

ДАТЧИКИ УСИЛИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ДИНАМОМЕТРИРОВАНИЯ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Ковшов В.Д., Емец С.В., Хакимьянов М.И., Светлакова С.В.

Научно-производственное предприятие «Грант»

Рассматриваются датчики усилия, применяемые в современных отечественных и зарубежных системах автоматизации скважин, эксплуатируемых штанговыми глубиннонасосными установками, анализируются их метрологические и эксплуатационные характеристики. Предложена конструкция разработанного авторами датчика усилия, описаны его основные конструктивные решения.

Введение

Разработка датчиков динамометрирования установок штанговых глубинных насосов (ШГН) добычи нефти является сложной и комплексной задачей, требующей применения самых современных подходов в таких областях техники как тензометрия, микроэлектроника, математическая обработка сигналов, метрология и надежность. Такие датчики должны работать на установках ШГН непрерывно на протяжении длительных периодов времени в условиях широкого диапазона температур, выдерживать воздействие влаги, серы и других разрушающих факторов, быть устойчивыми к перегрузкам и обеспечивать эксплуатацию во взрывоопасных зонах [1].

Перед авторами стояла задача проектирования датчика усилия (или динамографа), измеряющего нагрузку, приложенную в точке подвеса штанг ШГН. Эта нагрузка складывается из веса поднимаемой из скважины жидкости, веса колонны штанг и сил трения в насосе и колонне.

Требуется контролировать приложенное усилие до 100 кН во всем рабочем диапазоне температур – от -40 до +60°C. Датчик должен обеспечивать простоту монтажа, взаимозаменяемость, подключаться к стандартным входным каналам вторичной регистрирующей аппаратуры. Электронная схемотехника должна быть устойчива к воздействию электромагнитных помех от располагающихся в непосредственной близости мощных электродвигателей и преобразователей частоты.

Другим немаловажным требованием к проектируемому датчику является универсальность применения. Он должен подходить как к традиционным

балансирным станкам-качалкам различных типов, так и к получившим распространение в последнее время цепным приводам ШГН.

1. Места установки датчиков

Получить информацию о нагрузке, действующей на шток в точке подвеса штанг можно установив датчики в различных местах станка-качалки (рисунок 1). На практике широко используют датчики продольной и поперечной деформации штока (1), датчики сжатия, устанавливаемые на штоке между траверсами (2) и на штоке между верхней траверсой и замками (3), датчики деформации балансира (4). Известны также попытки рассчитывать усилие, измеряя потребляемую электродвигателем электрическую мощность (5).

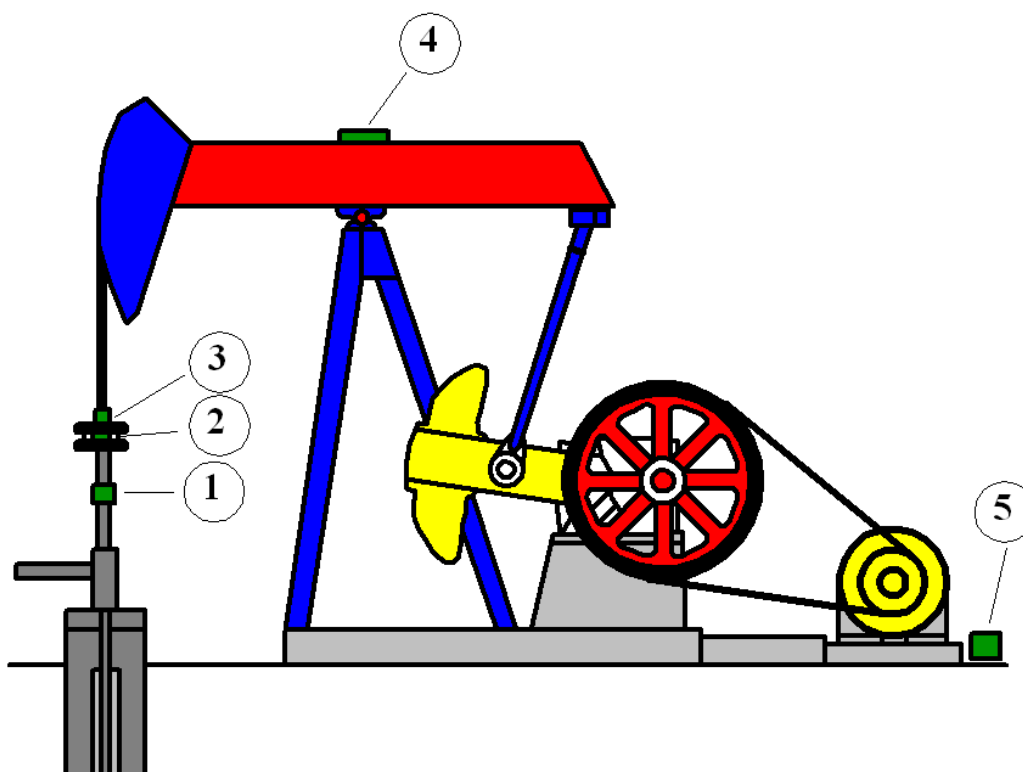


Рисунок 1. Схема установки датчиков усилия на станок-качалку

Очевидно, что чем ближе датчик будет располагаться к плунжеру насоса, тем более точную информацию об усилии можно получить, так как каждый следующий элемент цепочки передачи усилия будет вносить в сигнал дополнительные искажения. К сожалению, мы не имеем возможности установить

датчик непосредственно в глубинный насос, так как это связано с огромными затратами по поднятию и модернизации насосов и решению проблемы подвода питания и передачи информации.

Датчики продольной и поперечной деформации балансира (1) наиболее просты в монтаже (для их установки во многих случаях даже не надо останавливать станок-качалку), однако они не дают информацию об абсолютных значениях усилия, так как неизвестно, какая нагрузка была приложена к штоку в момент установки датчика. Поэтому область их применения ограничивается переносными портативными комплексами диагностики.

С этой точки зрения оптимальным является расположение датчика усилия на штоке между траверсами (2) и между верхней траверсой и замками (3). В обоих этих случаях усилие прикладывается непосредственно к датчикам, минуя какие-либо промежуточные преобразования.

Датчики деформации балансира (4) удобны в монтаже и эксплуатации: не возникает проблем с обрывами кабеля, датчик усилия может быть конструктивно совмещен с датчиком угла наклона балансира, обеспечивается легкий доступ для обслуживания. Однако таким датчикам свойственны такие недостатки как относительно низкая чувствительность (балансир изготавливается с большим запасом прочности и его деформация минимальна), необходимость проведения калибровки непосредственно на станке-качалке (для привязки деформации балансира к абсолютным значениям нагрузки) и паразитная температурная зависимость показаний (при изменениях температуры окружающей среды деформация балансира так же будет меняться). Кроме того, такой датчик не может быть использован на безбалансирных цепных приводах ШГН.

Что касается вычисления усилия путем замеров потребляемой электрической мощности (5), то данный метод является косвенным и очень приближенным. По мнению авторов ваттметрирование может дополнять данные, полученные методом динамометрирования, но не заменять его.

Таким образом, оптимальными местами расположения динамографа с точки зрения метрологических характеристик являются установка датчика между траверсами и между верхней траверсой и замками. Это признается ведущими мировыми производителями систем динамометрирования, такими как «Lufkin»,

«eP-Solutions», «Echometer» (США), а также отечественными разработчиками систем телемеханики для нефтегазодобывающих промыслов – НПФ «Экос» (Уфа), ЗАО «Линт» (Казань) и другими.

2. Обоснование конструкции чувствительного элемента

Одной из наиболее широко используемых в мире конструкций динамографов является датчик типа «Loadtrol» (рисунок 2), который одевается на шток и зажимается между верхней траверсой и замками. Такие датчики выпускаются фирмами «Interface» и «Omega» (США), их используют в своих системах динамометрирования фирмы «Lufkin» и «eP-Solutions» (США).

Датчик «Loadtrol» собран на основе упругого элемента в форме отрезка трубы (1), двух компенсационных тензорезисторов (2) и двух нагрузочных тензорезисторов (3), образующих полную мостовую схему.

Тензорезисторы наклеены на наружную поверхность упругого элемента и закрыты сверху защитным кожухом.

Имеются аналогичные датчики с магнитострикционным принципом действия, например датчик СДА-10ШГН фирмы «Интротест» (Екатеринбург).

Достоинство такой конструкции – полное облегание кольцевым упругим элементом штока, что дает возможность суммировать прилагаемую нагрузку по всем плоскостям – является одновременно ее большим недостатком. Для монтажа такого датчика требуется снятие замков со штока, данная операция очень трудоемкая и значительно затрудняет монтаж этого датчика.

Определенный недостаток конструкции «Loadtrol» - влияние на результат измерений несоосности прилагаемого усилия оси цилиндра. Причиной несоосности могут стать неровные поверхности траверс, замков и других элементов канатной подвески. Для минимизации такого влияния датчики комплектуются дополнительными центрирующими элементами – двумя устанавливаемыми друг над другом кольцами со сферическими поверхностями.

Еще один недостаток датчиков ранних разработок – пассивная схема. Датчик «Loadtrol» был разработан в 70-ых годах прошлого века, когда измерительные электронные схемы не могли быть выполнены настолько компактными, чтобы поместиться в одном корпусе с чувствительным элементом.

Величина выходного аналогового сигнала зависит от сопротивления (и, соответственно, длины) подводящего кабеля, от температурного изменения сопротивления кабеля, кроме того, аналоговый сигнал подвержен воздействию электромагнитных помех.

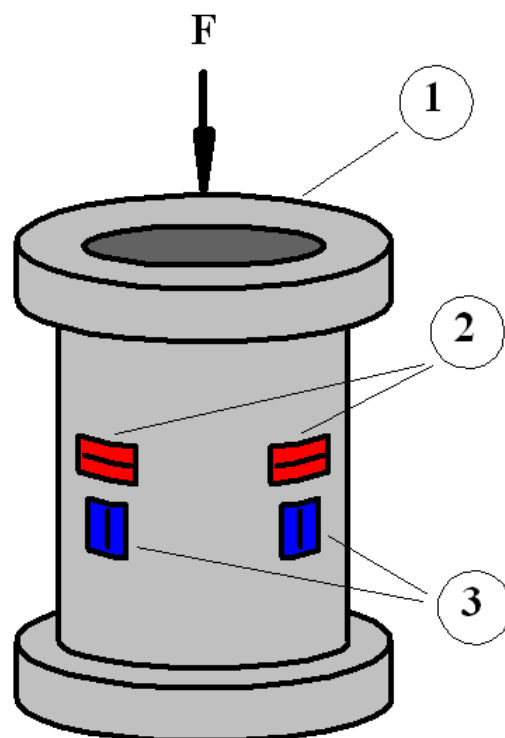


Рисунок 2. Упругий элемент датчика «Loadtrol»

Учитывая сказанное выше, авторы при проектировании датчика динамометрирования ШГН остановились на варианте размещения датчика на штоке между траверсами канатной подвески.

Самая распространенная конструкция датчика, устанавливаемого между траверсами, сделана на основе П-образной структуры (рисунок 3). На этом принципе сделаны датчики усилия производства ГУПН «Авитрон-Ойл» (Уфа), ООО «Микон» (Набережные Челны) и многие другие.

Такой датчик содержит два упругих элемента 1 и 2, соединенных перемычкой 3. Нагружающие (4 и 7) и опорные (5, 6, 8, 9) силовоспринимающие площадки каждого из упругих элементов развернуты друг относительно друга на 180° и образуют две трехточечные схемы нагружения, обеспечивающие

самоустановку датчика. Размещенные на упругих элементах нагрузочный (11) и компенсационный (10) тензорезисторы собраны в тензометрический полумост [2].

Достоинство такой «вилки» - простота изготовления, она может быть выполнена из проката П-образного профиля.

Однако, как показал расчет распределения деформации в упругих элементах, такая конструкция достаточно чувствительна к несоосности и перекосам приложения нагрузки [3].

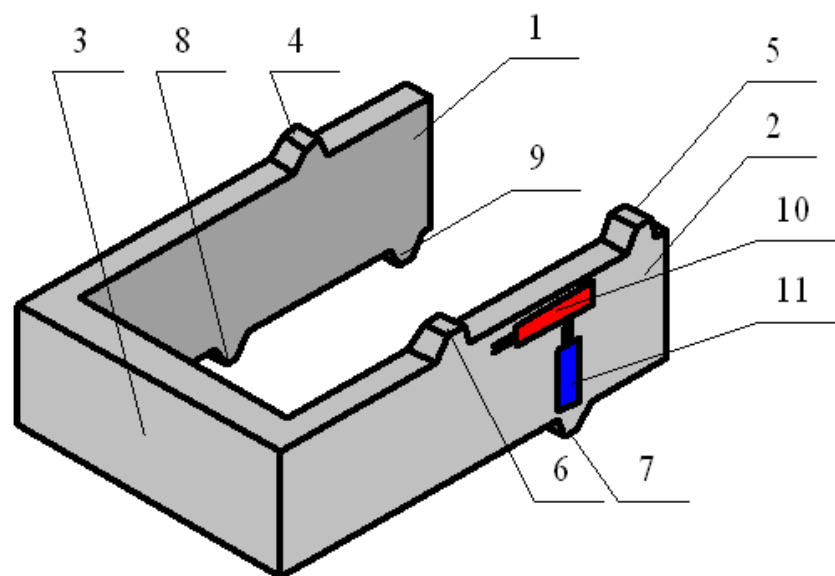


Рисунок 3. Тензорезисторный датчик силы, патент РФ № 2145414

На рисунках 4, 5, 6 и 7 показано, как распределяется деформация в упругих элементах при следующих вариантах приложения нагрузки:

- 1) усилие прилагается в центре силовоспринимающей площадки перпендикулярно ее поверхности (рисунок 4);
- 2) усилие прилагается с краю силовоспринимающей площадки перпендикулярно ее поверхности (рисунок 5);
- 3) усилие прилагается в центре силовоспринимающей площадки под углом 2° к ее поверхности (рисунок 6);
- 4) усилие равномерно распределено по всей поверхности силовоспринимающей площадки (рисунок 7).

Анализ показывает, что в данной конструкции напряжение сильно изменяется при различных способах приложения нагрузки. Как видно из рисунков 4-7, в области наклейки тензорезисторов деформация не будет равномерной, и ее суммарное значение также изменяется в каждом отдельном случае.

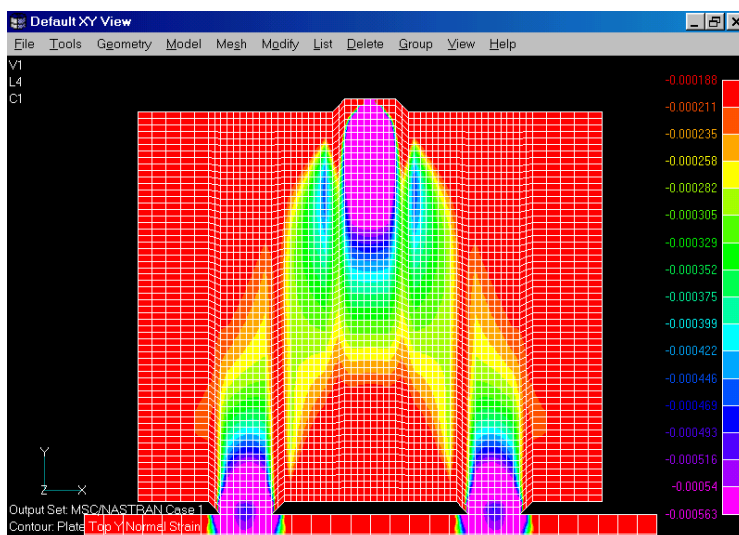


Рисунок 4. Приложение усилия в центре силовоспринимающей площадки перпендикулярно ее поверхности

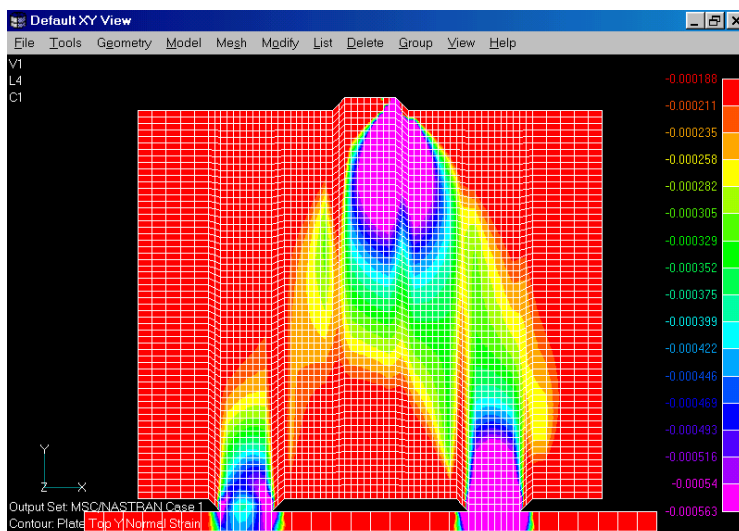


Рисунок 5. Приложение усилия с краю силовоспринимающей площадки перпендикулярно ее поверхности

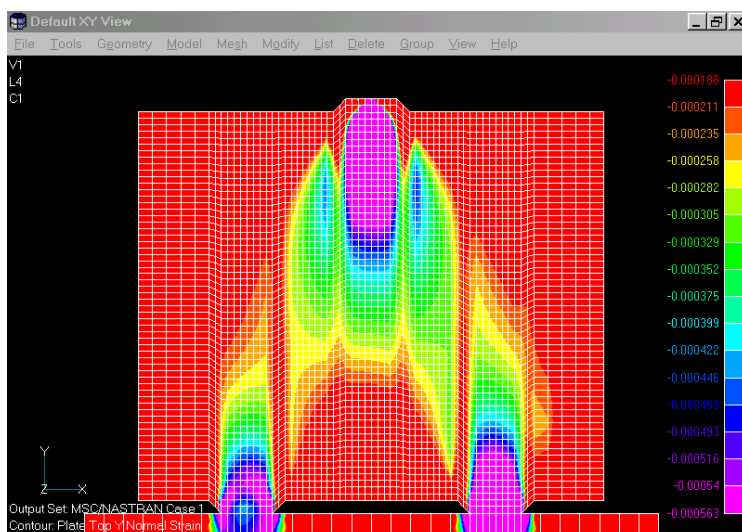


Рисунок 6. Приложение усилия в центре силовоспринимающей площадки под углом 2° к ее поверхности

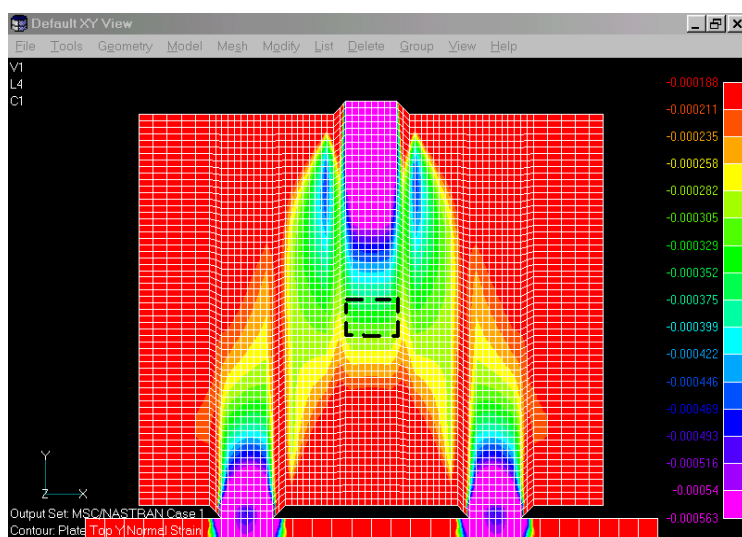


Рисунок 7. Приложение усилия равномерно по всей поверхности силовоспринимающей площадки

Известна еще одна разновидность такой «вилки», где упругие элементы выполнены в виде «S»-образных балок изгиба (рисунок 8). Это динамограф ДПН-Т20 производства НПФ «Интек» (Уфа).

Этой конструкции свойственны те же недостатки, что и предыдущей – деформация тензорезисторов будет зависеть от способа приложения нагрузки. Кроме того, «S»-образные упругие элементы сложны в изготовлении, требуется наклейка тензорезисторов с внутренней стороны отверстия.

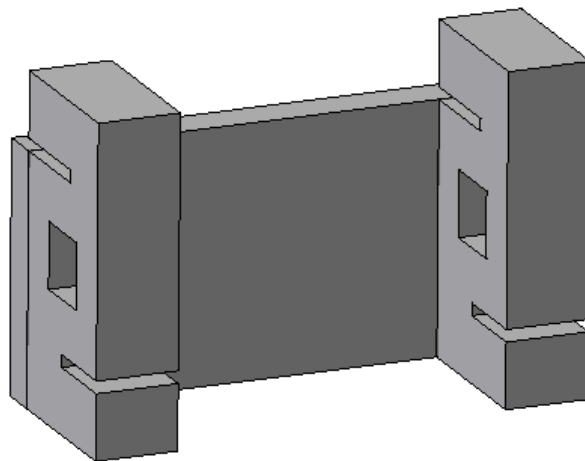


Рисунок 8. Динамограф ДПН-Т20 НПФ «Интек» (Уфа)

Авторами предложена конструкция датчика подковообразной формы с тремя цилиндрическими упругими элементами, размещенными в вершинах равностороннего треугольника (рисунок 9). Подковообразная форма корпуса в значительной степени облегчает монтаж по сравнению с датчиком «Loadrol», в этом случае для его установки требуется лишь разжать траверсы при помощи домкрата либо штангодержателя без разборки канатной подвески.

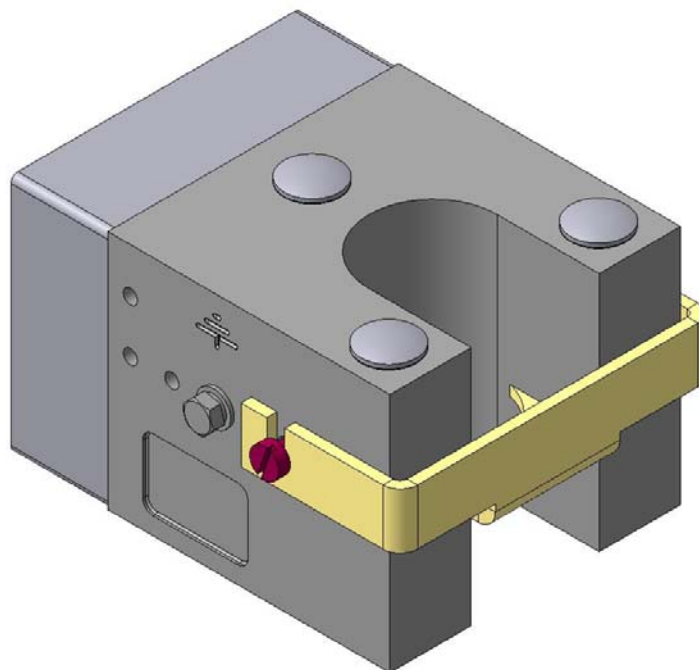


Рисунок 9. Датчик усилия ДДС-04

Датчик содержит три чувствительных элемента в форме цилиндрических стержней, размещенных в вершинах равностороннего треугольника, что обеспечивает самоустановку датчика. Специальная схема наклейки тензорезисторов и способ их включения в измерительную цепь позволяют компенсировать несимметричность распределения общей нагрузки между чувствительными элементами, которая неизбежно появляется при установке датчика между траверсами. Стержни чувствительных элементов имеют по торцам сферические поверхности, обеспечивая тем самым локализацию точек приложения усилия по оси цилиндра. Размещение чувствительных элементов в направляющих колодцах корпуса минимизирует появление изгибающих усилий. Габаритные размеры чувствительных элементов рассчитаны исходя из необходимости получения максимально допустимой деформации в зоне наклейки тензорезисторов и, следовательно, максимальной чувствительности.

В рассматриваемой конструкции датчика каждый упругий элемент (рисунок 10) содержит по два нагрузочных и по два компенсационных тензорезистора.

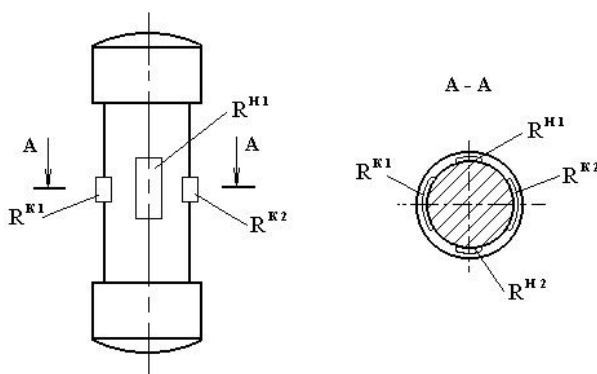


Рисунок 10. Упругий элемент с тензорезисторами

Конфигурация упругих элементов рассчитывалась с использованием современных методов компьютерного моделирования [4]. На рисунках 11, 12 и 13 показано, как изменяются механические напряжения по профилю упругого элемента при различных вариантах приложения нагрузки.

Рассматривалось три варианта приложения нагрузки:

- 1) нагрузка приложена по продольной оси упругого элемента;

2) нагрузка параллельна продольной оси, точка приложения смещена на 15% от диаметра стержня;

3) нагрузка приложена под углом 1° к продольной оси, точка приложения смещена на 8%.

Из рисунков 11, 12 и 13 видно, что при всех рассмотренных вариантах приложения нагрузки деформация в области наклейки тензорезисторов остается практически неизменной и равномерной. Таким образом, данная конфигурация упругих элементов обеспечивает независимость выходного сигнала датчика к перекосам установки и шероховатостям поверхностей траверс.

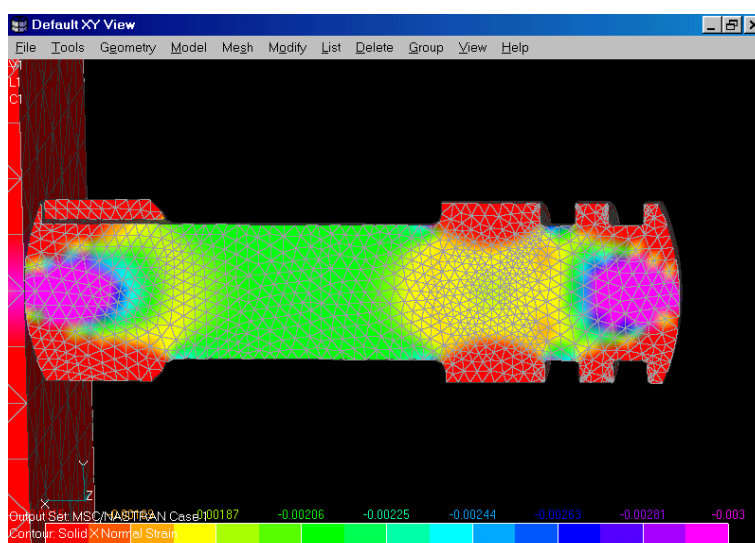


Рисунок 11. Приложение нагрузки по оси стержневого упругого элемента

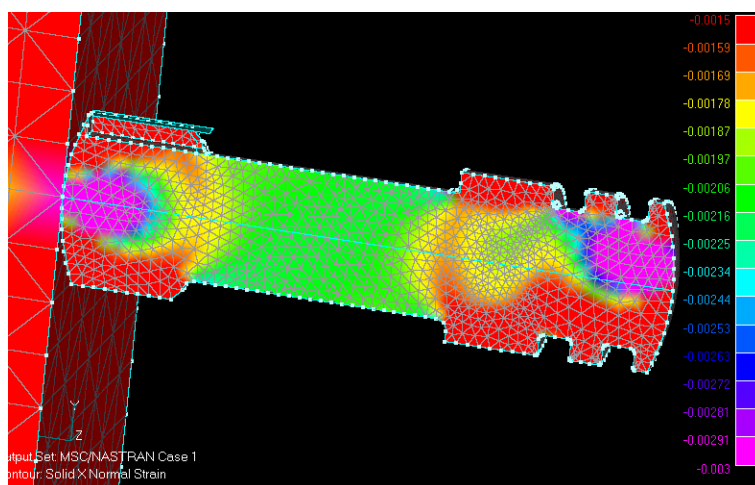


Рисунок 12. Нагрузка параллельна продольной оси, точка приложения смещена на 2 мм

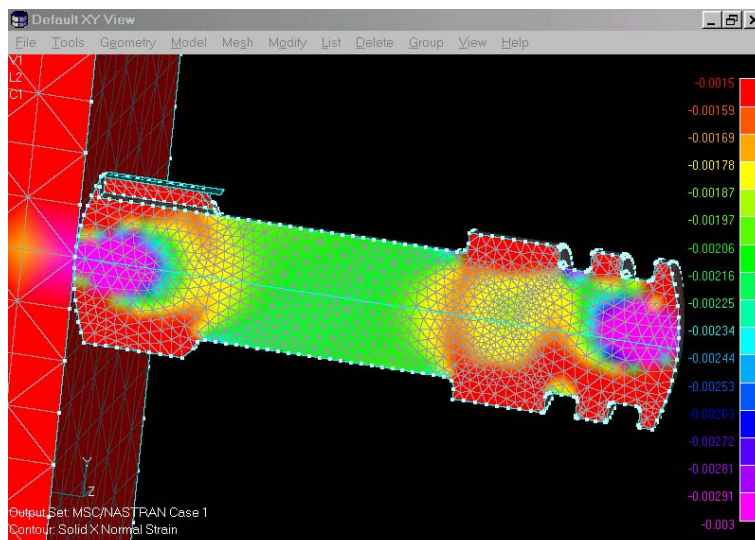


Рисунок 13. Нагрузка приложена под углом 1° к продольной оси, точка приложения смещена на 1 мм

Проведенные исследования позволили подобрать такую конфигурацию упругих элементов, чтобы минимизировать влияние на результат измерений несоосность и несимметричность приложения нагрузки, появление которых неизбежно на практике.

3. Схемная реализация датчика

В представленном датчике тензорезисторы всех трех чувствительных элементов соединены специальным образом в измерительную цепь так, чтобы приложенные к ним нагрузки суммировались.

Электронная плата размещается в непосредственной близости от чувствительных элементов, что исключает влияние на сигнал длинных соединительных проводов, в отличие от пассивных датчиков.

Структурная схема датчика усилия показана на рисунке 14.

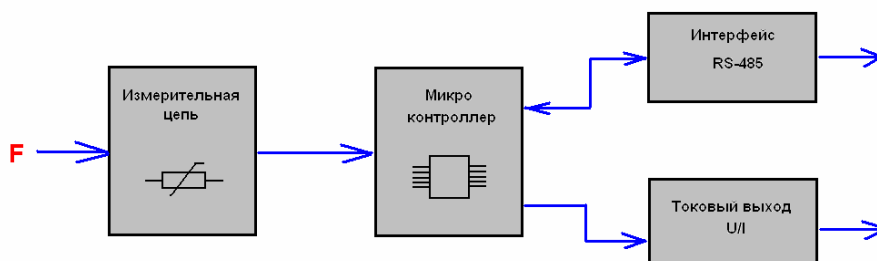


Рисунок 14. Структурная схема датчика усилия

Современная электроника позволяет относительно просто реализовать все схемные элементы датчика. Имеются готовые решения в виде отдельных микросхем, как для каждого элемента, так и интегрированные микроконтроллеры, имеющие внутри одной микросхемы все эти компоненты.

Однако для создания датчика для работы в сложных условиях не всегда подходят типовые предлагаемые решения.

Самый ответственный и сложный элемент датчика – его измерительная цепь. Она должна обеспечивать подавление постоянных и низкочастотных помех в виде действия промышленной частоты 50 Гц, а также высокочастотных помех и случайных выбросов.

На наш взгляд другим существенным требованием к датчикам динамометрирования ШГН является необходимость обеспечения временной стабильности показаний в широком диапазоне температур. С этой целью в измерительном преобразователе, предлагаемом авторами, применено импульсное питание измерительной цепи тензорезисторов с использованием специальной знакопеременной весовой функции, благодаря чему сведены к минимуму влияние температурного дрейфа напряжения смещения активных элементов преобразователя и помехи питающей сети 50 Гц, обусловленной расположением датчика в непосредственной близости от потребителей промышленной сети. Вместе с тем, дополнительная цифровая обработка результатов измерения позволила снизить влияние случайной помехи и нестабильности напряжения питания датчика.

Цифровая обработка выборки дискретных значений позволяет реализовать не только цифровое интегрирование сигнала, но и различные алгоритмы фильтрации, заключающиеся в удалении из выборки случайных выбросов.

Структурную схему измерительного канала, реализующего данные алгоритмы измерений, можно представить, как показано на рисунке 15.

Напряжение питания тензорезистивного моста ТМ от источника питания ИПит подается на вход модулятора М, где по сигналам с микроконтроллера МК инвертируется, либо подается на выход неинвертированным. Напряжение с измерительной диагонали тензомоста ТМ усиливается дифференциальным усилителем ДУ, после чего инвертируется демодулятором ДМ, либо подается на

вход АЦП неинвертированным в зависимости от полярности питающего напряжения. Цифровой код передается в микроконтроллер для последующей обработки. Микроконтроллер осуществляет управление источником питания, модулятором и демодулятором, а также регулирует начальное смещение тензомоста и коэффициент усиления благодаря применению цифровых потенциометров.

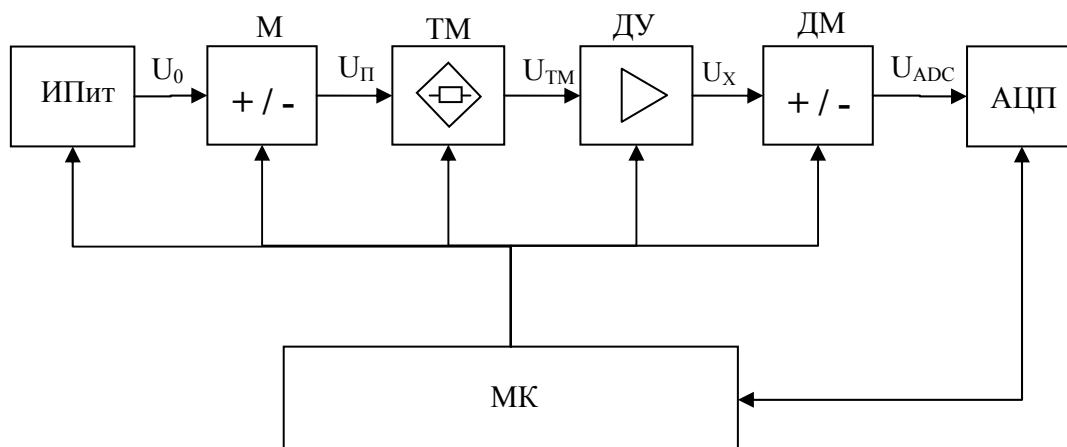


Рисунок 15. Структурная схема измерительной цепи датчика усилия:
ИПит – источник питания; М – модулятор; ТМ – тензомост;
ДУ – дифференциальный усилитель; ДМ - демодулятор; МК – микроконтроллер

Предложенная схема измерительной цепи позволяет использовать весовые функции со знакопеременными коэффициентами, а также применять цифровые интегрирование и фильтрацию при обработке выборок измеряемого сигнала. Эти факторы позволяют в значительной степени подавлять сетевые, постоянные, низкочастотные, а также случайные помехи [5].

В измерительной цепи устройства используется питание тензорезистивного моста именно напряжением, а не током, так как электронная плата располагается в непосредственной близости от тензодатчиков и влияние сопротивления проводов линии связи минимально.

Заключение

Проведенные испытания и опыт эксплуатации показали эффективность примененных в датчике конструктивных, схемных и алгоритмических решений.

В настоящее время разработанный датчик ДДС-04 производится НПП «Грант» [6] и широко внедряется в нефтегазодобывающих управлениях ОАО «Татнефть», данными датчиками уже оснащены свыше 600 скважин в Татарии. Запланировано внедрение большой партии датчиков в АНК «Башнефть».

Датчик имеет аналоговый токовый выходной сигнал 4-20 мА, а также цифровой выходной сигнал в стандарте интерфейса RS-485, поддерживается протокол Modbus-RTU. Это позволяет легко интегрировать их в любую систему телемеханики.

Датчики эксплуатируются в составе кустовых систем телемеханики совместно с контроллерами и станциями управления ШГН «Телебит» (ЗАО «Линт», Казань), «Орион» (ООО «Аякс», Ульяновск), АСУС-02 (НПФ «Экос», Уфа), «ТТУ» (ООО «Шатл», Казань), «Мега» (НПФ «Интек», Уфа) и другими.

На рисунке 16 показаны наложенные друг на друга динамограммы скважины №1312 НГДУ-2 ОАО «БЕЛКАМНЕФТЬ», измеренные разработанным датчиком. Замеры проводились контроллером автоматически в течении суток с интервалом в 2 часа.

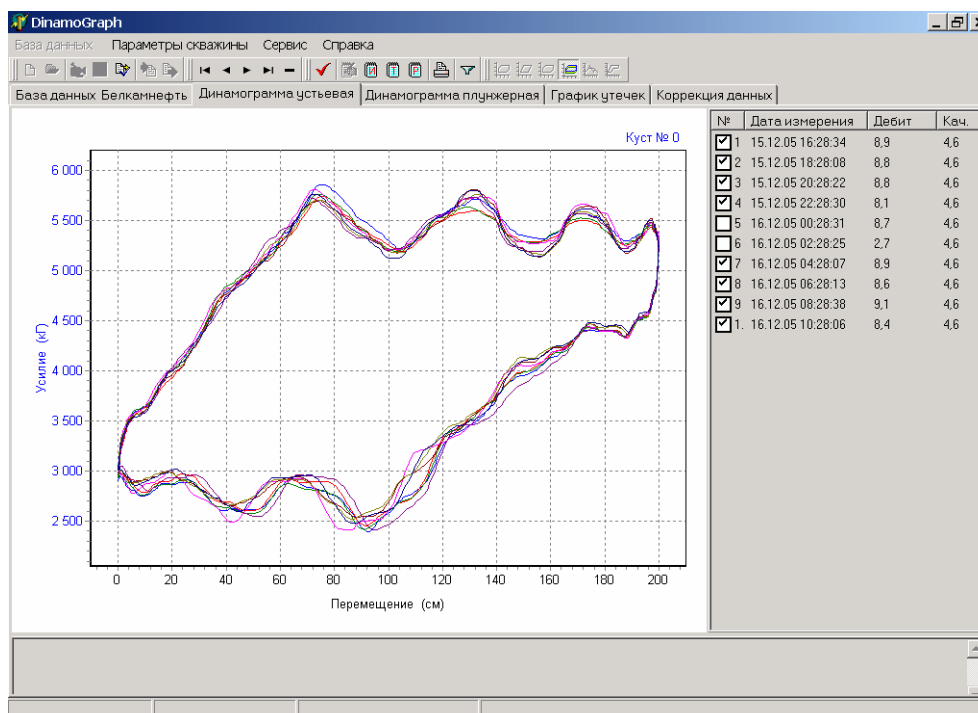


Рисунок 16. Наложенные друг на друга динамограммы скважины №1312 НГДУ-2 ОАО «БЕЛКАМНЕФТЬ»

Литература

1. Уразаков К.Р., Андреев В.В., Жулаев В.П. Нефтепромысловое оборудование для кустовых скважин.- М.: Недра, 1999.- С. 80-81.
2. Пат. 2145414 РФ, МПК G 01 L 1/22. Тензорезисторный датчик силы / УШПО / Свирский В.В., Мамлеев Р.Ф. // Оpubл. 2000.02.10.
3. Хакимьянов М.И., Штанев С.Л. Оценка погрешности датчика усилия ДДС-04 при смещении направления и точки приложения нагрузки // МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ: Труды международной научно-технической конференции (Россия, Пенза, 9-10 сентября 2002 г.) / Под ред. М.А. Щербакова.- Пенза: Информационно-издательский центр Пенз. гос. ун-та, 2002.- С. 165-167.
4. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Штанев С.Л. Анализ упругих элементов датчиков усилия систем динамометрирования ШГН. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Сборник материалов XIV Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Под редакцией профессора В.Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2002.- С.: 132-133.
5. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи): Учеб. пособие для вузов.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.- С. 92-106.
6. Система динамометрирования стационарная ДДС-04 (динамограф) // <http://www.grant-ufa.ru/dds-04.shtml> .