующий активность источника излучения  $A$  или плотность потока частиц или квантов  $\Phi$  в функционально связанную с ними среднюю частоту выходных сигналов  $n_{\text{дет}}$ , а значения характеристик частиц или квантов — в значения параметров сигнала. Таким образом, импульсные детекторы ионизирующего излучения осуществляют групповое преобразование  $n_{\text{дет}} = f(A)$  или  $n_{\text{дет}} = f(\Phi)$ , а пропорциональные детекторы также и индивидуальное преобразование энергия — амплитуда заряда. Последующие этапы преобразования выполняют электронные каскады, образующие электронную схему аппаратуры [16].

В случае однородного потока частиц или квантов связь между средней частотой сигналов на выходе детектора  $n_{\text{дет}}$  и плотностью потока  $\Phi$  наиболее простая:  $\Phi = n_{\text{дет}}/K_{\Phi}$ , где  $K_{\Phi}$  — чувствительность прибора, выражающая отношение изменения сигнала на выходе радиометра к изменению измеряемой величины. Аналогично,  $A = n_{\text{дет}}/K_A$ .

Таким образом, в состав радиометра обязательно должен входить измерительный преобразователь, усредняющий число сигналов, поступающих от детектора в единицу времени, — измеритель средней частоты (ИСЧ).

Для представления результатов измерения в единицах измеряемой величины в цепь измерительных преобразователей аппаратуры вводят масштабный преобразователь, который предназначен для изменения значений в заданное число раз  $m$ ; в простейшем случае  $m = 1/k$ .

Поскольку на детектор, помимо излучения, создаваемого объектом измерения, действует фоновое излучение, обусловленное посторонними источниками, и сопутствующее излучение источника зонда, радиометрическая аппаратура должна обладать избирательностью по отношению к «полезному» излучению. Для этого, во-первых, применяют детектор, обладающий наиболее приемлемой функцией реакции и, во-вторых, вводят между детектором и измерителем средней частоты промежуточные измерительные преобразователи, образующие импульсные фильтры, называемые дискриминаторами. Дискриминаторы из сигналов, обусловленных излучением определенного вида и энергии, отбирают импульсы по амплитуде, по времени появления и по форме, т. е.  $n_{\text{отб}} = f(A)$  или  $n_{\text{отб}} = f(\Phi)$ .

Для практической реализации отбора сигналов по какому-либо параметрам импульсы детектора необходимо чаще всего усиливать по мощности и формировать по длительности, т. е. аппаратура должна включать усилители и формирователи.

Средняя частота импульсов после отбора их по амплитуде, времени появления или форме однозначно связана с активностью источника или плотностью потока излучения только

в простейшем случае, когда функции распределения полезных и фоновых импульсов по указанному параметру сигнала детектора не пересекаются. Однако чаще распределения полезных и фоновых (шумовых) импульсов перекрываются и импульсный фильтр приходится усложнять. Для этого вводят два устройства отбора на различных интервалах изменения параметра и устройство, осуществляющее вычитание полученных плотностей потоков импульсов (измеритель разностной интенсивности).

Радиометрическая аппаратура, предназначенная для измерения плотности потока не одного, а нескольких видов излучения или излучения в нескольких энергетических интервалах, содержит несколько измерительных каналов, т. е. является двух-, трех-, или многоканальной.

Выбор конструкции зонда радиометрической аппаратуры и скважинного прибора в целом, а также электронной схемы отдельных узлов аппаратуры зависит от ее назначения, т. е. от используемого метода радиометрии. При этом определяющее влияние на геологическую эффективность аппаратуры оказывают конструктивные особенности скважинного прибора [5]. Схема ее электронной части предопределяет в основном эксплуатационные и метрологические характеристики: стабильность, погрешность, надежность и др.

К конструктивным особенностям радиометрической аппаратуры относят: внешний диаметр, толщину стенок и материал охранного кожуха; условия экранировки источников и детекторов излучения; геометрию их расположения в приборе; наличие или отсутствие прижимных или центрирующих устройств; размеры и типы источников и детекторов излучений.

При выборе той или иной конструкции и электронной схемы необходимо соблюдать общие требования, предъявляемые к любой аппаратуре для геофизических исследований в скважинах, а также требования, специфичные для скважинной радиометрической аппаратуры: статистическая точность измерений; дифференцирующая способность прибора; воспроизводимость результатов измерения; линейность аппаратуры; исключение взаимного влияния каналов.

Статистическая точность измерений в основном определяется выбором мощности источников и эффективностью, а также величиной рабочего объема детекторов излучений. С увеличением этих параметров точность измерений возрастает.

Дифференцирующая способность аппаратуры в первую очередь зависит от соотношения вкладов в регистрируемую величину полезного излучения и фона, обусловленного прямым излучением источника и мешающим излучением среды и самого прибора. Повышения дифференцирующей способности радиометрической аппаратуры можно добиться улучшением экранировки детекторов от источника излучений, повышением избирательности прибора к полезному излучению. Отметим, что диф-

ференцирующая способность приборов, регистрирующих нейтронное излучение, выше дифференцирующей способности приборов, регистрирующих гамма-излучение, вследствие отсутствия естественного нейтронного излучения в горных породах.

Воспроизводимость результатов измерения при условии стабильной работы электронной схемы во многом зависит от симметричности расположения в приборе источника и детектора излучений [5].

Под линейностью аппаратуры понимают соблюдение прямой пропорциональности между регистрируемыми средними частотами импульсов и истинной плотностью потока  $\Phi$ , поступающей на детектор излучения во всем диапазоне ее изменений. Основные причины нелинейности радиометрической аппаратуры заключаются в возникновении просчетов импульсов из-за конечного разрешающего времени детекторов, отдельных узлов электронной схемы и линии связи (кабеля).

Взаимное влияние каналов обусловлено проникновением сигналов одного канала в тракт передачи другого канала, а также совпадением во времени отдельных сигналов, передаваемых по линии связи из скважинного прибора на поверхность, и их взаимной компенсации или наложением. Кроме того, требование независимости результатов измерения от параметров кабеля непосредственно связано с требованием неискаженной передачи информации от датчика в скважинном приборе к наземной регистрирующей аппаратуре. Информация в радиометрической аппаратуре передается по каналам связи в виде статистически распределенных во времени нормализованных импульсов, средняя частота которых является измеряемой величиной. Для увеличения количества передаваемой информации целесообразно уменьшать длительность импульсов, передаваемых по каналу связи. Однако это не всегда возможно.

С учетом параметров геофизического кабеля для частотно-импульсной телеизмерительной системы может быть рекомендована длительность импульсов информации 20—35 мкс.

### Обобщенная блок-схема аппаратуры

Радиометрическая аппаратура содержит скважинный прибор, предназначенный для создания в горных породах и скважине поля ядерных излучений (частиц или квантов) и измерения плотности потока соответствующего излучения, и наземную регистрирующую и обрабатывающую аппаратуру. Наземные блоки и скважинный прибор связаны между собой геофизическим кабелем. Для одновременной передачи по кабелю сигналов от различных детекторов излучения создают несколько информационных каналов. Импульсы каналов различаются амплитудой и (или) полярностью. Наиболее широкое применение на практике находит двухканальная аппаратура, в которой импульсы каждого из каналов различаются полярностью.

Скважинный прибор радиометрической аппаратуры состоит из зонда и электронной схемы, помещенных в прочный кожух. Основные сведения о характеристиках зондов приведены в гл. III.

Электронная схема содержит следующие узлы (рис. 110): усилитель импульсов 3 (3'), поступающих от детектора (узлы 1,1' и 2,2'), дискриминатор шумов детектора 4 (4') и согласующий каскад 5, представляющий собой усилитель мощности и обеспечивающий его согласование с кабелем.

Скважинный прибор обычно питается постоянным током с поверхности от источника 8. Питание детекторов осуществляется от высоковольтного преобразователя 6. С наземной панели 7 информация каждого из каналов записывается аналоговым регистратором 10; она может быть выведена на цифровой регистратор 9.

Для уменьшения взаимного влияния каналов применяют схему блокировки совпавших разнополярных импульсов (ДРСТ-1) или такую схему согласующего каскада, которая обеспечивает преимущественное прохождение сигналов одной полярности (ДРСТ-3, НГГК-62). В случае использования трехжильного кабеля по двум жилам можно передавать импульсы обоих каналов, но в разной полярности. Этим самым компенсируются наводки на третью жилу, по которой можно передавать сигналы третьего и четвертого каналов [20].

Скважинная радиометрическая аппаратура, включающая в качестве источника излучения генератор нейтронов, питается переменным током (400 Гц — ИГН-4, 1000 Гц — ИГН-6) по двум жилам трехжильного бронированного кабеля. При хорошей симметричности схемы наводки на третью жилу отсутствуют, и по ней передаются разнополярные импульсы от двух детекторов [20].

Особенность скважинных спектрометров заключается в необходимости применения устройства стабилизации коэффициента преобразования: энергия частицы (кванта) — амплитуда импульса, поступающего на амплитудный анализатор.

В настоящее время для работы со скважинными приборами различных типов применяют унифицированную измери-

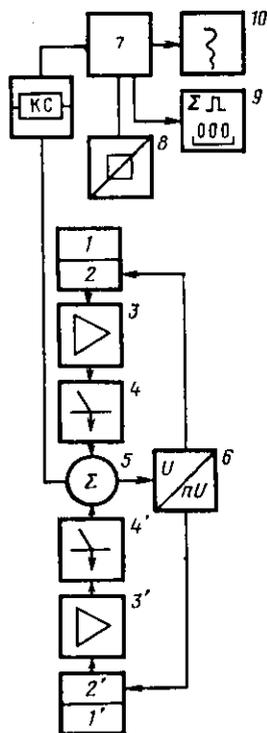


Рис. 110. Обобщенная функциональная схема двухканальной аппаратуры радиометрии скважин

тельную панель радиоактивного каротажа IP4-1П, предназначенную для работы с одножильными и трехжильными кабелями и серийными геофизическими лабораториями. Панель IP4-1П обладает высокой разрешающей способностью, позволяет одновременно регистрировать до четырех параметров, имеет сменные взаимозаменяемые блоки, может быть использована как преобразователь частотно-импульсной информации в аналоговую форму.

В панели IP4-1П разделение информации по каналам осуществляется по полярности и величине амплитуды импульсов, поступающих из скважинного прибора.

Измерительные каналы панели (рис. 111) идентичны и взаимозаменяемы. Первый и второй каналы (Iк и IIк) регистрируют импульсы отрицательной полярности, третий и четвертый (IIIк и IVк) — импульсы положительной полярности.

Для подключения к панели многоканальных скважинных приборов с применением в качестве линии связи трехжильного кабеля используют клеммы I, II и III, а с применением одножильного кабеля — клеммы ЦЖК и ОК.

Во входном блоке 1, включающем трансформаторы, диоды и усилители, сигналы разделяются по полярности. Импульсы положительной полярности поступают на эмиттерные повторители 2 первого и второго каналов, а отрицательной полярности — на эмиттерные повторители 2 третьего и четвертого каналов. Импульсы одинаковой полярности, различающиеся по амплитуде, разделяются с помощью амплитудных дискриминаторов 3. Дискриминаторы с высоким уровнем срабатывания

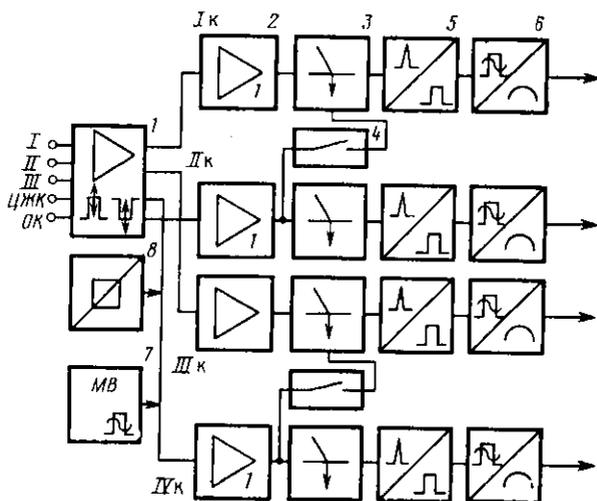


Рис. 111. Функциональная схема измерительной панели IP4-1П

пропускают импульсы большой амплитуды, а дискриминаторы с низким уровнем срабатывания — импульсы как малой, так и большой амплитуды. Импульсы малой амплитуды выделяются в результате действия схемы блокировки 4, которая на время действия большого импульса запирает дискриминатор с малым уровнем срабатывания. При выключении схемы блокировки канал регистрирует сумму импульсов одной полярности.

Импульсы, прошедшие через дискриминатор 3, формируются по длительности и амплитуде нормализаторами 5 и поступают на интеграторы 6, выходной ток которых пропорционален средней частоте импульсов канала.

В каждом канале панели имеются устройства регулирования уровня дискриминации, постоянной времени интегратора и установки пределов измерения.

Для градуирования выходного тока интеграторов в импульсах в минуту панель содержит калибратор 7, который может быть подключен к любому из каналов. Калибратор представляет собой самовозбуждающийся мультвибратор МВ с фиксированными частотами.

К выходу «пересчет» каждого канала может быть подключено цифровое устройство для счета импульсов в процессе

Таблица 14

Основные характеристики унифицированных панелей радиометрической аппаратуры

Технические характеристики	ИПРКУ-А	ИР4-ИИ
Число измерительных каналов	4	4
Измеряемая средняя частота импульсов, имп/с	0—12 800	0—6400
Максимальная нелинейность скорректированной счетной характеристики, %	±3	±3
Основная относительная погрешность при измерении и преобразовании средней частоты импульсов в выходной аналоговый параметр, %	±1	Не нормируется
Дополнительная приведенная погрешность измерения в диапазоне рабочих температур, % на 10 °С	±0,2	Не нормируется
Наработка на отказ, ч	1400	Не нормируется
Средний срок службы, годы	6	Не нормируется
Средняя продолжительность одного ремонта, ч	3	Не нормируется
Форма выходного информационного сигнала	Аналоговая цифровая	Аналоговая
Наличие сменных блоков управления, содержащих устройства для обработки результатов измерений	Есть	Нет
Тип базовых радиоэлектронных элементов	Интегральные схемы	Транзисторы

измерения или при настройке аппаратуры. Питается панель и скважинный прибор от сети переменного тока через блок питания 8. Монтаж электронных блоков панели выполнен методом печати. Входной блок и измерительные каналы сконструированы в виде съемных узлов.

В настоящее время разработана и подготовлена к серийному выпуску новая унифицированная измерительная панель радиоактивного каротажа ИПРКУ-А.

В табл. 14 приведены сравнительные характеристики панелей 1Р4-1П и ИПРКУ-А. Панель ИПРКУ-А, не отличаясь по принципу работы и блок-схеме от панели 1Р4-1П, превосходит ее по точности, надежности и ремонтпригодности. В электронной схеме ИПРКУ-А используются интегральные схемы. В комплекте со сменными вычислительными устройствами панель позволяет выполнять оперативную обработку информации в процессе скважинных измерений. Предусмотрено осуществление усреднения информации по заданным интервалам квантования с целью последующей записи в цифровой форме на долговременный носитель информации.

### **Технико-эксплуатационные характеристики и особенности серийной радиометрической аппаратуры**

Существует несколько типов аппаратуры (табл. 15), различающихся конструкцией и характеристиками зондовых устройств, элементной базой и схемными решениями.

Детекторы (сцинтилляционные и газоразрядные) канала нейтронного гамма-каротажа (НГК) окружаются обычно кадмием толщиной 0,5 мм. Для уменьшения влияния нейтронов на активацию материала кристалла (натрия и иода) между кристаллом и кадмиевым экраном предусмотрен слой карбида бора. Экран, защищающий детектор от прямого излучения источника, состоит из свинца и стали.

Наличие свинцово-железного экрана большой толщины и окружение счетчиков канала НГК кадмием способствуют повышению дифференцирующей способности этого канала по отношению к водородосодержанию горных пород и одновременно снижению его чувствительности к минерализации (на NaCl) промывочной жидкости и пластовой воды.

Конструкции, электронные схемы скважинных приборов стандартной радиометрии (ГК, НГК) описаны в литературе [2, 5, 6]. Основные данные об этих приборах приведены в табл. 15.

Остановимся более подробно на особенностях устройства аппаратуры для многозондового нейтронного каротажа. Разработано два типа такой аппаратуры: РКС-2 и МНК-1.

В скважинном приборе аппаратуры МНК-1 (рис. 112) в качестве детекторов тепловых нейтронов использованы пропорциональные гелиевые счетчики. Измерения выполняются одновременно двумя детекторами 3 и 4, расположенными на разных расстояниях от источника 1 и отделенными от него экраном 2. В малом зонде длиной  $l_m$  установлен детектор 3 типа СМ-56; ему соответствует длина чувствительной части счетчика  $\Delta z_m$ . В большом зонде длиной  $l_b$  имеются два детектора 4 типа СМ-18. Им соответствует длина чувствительной части  $\Delta z_b$ .

В канале ГК установлен детектор 5 с двумя кристаллами NaI(Tl)  $40 \times 40$  мм.

Прибор имеет дистанционную систему перемещения блока детекторов тепловых нейтронов на фиксированное расстояние от источника нейтронов, что приводит к изменению длин зондов. Для этой цели служит электродвигатель, который может перемещать блоки детекторов в обе стороны. Свободное пространство под блоком детекторов, образующееся после их перемещения вверх, заполняется водородсодержащей жидкостью, поступающей из сильфона, таким образом создается дополнительный экран от прямого излучения источника нейтронов. При перемещении блока детекторов вниз жидкость вытесняется обратно в сильфон.

Таким образом, прибор позволяет осуществлять последовательные измерения двумя парами зондов: основной парой при длинах зонда  $l_m$  и  $l_b$  и дополнительной парой с длинами зонда  $l_m + \Delta l$  и  $l_b + \Delta l$ . При этом измеряются по две частоты  $I_m$ ,  $I_b$  и  $I_{m\Delta}$ ,  $I_{b\Delta}$ , соответствующие основной и дополнительной паре зондов.

По результатам измерений основной парой зондов вычисляется отношение показаний  $A = I_m / I_b$ , а по результатам измерений основной и дополнительной парами — параметр  $\alpha$ , связанный с водородосодержанием горных пород и мало зависящий от изменения скважинных условий. Связь  $\alpha = f(A)$  (рис. 112, б) устанавливается по калибровочным измерениям.

Разработаны две модификации аппаратуры для измерения объемной плотности горных пород гамма-гамма-методом. Аппаратура

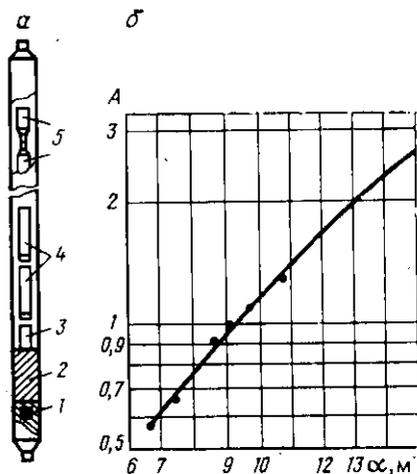


Рис. 112. Устройство скважинного прибора аппаратуры МНК (а) и калибровочная зависимость интерпретируемого  $\alpha$  и измеряемого  $A$  параметров (б)

Таблица 15

## Основные технические характеристики серийной радиометрической аппаратуры

Аппаратура	Марка	Метод	Счетчик; длина зонда, мм	Число жил кабеля		Тип кабеля
				Число каналов	Число жил кабеля	
Двухпараметровый скважинный прибор радиоактивного каротажа	ДРСТ-3-90, ДРСТ-3-60	ГК и НГК; ГК и ННК	Сцинтилляционный; 400, 500, 600, 700	2/3		Бронированный трехжильный
Универсальный теплостойкий каротажный радиометр	ТРКУ	ГК и НГК; ГК и ННК	Газоразрядный СИ-23Г, пропорциональный гелиевый СНМ-18-1			
Теплостойкий каротажный радиометр для скважин малого диаметра	Р-3	ГК, НГК, ННК	Газоразрядный СИ-23Г; 500, 600			
Аппаратура многозондового нейтронного каротажа	МНК-1	ГК	Сцинтилляционный	3/3		Бронированный трехжильный
		2ННК-Т	Пропорциональный гелиевый СНМ-56 и СНМ-18; 410 и 560, 610 и 760			
Скважинный прибор плотностного гамма-гамма-каротажа	РГП-2	Двухзондовый ГГК-П, ГК	Сцинтилляционный; 155, 360			То же
Скважинный комплексный радиометр	РКС-1	Двухзондовый ГГК-П				
Скважинный импульсный генератор нейтронов	ИГН-4	ИННК	Пропорциональный гелиевый СНМ-18; 440	1/3		»

Максимальная длина кабеля, км	Максимальное давление, МПа	Максимальная температура, °С	Диаметр, мм	Марка панели	Конструктивные особенности	Примечание
5	100	120	90, 60	IP4-IP, ДРСТ-2, ИПРКУ	Предусматривается смена сцинтиллятора в канале НК для перехода от НГК к ННК; два сцинтилляционных счетчика в канале ГК	Прибор ДРСТ-3-60 предназначен также для исследования твердых полезных ископаемых. Выпускается малой серией
8	100	200 (для ГК и НГК) 150 (для ННК) 230	100		Шесть счетчиков в канале ГК, три — НГК, четыре — ННК	
	150		60		Два счетчика в канале ГК, один — НГК	—
4	100	130	73	IP4-IP, ИПРКУ	Два сцинтилляционных счетчика Дистанционное перемещение детекторов 2ННК-Т на 200 мм	Предусматривается измерение четырьмя зондами 2 ННК-Т за два спуска
5	80	145	110	IP4-IP	Прижимное устройство с дистанционным управлением многократного действия	Прижимное устройство открывается на максимальной глубине
1,5	60	120	90	Специальная с вычислительным устройством «Десна»	Прижимное устройство с дистанционным управлением	Диаметр исследуемых скважин не менее 150 мм
5	100	—	—		Нейтронная трубка УНГ-1; частота посылки импульсов нейтронов 400 Гц; выход (1—2) × 10 <sup>2</sup> нейтр./с; длительность импульсов нейтронов 100—200 мкс	—

Продолжение табл. 15

Аппаратура	Марка	Метод	Счетчик; длина зонда, мм	Число каналов	Тип кабеля
				Число жил кабеля	
Импульсный генератор нейтронов малого диаметра	ИГН-6	ИННК; ИНГК	Гелиевый СНМ-18-1	1/3	Бронированный трехжильный
Скважинный люминесцентный гамма-спектрометр	СГСЛ-2	НГК-С; ГК-С; НГК-А	Сцинтилляционный; 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700	3/1	Бронированный одножильный; радиочастотный КРК-2

аппаратура РГП-2 разработана во ВНИИГИСе (Ю. А. Гулин и др.), а аппаратура РКС-1 — во ВНИИнефтепромгеофизике (Е. В. Семенов и др.).

Скважинный прибор в этой аппаратуре — двухзондовая измерительная установка (см. рис. 43) с управляемым прижимным устройством. В комплект аппаратуры входит полевое калибровочное устройство, представляющее собой блок из алюминия. Скважинный прибор рассчитан на проведение измерений с трехжильным бронированным кабелем. Телеизмерительная система обеспечивает передачу информации по трем каналам (первый — ГГК малый зонд, второй — ГГК большой зонд и третий — ГК). Структурные схемы приборов указанных типов аналогичны. Различие состоит в некоторых особенностях метрологического обеспечения, калибровочных зависимостей и алгоритмов интерпретации данных измерений. Оно обусловило различие в построении вычислительных устройств наземной части аппаратуры и конструкции измерительной установки. Подробное описание аппаратуры РКС-1 приведено в работе [6].

Максимальная длина кабеля, км	Максимальное давление, МПа	Максимальная температура, °С	Диаметр, мм	Марка панели	Конструктивные особенности	Примечание
—	35	120	42	«Десна»	Нейтронная трубка НТ-16; частота посылки импульсов нейтронов 20 Гц; выход $5 \times 10^7$ нейтр./с; длительность импульсов нейтронов 3 мкс Длина прибора 310 мм	Переход от ИННК к ИНГК достигается сменой детектора. Прибор может применяться в скважинах, бурящихся на твердые полезные ископаемые
2	20	60	50, 70	СГСЛ	Измерение в двух дифференциальных и одном интегральном каналах; регистрация полного спектра с неподвижным прибором	Может использоваться в неглубоких нефтяных и газовых скважинах с низкой температурой

Скважинные генераторы нейтронов ИГН-4 и ИГН-6М работают совместно с унифицированными наземными блоками «Десна».

Приборы ИГН-4 и ИГН-6М рассчитаны на использование трехжильного бронированного кабеля. Для управления работой приборов и коммутаций цепей при применении скважинных приборов ИГН-4 или ИГН-6М служит блок согласования «Десна-03». Запуск временного анализатора «Десна-02» осуществляется маркерным импульсом, вырабатываемым в блоке согласования. Скважинный прибор питается от унифицированного генератора УГ-1.

Остановимся более подробно на особенностях построения аппаратуры ИГН-6М и анализатора «Десна-02». Скважинный прибор ИГН-6М (рис. 113) состоит из двух частей: блока регистрации I и блока излучателя II.

Основным элементом блока излучателя является импульсная ускорительная трубка I типа НТ-16. Блок залит изоляционной жидкостью; имеется компенсатор теплового расширения.

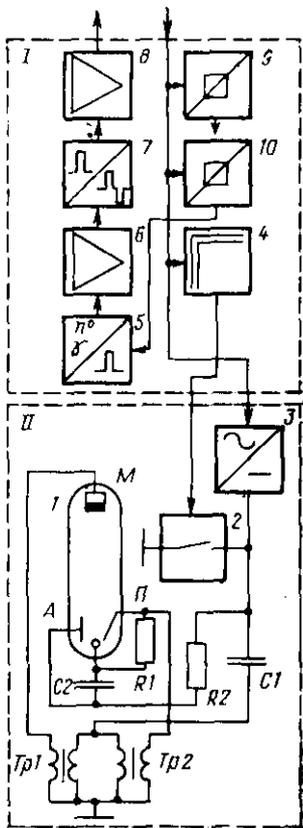
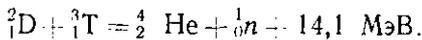


Рис. 113. Функциональная схема скважинного прибора аппаратуры ППП-6М

дируют тритиевую мишень *М*, в результате чего возникает импульс нейтронов по реакции



Нейтроны, замедляясь до тепловой энергии в окружающей среде, достигают детектора 5. Импульсы детектора усиливаются трехкаскадным услителем 6 и поступают на формирователь 7, который представляет собой два одновибратора. Импульсы с одновибраторов подаются на выходной усилитель 8, который выполнен по двухтактной трансформаторной схеме. В кабель подаются биполярные импульсы что позволяет улучшить разрешение канала связи.

Напряжение питания подается в блок 3, содержащий повышающий трансформатор и выпрямитель. В результате конденсаторы *C1*, *C2* и анод трубки *А* заряжаются до напряжения 3 кВ. Импульс запуска, подаваемый с поверхности и выделяемый схемой 4, управляет работой ключа 2. Коммутирующим элементом ключа является разрядник СКЭ-6. После срабатывания ключа начинается разряд конденсатора *C1* через первичные обмотки высоковольтных импульсных трансформаторов *Tr1* и *Tr2*; на вторичных обмотках трансформаторов возникают импульсы высокого напряжения с амплитудой 60 кВ и длительностью 2—3 мкс. Вторичные обмотки трансформаторов включены так, что на мишень трубки *М* подается отрицательный импульс, а на ионный источник *П* — положительный. В результате к трубке прикладывается напряжение около 120 кВ. Подключенный к вторичной обмотке трансформатора *Tr2* делитель на резисторах *R1*, *R2* необходим для защиты источника питания блока 3 от импульса высокого напряжения. Кроме того, с резистора *R1* снимается импульс напряжения (20—25 кВ) для пробоя промежутка катод — электрод *П* ионного источника. После пробоя начинается разряд конденсатора *C2*, запасенная энергия которого тратится на ионизацию плазмы, возникшей в ионном источнике трубки. Ионы дейтерия под действием высокого напряжения (120 кВ) выходят из ионного источника, бомбардируют тритиевую мишень *М*, в результате чего возникает импульс нейтронов по реакции

Питается электронная схема от стабилизатора 9, детектор излучения — от отдельного источника 10. Детектор излучения в приборе сменный: для нейтронов типа СНМ-18, для гамма-квантов сцинтиллятор с фотоумножителем ФЭУ-31.

Временной анализатор «Десна-02» предназначен для обработки информации, поступающей со скважинного прибора (ИГН-6М или ИГН-4).

Рассмотрим работу анализатора согласно функциональной схеме (рис. 114) и временной диаграмме (рис. 115).

Входной маркерный импульс, задающий начало временного анализа, с резистора  $R1$  через ограничитель 1 поступает на формирователь 2. На выходе формирователя образуется импульс, который запускает управляющий триггер 3 и служит импульсом сброса для измерителя средней частоты (ИСЧ) 14 интегрального канала  $I$ . Триггер 3 управляет работой генератора ударного возбуждения (ГУВ) 4.

В момент поступления маркерного импульса (рис. 115, б) триггер 3 переходит в другое устойчивое состояние (рис. 115, в) и тем самым запускает ГУВ (рис. 115, г). Синусоидальные колебания генератора 4 путем усиления и ограничения в блоке 5 формируются в прямоугольные импульсы (рис. 115, д). Период следования этих импульсов равен периоду синусоидальных колебаний и составляет 150 мкс. Далее импульсы поступают на цепочку триггеров 6, вызывая их последовательное срабатывание. На рис. 115, е показана форма сигнала на выходе первого триггера. Импульсом, появляющимся на последнем триггере, управляющий триггер 3 возвращается в исходное состояние. Цепочка в зависимости от заданного времени анализа может состоять из четырех или пяти триггеров.

Так, например, при работе с прибором ИГН-4 время анализа должно быть меньше 2500 мкс (частота посылок маркера равна 400 Гц). В этом случае включается только четыре триггера (положение 1 переключателя  $B$ ).

При работе с ИГН-6М, где частота запуска излучателя нейтронов 10 или 20 Гц (т. е. маркер следует через 100 или 50 мс), время анализа может быть установлено с помощью цепочки в пять триггеров (положение II переключателя  $B$ ). Цепочка триггеров 6 связана с дешифраторами счета 7 и сброса 8.

Наблюдая сигнал в контрольной точке  $KT5$ , выведенной на лицевую панель блока, можно судить о правильности его работы. В этой точке должна наблюдаться (рис. 115, ж) пачка, состоящая из 16 или 32 импульсов (в зависимости от положения переключателя  $B$ ). Дешифраторы счета и сброса представляют собой диодные матрицы.

Счетные импульсы снимаются с резистора  $R2$ , ограничиваются (блок 9), усиливаются (блок 10) и поступают на формирователь 11. Усилитель 10 дает возможность анализировать последовательности импульсов с амплитудой более 0,5 В.

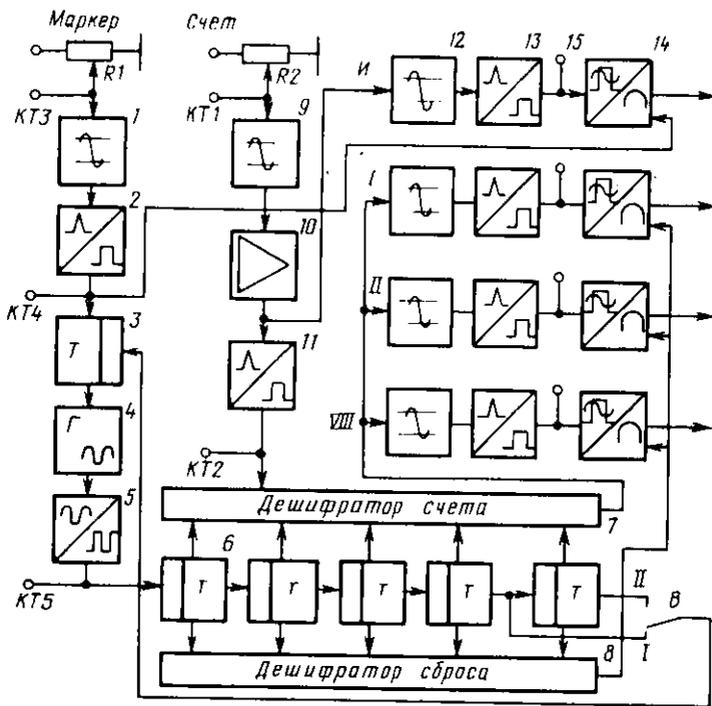


Рис. 114. Функциональная схема временного анализатора «Десна-02»

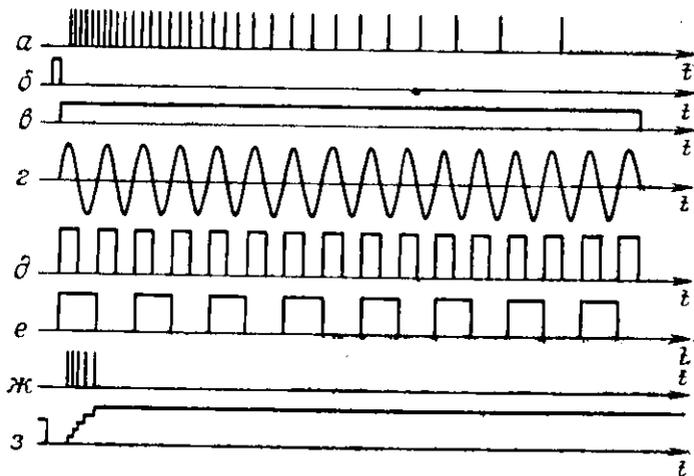


Рис. 115. Временная диаграмма работы временного анализатора Десна-02 (пояснение а — з — см. в тексте)

В контрольной точке *КТ2* могут наблюдаться сформированные счетные импульсы (рис. 115, *а*). Далее счетные импульсы поступают на дешифратор счета 7, где осуществляется их селекция во времени.

Дешифратор 7 имеет на выходе двенадцать шин, каждая из которых соответствует своему временному положению. С помощью переключателей, стоящих на входе каждого из восьми дифференциальных каналов (на схеме показаны *I*, *II* и *VIII* каналы), можно подключиться к той или иной шине, т. е. выбрать ту или иную задержку. Диапазон задержек 0—2100 мкс или 0—4500 мкс, длительность окна на каждой задержке 150 мкс. На рис. 115, *ж* показано поступление импульсов счета в шину, соответствующую нулевой задержке.

После переключателей (на схеме условно не показаны) счетные импульсы поступают на каждый из восьми каналов, которые содержат ограничители 12, формователи 13 и измерители средней частоты 14.

Сформированные импульсы с амплитудой 8 В могут быть сняты с выходов 15 и зарегистрированы любым счетным устройством. В комплект аппаратуры «Десна» входят два пересчетных устройства ИГН-4-03, содержащих по пять счетных каналов.

Измерители средней частоты преобразуют дискретную форму информации в аналоговую. В отличие от обычных в блоке «Десна-02» измерители средней частоты выполнены по принципу преобразователя код — аналог с управляющими резисторами. В ИСЧ входят счетные триггеры, управляющие работой ключей, которые, в свою очередь, задают ток через резисторы. Эти резисторы включены последовательно резистору нагрузки, напряжение на котором пропорционально количеству поступивших импульсов (рис. 115, *з*). Триггеры в данной схеме выполняют роль запоминающих элементов и возвращаются в нулевое состояние импульсом сброса, поступающим с дешифратора сброса 8 перед следующим циклом счета. Число триггеров и ключей в каждом канале ИСЧ выбрано из расчета максимального количества импульсов, регистрируемых в течение одного цикла работы анализатора.

Контрольные точки *КТ1* — *КТ5* позволяют наблюдать с помощью осциллографа сигналы в различных блоках схемы.

### Основные базовые каскады

Отбор импульсов по амплитудам в радиометрической аппаратуре используют не только при выделении потоков сигналов, соответствующих определенному энергетическому уровню или диапазону регистрируемого излучения, но и при фильтрации потоков сигналов, например, шумовых импульсов. Основной каскад узлов амплитудного отбора — это дискриминатор-нор-

мализатор, вырабатывающий нормализованный по амплитуде и длительности выходной сигнал при превышении входным импульсом амплитудой  $U_{вх}$  установленного напряжения дискриминации  $U_{дискр}$ .

Дискриминаторы радиометрической аппаратуры, выполненной на электронных лампах (ДРСТ и др.), представляют собой одновибратор с катодной связью (рис. 116). На пентоде  $Л1$  собран усилитель, а на триодах  $Л2$ ,  $Л3$  — одновибратор. Параметры схемы выбраны таким образом, чтобы обеспечивали заданный порог срабатывания дискриминатора и длительность выходного импульса (в приборе ДРСТ-200-250 мВ и 20—40 мкс соответственно).

Одновибратор — это каскад, охваченный положительной обратной связью и имеющий два состояния: устойчивое при отсутствии сигнала (импульса с детектора) и квазиустойчивое в течение времени  $\tau_{и}$  после воздействия сигнала. Лампы  $Л2$  и  $Л3$  выполняют роль вентиляей.

Различные схемы дискриминаторов-нормализаторов, выполненных на транзисторах и интегральных схемах, описаны в работе [16].

В качестве измерителей средней частоты в радиометрической аппаратуре применяют устройства, выполненные по аналоговому принципу, а также основанные на цифровой технике: аналоговые измерители средней частоты, называемые интеграторами, и счетчики импульсов с каскадами задания интервала времени измерения. В аналоговых измерителях на регистрирующие устройства выводят значение средней частоты. В счетчике импульсов среднюю частоту определяют по числу зарегистрированных импульсов за время  $t$  как  $n = N/t$ .

Вследствие статистического распределения во времени импульсов, поступающих на вход измерителя средней частоты, необходимо учитывать некоторые особенности построения этих устройств. В любом из них необходимо осуществлять накопле-

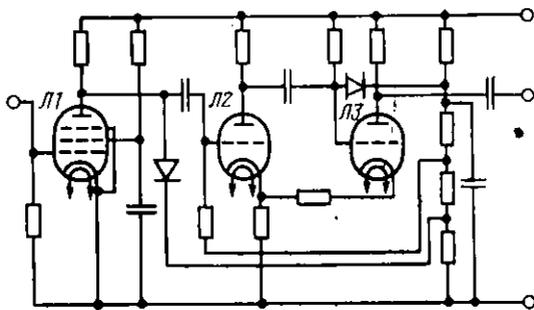


Рис. 116. Дискриминатор

ние числа импульсов, поступающих за определенный интервал времени. Для измерителя средней частоты относительная средняя квадратическая погрешность измерения частоты определяется как  $\sigma_n = 1/\sqrt{2n\tau}$ , где  $n$  — средняя частота импульсов;  $\tau$  — постоянная времени интегрирующего звена. Для счетчика импульсов средняя квадратическая погрешность в определении числа импульсов  $\Delta N = \sqrt{N} = \sqrt{nt}$ , следовательно,  $\sigma_n = 1/\sqrt{N} = 1/\sqrt{nt}$ . Таким образом, постоянная времени интегрирования должна быть выбрана так, чтобы для реального диапазона частот  $n$  не превышалось предельно допустимое значение  $\sigma$ .

В измерителе средней частоты выводимые результаты измерения относятся к текущему моменту времени, хотя наличие интегрирующего элемента обуславливает достаточно большое время установления показаний. В счетчике импульсов моменты выдачи новых результатов измерения дискретны и определяются выбранным интервалом времени  $t$ .

Для аналоговых измерителей средней частоты на практике не удается относительную систематическую погрешность измерений, приведенную к верхней границе измеряемых частот, сделать меньше 2—3%. В счетчике импульсов погрешность измерения связана лишь с погрешностью задания интервала времени  $t$  и может быть сделана предельно малой.

Динамический диапазон измеряемых частот в аналоговых измерителях средней частоты с линейным преобразованием данных ограничен значениями, не превышающими 3—4. В счетчике импульсов динамический диапазон представляемых значений может быть весьма широк. Для расширения динамического диапазона частот, измеряемых без вмешательства оператора, приходится выполнять устройства с нелинейным преобразованием (например, с логарифмическим) или с автоматическим переключением поддиапазона измерений.

Схемы аналоговых измерителей средней частоты строят по принципу усреднения количества электричества, приносимого входными импульсами. Каждый регистрируемый импульс добавляет в измерительную цепь заряд  $q_0$ , и при частоте входных сигналов  $n$  в измерительной цепи протекает ток  $i = nq_0$ . Заряды  $q_0$  поступают в измерительную цепь дискретно, и для получения непрерывной кривой тока необходимо усреднять приносимые заряды. Следовательно, основными узлами аналогового измерителя средней частоты являются частотно-токовой преобразователь и интегратор.

Наиболее просты по структуре и схеме линейные измерители средней частоты, однако из-за малого динамического диапазона их выполняют с несколькими поддиапазонами, различающимися коэффициентом преобразования измеряемой частоты в выходной сигнал. При этом соотношение между значениями  $n_{\max}$  для поддиапазонов устанавливают в пределах,

не превышающих 2,5—3, например, 1:3:10:30 или 1:2:4:10:20:40:100.

Так как информация в виде статистически распределенных во времени импульсов передается по каналу связи, имеющему конечное разрешающее время, при больших средних частотах возможны просчеты импульсов. Это приводит к нелинейной зависимости выходного тока интегратора от истинной, регистрируемой детектором частоты сигнала. Для учета таких просчетов используют корректирующие интеграторы.

Практически метод коррекции заключается в изменении порций зарядов  $q_0$ , поступающих на контур интегрирования, в зависимости от средней частоты сигналов. Для получения линейной характеристики необходимо, чтобы во всем диапазоне измеряемых интенсивностей выполнялось соотношение

$$i = qn,$$

где  $i$  — средний ток в контуре интегрирования;  $n$  — средняя частота импульсов на выходе детектора излучений;  $q$  — порция заряда, поступающая в интегратор от каждого импульса.

Однако из-за наличия мертвого времени  $\tau$  системы передачи средний выходной ток интегратора определяется выражением

$$i = qm = qnf(n, \tau). \quad (\text{VII.1})$$

где  $m$  — средняя частота импульсов на входе интегратора;  $f(n, \tau)$  — функция, учитывающая потери импульсов из-за наличия мертвого времени  $\tau$ .

При  $\tau = \text{const}$

$$f(n, \tau) = \frac{1}{1 + n\tau}. \quad (\text{VII.2})$$

Для того чтобы выполнялось соотношение (VII.1), необходимо подавать на контур интегрирования заряд, который был бы связан с загрузкой соотношением

$$i = q_0 m = q(1 + n\tau) \frac{n}{1 + n\tau}. \quad (\text{VII.3})$$

Таким образом, линейность нагрузочной характеристики интегратора может быть обеспечена при

$$q_0 = q(1 + n\tau). \quad (\text{VII.4})$$

Из последнего равенства следует, что коррекция просчетов может быть достигнута, если заряд каждого поступающего импульса будет увеличиваться с увеличением общей загрузки на интеграторе.

В панели ИР4-1П, выполненной на транзисторах, используется схема скорректированного измерителя средних частот, предложенная А. А. Брагиным и Р. Ф. Федоровым. Работает схема следующим образом (рис. 117).



Одновременно конденсатор  $C$  разряжается через резистор  $R$ . В установившемся режиме ток разряда равен току заряда.

Анализ схемы показывает, что шкала ИСЧ скорректирована и линейна относительно средней частоты импульсов на выходе детектора излучений при условии

$$\tau - (\alpha_1 + \alpha_2 - 1) \tau_0 \frac{R}{R_0} = 0, \quad (\text{VII.6})$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты усиления по току транзисторов  $T2$  и  $T4$ .

Тогда

$$i = nK_0,$$

где  $K_0 = (\alpha_1 I + I_{\text{к0}}) \tau_0$  — масштабный коэффициент шкалы ИСЧ;  $I$  — ток через резистор  $R3$ ;  $I_{\text{к0}}$  — неуправляемый ток коллектора транзистора  $T2$ .

Выбор и изменение масштабного коэффициента целесообразно осуществлять переключением сопротивления резистора  $R3$ , которое определяет ток  $I$ .

Если исключить из схемы цепь коррекции  $T4$ ,  $R_0$ , шкала будет линейной относительно средней частоты импульсов, поступающих на вход ИСЧ. Таким образом, калибровку измерителя с помощью генератора с периодической последовательностью импульсов можно проводить только при выключенной цепи коррекции.

Недостатком описанного приема коррекции является то, что измеряемая величина — средняя частота импульсов — корректируется в аналоговой форме. Тогда при регистрации дискретного значения средней частоты с помощью счетчиков импульсов погрешность измеряемой величины полностью будет определяться просчетами. В серийных приборах эта погрешность достигает 15—20 %, в результате чего дискретная информация, поступающая из скважинного прибора, оказывается малоприменной для регистрации в цифровой форме.

В ОКБ геофизического приборостроения Министерства геологии СССР разработано устройство, корректирующее погрешность в дискретной форме. Действие его основано на добавлении к поступающим такого количества импульсов, которое равно потерям, определяемым «мертвым» временем.

Разлагая выражение  $n = \frac{m}{1 - m\tau}$  в ряд по степеням  $\tau$ , получим

$$n \approx m (1 + m\tau + m^2\tau^2 + \dots). \quad (\text{VII.7})$$

Пренебрегая величинами высшего порядка ряда (VII.7), можно сделать заключение, что количество потерянных в системе импульсов равно  $m^2\tau$ .

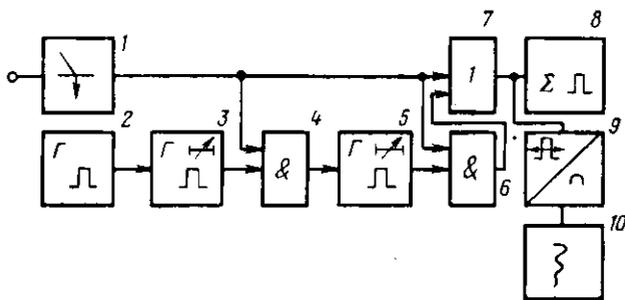


Рис. 118. Функциональная схема устройства, корректирующего просчеты в дискретной форме

Разработанное устройство (рис. 118) формирует именно такое количество импульсов и добавляет их к числу пришедших  $m$ .

Работа устройства заключается в следующем.

Выделенные в дискриминаторе 1 короткие импульсы информации поступают на вход схем совпадений 4. Сюда же поступают сформированные одновибратором 3 импульсы генератора периодических сигналов 2. В результате совпадений во времени через схему пройдут импульсы, средняя частота которых

$$m_1 = fm(\tau_{m1} + \tau_d), \quad (\text{VII.8})$$

где  $f$  — частота генератора 2;  $\tau_{m1}$  — длительность импульсов одновибратора 3;  $\tau_d$  — длительность импульса информации, поступающего с дискриминатора.

Поскольку  $\tau_{m1} \gg \tau_d$ , то можно считать, что

$$m_1 = fm\tau_{m1}. \quad (\text{VII.9})$$

На входы второй схемы совпадений 6 поступают импульсы информации и импульсы от одновибратора 5, запускаемого импульсами, прошедшими схему И4. В результате на выходе второго узла совпадений средняя частота будет

$$m_2 = m_1m(\tau_{m2} + \tau_d), \quad (\text{VII.10})$$

где  $\tau_{m2}$  — длительность импульса одновибратора 5.

Поскольку и в этом случае  $\tau_{m2} \gg \tau_d$ , то

$$m_2 = m_1m\tau_{m2}. \quad (\text{VII.11})$$

Подставив в выражение (VII.11) значение  $m_1$ , получим

$$m_2 = fm^2\tau_{m1}\tau_{m2}. \quad (\text{VII.12})$$

Выбрав длительность импульса одновибратора 5 равной периоду генератора 2  $\tau_{m2} = 1/f$  и подставив это значение в выражение (VII.12), найдем  $m_2 = m_2\tau_{m1}$ . Выбирая длительность им-

пульса первого одновибратора  $\tau_{m1}$  равной величине «мертвого» времени  $\tau$ , получим

$$m_2 = m^2\tau. \quad (\text{VII.13})$$

Таким образом, на выходе устройства формируются импульсы, количество которых равно количеству импульсов, потерянного в канале из-за просчетов. В результате суммирования этих дополнительных импульсов с пришедшими импульсами, осуществляемому схемой ИЛИ 7, получается линейная зависимость между количеством импульсов, поступающих на счетчик 8 и плотностью потока, зарегистрированного детектором. Блок 9 представляет собой обычный ИСЧ, аналоговый сигнал которого записывается регистратором 10.

#### § 4. АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН

Контроль технического состояния скважин геофизическими методами выполняют в период их бурения, обустройства обсадными колоннами и в процессе эксплуатации.

Геофизические измерения позволяют определять: диаметр и сечение ствола скважины, положение скважины и пересекаемых ею пластов в пространстве, качество цементирования обсадных колонн, качество перфорации.

Реализация геофизических измерений, позволяющих решать перечисленные выше задачи, осуществляется применением соответствующих скважинных приборов. Эти приборы в общем виде содержат датчик (или зонд) (см. гл. III) и электронную схему для преобразования (усиления) сигналов и передачи их по кабелю на поверхность в наземную панель. Особенности приборов, в первую очередь, определяются применяемыми датчиками (зондами).

Ниже описываются в основном новые приборы, серийное производство которых начато недавно. Сведения о других приборах можно найти в работах [2, 6, 19].

#### Каверномеры и профилемеры

Каверномеры и профилемеры всех типов содержат систему мерных рычагов (щупов), величина угла раскрытия которых преобразуется в электрические сигналы (см. гл. III, § 4). Различаются каверномеры конструкциями, способами раскрытия (закрытия) мерных рычагов и блоками, осуществляющими преобразование электрических сигналов основного преобразователя датчика к виду, удобному для передачи по кабелю на поверхность.

В нефтяных и газовых скважинах применяются (см. табл. 16) каверномер типа КС-3 с электромеханическим

Таблица 16

Технико-эксплуатационные характеристики каверномеров и профилемеров

Прибор	Диапазон измерения диаметра скважины, мм	Погрешность измерения диаметра скважины, мм	Число мерных рычагов	Число жил кабеля	Диаметр, мм	Длина, мм	Предельная температура, К	Предельное давление, МПа
КС-3	110—80	±10	4	3	80	1921	373	50
КСУ-1	70—760	±10	3	3	70	1918	473	100
КСУ-2	46—370	±5	3	3	36	1810	343	20
КМ-1	75—350	±5	3	3	48	1860	353	25
КМ-2	50—350	±4	3	3	36	1860	353	25
СКП-1	100—760	±10	4	1	70	3200	423	100
СПР-1	60—400	±15	8	1	110	3450	403	100
ПТС-2	112—300	±1,5	8	3	110	3675	408	120

раскрывающим устройством разового действия, каверномер КСУ-1 с гидравлической системой, которая позволяет выполнять четыре открытия и закрытия измерительных рычагов, каверномер КСУ-2 с неограниченным числом циклов раскрытия рычагов. В последних двух приборах используется АМ-ЧМ телеизмерительная система. Такая же система применена в каверномерах-профилемерах ТПК-1 и СКП-1 [2, 6].

В скважинах малого диаметра используются каверномеры КМ-1 и КМ-2, имеющие гидравлическую систему управления раскрытием рычагов однократного действия [2].

Многорычажный профилемер СПР-1 предназначен для детальных исследований необсаженных скважин и обеспечивает измерение восьми радиусов и азимута искривления скважины. Измерения проводят при остановках прибора с интервалом 5—20 м. По данным измерений строят ориентированные по странам света сечения скважины [2].

Профилемер ПТС-2 используют для детальных исследований обсадных колонн нефтяных и газовых скважин. Аппаратура рассчитана на работу с трехжильным бронированным кабелем.

В скважинном приборе (рис. 119) имеется восемь резистивных датчиков перемещений, каждый из которых механически связан со своим рычагом 1, ..., 8. Резисторы датчиков  $R1—R8$  соединены последовательно и включены между первой жилой и оплеткой кабеля (1—ОК). Питание датчиков осуществляется стабилизированным током с поверхности от источника 10 через блок управления 11, жилу 1, диод Д2, обмотку реле Р1. Падение на каждом резисторе пропорционально величине раскрытия рычага, т. е. радиусу.

В режиме «Измерение» ток питания вызывает срабатывание реле Р1, которое своими контактами Р1-1 и Р1-2 подключает

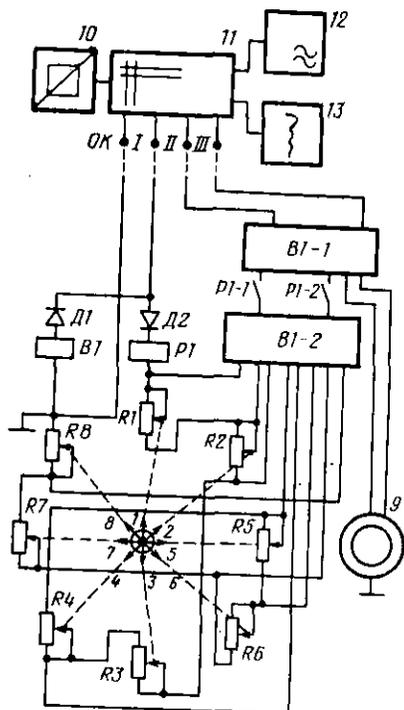


Рис. 119. Функциональная схема профилемера ИТС-2

ми резисторов. Этим обеспечивается измерение восьми радиусов колонны. Кроме того, переключатель *B1* подключает к жилам *II* и *III* резисторы стандарт-сигналов (на схеме не показаны) и обмотки электродвигателя, который служит для раскрытия и закрытия рычагов. Его питание осуществляется переменным током по *II* и *III* жилам от блока питания *12*.

Блок управления *11* имеет переключатель рода работы, цепи индикации позиций скважинного переключателя *B1*, устройство автоматического управления двигателем *9*, цепи выходных сигналов. Измеряемые параметры колонны записываются регистратором *13*. Восемь радиусов измеряют при остановках прибора с заданным интервалом по глубине скважины.

### Инклинометры и пластовые наклонометры<sup>1</sup>

Основными приборами для измерения искривления нефтяных и газовых скважин являются инклинометры дискретного действия типа КИТ и КИТА [6]. Принцип действия

<sup>1</sup> Этот раздел написан совместно с Р. И. Кривоносовым.

жилы *II* и *III* к резисторам датчиков. Реле *P1* предохраняет резисторы от случайного попадания на них переменного напряжения 220 В в режиме раскрытия или закрытия.

При непрерывной регистрации двух взаимно перпендикулярных диаметров и их суммы измеряется падение напряжения на двух соединенных последовательно группах резисторов *R1—R4* и *R5—R8*. При этом жила *II* кабеля с помощью переключателя *B1* подсоединяется к резистору *R1*, жила *III* — к общей точке соединения резисторов *R4* и *R5*; третьим проводом служит оплетка кабеля. Сигнал суммы диаметров снимается между жилой *II* и *OK*.

С помощью переключателя *B1*, управляемого током противоположного знака, через диод *D1* жилы *II* и *III* могут быть поочередно подключены к каждому из восьми

и конструкция датчика инклинометров дискретного действия подробно рассмотрены в гл. 3, § 5.

Наличие инклинометрического датчика является обязательным в пластовых наклономерах, предназначенных для определения элементов залегания пластов по результатам геофизических измерений в одной скважине. В разработанных ранее пластовых наклономерах ИП-2, ИП-1 использовались инклинометры дискретного действия. В инклинометре аппаратуры пластового наклономера НИД-1, а также в цифровом инклинометре ИНИ-721 используются датчики, позволяющие вести непрерывную запись элементов искривления скважины со скоростью до 1000 м/ч. Разрабатываются гироскопические инклинометры для нефтяных и газовых скважин.

Технико-эксплуатационные характеристики некоторых инклинометров приведены в табл. 17.

Рассмотрим принцип действия и особенности построения инклинометрического прибора на примере аппаратуры пластового наклономера НИД-1, разработанного во ВНИИнефтепромгеофизике.

Аппаратура пластового наклономера НИД-1 предназначена для определения угла и азимута падения пластов, измерения зенитного угла, азимута искривления и среднего диаметра скважины. Для определения элементов залегания пластов в аппаратуре применяют метод координат.

Рис. 120 поясняет принцип действия пластового наклономера и инклинометра. Вдоль трех образующих стенки скважины записываются три кривые I, II, III дифференциальными микроэкранированными зонами. По ним определяется взаимное смещение границ пласта по глубине  $h_{1,2}$  и  $h_{1,3}$ . Одновременно измеряют: углы отклонения прибора от вертикали  $a_1$  и  $a_2$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось прибора, в одной из которых (ориентированной к плоскости

Таблица 17

Технико-эксплуатационные характеристики инклинометров

Прибор	Диапазон измерения азимута скважины, градус	Допустимая погрешность измерения азимута скважины (при угле искривления не менее 3°), градус	Диапазон измерения угла искривления скважины, градус	Допустимая погрешность измерения угла искривления скважины, градус	Диаметр, мм	Предельная температура, К	Предельное давление, МПа
КИТ	0—360	±4	0—50	±0,5	60	473	64
КИТА	0—360	±4	0—50	±0,5	74	473	120
НИД-1	0—360	±5	0—50	±0,5	100	400	100
ИНИ-721	0—360	±2	0—100	±0,4	73	423	60

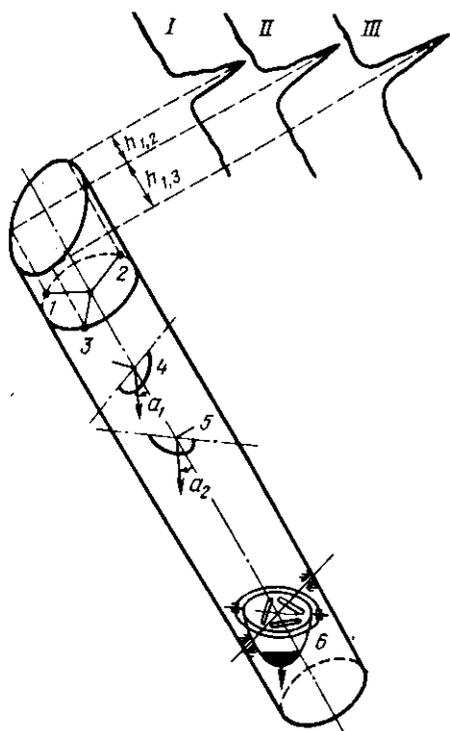


Рис. 120. Принцип действия пластового накломера

накломера) расположена зондовая установка 1—3; угол между направлением на магнитный север и фиксированным направлением (азимутальная ориентация накломера) зондового устройства  $\xi$ ; диаметр скважины  $d_c$ . Полученные данные позволяют рассчитать угол  $\alpha$  и азимут  $\Theta$  падения пласта, а также зенитный угол  $\delta$  и азимут  $\varphi$  наклона скважины.

Исходные параметры измеряют непрерывно, что позволяет путем обработки данных по соответствующему алгоритму послойно определять элементы залегания пластов и выполнять непрерывную инклинометрию скважин.

Углы  $a_1$  и  $a_2$  измеряют маятниковыми устройствами 4 и 5. Оси маятников перпендикулярны друг к другу и к оси прибора. Каждый маятник представляет собой поплавков со смещенным центром тяжести, жестко связанный с ротором бесконтактного индукционного датчика.

Азимут ориентации скважинного прибора определяют относительно направления магнитного поля Земли с помощью устройства 6, ориентированного относительно микроустановки 1. Основой чувствительного элемента устройства 6 являются дифференциальный феррозонд и следящая система.

Скважинный прибор НИД-1 включает в себя электронный блок, размещенный в немагнитном корпусе, и управляемое прижимное устройство (УПУ) многократного действия, на рычагах которого располагаются башмаки с измерительными электродами. Конструкция прибора обеспечивает замену измерительных башмаков для работы с микроэкранированным дифференциальным зондом или макроградиент-зондом.

Средний диаметр скважины измеряют потенциометром, движок которого связан со штоком прижимного устройства.

Телеизмерительная система аппаратуры НИД-1 обеспечивает непрерывное измерение и передачу сигналов по семи каналам (три градиент-зонда; азимут ориентации одной из зондовых

установок угол и азимут искривления скважины; средний диаметр скважины).

В аппаратуре применена восьмиканальная телеизмерительная система с частотным разделением каналов, частотной модуляцией несущих и двумя АМ поднесущими. Несущие частоты составляют 7,8; 14,0; 25,7 и 45 кГц, поднесущие — 400 и 267 Гц.

Скважинный прибор (рис. 121) питается от наземного генератора 21 электрическим током частотой 400 Гц. Низкочастотные цепи питания и управления и высокочастотные измерительные цепи разделяются с помощью конденсатора С. Последовательно в цепь питания и управления включены трансформаторы накала и питания двигателей  $Tr1$ ,  $Tr2$ , анодный трансформатор  $Tr3$ , трансформатор питания зондов  $Tr4$ , диод Д и реле Р1. Через контакты реле РН ток замыкается по цепи переключателя В и резистор R2 или электромагнит ЭМ и далее — эталонный резистор стандарт-сигнала  $R_0$ .

Реле Р1 срабатывает при подаче на прибор напряжения питания 400 Гц через диод Д и резистор R1. При этом замыкаются нормально разомкнутые контакты реле и в цепь питания включаются резисторы R2, R3.

Прижимное устройство управляется импульсами отрицательной полярности с частотой 4—5 Гц и скважностью 2 от источника 19. При этом обмотка электромагнита ЭМ запитывается через нормально замкнутые контакты реле Р1—1.

Смена положения переключателя В происходит при подаче положительных импульсов. При этом замыкаются нормально разомкнутые контакты реле Р1—1 и запитывается обмотка переключателя В. В первом положении подключается сигнал «Нуль», во втором — «Стандарт», в третьем — измерительные сигналы от датчиков.

Измерительные датчики питаются переменным током частотой 400 и 267 Гц соответственно от наземного генератора 21 отдельного преобразователя 7. Преобразователь синхронизируется частотой 400 Гц (обмотки б  $Tr1$ ).

Токовые электроды зондов S1—S3 питаются от трансформатора  $Tr4$ , а микродвигателя М потенциометра азимута ориентации  $R_{\xi}$  — от трансформатора  $Tr1$  (обмотка а).

Для питания датчиков составляющих зенитного угла S4, S5 (выводы в), потенциометра  $R_d$  (среднего диаметра скважины) служит преобразователь 7 (267 Гц). Индукционный датчик S7 питается от отдельного генератора б (выводы г).

Устройство измерения азимута ориентации включает в себя трехфазный феррозондовый датчик S7 и следящую систему, состоящую из сельсина S6, усилителя 8, фазового детектора 9, магнитного усилителя 10, усилителя мощности 11, микродвигателя М и потенциометра  $R_{\xi}$ .

Величина э. д. с., возникающая в измерительной обмотке феррозонда S7, зависит от угла между направлением продоль-

ной оси феррозонда и направлением горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $H$ .

Сигналы, возникающие в измерительных обмотках феррозондов, подаются на обмотки синхронизации сельсина-приемника  $S6$  и возбуждают в нем магнитный поток. Направление результирующего вектора магнитного потока и, следовательно, сигнала в обмотке возбуждения сельсина определяется соотно-

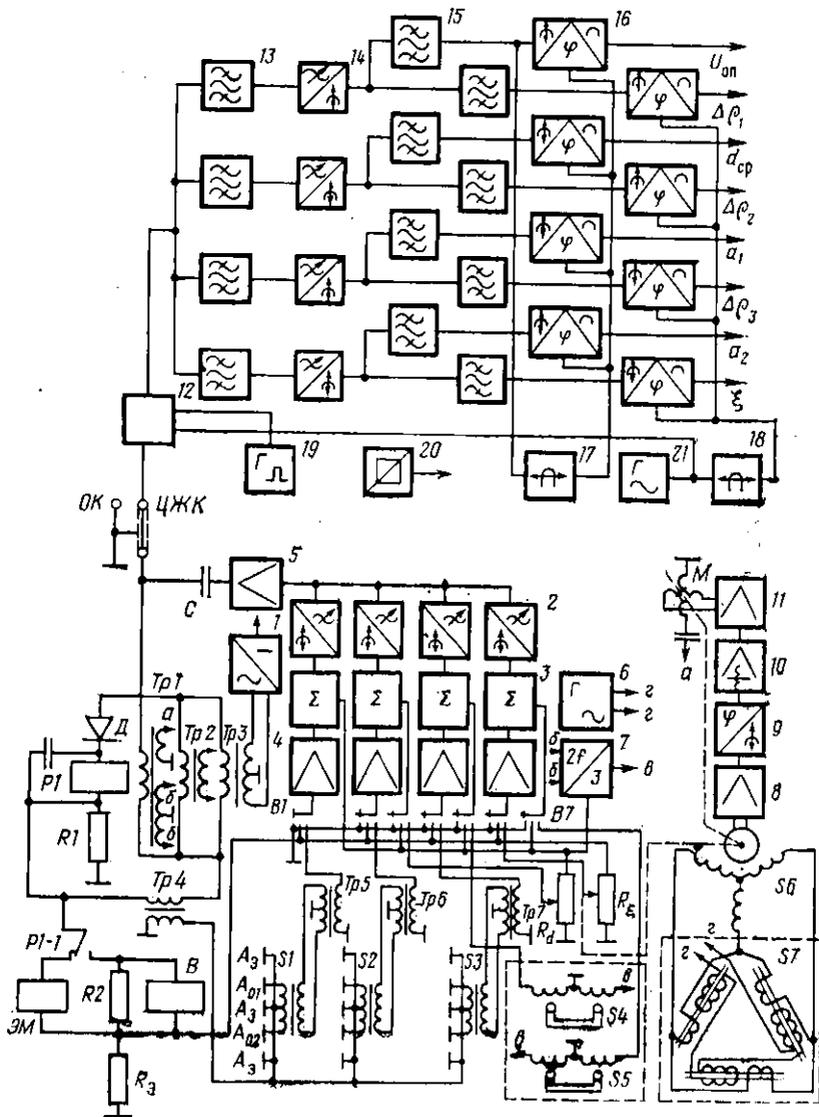


Рис. 121. Функциональная схема аппаратуры НИД-1

шением величин токов в обмотках синхронизации. Сигнал с обмотки возбуждения сельсина подается на вход избирательного усилителя (8, 9, 10, 11) в виде напряжения переменного тока, содержащего гармоники с частотами, кратными основной частоте (9 кГц). Усилитель усиливает только напряжение второй гармоники, преобразует его и подает в управляющую обмотку электродвигателя, который через редуктор вращает ротор сельсина до тех пор, пока напряжение второй гармоники в обмотке возбуждения сельсина не станет равным нулю.

При повороте датчика в горизонтальной плоскости на некоторый угол относительно направления магнитного меридиана изменяется распределение тока в обмотках синхронизации сельсина, и двигатель поворачивает ротор сельсина на тот же угол. На корпусе сельсина укреплен реохорд, а на оси — ползунок реохорда  $R\xi$ , положение которого определяется положением датчика относительно магнитного меридиана, что позволяет регистрировать азимутальную ориентацию наклономера.

Аппаратура работает следующим образом. В скважинном приборе информационные сигналы от зондовых микроустановок  $S1-S3$  через согласующие трансформаторы  $Tr5-Tr7$  от датчиков составляющих зенитного угла  $S4, S5$ , от потенциометров азимута ориентации  $R\xi$  и диаметра скважины  $R_d$  через переключатель  $B$  (направления  $B1-B7$ ), усилители 4 (или непосредственно) поступают на входы смесителей 3. Суммарные сигналы с выходов смесителей подаются на вход частотных преобразователей 2. С выходов частотных преобразователей сигналы суммируются, усиливаются усилителем 5 и через разделительный конденсатор  $C$  поступают в канал связи (ЦЖК—ОК). Электронная схема скважинного прибора питается от выпрямителя 1.

В измерительной панели высокочастотные ЧМ-сигналы, переданные по кабелю через входное устройство 12, поступают на входы полосовых частотных фильтров 13, где разделяются по несущим частотам 7, 8; 14; 25, 7; 45 кГц; далее они подаются на входы частотных детекторов 14. Сигналы с выходов частотных детекторов поступают на фильтры 15 поднесущих частот 400 и 267 Гц. Разделенные по каналам сигналы 400 и 267 Гц поступают на входы фазочувствительных выпрямителей 16, опорные сигналы на которые подаются от фазовращающих усилителей 17, 18.

С выходов фазочувствительных выпрямителей аналоговые информационные сигналы, величины которых пропорциональны измеряемым параметрам, поступают на индикаторные и регистрирующие приборы.

Питание измерительной панели осуществляется от стабилизатора 20.

Метрологические характеристики инклинометра аппаратуры НИД-1 приведены в табл. 17.

Метрологические характеристики аппаратуры НИД-1

Пределы измерения:

удельных электрических сопротивлений пород при $\rho_n/\rho_c \leq 300$ , Ом·м	1—2000
диаметра скважины, мм	130—400

Основная погрешность измерения:

превышения характерных точек плоскости напластования вдоль трех образующих стенки скважины, мм	$\pm 2,5$
диаметра скважины, мм	$\pm 5$

### Аппаратура контроля качества цементирования и технического состояния обсадных колонн

Для контроля качества цементирования обсадных колонн применяют скважинный гамма-дефектомер-толщиномер типа СГДТ-2 [2], позволяющий определять наличие цементного камня за колонной, его плотность, полноту и равномерность заполнения затрубного пространства цементным камнем, эксцентриситет обсадной колонны, среднюю по периметру толщину стенки обсадных труб, дефекты, связанные с механическими или химическими воздействиями, эффективность и последствия перфорации, местоположение муфт, центрирующих фонарей и пакеров.

Скважинный прибор аппаратуры СГДТ-2 содержит два зонда для регистрации рассеянного гамма-излучения. Первый зонд (зонд дефектомера) состоит из источника ( $^{137}\text{Cs}$ ) и детектора. Детектор помещен во вращающийся свинцовый экран с коллимационными окнами. Второй зонд (зонд толщиномера) включает в себя источник мягкого гамма-излучения и детектор, расположенный также в свинцовом экране с коллимационными окнами. Второй зонд (зонд толщиномера) включает в себя источник мягкого гамма-излучения и детектор, расположенный также в свинцовом экране с коллимационными окнами.

При исследовании скважин регистрируются одновременно две диаграммы рассеянного гамма-излучения дефектомера и толщиномера. Кривая дефектомера записывается при равномерном вращении экрана в процессе непрерывного перемещения прибора вдоль скважины (круговая цементограмма) либо при остановке прибора (дефектограмма).

Аппаратура СГДТ-2 рассчитана на работу с трехжильным кабелем в комплекте с серийными геофизическими лабораториями общего назначения.

Разработана аппаратура СГДТ-3, которая заменит прибор СГДТ-2. Новая аппаратура отличается тем, что в ней нет системы вращения измерительного зонда, включающей электродвигатель и редуктор. Тем не менее прибор обеспечивает регистрацию плотности потока рассеянного гамма-излучения по периметру скважины в виде непрерывной кривой (селективной цементограммы).

Детекторы гамма-излучения равномерно расположены по периметру измерительного зонда прибора параллельно его оси и

взаимно экранированы. С помощью электронного коммутатора осуществляется последовательный, циклически повторяющийся «опрос» каждого детектора в течение определенного промежутка времени  $\Delta t$ .

С увеличением числа детекторов по характеру регистрируемая диаграмма приближается к кривой, зарегистрированной с помощью равномерно вращающегося направленного зонда. Однако реальные размеры, а также необходимость экранировки не позволяют увеличивать число детекторов в аппаратуре СГДТ-3, превышающее 6.

В приборе используется один источник гамма-излучения цезий-137. Зонды толщиномера и дефектомера совмещены.

Прибор рассчитан на работу как с трехжильным, так и одножильным бронированным кабелем. Применяется серийная наземная панель 1Р4-1П или ИПРКУ-А1.

Выводы о качестве цементирования можно сделать по данным измерений приборами АКЦ (см. § 2). Преимущество акустических исследований перед исследованиями гамма-гамма-методом, а также термометром заключается в возможности определения не только наличия цемента, но и его сцепления с обсадной колонной и горной породой [2].

В процессе испытания и опробования скважин, а также их эксплуатации необходимо определять состояние обсадной (технической) колонны: положение муфтовых соединений, наличие трещин, разрывов и отверстий, характер перфорированного интервала, изменение диаметра и толщины колонны и т. п.

Некоторые дефекты в обсадной колонне и за ней можно определять рассмотренной выше аппаратурой СГДТ. Исследование технического состояния обсадной колонны, определение муфтовых соединений, количества и местонахождение перфорационных отверстий с высокой эффективностью может быть выполнено аппаратурой скважинного акустического телевизора САТ-1.

Для обнаружения трещин, разрывов, отверстий в колонне, а также выявления изменения внутреннего диаметра колонны используют аппаратуру скважинного индукционного дефектомера ДСИ [2].

Местоположение муфтовых и замковых соединений труб, магнитных меток на трубах и нарушений в колонне (разрывы, утолщения) определяют с помощью приборов, основанных на измерении магнитного поля внутри колонны. На таком принципе основано построение магнитных локаторов муфт [6], а также прихватопредделителей и прихватометров [6]. При построении прихватопредделителей, кроме того, используют то обстоятельство, что остаточная намагниченность ферромагнитного материала резко изменяется, если ферромагнетик подвергнуть внешней деформации.

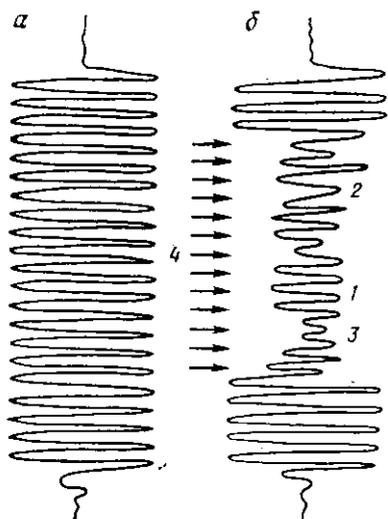


Рис. 122. Диаграммы, записанные аппаратурой АКП-1 до перфорации (а) и после перфорации (б)

Разработана аппаратура контроля перфорации АКП-1, принцип действия которой основан на следующих положениях.

До перфорации в предполагаемом интервале ее проведения обсадные трубы дискретно намагничивают с шагом, равным длине намагничивающего устройства. После этого осуществляют контрольную локацию намагниченных участков, которую проводят одновременно с записью кривой муфтовых соединений и естественной радиоактивности пластов. Как видно на рис. 122, а, при контрольной локации намагниченных участков регистрируется диаграмма гармонического вида.

После проведения перфорации (на рис. 122, б интервал показан стрелками 4) выполняют повторную запись диаграммы остаточной намагниченности колонны. Сравнивая диаграммы до и после перфорации, по нарушению регулярности в намагниченности точно определяют верхнюю и нижнюю границы интервала и характер перфорации. Из диаграммы, изображенной на рис. 122, б, следует, что в интервале перфорации намагниченность обсадной колонны претерпела существенные изменения: уменьшилась намагниченность (участок 1) и появились нарушения в регулярном характере намагниченности от образовавшихся отверстий или трещин в колонне (участки 2, 3). На фоне регулярной намагниченности колонны вне интервала воздействия четко выделяется интервал перфорации.

## § 5. АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИИ В ДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИНАХ

В последние годы все шире применяются промыслово-геофизические исследования в фонтанирующих и нагнетательных скважинах, а также в скважинах, оборудованных штанговыми и электроцентробежными насосами (ЭЦН). К приборам, применяемым при этих исследованиях, предъявляются следующие основные требования: надежность, простота, малые размеры. При проведении исследований используют специальное оборудова-

ние (см. гл. 8), позволяющее проводить геофизические измерения в скважинах без их остановки.

Комплекс геофизических исследований в действующих скважинах включает в себя изучение различными ядерно-геофизическими методами со стационарным и импульсным источниками нейтронов и гамма-квантов, измерение скорости перемещения жидкости (дебитометрию), плотности и состава флюидов по стволу скважины, измерение температуры, давления и другие виды исследования. При этом применяют аппаратуру, описанную выше, а также специальные приборы.

Построение скважинных приборов для ядерно-геофизических исследований основано на тех же принципах, что и построение описанных выше приборов. Однако в них используются более простые и надежные схемы и конструкции, и они имеют меньшие размеры.

Скорость и характер движения жидкости в эксплуатационных скважинах определяют с помощью механических и термоэлектрических дебитометров.

Механические дебитометры («Кобра-36Р», РГД-4 и др.) содержат вертушку, которая приводится в движение потоком флюида, поступающего из скважины, и электрическую схему для измерения числа оборотов вертушки.

Термоэлектрические дебитометры (СТД-2, Т-4 и др.) имеют датчик, представляющий собой подогреваемый резистор. Температура датчика определяется свойством флюида и скоростью потока в скважине. Чем выше скорость потока, тем ниже температура датчика (см. гл. II).

Для измерения состава флюидов по стволу скважины служат приборы, основанные на изучении рассеянного гамма-излучения и измерении удельного электрического сопротивления индукционным или обычным резистивиметром (см. гл. III).

Промышленное применение нашла аппаратура типа ГПП-1 [2], обеспечивающая одновременное измерение естественной радиоактивности горных пород и исследование плотностных и химических характеристик промысловой жидкости, заполняющей ствол скважины.

Геофизический скважинный комплексный прибор «Геоскоп-1» позволяет одновременно измерять и регистрировать температуру, давление, расход и содержание воды в добываемой продукции. Прибор снабжен локатором муфт. Предназначен для работы в составе комплексной промышленной исследовательской станции (КОМПАС), оборудованной автоматической скважинной телеизмерительной и регистрирующей аппаратурой (АСТРА). Частотная телеизмерительная система обеспечивает применение в качестве канала связи одножильный бронированный кабель длиной до 5000 м. Рабочие частоты преобразователей находятся в пределах 4—8, 10—20, 25—50 и 60—120 кГц. Прибор конструктивно выполнен по принципу

Таблица 19

## Основные характеристики скважинных термометров

Технические характеристики	ТЭГ-60	ТЭГ-60А	ТЭГ-36	Т-4
Пределы измерения, К	273—473	273—523	273—423	273—423
Приведенная основная погрешность измерения (не более), %	1,0	1,0	1,0	$\pm [0,8 + 0,006 (T^* - 293)]$ К
Постоянная времени, с	2	2	2	1,0
Предельные условия работы: давление, МПа	120	120	100	100
Время непрерывной работы при предельных условиях, ч	4	4	4	4
Размеры скважинного прибора, мм:				
диаметр	60	60	36	36
длина с кабельной головкой	2045	2045	2010	1170

\*  $T$  — измеряемая температура, К.

агрегатированного комплекса — отдельные функциональные блоки преобразователей соединяются между собой с помощью разъема.

В качестве примера рассмотрим особенности построения скважинных электронных термометров, используемых с целью решения задач термометрии скважин как в действующих, так и в бурящихся скважинах.

Распространение получили серийные скважинные электронные термометры на одножильном кабеле типа ТЭГ, а также термометр-индикатор расхода Т-4 (табл. 19). Принципиальные схемы названных скважинных приборов аналогичны.

Рассмотрим функциональную схему (рис. 123) термометра-индикатора расхода Т-4, который в отличие от ТЭГ

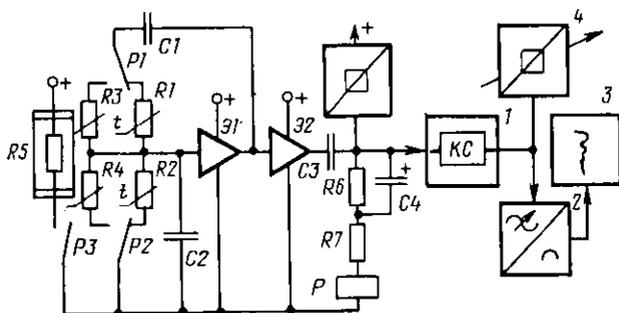


Рис. 123. Функциональная схема термометра-индикатора расхода Т-4

может работать в двух режимах — «Расход» и «Температура».

Датчиками в приборе Т-4 служат термочувствительные резисторы  $R1$ ,  $R2$  (или  $R3$ ,  $R4$ ). Резисторы включены в частотно-зависимую цепь обратной связи  $C1$ ,  $R1$ ,  $C2$ ,  $R2$  усилителя  $\mathcal{E}1$ ; они определяют частоту колебаний, возникающих на его выходе. Период  $T$  этих колебаний линейно зависит от величины сопротивлений резисторов  $R1$ ,  $R2$ . При  $R1=R2=R$  и  $C1=C2$   $T=2\pi RC$ .

Промодулированные по частоте колебания усиливаются в усилителе мощности  $\mathcal{E}2$  и через конденсатор  $C3$  подаются по каналу связи 1 на измерительную панель 2. Здесь частота колебаний преобразуется в аналоговый сигнал, который записывается регистратором 3.

Скважинный прибор имеет два первичных преобразователя: преобразователь температуры ( $R1$ ,  $R2$ ) и преобразователь расхода ( $R3$ ,  $R4$ ). Оба резистора в каждом преобразователе изготовлены из вольфрамовой нити и навиты в виде спирали на один стержень. Поверх резисторов  $R3$ ,  $R4$  наматывается подогревная обмотка ( $R5$ ) из нихромовой проволоки.

Работа прибора в качестве индикатора расхода основана на зависимости температуры подогрева любого тела, помещенного в поток жидкости, от относительной скорости его движения.

Переключаются режимы работы прибора с помощью схемы коммутации, которая состоит из реле  $P$ , резисторов  $R6$ ,  $R7$  и конденсатора  $C4$ . Переключение происходит за счет плавного или скачкообразного включения тока питания скважинного прибора от источника 4. При плавном увеличении тока питания скважинного прибора до номинального значения контакты реле  $P1-P3$  не включаются, потому что ток, проходящий через обмотку реле, меньше тока срабатывания. Это положение контактов реле (нормально замкнутые контакты) соответствует режиму работы «Температура».

При скачкообразном увеличении тока питания скважинного прибора до номинального значения контакты реле  $P1-P3$  включаются, так как при этом за счет зарядки конденсатора  $C4$  ток, проходящий через обмотку реле, увеличивается до значения тока срабатывания. Это положение контактов соответствует режиму работы «Расход».

## ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

---

В предыдущих главах были рассмотрены основные элементы промыслово-геофизической аппаратуры и оборудования, обеспечивающие измерение исследуемых параметров и регистрацию результатов исследований отдельными геофизическими методами.

В промысловой геофизике применяют также оборудование, выполняющее вспомогательную роль в процессе исследования скважин: устройства для обслуживания геофизического кабеля, лебедки и подъемники, устройства согласования перемещения скважинного прибора и диаграммной ленты, элементы обустройства скважин и др.

### § 1. ЛЕБЕДКИ И ПОДЪЕМНИКИ

#### Лебедки

Скважинный прибор перемещается в скважине (спуск и подъем) с помощью лебедки, на которой намотан геофизический кабель. В настоящее время большинство лебедок рассчитано на работу с бронированным геофизическим кабелем (одножильным, трехжильным или семижильным).

Основными частями лебедки являются рама, барабан, на который намотан кабель, привод для вращения барабана, укладчик кабеля и коллектор. Для предотвращения намагничивания кабеля барабан лебедки выполняют, как правило, из немагнитной стали. Барабан имеет колеса цепной передачи, с помощью которой он соединяется с приводом лебедки.

Привод лебедок тяжелого типа обычно осуществляется от двигателя автомобиля, на котором она монтируется. Для передачи вращения от двигателя к барабану лебедки служит коробка отбора мощности.

Для вращения барабана лебедок среднего типа могут также использоваться электродвигатели, а лебедок легкого типа с малым количеством кабеля (до 400 м) — ручной привод.

Передача от двигателя к барабану лебедки должна обеспечивать возможность изменения скорости подъема кабеля в диапазоне не менее 150—8000 м/ч иметь передачу на плавный спуск кабеля.

## Коллекторы

Для подсоединения измерительной цепи к жилам кабеля на лебедках устанавливаются коллекторы. Коллектор лебедки обычно состоит из подвижной части, связанной с барабаном лебедки, и неподвижной части — корпуса, закрепленного на раме лебедки. На одной из этих частей (обычно на подвижной) имеются изолированные металлические кольца, по которым скользят щетки. К кольцам подведены жилы кабеля; от щеток идут выводы на измерительную схему. Коллекторы лебедок бывают дисковые и цилиндрические.

Широкое применение в последнее время нашел маслonaполненный цилиндрический коллектор КМ-7.

## Подъемники

В зависимости от выполняемых задач и глубины исследуемых скважин лебедки устанавливают на отдельном автомобиле-подъемнике. Иногда подъемник и лаборатории объединяют в одном кузове автомобиля.

В табл. 20 приведены технические характеристики подъемников ПК-1, ПК-2, ПК-4, ПК-С.

Наиболее распространенным самоходным подъемником для исследования глубоких скважин является подъемник ПК-4, подробное описание которого приводится в работе [6].

Т а б л и ц а 20

Основные технические характеристики подъемников

Технические характеристики	ПК-1	ПК-2	ПК-4	ПК-С
Вместимость барабана лебедки, м	1100	2200	4200	7200
Диапазон скоростей подъема, м/ч	30—4000	100—8000	100—8000	100—10 000
Тяговое усилие на барабане, кг	2000	3000	6000	8000

Примечание. Диапазоны скорости подъема и тяговое усилие на барабане даны из расчета среднего диаметра барабана.

## Устройства блокировки и аварийного отключения привода лебедки

С целью предотвращения аварийных ситуаций подъемники снабжают противоаварийными средствами — автоматической блокировкой противозатаскивания и натяжения кабеля.

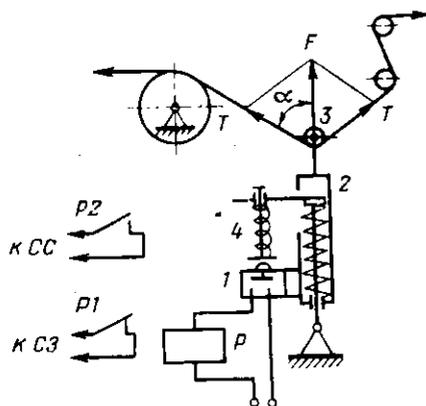
При подходе скважинного прибора к устью скважины или при достижении допустимого натяжения кабеля включается звуковая и световая сигнализация. Принцип работы противозатаскивателя основан на разности частот вращения дисков, которые обеспечивают возможность включения сигнализации только в одном из их положений. В рассматриваемом противозатаскивателе такое положение отмечено пазом, выполненным в каждом из дисков. Сигнализация включается от скобы, западающей в пазы дисков и воздействующей на микропереключатель.

Диски кинематически связаны с валом лебедки. При спуске прибора на кабеле в скважину на глубину 30—40 м диски устанавливаются так, чтобы пазы были совмещены и скоба могла западать в них, вызывая срабатывание сигнализации.

Продолжение спуска прибора ведет к тому, что диски, имеющие разную частоту вращения, разворачиваются на разные углы. Чем больше оборотов будет сделано лебедкой, тем больше возрастает смещение пазов относительно места, где возможно западание скобы на дисках.

При смене вращения на обратное (при подъеме скважинного прибора) западание скобы в пазы дисков произойдет в тот момент, когда количество оборотов лебедки, работающей на подъем кабеля, будет равно количеству оборотов лебедки, работающей на спуск кабеля. В этот момент срабатывает сигнализация, предупреждающая о подходе прибора к устью скважины.

На рис. 124 изображена функциональная схема устройства для аварийного выключения двигателя привода лебедки, наступающего при натяжении кабеля выше допустимого. Принцип работы устройства следующий.



Кабель проходит через ролик 3 динамометра 2 и систему направляющих роликов к устью скважины, где установлен блок-баланс или лубрикатор. Динамометр шарнирно крепится к раме устройства, что обеспечивает направление силы  $F$  вдоль его оси.

Увеличение силы натяжения кабеля  $T$ , например, за счет прихвата скважинного прибора, приводит к росту  $F$  в соответствии с выражением

$$F = 2T \cos \alpha.$$

Рис. 124. Функциональная схема устройства для аварийного выключения двигателя привода лебедки

Под ее действием корпус динамометра, преодолевая

усилие пружины, поднимается вверх, а прикрепленный к нему микровыключатель 1 при достижении определенного натяжения кабеля достигает толкателя 4 и замыкает свои контакты. В результате срабатывает реле Р, размыкая нормально замкнутый контакт Р1, включенный в цепь системы зажигания СЗ двигателя автомобиля. Двигатель глохнет, обрыв кабеля предотвращается. Одновременно через контакты Р2 может быть включена система сигнализации СС. Для предотвращения разрушения микровыключателя толкатель 4 подпружинен. Настройка устройства осуществляется регулированием расстояния между толкателем и микровыключателем.

## § 2. УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРИВЯЗКУ РЕЗУЛЬТАТОВ К ГЛУБИНАМ

Глубину, на которой находится скважинный прибор при регистрации геофизических параметров, проведении прострелочно-взрывных и других работ в скважине, устанавливают путем измерения длины кабеля, спускаемого в скважину. Приблизительно эта глубина определяется числом оборотов мерного ролика, по желобу которого кабель направляется в скважину. Уточняют глубины по магнитным меткам, нанесенным на кабель через определенные интервалы.

### Мерный ролик и датчик глубин

Мерный ролик рассчитан таким образом, что за один оборот через него проходит участок кабеля определенной известной длины  $l_p$ . Обычно расчетную длину  $l_p$  устанавливают равной 1500 мм для оплеточных и шланговых кабелей и 2000 мм для бронированных кабелей. Таким образом, расчетный радиус  $r_p$ , по которому кабель должен огибать ролик, определяется формулой

$$r_p = r_0 + \frac{d}{2} = \frac{l_p}{2\pi},$$

где  $r_0$  — радиус ролика, измеренный по дну желоба;  $d$  — диаметр кабеля.

Поскольку диаметры кабелей различных марок неодинаковы, радиус  $r_0$  должен быть регулируемым, чтобы удовлетворялось указанное равенство. С этой целью мерные ролики снабжают корректирующими вкладышами, которые при необходимости укрепляют в желобе ролика, доводя сумму  $r_0 + \frac{d}{2}$  до расчетных величин 239 мм (при  $l_p = 1500$  мм) или 318 мм (при  $l_p = 2000$  мм).

Передача вращения мерного ролика лентопротяжному механизму аналогового регистратора или к блоку синхронизации цифрового регистратора осуществляется с помощью системы электрической синхронной связи, сельсинной передачи [6]. Независимо от диаметра мерного ролика эта передача рассчитана таким образом, что прохождению 1 м кабеля соответствуют четыре оборота ротора сельсина-датчика. Для этого вал мерного ролика соединяется с ротором сельсина посредством редуктора с передаточным числом 6 при  $l_p = 1500$  мм или 8 при  $l_p = 2000$  мм.

### Разметка кабеля по глубинам

Рассмотренная система согласования перемещений скважинного прибора и диаграммной бумаги не гарантирует необходимой точности привязки результатов измерений к глубинам. Это происходит в основном из-за проскальзывания кабеля и несоответствия фактического радиуса огибания кабелем мерного ролика принятому расчетному значению.

Корректировку шкалы глубин на диаграммах и уточнение фактических глубин нахождения скважинного прибора выполняют путем использования магнитных меток, нанесенных на кабель через определенные интервалы — от 10 до 50 м. При их нанесении необходимо учитывать удлинение кабеля под действием натяжения и температуры. Наиболее точно такой учет обеспечивается при разметке кабеля в процессе исследования скважин, однако аппаратура для автоматической разметки движущегося кабеля не получила еще распространения, а при остановках натяжение кабеля заметно меняется, что приводит к существенным погрешностям. Поэтому на практике распространена разметка кабеля на стационарных автоматических разметочных установках [2, 6].

Натяжение кабеля в процессе его подъема из скважины изменяется непрерывно и оценивается выражением

$$P = (Q - Q_{ж}) + T_{т} + T_{и},$$

где  $Q$  — масса скважинного прибора и кабеля, опущенного в скважину;  $Q_{ж}$  — масса жидкости, вытесненной прибором и кабелем;  $T_{т}$  — сила трения кабеля о стенки скважины и промысловую жидкость;  $T_{и}$  — сила инерции кабеля при изменении скорости его движения.

На стационарной разметочной установке натяжение меняют ступенями, обычно через каждые 500 м передвижения кабеля, руководствуясь специальными таблицами, составленными для различных типов кабеля, массы приборов, параметров промысловой жидкости и скорости регистрации диаграмм.

Устройство для нанесения магнитных меток представляет собой катушку с С-образным сердечником, обращенным незамкнутой стороной к кабелю.

При пропускании через катушку импульса постоянного тока расположенный против нее участок кабеля намагничивается. Стирание меток производится в принципе таким же устройством, но вместо постоянного тока через катушку пропускают переменный ток промышленной частоты. Для надежного размагничивания кабеля его скорость перемещения перед размагничивающим устройством не должна превышать 1000 м/ч.

Улавливание меток в станциях последних выпусков осуществляется магнитомодуляционным меткоуловителем (магнитным зондом), схема которого представлена на рис. 21. Ранее для улавливания магнитных меток применяли катушку, аналогичную намагничивающей. При малой скорости кабеля такой меткоуловитель давал очень малый сигнал и не срабатывал, а при большой скорости регистрировались ложные метки от слабонамагниченных участков кабеля. Величина сигнала магнитомодуляционного меткоуловителя не зависит от скорости движения кабеля.

### **§ 3. ЭЛЕМЕНТЫ ОБУСТРОЙСТВА СКВАЖИН ПРИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

#### **Блок-баланс и устройства контроля пуско-подъемных операций**

Для обеспечения спуска и подъема кабеля в скважину и контроля его движения применяют блок-баланс с установленными на нем датчиками измерения длины кабеля, находящегося в скважине, скорости его перемещения и натяжения.

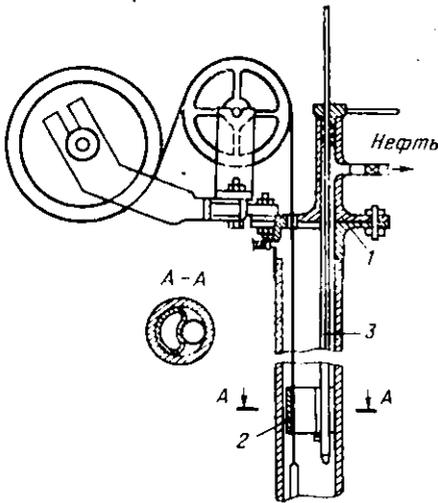
Чаще всего применяют рамочные и подвесные блок-балансы [2, 6]. При проведении геофизических исследований в скважинах с необорудованным устьем используют блок-балансы которые закрепляют на фланце обсадной колонны или ввинчивают в муфты бурильных труб. Основным элементом блок-баланса является мерный ролик. Для измерения нагрузок на кабель применяют датчик натяжения типа ДНТ-033 (см. гл. II). Для определения скорости движения кабеля в скважине сельсин-присланик через редуктор связывают с маломощным генератором переменного тока. В зависимости от числа оборотов сельсинна в генераторе развивается соответствующая э. д. с., измеряемая милливольтметром. Шкала милливольтметра проградуирована в единицах скорости (м/ч).

#### **Устьевое оборудование для работы под давлением**

Геофизические приборы спускают в эксплуатационные, нагнетательные скважины с избыточным давлением на устье через промежуточную емкость — лубрикатор, устанавливаемый на фонтанной арматуре [2].

Для герметизации устья скважины в процессе бурения в случае угрозы выброса или открытого фонтанирования применяют

Рис. 125. Оборудование скважины при исследовании через затрубное пространство



противовыбросовые превенторы. Целесообразно использовать превентор совместно с установленным на нем лубрикатором. Это позволяет применять лубрикатор при давлении на устье, на которое рассчитан превентор.

#### Оборудование при исследовании скважины через затрубное пространство

Геофизические исследования скважин, оборудованных штанговыми глубинными насосами, осуществляют с помощью малогабаритных приборов, спускаемых в межтрубное пространство (см. рис. 125).

Спуск прибора в межтрубное пространство становится возможным в результате наличия в оборудовании планшайбы 1 с эксцентричной подвесной трубой 3 и эксцентричного фонаря 2 на конце колонны насосно-компрессорных труб.

#### Оборудование при исследовании скважин с электроцентробежными насосами

Геофизические исследования в скважинах с погружными электроцентробежными насосами можно проводить с использованием устройства, разработанного во ВНИИ нефтепромышленной геофизики.

Устройство (рис. 126) устанавливают в месте соединения погружного насоса и колонны насосно-компрессорных труб (НКТ); оно включает в себя запорно-сливной 2 и запорно-пропускной 3 клапаны, расположенные в корпусе децентрактора 1. В корпусе имеются отверстия: а — для прохождения скважин-

ных приборов и *б* — для слива жидкости из НКТ 5. Устройство показано в положении, когда прибор 7 спущен под насос 8. Отверстие *а* уплотнено сальником 9, спускаемым вместе с прибором. Насос отключен.

При включении насоса 8 жидкость через патрубок *б* поступает по цилиндрической проточке *е* под запорно-сливной клапан. Последний поднимается вверх. При этом отверстия *в* и *г* совмещаются, и жидкость через отверстия *д*, *г*, *в* поступает в НКТ 5. Под действием собственного веса, веса кабеля 10 и перепада давления на сальнике прибор опускается на забой, где проводят исследования при различных режимах эксплуатации.

Для извлечения прибора насос отключают. При этом запорно-сливной клапан 2 опускается вниз. Жидкость из НКТ сливается через отверстия *б* и *в* в межтрубное пространство. В результате давление, воздействующее на сальник сверху и снизу, выравнивается, и прибор вместе с сальником поднимается в НКТ.

Теперь при пуске насоса жидкость поступает по цилиндрической проточке *е* и через соединительные каналы *з* и *и* воздействует на поршень клапана 3, который перемещается влево, перекрывая отверстие *а*. Каналы *з* и *и* соединяются посредством проточки *ж*, выполненной на корпусе запорно-сливного клапана 2. Шарик 4 препятствует подъему клапана 2 вверх, поскольку при подъеме клапана под шариком создается разрежение. Дальнейшее повышение давления, развиваемого насосом, приводит к отрыву клапана 2 и перемещению его вверх. Отверстие *б* перекрывается. Жидкость поступает в НКТ по каналу *е—д—г—в*.

При остановке насоса в случае необходимости спуска прибора клапан 2 опускается вниз, соединяя каналы *з* и *и*. Справа на поршень клапана 3 воздействует давление столба жидкости в межтрубном пространстве. Поскольку гидравлическое сопротивление канала *в—б* значительное, в начальный момент слива жидкости из НКТ слева на поршень клапана 3 воздействует давление, превышающее давление, действующее справа. В результате поршень перемещается вправо и открывает отверстие *а* для пропуска прибора.

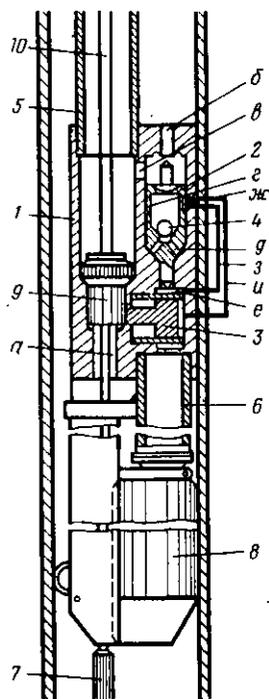


Рис. 126. Оборудование скважин с электроцентробежным погружным насосом

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## Основная литература

1. Горбенко Л. А. Каротажные кабели и их эксплуатация. М., Недра, 1978.
2. Дьяконов Д. И., Леонтьев Е. И., Кузнецов Г. С. Общий курс геофизических исследований скважин. М., Недра, 1977.
3. Зельцман П. А. Конструирование аппаратуры для геофизических исследований скважин. М., Недра, 1968.
4. Ивакин Б. Н., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. Акустический метод исследования скважин. М., Недра, 1978.
5. Ларионов В. В. Радиометрия скважин. М., Недра, 1969.
6. Померанц Л. И., Чукин В. Т. Аппаратура и оборудование для геофизических методов исследования скважин. Изд. 2-е, перераб. М., Недра, 1978.
7. Ривкин И. Я. Автоматические каротажные станции. М., Недра, 1964.
8. Сохранов Н. Н. Машинные методы обработки и интерпретации результатов геофизических исследований. М., Недра, 1973.
9. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. М., Госгеолтехиздат, 1963.
10. Фремке А. В. Телеизмерения. М., Высшая школа, 1975.
11. Электрические измерения/Под ред. Е. Г. Шрамкова. М., Высшая школа, 1972.
12. Электрические измерения неэлектрических величин/А. М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др. Л., Энергия, 1975.

## Дополнительная литература

13. Алиев Т. М., Мамаконов А. Г., Мелик-Шахназаров А. М. Информационные системы в нефтяной промышленности. М., Недра, 1972.
14. Булатова Ж. М., Волкова Е. А., Дубров Е. Ф. Акустический каротаж. Л., Недра, 1970.
15. Воскобойник Н. И. О скорости электрического каротажа при комплексных измерениях с временным разделением. — Прикладная геофизика, вып. 23. М., Гостоптехиздат, 1960, с. 202—216.
16. Горн Л. С., Хазанов Б. И. Схемотехника радиометров. М., Атомиздат, 1977.
17. Комаров С. Г. Геофизические методы исследования скважин. Изд. 2-е, перераб. М., Недра, 1973.
18. Кривко Н. Н. Основы телеметрии физических полей в нефтяных и газовых скважинах. М., изд. МИНХ и ГП, 1979.
19. Ремонт промысловой геофизической аппаратуры/А. Е. Зерщиков, В. П. Луков, В. И. Неговора и др. М., Недра, 1976.
20. Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика. М., Недра, 1978.
21. Справочник геофизика. Т. IV. Сейсморазведка. М., Недра, 1966.
22. Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И. Теоретические основы информационной техники. М., Энергия, 1979.
23. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы. М., Энергия, 1974.
24. Электрические измерительные преобразователи/В. Ю. Кончаловский, Я. А. Купершмидт, Р. Я. Сыролятова, Р. Р. Харченко. М., Энергия, 1967.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Глава I. Общие принципы геофизических измерений в скважинах . . . . .	8
§ 1. Общие сведения о скважинных телеизмерительных системах . . . . .	8
§ 2. Некоторые характеристики скважинных телеизмерительных систем . . . . .	15
§ 3. Состав и назначение блоков скважинных телеизмерительных систем . . . . .	22
§ 4. Общая характеристика измерительных преобразователей . . . . .	25
Глава II. Преобразователи незлектрических величин в электрические . . . . .	29
§ 1. Контактные преобразователи . . . . .	29
§ 2. Резистивные преобразователи . . . . .	30
§ 3. Магнитные преобразователи . . . . .	41
§ 4. Емкостные преобразователи . . . . .	49
§ 5. Радиационные преобразователи . . . . .	51
§ 6. Генераторные преобразователи . . . . .	59
Глава III. Зонды и датчики геофизических параметров . . . . .	66
§ 1. Зонды для электрических и электромагнитных методов . . . . .	66
§ 2. Зонды для радиометрии скважин . . . . .	78
§ 3. Акустические зонды . . . . .	85
§ 4. Датчики каверномеров и профиломеров . . . . .	93
§ 5. Датчики инклинометров . . . . .	96
§ 6. Датчики электрических термометров и термоэлектрических расходомеров . . . . .	99
Глава IV. Измерительные и регистрирующие приборы . . . . .	101
§ 1. Способы измерения напряжения и тока при аналоговой регистрации . . . . .	102
§ 2. Принцип действия и статические параметры зеркального гальванометра . . . . .	104
§ 3. Уравнение движения рамки гальванометра . . . . .	107
§ 4. Включение гальванометра в измерительный канал светолучевого осциллографа . . . . .	111
§ 5. Светолучевые осциллографы . . . . .	114
§ 6. Принцип действия автоматического потенциометра . . . . .	124
§ 7. Уравнение движения ротора электродвигателя в системе автоматического потенциометра . . . . .	128
§ 8. Двухканальный автоматический потенциометр ПАСК-8 . . . . .	131
§ 9. Основы цифровой регистрации промыслово-геофизических данных . . . . .	136
§ 10. Цифровые преобразователи-регистраторы геофизических данных . . . . .	146
§ 11. Цифровые регистраторы геофизических измерительных лабораторий . . . . .	153
Глава V. Электрические параметры геофизических кабелей . . . . .	161
§ 1. Общая характеристика и устройство геофизических кабелей . . . . .	161
§ 2. Первичные электрические параметры геофизических кабелей . . . . .	163
§ 3. Вторичные (волновые) параметры геофизических кабелей . . . . .	169
Глава VI. Геофизические измерительные лаборатории и станции . . . . .	173
§ 1. Общая характеристика измерительных лабораторий и станций . . . . .	173
§ 2. Аналоговые измерительные лаборатории и станции . . . . .	175
§ 3. Цифровые измерительные лаборатории . . . . .	180
§ 4. Компьютеризованные геофизические лаборатории . . . . .	184

§ 5. Аппаратура для передачи по каналам связи цифровых результатов геофизических исследований скважин . . . . .	187
Глава VII. Скважинная геофизическая аппаратура . . . . .	193
§ 1. Аппаратура для электрометрии скважин . . . . .	194
§ 2. Аппаратура для акустических исследований . . . . .	215
§ 3. Аппаратура для радиометрии скважин . . . . .	233
§ 4. Аппаратура для контроля технического состояния скважин . . . . .	256
§ 5. Аппаратура для исследований в действующих скважинах . . . . .	266
Глава VIII. Промышленно-геофизическое оборудование . . . . .	270
§ 1. Лебедки и подъемники . . . . .	270
§ 2. Устройства, обеспечивающие привязку результатов к глубинам . . . . .	273
§ 3. Элементы обустройства скважин при геофизических исследованиях . . . . .	275
Список литературы . . . . .	278

**Николай Николаевич Кривко**  
**Валерий Дмитриевич Шароварин**  
**Владимир Николаевич Широков**

**ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА  
И ОБОРУДОВАНИЕ**

Редактор издательства *Н. Г. Богачева*  
Переплет художника *А. Е. Гучканова*  
Художественный редактор *В. В. Шутько*  
Технические редакторы *Р. Ф. Самойлова, Н. С. Гришанова*  
Корректор *Р. Т. Баканова*

ИБ № 3628

Сдано в набор 04.02.81. Подписано в печать 13.05.81. Т-08864. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Бумага типографская № 3. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. п. л. 17,5. Усл. кр.-отт. 17,5. Уч.-изд. л. 17,89. Тираж 5900 экз. Заказ № 543/6946—3. Цена 85 коп.

Издательство «Недра», 103633, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.