МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова»
Машиностроительный факультет
Кафедра «Тепловые двигатели и установки»

Практическая работа №3

по дисциплине: «Автоматизация производственных процессов в нефтегазодобыче»

на тему: «Изучение устройства и принципов действия датчиков измерения усилия (силы)»

Вариант №6

Выполнил: студент гр. М24-213-1оз
Лискович Д.И.

Принял: к.т.н., доцент
Закиров М.Ф.

Ижевск, 2026 г.

Цель работы:

Изучение устройства и принципов действия датчиков систем автоматического управления для измерения физических величин.

Основная часть:

Область применения и классификация датчиков измерения усилия (силы)

Область применения.

В нефтегазовой отрасли контроль усилий критически важен для безопасности и эффективности процессов:

- Бурение: контроль веса на крюке талевой системы (нагрузка на буровую вышку), контроль осевой нагрузки на долото.
- Добыча: измерение нагрузок на насосные штанги (в станках-качалках), контроль усилий в фонтанной арматуре.
- Трубопроводный транспорт: контроль натяжения трубопроводов при прокладке, измерение распорных усилий в опорах.
- Ремонтные работы: контроль усилий при подъеме и спуске труб, испытание оборудования на прочность.

Более подробно области применения датчиков силы в нефтегазовой отрасли описаны в [1].

Классификация.

Датчики силы (силоизмерители) классифицируются по принципу действия (типу преобразования):

1. Тензорезистивные (тензодатчики): преобразуют деформацию упругого элемента в изменение электрического сопротивления. Самый распространенный тип.

2. Пьезоэлектрические: используют эффект возникновения заряда при механическом воздействии на кристалл (кварц, пьезокерамика). Хороши для динамических (быстроизменяющихся) сил.

3. Емкостные: измеряют силу по изменению расстояния между обкладками конденсатора, связанного с упругим элементом.

4. Индуктивные: измеряют перемещение сердечника в катушке индуктивности под действием силы.

5. Магнитоупругие: основаны на изменении магнитной проницаемости ферромагнетиков при механической деформации (сжатии/растяжении).

Классификация датчиков по принципу действия подробно рассмотрена в [1].

Устройство и принцип действия различных типов датчиков

Рассмотрим 4 основных типа датчиков для измерения усилия.

1. Тензорезистивный датчик силы (Тензодатчик)

Это основа большинства современных электронных весов и динамометров.

- Устройство: состоит из упругого элемента (стальная колонна, балка или кольцо), на который наклеены тензорезисторы (тензорезисторы — это тонкие проводники или фольга, уложенные змейкой) (рис.1).

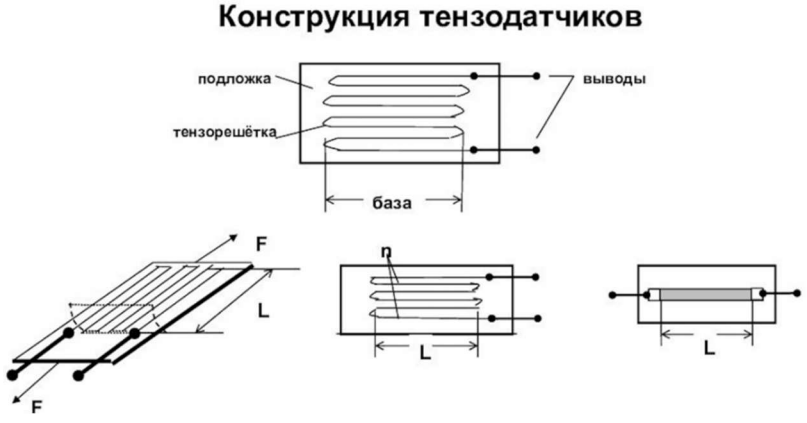


Рис.1. Конструкция тензодатчиков

- Принцип действия: под действием силы F упругий элемент деформируется (растягивается или сжимается). Вместе с ним деформируется и тензорезистор. При растяжении его геометрическая длина увеличивается, а поперечное сечение уменьшается, что приводит к увеличению электрического сопротивления R. При сжатии — сопротивление падает. Схема моста преобразует эту микроскопическую разницу сопротивлений в электрический сигнал (милливольты), пропорциональный приложенной силе.

Подробное описание тензорезисторных датчиков приведено в [2].

2. Пьезоэлектрический датчик силы

Используется для измерения быстропеременных сил (вибрации, удары).

- Устройство: основной элемент — пластина из пьезоэлектрического материала (кварц, титанат бария), заключенная в корпус между двумя металлическими электродами (рис.2).

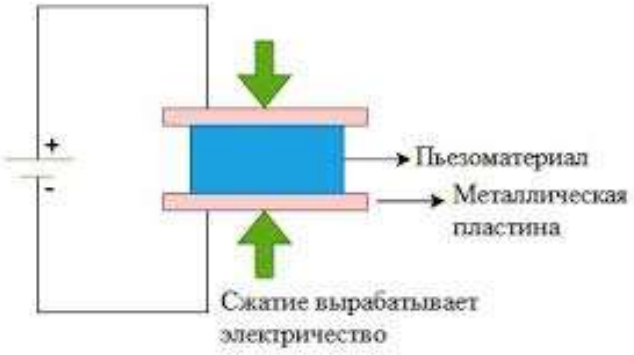


Рис.2. Принцип работы пьезоэлектрического датчика

Принцип действия: основан на прямом пьезоэффекте. При приложении силы к пьезокристаллу происходит его поляризация, и на гранях (электродах) появляются электрические заряды разного знака. Возникает разность потенциалов U, пропорциональная силе F. Если сила постоянна, заряд может "стекать" (из-за

сопротивления изоляции), поэтому пьезодатчики в основном применяются для измерения динамических процессов (сила должна меняться).

Пьезоэлектрический эффект и его применение рассмотрены в [2].

3. Емкостной датчик силы

- Устройство: состоит из неподвижной пластины конденсатора и подвижной пластины (мембраны), связанной с упругим элементом. Между ними находится диэлектрик (воздух) (рис.3).

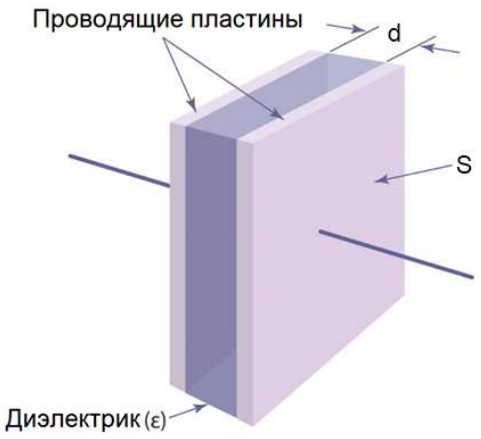


Рис.3. Схема емкостного датчика силы

- Принцип действия: под действием силы мембрана прогибается, уменьшая зазор d между обкладками. Емкость конденсатора обратно пропорциональна зазору.:

$$C = \varepsilon * (\frac{S}{d}), \quad (1)$$

где: Ɛ – постоянное значение относительно диэлектрической проницаемости среды между пластинами;

S – площадь пластин;

d – расстояние между пластинами.

Изменение емкости измеряется электронной схемой и преобразуется в выходной сигнал (напряжение или ток), пропорциональный силе.

Особенности емкостных датчиков изложены в [2].

4. Магнитоупругий датчик

Часто применяется для контроля больших усилий в прокатных станках и тяжелом оборудовании, актуально для нефтегазодобычи (например, нагрузки на опоры).

- Устройство: основным элементом магнитоупругого датчика силы является сердечник, выполненный из ферромагнитного материала (специальная электротехническая сталь), обладающего магнитоупругими свойствами. На сердечнике размещены две электрически изолированные друг от друга обмотки: первичная (обмотка возбуждения) и вторичная (измерительная обмотка). Первичная обмотка подключается к источнику переменного тока и предназначена для создания в сердечнике переменного магнитного потока. Вторичная обмотка служит для съема выходного сигнала, величина которого изменяется в зависимости от механической нагрузки, приложенной к датчику (рис.4).

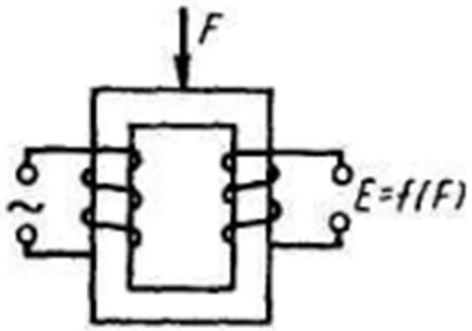


Рис.4. Схема магнитоупругого датчика силы

- Принцип действия: основан на эффекте магнитоупругости. В исходном состоянии (без нагрузки) магнитное поле симметрично, и во вторичной обмотке сигнал близок к нулю. При сжатии сердечника силой F его магнитная проницаемость в направлении действия силы изменяется (уменьшается), магнитный поток перераспределяется и пересекает витки вторичной обмотки. В

ней наводится ЭДС, пропорциональная приложенной силе.

Магнитоупругий принцип преобразования описан в [2].

Основные характеристики и параметры датчиков силы

Выбор датчика силы для систем автоматизации в нефтегазодобыче — это ответственная инженерная задача, так как от точности и надежности этих измерений часто зависит не только эффективность технологического процесса, но и безаварийная работа дорогостоящего оборудования. Датчики работают в тяжелых условиях: высокие и низкие температуры, вибрация, запыленность, агрессивные среды. Поэтому при подборе устройства необходимо тщательно анализировать комплекс его технических характеристик. Ниже приведен подробный разбор ключевых параметров.

1. Номинальная нагрузка.

Это фундаментальная характеристика, определяющая максимальное значение силы, которое датчик способен измерить с гарантированной точностью, оставаясь в пределах своего рабочего (линейного) диапазона.

Физический смысл: превышение этого значения не приводит к мгновенному разрушению, но вызывает резкий рост нелинейности характеристики, делая результаты измерений недостоверными.

Диапазон значений: в нефтегазовой отрасли спектр огромен. Для измерения усилий натяжения нити в геофизических приборах могут использоваться датчики на несколько ньютонов (Н). Для контроля веса бурового инструмента (нагрузка на крюке) требуются датчики на сотни килоньютонов (кН). Для измерения распорных усилий в опорах морских платформ или крупных резервуарах применяются датчики на несколько меганьютонов (МН). Выбор всегда делается с запасом, чтобы рабочие нагрузки составляли 50-70% от номинала, обеспечивая наилучшую линейность.

2. Выходной сигнал

Этот параметр определяет тип электрического сигнала, который генерирует датчик и который будет обрабатываться контроллером (ПЛК).

Тензометрические датчики без встроенной электроники: выдают сигнал в милливольтах (мВ). Характеристика указывается как мВ/В. Например, чувствительность 2 мВ/В означает, что при питании моста напряжением 10 В и номинальной нагрузке, выходной сигнал составит 20 мВ. Это очень слабый сигнал, требующий экранированных линий и качественных нормирующих усилителей.

Датчики со встроенной электроникой (интеллектуальные): наиболее популярны в современной автоматизации, так как сигнал уже усилен и линеаризован внутри корпуса.

Токовая петля 4-20 мА: самый распространенный стандарт для нефтегазодобычи. Ток менее чувствителен к помехам и падению напряжения в длинных линиях (километровые кабели на промыслах). Важно: нижняя граница 4 мА позволяет диагностировать обрыв линии (0 мА).

Напряжение 0-10 В: используется чаще внутри шкафов управления на короткие расстояния.

Цифровые интерфейсы: современные датчики все чаще оснащаются интерфейсами CAN, RS-485 (Modbus RTU) или HART, передавая уже оцифрованное значение силы, что исключает потерю точности при передаче.

3. Класс точности

Интегральная характеристика, показывающая суммарную погрешность датчика (включая нелинейность, гистерезис и повторяемость), выраженную в процентах от номинальной нагрузки.

Высокоточные датчики (класс 0.1 – 0.2): используются в системах коммерческого и учетно-расчетного взвешивания. Пример в нефтегазодобыче: взвешивание автоцистерн с нефтепродуктами при отгрузке, дозирование химических реагентов (ингибиторов, деэмульгаторов) при подготовке нефти. Ошибка здесь приводит к прямым финансовым потерям.

Общепромышленные датчики (класс 0.5 – 1.0): применяются для технологического контроля и защиты оборудования. Пример: контроль нагрузки на долото в процессе бурения. Здесь важнее не абсолютная точность до грамма, а надежность и воспроизводимость сигнала для автоматического поддержания режима бурения (предотвращение прихвата или поломки инструмента). Погрешность в 1% от 100 тонн (1 тонна) в данном контексте является допустимой.

Факторы влияния: важно понимать, что заявленный класс точности производитель гарантирует только в нормальных условиях. При выходе за пределы рабочего температурного диапазона погрешность может значительно возрасти.

4. Чувствительность

Параметр, тесно связанный с выходным сигналом. Показывает, насколько изменится сигнал при изменении приложенной силы.

Единицы измерения: мВ/Н, мВ/кН или мА/кН.

Инженерный смысл: высокая чувствительность позволяет регистрировать малейшие флуктуации усилия. Однако чрезмерно высокая чувствительность может сделать датчик восприимчивым к вибрационным помехам и шумам, не связанным с измеряемой величиной. Поэтому при выборе ищут баланс между чувствительностью и помехозащищенностью.

5. Гистерезис

Это разность показаний датчика при одном и том же значении силы, полученных при ее возрастании и убывании.

Природа явления: Связан с несовершенством упругих свойств материала (упругим последействием) и внутренним трением. Представьте, что упругий элемент (стальная мембрана или колонна) немного «запоминает» предыдущее состояние и возвращается в исходное положение не мгновенно.

Практическая важность: в технологических процессах, где нагрузка постоянно меняется вверх-вниз (например, вес колонны труб при спуско-подъемных операциях), высокий гистерезис может внести существенную неопределенность в показания. Для статических процессов (контроль веса

резервуара) гистерезис менее критичен.

6. Допустимая перегрузка

Характеристика механической прочности и живучести датчика. Указывает, какую максимальную нагрузку (в процентах от номинальной) датчик может выдержать без необратимых изменений характеристик или механического разрушения.

Рабочая перегрузка: обычно 120-150%. При превышении номинала в пределах этого значения датчик может выйти за паспортную точность, но после снятия нагрузки вернется в норму.

Разрушающая перегрузка: Значение, при котором происходит поломка (например, 300-500%).

Актуальность для нефтегазодобычи: в условиях грузоподъемных операций на буровой возможны рывки и раскачивания груза, что создает кратковременные пиковые нагрузки, значительно превышающие статический вес. Датчик должен быть рассчитан на такие пики.

7. Ползучесть

Изменение выходного сигнала датчика во времени при действии постоянной (неизменной) номинальной нагрузки.

Природа явления: это следствие релаксации напряжений в материале упругого элемента и в самом тензорезисторе (или связующем веществе, которым он приклеен). Материал медленно «течет», изменяя деформацию.

Временные рамки: обычно ползучесть оценивается за фиксированный промежуток времени, например, за 30 минут. Современные датчики имеют очень малую ползучесть (сотые доли процента).

Практическое значение: если датчик работает в статическом режиме (например, измеряет вес нефти в огромном резервуаре в течение многих месяцев), ползучесть может имитировать медленное изменение массы там, где его нет. Поэтому для долговременного мониторинга этот параметр крайне важен.

8. Температурный диапазон и погрешности

Для нефтегазодобычи это, пожалуй, один из самых критичных параметров. Оборудование работает на открытом воздухе в условиях резко-континентального климата (от экстремального холода до жары).

Рабочий температурный диапазон: для уличной эксплуатации в России (Сибирь, Крайний Север) требуется диапазон не менее -60°С до +50°С.

Температурная погрешность: важно смотреть не только на диапазон, но и на то, как меняются показания внутри него.

Дрейф нуля (ТКНУЛЯ): изменение выходного сигнала при отсутствии нагрузки из-за температуры. На морозе датчик может «показаться» тяжелее или легче, чем есть на самом деле, если не предусмотрена компенсация.

Дрейф чувствительности (ТКЧ): изменение наклона характеристики (цены деления) при изменении температуры.

Термокомпенсация: качественные датчики для нефтегазодобычи проходят индивидуальную термокомпенсацию в заводских условиях или имеют встроенную электронику, корректирующую показания по данным встроенного термодатчика.

Примеры моделей датчиков силы российского производства

Для каждого из рассмотренных типов датчиков ниже приведены примеры серийно выпускаемых изделий отечественных производителей. Указаны их основные технические параметры, внешний вид и рекомендуемые области применения в нефтегазовой отрасли и смежных областях.

1. Тензорезистивный датчик силы ДСТ-С-200

Назначение: измерение статических и медленно меняющихся усилий сжатия и растяжения в весоизмерительной технике, системах контроля нагрузки на буровом оборудовании, испытательных стендах (рис.5).



Рис.5. Тензорезистивный датчик силы ДСТ-С-200

Применение в нефтегазодобыче: контроль натяжения талевого каната, взвешивание бурового инструмента, измерение усилий в элементах фонтанной арматуры.

Информация о датчике ДСТ-С-200 получена из технической документации производителя [3] и приведена в таблице 1 (табл.1).

Таблица 1. Технические характеристики датчика ДСТ-С-200

Параметр	Значение
Диапазон измерения	0…200 кгс (0…1,96 кН)
Класс точности	0,5
Выходной сигнал	2,0 ± 0,1 мВ/В
Рекомендуемое напряжение питания моста	10 В (макс. 15 В)
Рабочий температурный диапазон	–30…+50 °C
Температурная погрешность нуля	±0,04 %/10 °C
Материал упругого элемента	Нержавеющая сталь

Окончание таблицы 1

Параметр	Значение
Степень защиты	IP66
Габаритные размеры	76 × 50 × 20 мм
Масса	0,5 кг

Данный датчик относится к классу S-образных тензодатчиков и широко применяется в системах взвешивания бункеров и контроля натяжения тросов. Благодаря компактным размерам и высокой точности он подходит для встраивания в ограниченное пространство бурового оборудования.

2. Пьезоэлектрический датчик силы ДПУ-02

Назначение: измерение динамических и ударных усилий при виброиспытаниях, контроле работы насосов и компрессоров, мониторинге гидроударов в трубопроводах (рис.6).



Рис.6. Пьезоэлектрический датчик силы ДПУ-02

Применение в нефтегазодобыче: контроль вибрации буровых насосов, обнаружение гидравлических ударов в системе поддержания пластового давления.

Характеристики датчика ДПУ-02 приведены в таблице 2 по данным производителя [4] (табл.2).

Таблица 2. Технические характеристики датчика ДПУ-02

Параметр	Значение
Диапазон измерения	±10 кН
Коэффициент преобразования	10 мВ/кН
Нелинейность	≤ 1 %
Частотный диапазон	0,5…5000 Гц
Емкость	1000 пФ
Рабочий температурный диапазон	–40…+85 °C
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Степень защиты	IP67
Габаритные размеры	Ø30 × 40 мм
Масса	0,15 кг
Примечание	Требуется внешний согласующий усилитель заряда

Высокий частотный диапазон и широкий температурный интервал позволяют использовать этот датчик для вибромониторинга насосных агрегатов и диагностики гидроударов в трубопроводах. Наличие внешнего согласующего

усилителя обеспечивает гибкость настройки измерительного канала.

3. Емкостной датчик силы ДЕС-100

Назначение: прецизионное измерение малых усилий в научных исследованиях, микромеханике, системах точного дозирования реагентов (рис.7).



Рис.7. Емкостной датчик силы ДЕС-100

Применение в нефтегазодобыче: контроль усилия затяжки резьбовых соединений, дозирование химреагентов, микромеханические испытания образцов пород.

Технические характеристики датчика приведены ниже (табл.3).

Таблица 3. Технические характеристики датчика ДЕС-100

Параметр	Значение
Диапазон измерения	0…100 Н
Основная погрешность	±1,0 %

Окончание таблицы 3

Параметр	Значение
Выходной сигнал	4…20 мА (двухпроводная линия)
Напряжение питания	24 В постоянного тока
Потребляемая мощность	≤ 1 Вт
Рабочий температурный диапазон	–20…+70 °C
Температурная погрешность	±0,1 %/10 °C
Материал мембраны	Нержавеющая сталь
Степень защиты	IP65
Габаритные размеры	60 × 30 × 30 мм
Масса	0,25 кг

Благодаря прецизионному измерению малых усилий и унифицированному выходному сигналу 4–20 мА датчик ДЕС-100 оптимален для автоматизированных систем дозирования реагентов и лабораторных исследований образцов горных пород.

4. Магнитоупругий датчик силы МДУ-50

Назначение: контроль больших усилий в металлургии, горнодобывающей и нефтегазовой промышленности – измерение нагрузки на опоры буровых вышек, распорных усилий в креплениях трубопроводов, натяжения якорных связей (рис.8).



Рис.8. Магнитоупругий датчик силы МДУ-50

Применение в нефтегазодобыче: мониторинг усилий на опорах резервуаров и буровых вышек, контроль натяжения труб при горизонтальном бурении.

Данные о магнитоупругом датчике МДУ-50 соответствуют технической документации [5] (табл.4).

Таблица 4. Технические характеристики датчика МДУ-50

Параметр	Значение
Номинальное усилие	50 кН
Пределы измерения	0…50 кН
Класс точности	1,5
Выходной сигнал	0…10 В
Напряжение питания первичной обмотки	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	≤ 5 ВА

Окончание таблицы 4

Параметр	Значение
Рабочий температурный диапазон	–10…+50 °C
Допустимая перегрузка	120 % от номинала
Степень защиты	IP54
Габаритные размеры	150 × 100 × 80 мм
Масса	3,5 кг

Прочная конструкция и высокая устойчивость к перегрузкам делают этот датчик пригодным для длительной эксплуатации в условиях вибраций и переменных нагрузок. Он может использоваться в системах контроля усилий на опорах буровых вышек и резервуарных парках.

Вывод:

Изучили устройство и принципы действия датчиков систем автоматического управления для измерения физических величин.

Список использованных источников

1. *Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А.* Автоматизация и автоматизированные системы управления в нефтегазовой промышленности. — М.: Инфра-Инженерия, 2020. — 312 с.

2. *Келим Ю.М.* Типовые элементы систем автоматического управления. — М.: Форум, 2019. — 384 с.

3. ООО «Тензо-М». Каталог тензодатчиков серии. URL: https://tenso-m.ru (дата обращения: 04.03.2026).

4. АО «НПП «Мера». Пьезоэлектрические датчики силы ДПУ. URL: https://mera.ru (дата обращения: 04.03.2026).

5. ООО «Завод датчиков». Магнитоупругие датчики усилия МУ. URL: https://zavod-datchikov.ru (дата обращения: 05.03.2026).