



С. И. Васильев, Е. Н. Мечус, М. А. Елисеев

**ДАТЧИКИ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВОМ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН**



«Инфра-Инженерия»

УДК 622.241(03)  
ББК 33.13+32.965.-044.3[я2]  
В19

**Васильев, С. И.**

**В19** Датчики систем управления строительством нефтегазовых скважин : учебное пособие / С. И. Васильев, Е. Н. Мечус, М. А. Елисеев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 168 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0298-9

Рассмотрено функциональное назначение устройств, предназначенных для контроля процесса бурения скважин и управления им. Приведены сведения о датчиках и системах управления строительством нефтяных и газовых скважин, обеспечения безопасности при бурении. Представлена информация об инновационных типах датчиков, находящихся в составе станций геолого-технологических исследований и контроля процесса бурения скважин.

Предназначено для студентов и аспирантов направления подготовки «Нефтегазовое дело», а также для работников нефтегазовой отрасли.

УДК 622.241(03)  
ББК 33.33+32.965.-044.3[я2]

ISBN 978-5-9729-0298-9

© Васильев С. И., Мечус Е. Н., Елисеев М. А. 2020  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СРЕДСТВА И СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН ...	6
2. КЛАСИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН .....	9
2.1. Классификация датчиков регистрации параметров .....	9
2.2. Принципы реализации измерений параметров бурения скважин.....	9
3. УСИЛИТЕЛИ АВТОМАТИКИ.....	15
4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ.....	17
4.1. Общие сведения .....	17
4.2. Параметрические измерительные схемы .....	17
4.3. Генераторные измерительные схемы.....	20
4.4. Измерительные усилители .....	22
4.5. Выпрямители .....	24
4.6. Активные фильтры .....	25
4.7. Компенсационные схемы .....	26
4.8. Дифференциальная схема .....	27
4.9. Чувствительность измерительных схем .....	28
5. ДАТЧИКИ МОМЕНТА НА РОТОРЕ .....	29
5.1. Датчики момента на роторе для установок с электроприводом .....	29
5.2. Датчики момента на роторе для установок с цепным приводом .....	31
5.3. Датчики момента на роторе для установок с механическим приводом .....	31
5.4. Датчики момента на роторе для установок с угловым редуктором.....	32
5.5. Тензометрические датчики измерения усилия под опорой .....	32
5.6. Датчики измерения реактивного момента между основанием и столом ротора (тензометрические на растяжение).....	33
6. ДАТЧИКИ ВЕСА БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	41
6.1. Датчики натяжения неподвижной ветви талевого каната .....	41
6.2. Тензометрический датчик растяжения конструкций крепления неподвижной ветви талевого каната .....	48
7. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ КЛИНЬЕВ РОТОРА.....	52
7.1. Датчики положения клиньев по давлению в пневматической системе.....	52
7.2. Акселерометрические датчики положения клиньев.....	53
7.3. Датчик ДКР положения клиньев .....	55
8. ДАТЧИКИ ПЛОТНОСТИ БУРОВОЙ ЖИДКОСТИ .....	57
8.1. Поплавковые (весовые) плотномеры .....	57
8.2. Резонансные плотномеры.....	58
8.3. Диффометрические плотномеры.....	59
8.4. Радиоактивные (гамма-гамма) плотномеры.....	61
8.5. Примеры конструктивного исполнения датчиков плотности буровой жидкости .....	63
9. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ БУРОВОГО РАСТВОРА.....	67
9.1. Датчик давления бурового раствора на входе скважины .....	70
9.2. Датчик давления бурового раствора в линии нагнетания ДВД-1 .....	71

10. ДАТЧИКИ РАСХОДА БУРОВОЙ ЖИДКОСТИ .....	73
10.1. Электромагнитные датчики расхода .....	73
10.2. Кориолисовые расходомеры .....	75
10.3. Ультразвуковые (доплеровские) расходомеры .....	76
10.4. Индикаторы потока .....	78
10.5. Ультразвуковой расходомер ДРУ .....	82
10.6. Индикатор расхода бурового раствора на выходе ИРМ .....	83
10.7. Датчик-расходомер количества выходящего бурового раствора Weatherford ...	84
10.8. Ультразвуковые датчики уровня буровой жидкости (радарный уровнемер) .....	85
10.9. Гидростатические датчики уровня .....	88
10.10. Поплавковые датчики уровня буровой жидкости .....	90
10.11. Датчик уровня бурового раствора геркононовый .....	94
10.12. Измеритель суммарного уровня буровой жидкости в ёмкостях ИСУ-1 .....	97
11. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ БУРОВОЙ ЖИДКОСТИ .....	103
11.1. Датчик температуры буровой жидкости на входе/выходе НПФ «Геофизика» .....	105
11.2. Датчик температуры буровой жидкости на выходе ДТР .....	106
11.3. Датчик плотности и температуры бурового раствора (в приёмной ёмкости) ..	107
11.4. Датчики проходки (глубины) скважины .....	108
12. ДАТЧИКИ ОБОРОТОВ ВАЛА БУРОВОЙ ЛЕБЕДКИ .....	111
12.1. Датчики оборотов лебедки магнитного типа .....	111
12.2. Датчики оборотов лебедки с клиноременной передачей .....	112
12.3. Датчики оборотов лебедки с прямой передачей .....	114
12.4. Датчики положения крюка на подвижных судах/платформах .....	118
12.5. Датчик оборотов вала буровой лебёдки .....	119
12.6. Датчик положения талевого блока ДОЛ-5 .....	120
12.7. Датчик положения буровой лебедки Wetherford .....	121
13. ДАТЧИКИ ХОДОВ НАСОСА И ОБОРОТОВ РОТОРА .....	122
13.1. Датчик ДОР/ДХН .....	125
13.2. Датчик ДХН .....	126
14. ИНКЛИНОМЕТРИЯ .....	127
14.1. Датчики контроля газосодержания в буровых растворах .....	130
15. КАВЕРНОМЕТРИЯ .....	133
15.1. Управляемый скважинный каверномер КМ-43 .....	133
15.2. Профилемер-каверномер скважинный ПФ-80-8, ПФ-80-8Т .....	134
15.3. Указатель направления ветра УНВ-310 .....	135
16. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН .....	139
ГЛОССАРИЙ .....	159
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	162
Приложение. Примеры расчета глубины обрыва буровой колонны .....	163

## 1. СРЕДСТВА И СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Для организации безопасного ведения работ при строительстве скважины и обеспечения безопасности на случай пожара, инженерно-технический и рабочий персонал обеспечивается средствами индивидуальной защиты и спецодеждой.

Для обеспечения безопасности работающих в случае возгорания при строительстве скважины, инженерно-технический и рабочий персонал обеспечивается следующей нормативно-технической документацией по пожарной безопасности:

- Постановление Правительства РФ от 25 апреля 2012 г. № 390 «О противопожарном режиме»;
- Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности ППБО-85;
- Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. НПБ 105-03, ГУГПС и ФГУ ВНИИПО МЧС России № 2003.

Рабочий персонал при строительстве скважины обеспечивается следующей нормативно-технической документацией по безопасности труда, разработанной и утвержденной на данном предприятии:

- инструкции по профессиям и видам работ;
- инструкции по безопасной эксплуатации оборудования;
- мероприятия по предупреждению аварий и осложнений;
- план ликвидации возможных аварий.

Основные средства контроля параметров бурения нефтяных и газовых скважин представлены в табл. 1, подробное описание устройства, принципа их действие раскрыто в последующих разделах справочного пособия.

**Таблица 1**

**Средства контроля параметров бурения нефтяных и газовых скважин**

№ п/п	Наименование устройства	Шифр	Количество, шт.
1	Станция геолого-технических исследований с комплектом наземных технологических датчиков системы контроля и управления процессом бурения	Разрез	1
2	Пульт контроля процесса бурения	АМТ-121	1
3	Гидравлический индикатор веса	ГИВ-6-1	1
4	Датчик веса	ДВР-2Б	1
5	Манометр	МТС-7104	—
6	Манометр нагнетательной системы	МТ-500	1
7	Манометр пневмосистемы	МТ-16	1
8	Электроконтактный манометр	ЭКМ	1
9	Расходомер бурового раствора	РГР-7	1
10	Указатель уровня в приемных емкостях	УП-11М	1
11	Станция контроля цементирования	СКУПЦ-К	1
12	Лаборатория дефектоскопии	ПКДЛ-1	1
13	Лаборатория глинистых растворов	ЛГР-3	1
14	Прибор Вика для определения параметров цементного раствора	—	1
15	Автоматическая газокаротажная станция	АГКС-4АЦ	1
16	Счетчик расхода холодной воды	СТВ-100	1

№ п/п	Наименование устройства	Шифр	Количество, шт.
17	Система емкостей с уровнемерами и устройством авт. сигнализации уровня жидкости в емкостях	–	–
18	Переносные сигнализаторы загазованности	СП-20-М	2
19	Комплекс средств для контроля параметров бурения	Разрез	1
20	Станция инклинометрическая буровая	Schlumberger	1
21	Измеритель потока бурового раствора на выходе из скважины со звуковой и световой сигнализацией	–	1
22	Измеритель уровня раствора в доливной емкости со звуковой и световой сигнализацией	УП-11М с СС-1	1
23	Прибор громкоговорящей связи	ПГС-10	1
24	Пульт управления противовыбросовым оборудованием	ГУЛ 100БР	1
25	Ограничитель допускаемой грузоподъемности лебедки	ОБЛ	1
26	Блокирующее устройство по отключению привода буровых насосов при повышении давления в нагнетательном трубопроводе на 10–15 % выше максимального рабочего давления насосов для соответствующей цилиндрической втулки	КП 50-500	–

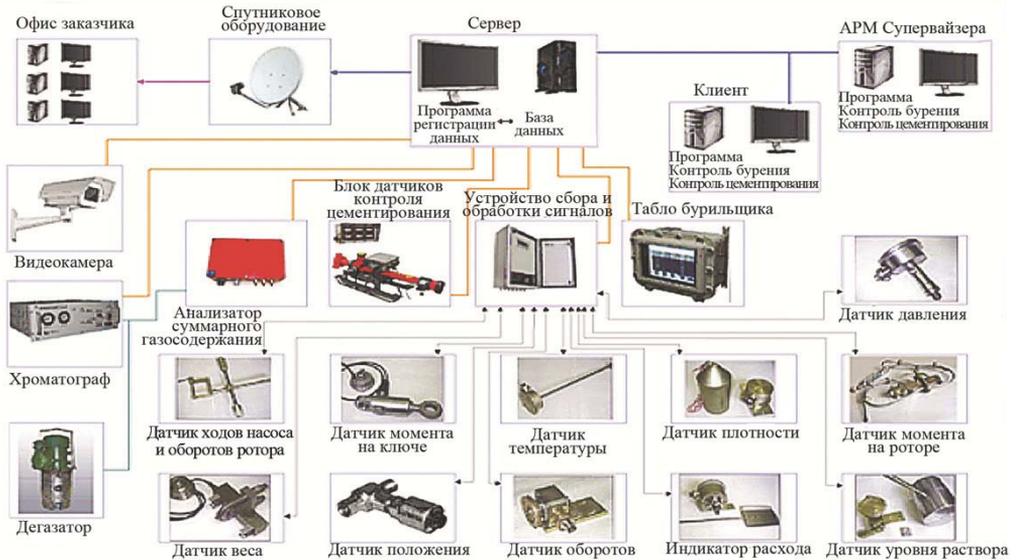
*В процессе бурения* системой измерения параметров бурения скважины (рис. 1) непрерывно регистрируются следующие технологические параметры:

- глубина скважины;
- механическая скорость проходки;
- вес на крюке;
- нагрузка на долото;
- давление промывочной жидкости на входе;
- давление промывочной жидкости на выходе;
- расход промывочной жидкости на выходе из скважины (индикатор потока);
- расход промывочной жидкости на входе;
- уровень и объем промывочной жидкости в приемных емкостях и доливочной емкости;
- скорость спуска и подъема бурильного инструмента;
- плотность промывочной жидкости на входе и выходе из скважины;
- число ходов насосов;
- температура промывочной жидкости на входе и выходе из скважины;
- электропроводность промывочной жидкости на входе и выходе из скважины;
- крутящий момент на роторе;
- крутящий момент на ключе;
- обороты ротора.

*В процессе технологических исследований* (рис. 1) фиксируются и корректируются по мере изменения следующие сведения:

- конструкция бурового инструмента;
- конструкция скважины;
- диаметры и интервалы открытого ствола скважины;
- диаметр и глубина спуска обсадных колонн;
- количество емкостей, включенных в циркуляцию, и площадь их поверхности;
- наименование используемых систем очистки и дегазации промывочной жидкости;

- наименование производимых на буровой операции с указанием времени начала и конца;
- оценка ситуаций и краткая их характеристика;
- выдаваемые буровой бригаде предупреждения и рекомендации;
- оценка действий буровой бригады после выдачи предупреждений и рекомендаций;
- типоразмеры спускаемых долот, их износ;
- фактическая проходка и время долбления;
- параметры промывочной жидкости.



**Рис. 1. Схема измерения параметров при бурении нефтяных и газовых скважин**

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

### 2.1. Классификация датчиков регистрации параметров

Классификацию датчиков регистрации параметров процесса бурения скважин целесообразно построить на основе принципа их действия. Все датчики целесообразно разделить на датчики:

- активного сопротивления;
- реактивного сопротивления;
- генераторные датчики.

*Датчики активного сопротивления* подразделяются на потенциметрические, тензометрические, контактные датчики и термометры сопротивления.

Следует отметить, что потенциметрические датчики подразделяются на датчики, выполненные по схеме реостата и по схеме делителя напряжения.

*Датчики реактивного сопротивления* подразделяются на датчики емкостные и датчики индуктивные.

*Датчики генераторного типа* подразделяются на тахометрические, термоэлектрические и пьезоэлектрические.

Независимо от принципа действия датчика каждый из них может иметь линейную или не линейную характеристику. Датчики, имеющие линейную характеристику, обозначаются *A*, нелинейную характеристику – *B* или *C* (рис. 2).

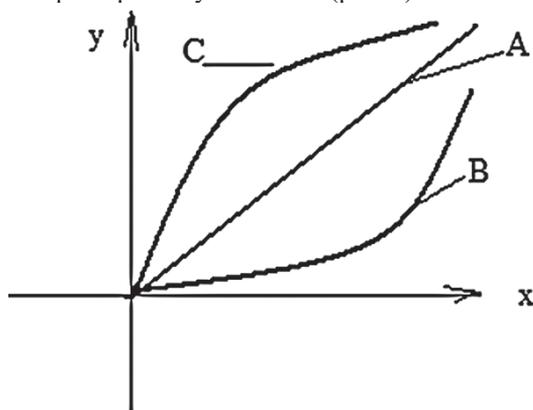


Рис. 2. Виды характеристик датчиков систем управления и регистрации параметров

Независимо от принципа действия и вида характеристики все датчики могут иметь однократную характеристику – зависимость выходного параметра от входного расположена в одном из квадрантов декартовой системы координат, или двухкратную характеристику – зависимость выходного параметра от входного расположена в двух квадрантах декартовой системы координат.

### 2.2. Принципы реализации измерений параметров бурения скважин

*Физические принципы* измерения параметров бурения базируются на преобразовании механического момента в электрический сигнал. Могут быть использованы индукционные, ёмкостные, магнитоупругие, струнные, тензометрические, гидравлические и др. типы преобразователей.

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент – приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей, в том числе для герметичного соединения датчика с объектом и защиты от внешних воздействий и устройства вывода информационного сигнала. Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, ёмкостный, индуктивный, резонансный, ионизационный, пьезоэлектрический и другие.

### **Тензометрический метод**

Чувствительные элементы датчиков базируются на принципе изменения сопротивления при деформации тензорезисторов, приклеенных к упругому элементу, который деформируется под действием давления.

### **Пьезорезистивный метод**

Основан на интегральных чувствительных элементах из монокристаллического кремния. Кремниевые преобразователи имеют высокую чувствительность благодаря изменению удельного объемного сопротивления полупроводника при деформировании давлением. Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются, так называемые, Lowcost – решения, основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с защитой силиконовым гелем. Для измерения агрессивных сред и большинства промышленных применений используется преобразователь давления в герметичном металло-стеклянном корпусе, с разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды посредством кремнийорганической жидкости.

### **Ёмкостной метод**

Ёмкостные преобразователи используют метод изменения ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые ёмкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости. В элементе из керамики или кремния пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью. Недостаток – нелинейная зависимость емкости от приложенного давления.

Ёмкостным датчиком называют преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение ёмкостного сопротивления.

Возможные области применения ёмкостных датчиков чрезвычайно разнообразны. Они используются в системах регулирования и управления производственными процессами почти во всех отраслях промышленности. Ёмкостные датчики применяются для контроля заполнения резервуаров жидким, порошкообразным или зернистым веществом, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, конвейерах, роботах, обрабатывающих центрах, станках, в системах сигнализации, для позиционирования различных механизмов и т. д.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили датчики приближения (присутствия), которые помимо своей надежности, имеют широкий ряд преимуществ. Имея сравнительно низкую стоимость, датчики приближения охватывают огромный спектр направленности по своему применению во всех отраслях промышленности. Типичными областями использования ёмкостных датчиков этого типа являются:

- сигнализация заполнения емкостей из пластика или стекла;
- контроль уровня заполнения прозрачных упаковок;
- сигнализация обрыва обмоточного провода;

- регулирование натяжения ленты;
- поштучный счет любого вида и др.

Емкостные датчики линейных и угловых перемещений являются наиболее распространенными приборами, широко используемыми в машиностроении и на транспорте, строительстве и энергетике, в различных измерительных комплексах.

Сравнительно новыми приборами, доведенными до широкого промышленного применения в последние годы, стали малогабаритные емкостные инклинометры с электрическим выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика. В качестве основных можно считать следующие области применения инклинометров: использование в системах горизонтирования платформ, определение величины прогибов и деформаций различного рода опор и балок, контроль углов наклона автомобильных и железных дорог при их строительстве, ремонте и эксплуатации, определение крена автомобилей, кораблей и подводных роботов, подъемников и кранов, экскаваторов, сельскохозяйственных машин, определение углового перемещения различного рода вращающихся объектов – валов, колес, механизмов редукторов как на стационарных, так и подвижных объектах.

Емкостные датчики уровня находят применение в системах контроля, регулирования и управления производственными процессами в пищевой, фармацевтической, химической, нефтеперерабатывающей промышленности. Они эффективны при работе с жидкостями, сыпучими материалами, пульпой, вязкими веществами (проводящими и непроводящими), а также в условиях образования конденсата, запыленности.

Емкостные датчики (рис. 3) также находят применение в различных отраслях промышленности для измерения абсолютного и избыточного давления, толщины диэлектрических материалов, влажности воздуха, деформации, угловых и линейных ускорений и др.



**Рис. 3. Номенклатура емкостных преобразователей**

Емкостные датчики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с датчиками других типов. К их *достоинствам* относятся:

- простота изготовления, использование недорогих материалов для производства;
- малые габариты и вес;
- низкое потребление энергии;
- высокая чувствительность;
- отсутствие контактов (в некоторых случаях – один токосъем);
- долгий срок эксплуатации;
- потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части емкостного датчика;
- простота приспособления формы датчика к различным задачам и конструкциям.

К *недостаткам* емкостных датчиков следует отнести:

- сравнительно небольшой коэффициент передачи (преобразования);
- высокие требования к экранировке деталей;
- необходимость работы на повышенной (по сравнению с 50 Гц) частоте.

Однако в большинстве случаев можно добиться достаточной экранировки за счет конструкции датчика, а практика показывает, что емкостные датчики дают хорошие результаты на широко распространенной частоте 400 Гц. Присущий конденсаторам краевой эффект становится значительным, лишь когда расстояние между обкладками сравнимо с линейными размерами рассматриваемых поверхностей. Этот эффект можно в некоторой степени устранить, используя защитное кольцо, позволяющее вынести его влияние за границы поверхности обкладок, реально используемой при измерении.

Емкостные датчики замечательны своей простотой, что позволяет создавать прочные и надежные конструкции. Параметры конденсатора зависят только от геометрических характеристик и не зависят от свойств используемых материалов, если эти материалы правильно подобраны. Следовательно, можно сделать пренебрежимым влияние температуры на изменения площади поверхности и расстояния между обкладками, правильно подбирая марку металла для обкладок и изоляцию для их крепления. Остается лишь защищать датчик от тех факторов окружающей среды, которые могут ухудшить изоляцию между обкладками, – от пыли, коррозии, влажности, ионизирующей радиации.

Ценные качества емкостных датчиков – малая величина механического усилия, необходимого для перемещения его подвижной части, возможность регулировки выхода следящей системы и высокая точность работы – делают емкостные датчики незаменимыми в приборах, в которых допускаются погрешности лишь в сотые и даже тысячные доли процента.

Обычно емкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого испытывает подвергаемое контролю перемещение, вызывая изменение емкости. Пренебрегая краевыми эффектами, можно выразить емкость для плоского конденсатора следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{4\pi d},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заключенной между обкладками;

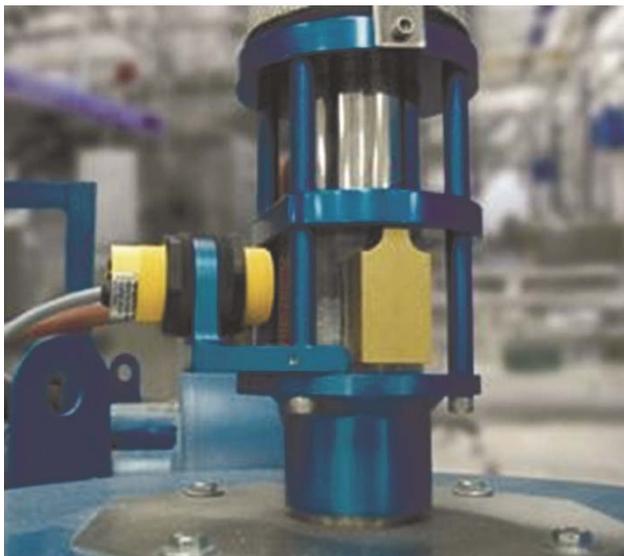
$S$  и  $d$  – площадь поверхности рассматриваемых обкладок и расстояние между ними соответственно.

Емкостные преобразователи могут быть использованы при измерении различных величин по трем направлениям в зависимости от функциональной связи измеряемой неэлектрической величины со следующими параметрами:

- переменной диэлектрической проницаемостью среды  $\varepsilon$ ;
- площадью перекрытия обкладок  $S$ ;
- изменяющимся расстоянием между обкладками  $d$ .

В первом случае емкостные преобразователи можно применять для анализа состава вещества, поскольку диэлектрическая проницаемость является функцией свойств вещества. При этом естественной входной величиной преобразователя будет состав вещества, заполняющего пространство между пластинами. Особенно широко емкостные преобразователи этого типа применяются при измерении влажности твердых и жидких тел, уровня жидкости, а так же определения геометрических размеров небольших объектов. В большинстве случаев практического использования емкостных преобразователей их естественной входной величиной является геометрическое перемещение электродов относительно друг друга. На основе этого принципа построены датчики линейных и угловых перемещений, приборы измерений усилий, вибраций, скорости и ускорения, датчики приближения, давления и деформации (экстензометры) (рис. 4).

По способу исполнения все емкостные измерительные преобразователи можно разделить на одноемкостные и двухъемкостные датчики. Последние бывают дифференциальными и полудифференциальными.



**Рис. 4. Общий вид емкостного преобразователя для измерения давления**

#### **Резонансный метод**

В основе метода лежит изменение резонансной частоты колеблющегося упругого элемента при деформировании его силой или давлением. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора. К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, невозможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

#### **Индуктивный метод**

Основан на регистрации вихревых токов (токов Фуко). Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном. Преобразователь измеряет смещение мембраны при отсутствии механического контакта. В катушках генерируется электрический сигнал переменного тока таким образом, что заряд и разряд катушек происходит через одинаковые промежутки времени. При отклонении мембраны создается ток в фиксированной основной катушке, что приводит к изменению индуктивности системы. Смещение характеристик основной катушки дает возможность преобразовать давление в стандартизованный сигнал, по своим параметрам прямо пропорциональный приложенному давлению.

#### **Ионизационный метод**

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются ламповые диоды. Лампа оснащена двумя электродами: катодом и анодом, – а также нагревателем. В некоторых лампах последний отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Преимуществом таких ламп является возможность регистрировать низкое давление – вплоть до глубокого вакуума с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например, емкостными. Зависимость сигнала от давления является логарифмической.

### **Пьезоэлектрический метод**

В основе лежит прямой пьезоэлектрический эффект, при котором пьезоэлемент генерирует электрический сигнал, пропорциональный действующей на него силе или давлению. Пьезоэлектрические датчики используются для измерения быстроменяющихся акустических и импульсных давлений, обладают широкими динамическими и частотными диапазонами, имеют малую массу и габариты, высокую надежность и могут использоваться в жестких условиях эксплуатации. Пьезоэлектрические датчики применяются для измерения быстропеременных процессов в диапазоне частот от единиц Гц до сотен кГц.

Сигналы с датчиков давления могут быть как медленноменяющимися, так и быстропеременными. В первом случае их спектр лежит в области низких частот. Для того, чтобы с высокой точностью оцифровать такой сигнал необходимо подавить высокочастотную часть спектра, полностью состоящую из помех. Это особенно актуально в промышленных условиях. Специально для ввода медленноменяющихся сигналов используются интегрирующие АЦП. Они проводят измерение не мгновенного значения сигнала (которое изменяется под действием помех), а интегрируют сигнальную функцию за заданный промежуток времени, который заведомо меньше постоянной времени процессов, происходящих в контролируемой среде, но заведомо больше периода самой низкочастотной помехи. Интегрирующие АЦП выпускают многие зарубежные фирмы (Texas Instruments, Analog Devices и др.). Для измерения переменных давлений применяют датчики с аналоговым выходным сигналом, например, 0–20, 4–20 мА и 0–5, 0,4–2,0 В.

### 3. УСИЛИТЕЛИ АВТОМАТИКИ

В современных системах автоматики для управления исполнительными механизмами требуется мощность, во много раз превышающая выходную мощность сигнала датчиков. Поэтому на практике возникает необходимость в усилении сигналов датчиков. Для этой цели служат усилители различных типов.

В зависимости от вида вспомогательного источника энергии усилители можно разбить на следующие группы: электрические, гидравлические и пневматические. Электрические усилители в свою очередь делятся на ионные, электронные, электромеханические, электромашинные и магнитные.

И в перечисленных выше электрических усилителях рассмотрим магнитные усилители, так как другие типы усилителей должны изучаться в соответствующих курсах.

Магнитным называется усилитель, принцип действия которого основан на изменении магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника катушки при изменении подмагничивающего (управляющего) тока.

В простейшем виде магнитный усилитель представляет собой дроссель насыщения переменного тока, в цепь которого последовательно с рабочей обмоткой ( $W_p$ ) включено сопротивление нагрузки ( $R_n$ ) (рис. 5). Дроссель переменного тока это устройство, индуктивность которого может меняться в широких пределах за счет подмагничивания дросселя постоянным током.

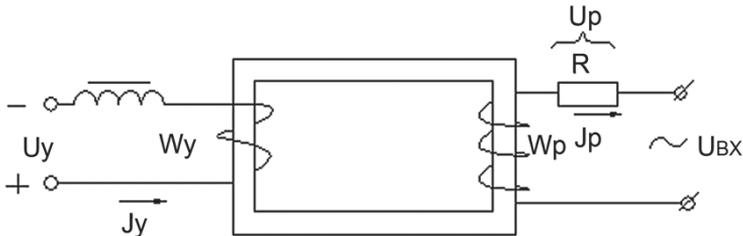


Рис. 5. Схема дроссельного магнитного усилителя

Выходное напряжение ( $U_p$ ) магнитного усилителя снимается с нагрузки ( $R_n$ ).

Будем считать, что ток в рабочей цепи ( $J_p$ ) является синусоидальным и его значение можно найти по формуле:

$$J_p = \frac{U_{BX}}{Z};$$

$$Z^2 = R^2 + X_H^2,$$

где  $U_{BX}$  – напряжение питания магнитного усилителя;  
 $Z$  – полное активное сопротивление рабочей цепи;  
 $X_H$  – индуктивное сопротивление рабочей обмотки;  
 $R$  – катушки переменному току.

Полное активное сопротивление рабочей цепи ( $Z$ ) состоит из активного сопротивления нагрузки ( $R_p$ ) и активного сопротивления рабочей обмотки ( $R_w$ )

$$R = R_H + R_w,$$

где  $R$  – активное сопротивление;  
 $X_H$  – индуктивное сопротивление.

Индуктивное сопротивление рабочей обмотки ( $X_H$ ) определяется по формуле:

$$X_H = \omega_p \cdot L_p,$$

где  $\omega_p$  – угловая частота переменного напряжения рабочей цепи  $\omega_p = 2\pi f$ ;  
 $L_p$  – индуктивность рабочей обмотки, определяемая по формуле:

$$L_p = \frac{\omega_p^2}{R_M} = \frac{\omega_p^2}{l_c} \cdot S_c \cdot \mu_c,$$

где  $R_M = \frac{l_c}{S_c \cdot \mu_c}$  – модуль магнитного сопротивления сердечника.

$$L_p = \frac{\omega_p^2}{l_c} \cdot S_c \cdot \mu_c,$$

где  $\omega_p$  – число витков рабочей обмотки;

$S_c$  – площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника;

$l_c$  – длина средней магнитной линии сердечника;

$\mu_c$  – магнитная проницаемость сердечника.

С учетом последних выражений ток в рабочей цепи запишется в виде:

$$J_p = \frac{U_p}{\sqrt{R^2 + w^2 \frac{W_p^4}{l_c} \cdot S_c \cdot \mu_c}}.$$

Из этой формулы видно, что ток в рабочей цепи, или в нагрузке зависит от индуктивности рабочей обмотки ( $L_p$ ), которая пропорциональна магнитной проницаемости ( $\mu_c$ ). В свою очередь магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника ( $\mu_c$ ) зависит от магнитной индукции ( $B$ ) и напряженности внешнего магнитного поля ( $H$ ):

$$\mu_c = \frac{dB}{dH}.$$

При отсутствии управляющего напряжения ( $J_y$ ) на входе дроссельного магнитного усилителя напряженность магнитного поля  $H = 0$ . В этом случае магнитная проницаемость ( $\mu_c$ ) имеет большое значение. Следовательно, индуктивность ( $L_p$ ) и индуктивное сопротивление рабочей обмотки ( $X_L$ ) имеет также большое значение. В данном случае ток в рабочей цепи ( $J_p$ ) имеет небольшое значение. Его обычно называют током холостого хода. При этом большая часть переменного напряжения ( $U_p$ ) падает на рабочей обмотке ( $W_p$ ), а незначительная часть – на нагрузке ( $R_H$ ).

При подаче на вход усилителя управляющего напряжения ( $J_y$ ) по цепи управления потечет ток управления ( $J_y$ ), в результате чего возникнет напряженность постоянного магнитного поля  $H$ . Ферромагнитный сердечник усилителя насыщается и его магнитная проницаемость ( $\mu_c$ ) падает. Следовательно, индуктивное сопротивление рабочей обмотки ( $X_p$ ) также падает, в результате чего ток в рабочей цепи ( $J_p$ ) увеличивается. В этом случае большая часть переменного напряжения ( $U$ ) падает уже на нагрузке ( $R_H$ ), а меньшая часть – на рабочей обмотке ( $W_p$ ).

Следует заметить, что с помощью тока управления ( $J_y$ ) можно регулировать ток в рабочей цепи, т. е. ток в нагрузке ( $J_p$ ).

Если обмотку управления ( $W_y$ ) выполнить с числом витков во много раз превышающим число витков рабочей обмотки ( $W_p$ ), то получим эффект усиления по току.

К основным достоинствам магнитных усилителей можно отнести:

- высокую надежность и большой срок службы;
- возможность питания непосредственно от сети переменного тока промышленной частоты;
- неограниченная выходная мощность;
- высокий КПД;
- возможность создания бесконтактных систем автоматического управления.

## 4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

### 4.1. Общие сведения

Основные типы ЧЭ преобразуют изменение измеряемой величины в изменение какого-либо параметра, например, сопротивления, емкости, индуктивности, заряда. Часто эти параметры объединяют термином импеданс. Импеданс может быть как активным, так и реактивным. Например, импеданс резистивных ЧЭ – обычное сопротивление  $R$ , емкостных ЧЭ –  $Z = \frac{1}{2\pi fC}$ , электромагнитных ЧЭ –  $Z = 2\pi fL$ , где  $f$  – частота тока, протекающего через ЧЭ.

Для преобразования изменения импеданса  $Z$  ЧЭ параметры электрического сигнала ЧЭ включают в измерительную схему.

Обычно используют параметрические и генераторные схемы. Функция преобразования параметрической схемы:  $U_{\text{ВЫХ}} = f_1(Z_{\text{ЧЭ}}, Z_C)$ . Функция преобразования генераторной схемы:

$$\omega_{\text{ВЫХ}} = -f_2(Z_{\text{ЧЭ}}, Z_C),$$

где  $Z_{\text{ЧЭ}}$  – импеданс ЧЭ,  
 $Z_C$  – импеданс измерительной схемы,  
 $\omega_{\text{ВЫХ}}$  – частота выходного сигнала.

Тип измерительной схемы определяется датчиком. Измерительная схема в общем случае включает в себя источник питания, уравнивающее устройство и вспомогательные датчики для компенсации вредного влияния внешних факторов.

### 4.2. Параметрические измерительные схемы

Параметрические схемы предназначены для преобразования информации, полученной ЧЭ в процессе измерения, в вариации тока или напряжения. Схемы могут состоять исключительно из ЧЭ или включать наряду с ними дополнительные элементы, корректирующие её функцию преобразования.

Наиболее распространены два типа параметрических схем: потенциметрические и мостовые с питанием как постоянным, так и переменным током. В дальнейшем мы будем рассматривать их свойства на примерах цепей постоянного тока, имея в виду, что полученные соотношения в равной степени справедливы и для цепей переменного тока. В тех же случаях, когда цепи переменного тока имеют какие-либо специфические особенности, они будут рассмотрены отдельно.

Потенциметрическая схема с резистивным ЧЭ представлена на рисунке 6.

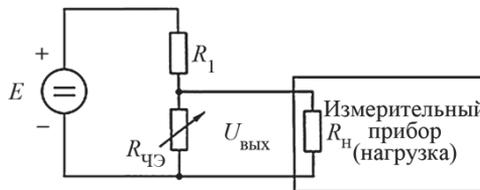


Рис. 6. Схема в виде делителя напряжения

ЧЭ с сопротивлением  $R_{\text{ЧЭ}}$  включен последовательно с резистором  $R_1$ , а питание осуществляется от источника  $E$ . Выходное напряжение схемы  $U_{\text{ВЫХ}}$ , измеряемое прибором с собственным сопротивлением  $R_{\text{Н}}$ , равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_{\text{ЧЭ}} \cdot R_{\text{Н}}}{R_{\text{ЧЭ}} + R_{\text{Н}}}} \cdot \frac{R_{\text{ЧЭ}} \cdot R_{\text{Н}}}{R_{\text{ЧЭ}} + R_{\text{Н}}}$$

При  $R_n \gg R_{\text{ЧЭ}}$ :

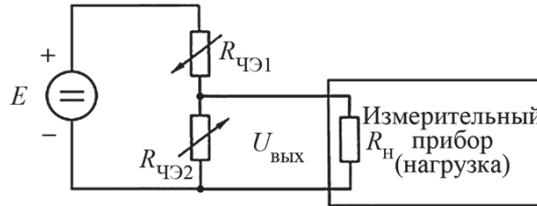
$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \frac{R_{\text{ЧЭ}}}{R_1 + R_{\text{ЧЭ}}},$$

т. е.  $U_{\text{ВЫХ}}$  не зависит от  $R_n$  и является нелинейной функцией от  $R_{\text{ЧЭ}}$ . Если ЧЭ изменяет свое сопротивление в пределах  $R_{\text{ЧЭ}} \pm \Delta R$ , а  $R_1 = R_{\text{ЧЭ}}$ , то

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_{\text{ЧЭ}}},$$

т. е. ЧЭ работает в линейной зоне.

Линеаризация достигается также дифференциальным включением ЧЭ, когда в качестве  $R_1$  используется ЧЭ таким образом, что его сопротивление получает приращение обратного знака по сравнению с основным ЧЭ. Схема с дифференциальным включением ЧЭ показана на рисунке 7.



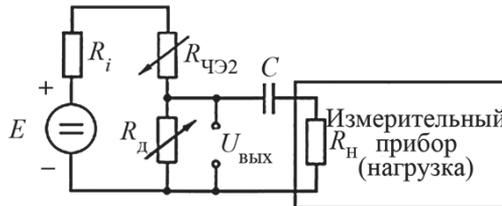
**Рис. 7. Потенциметрическая схема с дифференциальным включением ЧЭ**

Дифференциальное включение образуется при замене постоянного сопротивления  $R_1$  вторым ЧЭ, идентичным используемому. ЧЭ изменяют свое сопротивление так, что  $R_{\text{ЧЭ1}} + \Delta R_1$ , а  $R_{\text{ЧЭ2}} + \Delta R_2$ . Это могут быть резистивные, электромагнитные, емкостные ЧЭ. Особенностью схемы при  $|\Delta R_1| = |\Delta R_2|$  и  $R_n \rightarrow \infty$  является линейность функции преобразования:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \frac{\Delta R}{2R},$$

где  $\Delta R = |\Delta R_1| = |\Delta R_2|$ ,  $R = R_{\text{ЧЭ1}} = R_{\text{ЧЭ2}}$ .

Недостатком потенциметрической схемы является наличие в выходном сигнале постоянной составляющей, не содержащей полезной информации. Для выделения полезной  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$  составляющей сигнала можно использовать емкостную связь (рисунок 8).



**Рис. 8. Потенциметрическая схема с емкостной связью между схемой и нагрузкой**

Конденсатор  $C$  и  $R_n$  образуют фильтр верхних частот.

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \frac{\Delta R}{2R + R_i},$$

где  $R_i$  – внутреннее сопротивление источника питания  $E$ . Обычно  $R_i \ll R_{\text{ЧЭ}}$ ,  $R_n$ . В идеальном случае  $R_i = 0$ .