

# ДАТЧИК ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Сакаев А.Ф.

*Научно-производственное предприятие «Грант»  
Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*В работе сделан анализ основных способов и средств определения параметров движения штока штанговых глубиннонасосных установок. Описаны разработанные авторами схемы акселерометров для измерения перемещений с малыми амплитудой и частотой, приведены результаты испытаний на насосных установках с цепным приводом.*

## Введение

Общепризнанно, что в области промышленной автоматизации если прошлый, XX век, считался веком микропроцессорной техники, то нынешний, XXI век, является веком сенсорной техники, или веком использования датчиков. В последнее время появляется много датчиков миниатюрного исполнения, выполненных с использованием интегральных технологий, это датчики температуры, давления, усилия и другие. Среди них можно выделить датчики ускорения, созданные на кристалле микросхемы – так называемые интегральные акселерометры. В данной статье рассматривается применение интегральных акселерометров для определения параметров хода установок штанговых глубинных насосов (ШГН).

## 1. Постановка задачи

При автоматизации работы установок ШГН необходимо измерять параметры движения точки подвеса насосных штанг [1]. Эта информация требуется для построения динамограмм и ваттметрограмм (соответственно графиков изменения усилия и потребляемой электродвигателем активной мощности в функции перемещения штока), что в свою очередь необходимо для диагностики состояния оборудования, режима ее функционирования, а также регулирования производительности установки ШГН при использовании частотного регулирования скорости вращения электродвигателя [2].

Параметры движения установки ШГН включают в себя длину хода, частоту и период качаний, моменты прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек.

Нужно отметить, что существует несколько типов приводов для глубинных насосов, из которых наибольшее распространение получили два: это традиционные станки-качалки с двуплечим балансиром и цепные установки. У первых перемещение точки подвеса штанг происходит по закону, близкому к гармоническому, у вторых – скорость движения постоянна за исключением моментов прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек, где меняется направление движения.

Для измерения параметров движения штока используются различные средства: датчики угла наклона, маятники с потенциометрами, концевые выключатели, бесконтактные датчики положения, устанавливаемые на выходном валу редуктора и линейные акселерометры.

Механические преобразователи (концевые выключатели и потенциометры) не удовлетворяют современным требованиям надежности и на сегодняшний день уже нигде не используются – их подвижные элементы быстро выходят из строя под воздействием факторов погодных условий (попадание влаги с последующим ее замерзанием в лед), механических вибраций, а также агрессивности среды (воздействие сероводорода).

При использовании датчиков угла наклона балансира (которые, как правило, также делаются на базе интегральных акселерометров) приходится измерять малые изменения углов в условиях воздействия вибраций. Угол наклона балансира необходимо преобразовывать в текущее положение штока, для чего нужно задавать геометрию данного станка-качалки. И, наконец, эти датчики не могут быть использованы на установках с цепным приводом, где отсутствует балансир.

В настоящее время на балансирных станках-качалках широко используются бесконтактные датчики положения. Они устанавливаются, как правило, на выходном валу редуктора и представляют собой герконы или датчики Холла, срабатывающие при прохождении рядом с ними постоянных магнитов. Так как один оборот вала редуктора соответствует одному полному циклу

качания, это позволяет с необходимой точностью фиксировать моменты прохождения штоком одной (нижней) или двух – (нижней и верхней) мертвых точек. Недостатки такого способа определения параметров движения штока следующие:

1. Датчик положения расположен отдельно от других элементов системы автоматизации (например, датчика усилия в системах динамометрирования), что вызывает дополнительные проблемы с соединительными кабелями.

2. Датчик требует очень точной установки (совмещение датчика Холла с магнитами должно происходить точно в мертвых точках, также требуется обеспечение малого зазора между ними). Естественно, после проведения любых ремонтных работ на скважине эти настройки сбиваются, и требуется выезд специальной бригады для восстановления работоспособности датчика.

3. Датчик неприменим для установок ШГН с цепным приводом, у которых нет однозначной зависимости между углом поворота выходного вала редуктора и положением точки подвеса штанг.

Выходом из данной ситуации могли бы стать аналогичные датчики, устанавливаемые на устье скважины и реагирующие на магниты, закрепленные непосредственно на штоке. Однако на практике такие системы не прижились в силу ряда причин:

1. Датчик находится во взрывоопасной зоне, требуется его специальное исполнение, что отражается на цене.

2. При проведении любых ремонтных работ на скважине будут смещаться настройки элементов датчика и потребуются их последующая регулировка.

3. После изменения длины хода штока снова потребуются настройка элементов датчика.

Наиболее оптимальным, с этой точки зрения способом определения параметров движения штока, является использование линейного акселерометра для измерения ускорения, возникающего при возвратно-поступательном движении штока насосной установки, и последующем интегрировании этого сигнала сначала в скорость, а потом в перемещение.

Применение акселерометров для определения параметров движения штока является очень удобным и практичным решением: малогабаритный интегральный

акселерометр может быть совмещен в одном корпусе с датчиком усилия, что уменьшает количество кабельных соединений, значительно упрощает монтаж, снижает металлоемкость и стоимость системы динамометрирования. На этом принципе построены многие динамографы: СДА-10-ШГН (НПО «Интротест», Екатеринбург), Микон-802 (ООО «Микон», Набережные Челны), СИДДОС-автомат (ТНПВО «СИАМ», Томск), ДПН-Т20 (НПФ «Интек», Уфа) и другие.

Однако трудность создания таких датчиков заключается в очень низком уровне ускорений, возникающих при движении точки подвеса штанг и наличии паразитных вибраций. Так, например, для насосной установки с длиной хода 4 метра, совершающей 2 качания в минуту, изменения ускорения составят всего лишь  $\pm 0,01g$  (самые чувствительные из выпускаемых сейчас интегральных акселерометров имеют диапазон измерения ускорений в несколько сотен раз больше). При этом механические возмущения, создаваемые ударами и вибрациями механических узлов оборудования будут создавать помехи, имеющие значительно большую амплитуду ускорений. Использование фильтров, в свою очередь, вносит в сигнал фазовые искажения, из-за чего соответствующие моменты хода штока будут фиксироваться с некоторым временным опозданием.

Немаловажным фактором является широкий диапазон изменения температуры окружающей среды от минус 40 до  $+60^{\circ}C$ , тогда как все интегральные акселерометры обладают значительной температурной погрешностью.

Поэтому практически все отечественные динамографы с датчиками перемещения на основе акселерометров по паспорту имеют погрешность не менее 5%. Такая погрешность не может обеспечить достоверность получаемых динамограмм и, соответственно, адекватное принятие решений по результатам их анализа.

Перед авторами стояла задача разработки датчика параметров движения штока установки ШГН, который обеспечивает, прежде всего, фиксацию моментов прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек с погрешностью не более 0,5...1,0 %, а также проанализировать возможность измерения при помощи акселерометра длины хода штока.

## 2. Выбор акселерометра

Авторами рассматривалось несколько видов интегральных акселерометров: пленочные пьезоэлектрические, объемные и поверхностные [3].

Пленочные пьезоэлектрические интегральные акселерометры выпускает компания Atochem Sensors – акселерометры серии АСН.

Объемные интегральные акселерометры производит компании Lucas NovaSensor – акселерометры серии NAC.

Поверхностные интегральные акселерометры выпускает компания Analog Devices – акселерометры серии ADXL, а также компания Motorola – акселерометры серии ХММА.

Для разрабатываемого датчика перемещения наиболее целесообразно с точки зрения цены, доступности, качества и габаритов, оказалось использовать интегральные акселерометры фирмы Analog Devices [4].

В таблице 1 приведены основные технические характеристики интегральных акселерометров фирмы Analog Devices.

Из таблицы 1 видно, что наибольшей чувствительностью и минимальной суммарной погрешностью обладает интегральный акселерометр ADXL103.

Акселерометр ADXL213 обладает несколько большей чувствительностью, но уступает ADXL103 по таким параметрам как нелинейность, температурный дрейф нуля и чувствительности, плотность шумов. Широтно-импульсный тип выходного сигнала менее удобен, чем аналоговый. Кроме того, для данной задачи требуется измерять ускорения только по одной оси, тогда как ADXL213 имеет две оси измерения ускорения и, соответственно, является избыточным.

Как видно из таблицы 1, наибольший вклад в общую величину погрешности акселерометра ADXL103 вносят смещение нуля и чувствительности – по 10% и 6%, соответственно, затем идет погрешность поперечной чувствительности (2...5%) и нелинейность акселерометра (0,5...2,5%) и совсем небольшой вклад вносят температурный дрейф нуля и чувствительности акселерометра – по 0,265% и 0,2%, соответственно.

Определим суммарное значение погрешностей акселерометра (приведенное значение).

Таблица 1

Технические характеристики акселерометров,  
выпускаемых фирмой Analog Devices

Модель акселерометра	<a href="#">ADXL103</a>	<a href="#">ADXL204</a>	<a href="#">ADXL213</a>	<a href="#">ADXL322</a>	<a href="#">ADXL202</a>
Количество осей	1	2	2	2	2
Диапазон измерений, g	±1,7	±1,7	±1,2	±2	±2
Тип выходного сигнала	Аналоговый	Аналоговый	ШИМ	Аналоговый	ШИМ
Чувствительность	1000 mV/g	620 mV/g	30 %/g	420 mV/g	12.5 %/g
Нелинейность шкалы, % от FS	0,5 – 2,5	0,5 – 2,5	0,5	0,2	0,2
Поперечная чувствительность, %	2 – 5	2 – 5	2	2	2
Температурный дрейф нуля, mg/°C	0,1	0,2	0,25	0,5	2
Температурный дрейф чувствительности, % от величины измерения	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
Плотность шумов, mg/√Гц	110	170	160	220	200
Потребляемый ток, mA	0,7	0,5	0,7	0,5	0,6
Диапазон рабочих температур, °C	- 40 – 125	- 40 – 125	- 40 – 85	- 20 – 70	- 40 – 85

Погрешность поперечной чувствительности акселерометра, при определении суммарной погрешности акселерометра, примем равной нулю, так как в нашем случае на акселерометр не действуют никакие поперечные силы.

Нелинейность акселерометра изменяется от экземпляра к экземпляру изделия, ее максимальное значение составляет 2,5% (типичное значение нелинейности составляет 0,5%).

Найдем среднеквадратичное значение суммарной погрешности акселерометра:

$$\delta = \sqrt{10^2 + 6^2 + 2,5^2 + 0,265^2 + 0,2^2} = 11,93\% .$$

Полученное значение погрешности очень велико, поэтому в любом случае необходимо рассмотреть методы компенсации погрешностей акселерометра. При

этом каждую составляющую полной погрешности акселерометра необходимо рассматривать отдельно, так как разные виды погрешностей акселерометра зависят от разных факторов, и, следовательно, для их устранения необходимо использовать разные методы.

### **3. Методы компенсации погрешностей акселерометра**

#### *Поперечная чувствительность акселерометра*

Погрешность, обусловленная поперечной чувствительностью акселерометра, в нашем случае учитываться не будет, так как на акселерометр не действуют никакие поперечные силы (ускорение, которое испытывает акселерометр при перемещении полированного штока насосной установки, действует только вдоль оси чувствительности акселерометра).

#### *Смещение нуля и температурный дрейф нуля акселерометра*

Погрешности смещения нуля и температурного дрейфа нуля акселерометра изменяются во времени очень медленно и их можно считать постоянными величинами в течение одного периода качания насосной установки. Таким образом, эти погрешности являются систематической составляющей погрешности акселерометра.

В свою очередь, в законе ускорения полированного штока отсутствует постоянная составляющая. Отсюда следует, что суммарное действие постоянных погрешностей акселерометра достаточно легко можно устранить программным путем, для этого достаточно удалить постоянную составляющую из сигнала ускорения.

Постоянная составляющая сигнала ускорения определяется как среднее значение сигнала ускорения за один период. Удалить постоянную составляющую из сигнала ускорения можно путем ее вычитания из измеренных значений ускорения.

В случае использования данного метода происходит практически полная компенсация систематических составляющих погрешностей акселерометра, а точность компенсации в этом случае будет определяться лишь величиной шумов сигнала ускорения, усредненной в течение одного периода.

*Температурный дрейф коэффициента чувствительности акселерометра*

Температурный дрейф коэффициента чувствительности акселерометра составляет 0,2% от величины измеренного ускорения (перемещения). Таким образом, при длине хода полированного штока 2 м, максимальное значение этой погрешности составит величину

$$\Delta l = \frac{0,2}{100} \cdot 2000 = 0,004 \text{ м.}$$

Полученное значение погрешности очень мало, поэтому нет необходимости использовать какие-нибудь методы ее компенсации. Кроме того, авторам работы не известны какие-нибудь простые методы компенсации этой погрешности (метод проведения калибровки акселерометра в термокамере слишком сложен в реализации).

*Нелинейность акселерометра*

Максимальное значение нелинейности акселерометра составляет 2,5% от полной шкалы.

Так как в нашем случае будет использоваться только небольшая часть измерительного диапазона акселерометра, можно снизить погрешность нелинейности акселерометра путем калибровки шкалы акселерометра в меньшем диапазоне измеряемых ускорений.

Сущность такой настройки заключается в определении значения коэффициента чувствительности акселерометра, который соответствует уменьшенному диапазону измеряемых ускорений (рисунок 1). При этом коэффициент чувствительности акселерометра определяется следующей формулой:

$$k = \frac{U_{\max} - U_0}{\Delta a},$$

где  $k$  – коэффициент чувствительности акселерометра;

$U_{\max}$  – напряжение на выходе акселерометра при максимальном значении ускорения уменьшенного диапазона измерений, В;

$U_0$  – напряжение на выходе акселерометра при нулевом ускорении, В;

$\Delta a$  – длина уменьшенного диапазона ускорения, м/с<sup>2</sup>.

При использовании данного метода погрешность нелинейности снижается приблизительно в

$$K(\delta) = \frac{a_{1\max}}{a_{2\max}} \text{ раз,}$$

где  $a_{1\max}$  – максимальное ускорение полного диапазона ускорений,  $\text{м/с}^2$ ;

$a_{2\max}$  – максимальное ускорение уменьшенного диапазона,  $\text{м/с}^2$ .

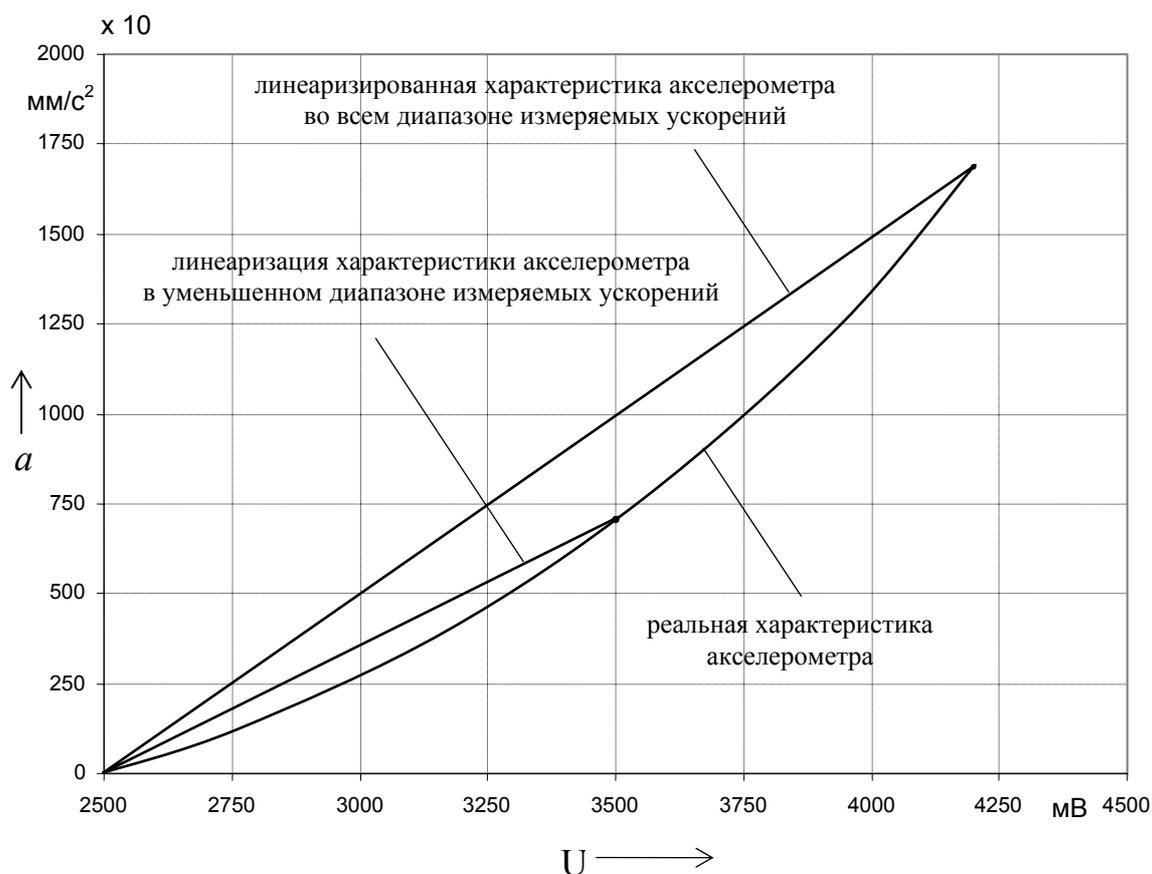


Рисунок 1. Метод линеаризации измерительной шкалы акселерометра в уменьшенном диапазоне измеряемых ускорений

Рассмотрим возможность применения данного способа снижения погрешности нелинейности акселерометра в нашем случае (в случае применения акселерометра в качестве чувствительного элемента датчика параметров движения штока установки ШГН).

Определим максимальное значение ускорения, которое может испытывать акселерометр при движении штока (длина хода штока 0,5 м, совершается 12 качаний в минуту):

$$a_{\max} = \frac{l \cdot \omega_{\max}^2}{9,81} = \frac{l \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot f_{\max} / 60)^2}{9,81} = \frac{0,5 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 12 / 60)^2}{9,81} = 0,08g,$$

где  $a_{\max}$  – максимальное ускорение, м/с<sup>2</sup>;

$\omega_{\max}$  – максимальное значение угловой частоты качаний станка-качалки, рад/с;

$f_{\max}$  – максимальное значение частоты качаний станка-качалки, кач/мин;

$l$  – длина хода станка-качалки, соответствующая максимальному ускорению, м.

Таким образом, в случае настройки измерительной шкалы акселерометра под уменьшенный диапазон измеряемых ускорений ( $\pm 0,08$  м/с<sup>2</sup>), погрешность нелинейности измерительной шкалы акселерометра снизится в  $k = \frac{1,7}{0,08} = 20$  раз

и составит величину  $\delta = \frac{2,5\%}{20} = 0,125\%$ .

#### *Результаты компенсации погрешностей акселерометра*

Как показал проведенный анализ, из всех погрешностей остаются лишь температурный дрейф чувствительности, равный 0,2% и нелинейность, составляющую 0,125% в диапазоне действующих в установке ШГН ускорений. Тогда их среднеквадратичное значение составит:

$$\delta = \sqrt{0,2^2 + 0,125^2} = 0,24\% .$$

Таким образом, в ходе анализа погрешностей акселерометра выяснилось, что суммарную величину погрешности акселерометра можно снизить с 11,93% до 0,24%, используя при этом только программные средства компенсации погрешностей: компенсация погрешностей смещения нуля и температурного дрейфа нуля осуществляется методом удаления систематической составляющей из сигнала ускорения; компенсация погрешности нелинейности и погрешности смещения коэффициента чувствительности акселерометра осуществляется методом калибровки акселерометра в уменьшенном диапазоне измеряемых ускорений.

#### 4. Проектирование измерительной цепи

Измерительная цепь акселерометра применительно к данной задаче должна удовлетворять следующим условиям: быть простой и компактной для монтажа в ограниченном пространстве датчика, обеспечивать фильтрацию сигнала ускорения для ослабления шумов собственно акселерометра и шумов, вызванных вибрациями элементов насосной установки и электродвигателя, обеспечивать высокую степень усиления сигнала с акселерометра, который работает лишь в начальном участке своего диапазона.

Современная элементная база позволяет частично упростить последнее условие за счет использования АЦП с высокой разрешающей способностью.

Авторы отказались от аппаратного интегрирования сигнала ускорения и решили использовать цифровую обработку массива данных уже в микроконтроллере датчика, так как в этом случае появляется возможность гибкого использования различных алгоритмов преобразования сигналов [5].

С учетом вышесказанного после ряда экспериментов авторы остановились на схеме, представленной на рисунке 2.

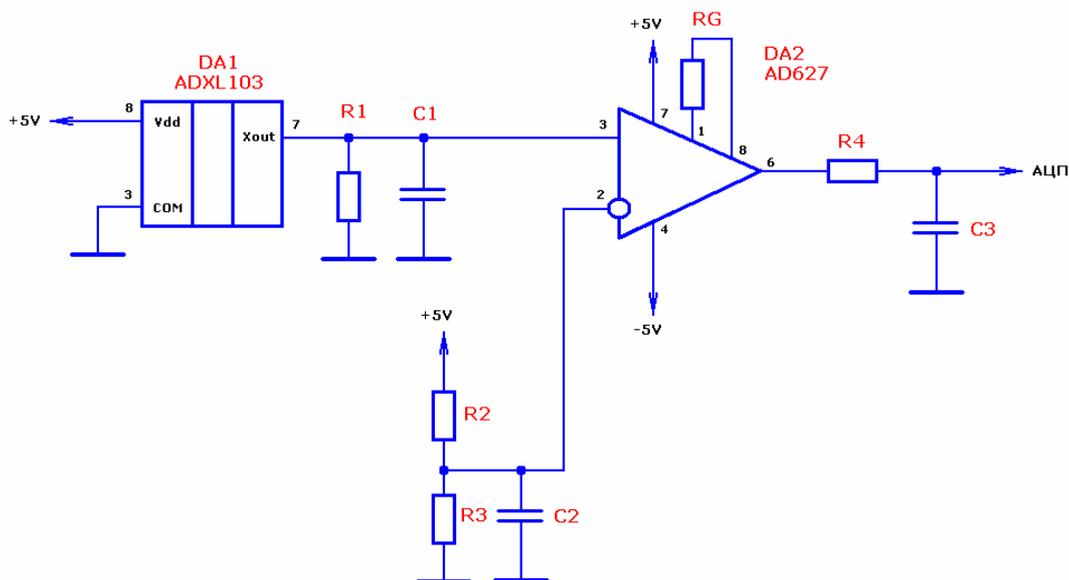


Рисунок 2. Схема измерительной цепи акселерометра

Выходной сигнал с акселерометра DA1 ADXL103 поступает на неинвертирующий вход дифференциального усилителя DA2 AD627 через цепочку R1C1. Включение резистора R1 на землю необходимо для разрядки конденсатора C1. На инвертирующий вход усилителя подается постоянное напряжение с делителя R2R3 для компенсации постоянной составляющей на выходе акселерометра, соответствующей воздействию ускорению в 1g (вызванной вертикальной ориентацией оси акселерометра).

Коэффициент усиления DA2 был подобран экспериментально исходя из ускорений движения штока, динамического диапазона реального шума и уровня помехи вибрации и приблизительно составляет 8. Сигнал на вход АЦП подается через ФНЧ R4C3.

Как показали экспериментальные записи ускорений при таком подборе характеристик элементов измерительной цепи обеспечивается максимальный размах входного сигнала АЦП без ухода в насыщение.

## **5. Обработка полученных массивов ускорений**

Цифровое интегрирование и математическая обработка массива данных ускорения являются очень важным этапом преобразования сигнала, определяющим в конечном итоге получаемый результат. На рисунке 3 представлен полученный при помощи акселерометра исходный сигнал ускорения за два периода качания установки ШГН с цепным приводом. Сигнал ускорения содержит высокий уровень шума, превосходящий полезный сигнал в несколько раз. Так как в условиях покоя датчика этот шум отсутствует, его природа обусловлена вибрациями и рывками штока насосной установки. Очевидно, что без соответствующей математической обработки сигнала никакой полезной информации из этого массива получить невозможно. В тоже время, как известно, использование любых фильтров сопровождается искажениями фазы сигнала, что приведет к запоздалой фиксации мертвых точек.

Полученный массив ускорений за период времени, заведомо превосходящий один период качания, подвергается цифровому интегрированию с использованием метода медианного фильтра. Полученный при этом сигнал скорости представлен на рисунке 4. За счет проявляющихся при интегрировании

помех и шумовых составляющих мы получаем скорость, отличающуюся в соответствующие моменты разных периодов качания. Таким образом, по этим данным нельзя определить точные значения скорости движения штока.

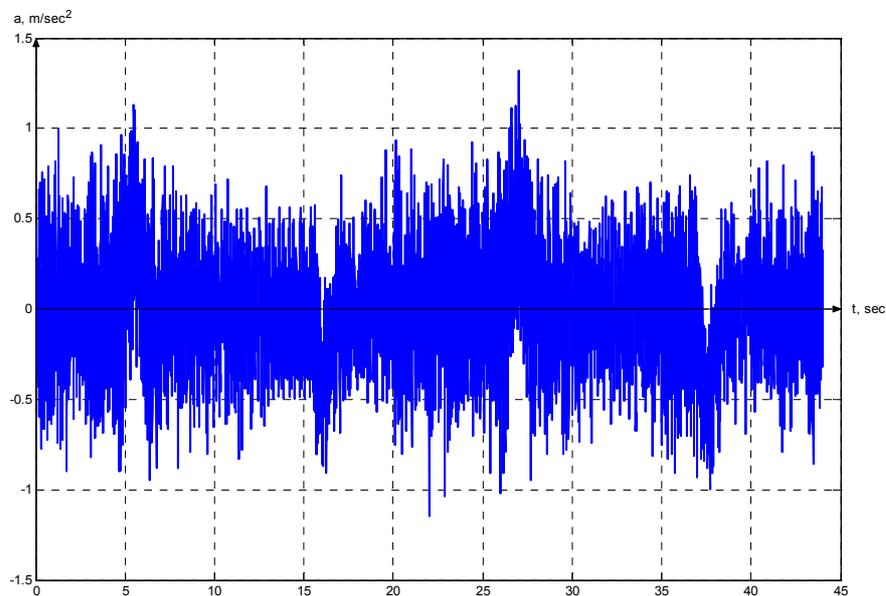


Рисунок 3. Исходный сигнал ускорения с акселерометра

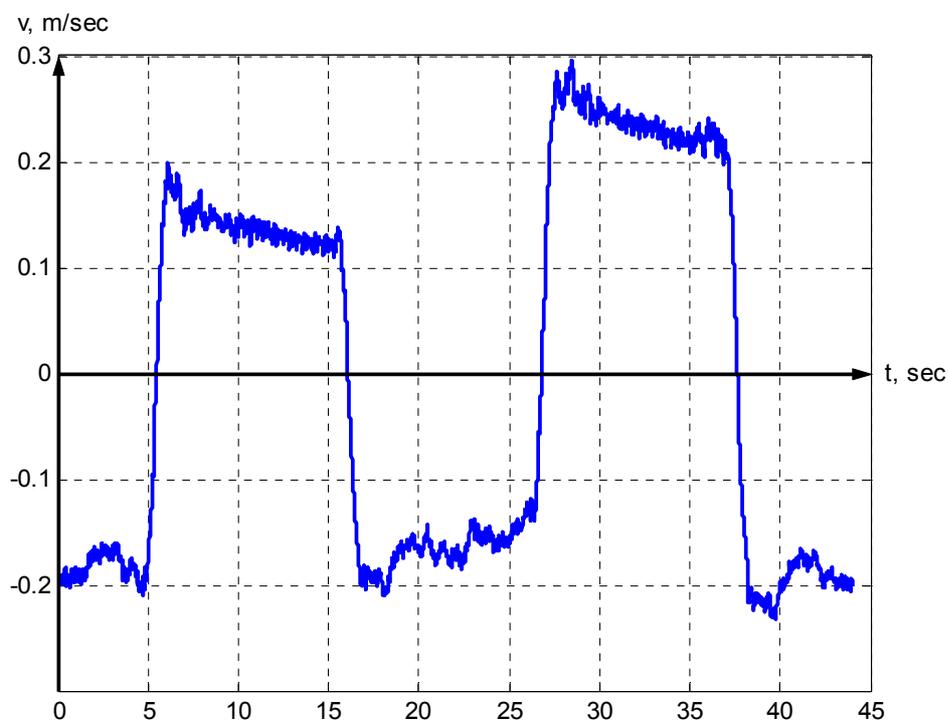


Рисунок 4. График скорости, полученный при первом интегрировании сигнала ускорения

На рисунке 5 приводится полученный при повторном интегрировании ускорения сигнал перемещения. Перемещение между мертвыми точками имеет линейный характер, как и должно быть на установках с цепным приводом, но сигнал изменяется по амплитуде также за счет проявляющихся при интегрировании помех и шумов.

Таким образом, можно сделать вывод, что по сигналу перемещения нельзя с необходимой точностью вычислить длину хода штока, но можно фиксировать моменты прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек. Так как длина хода является величиной постоянной для каждой насосной установки, она может быть задана в программу оператором единожды.

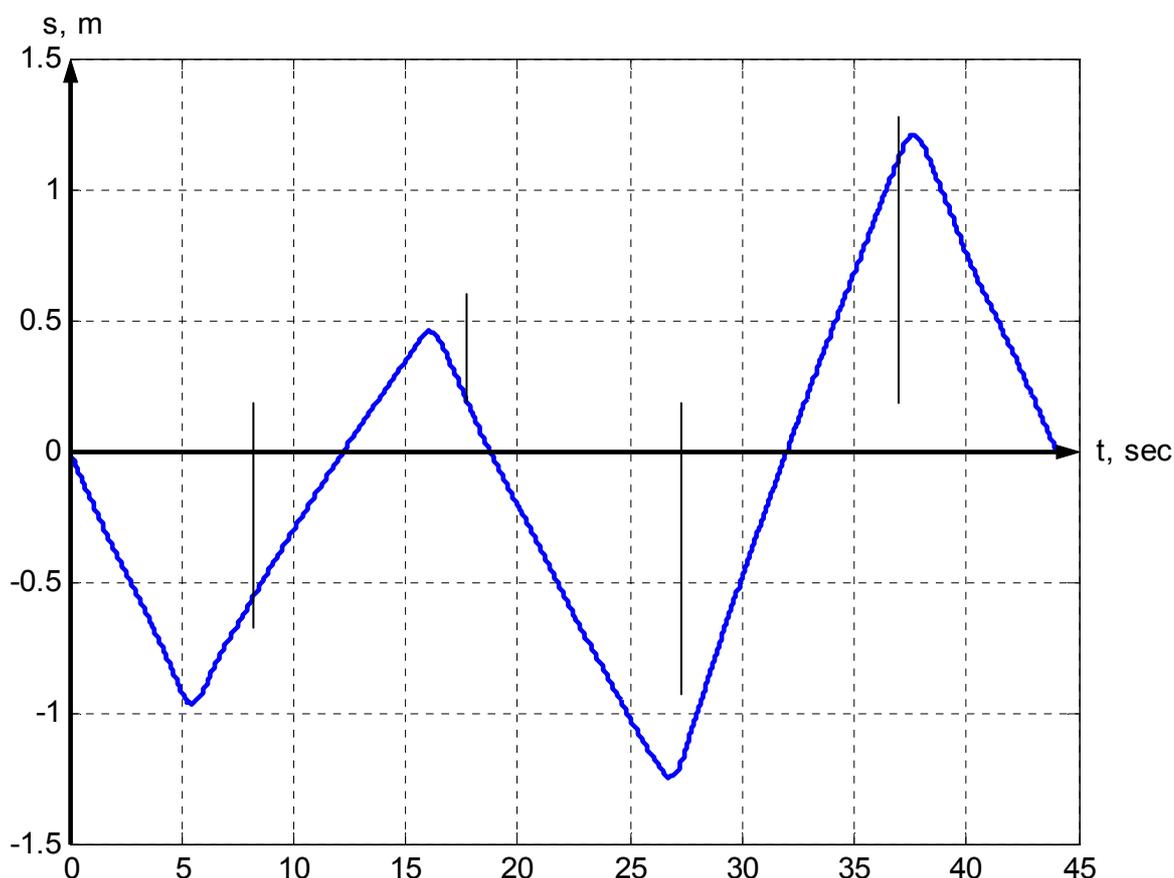


Рисунок 5. Конечный график перемещения, полученный посредством двойного интегрирования сигнала ускорения

## Заключение

Представленные в статье способ измерения параметров движения штока установки ШГН совместно с цифровой обработкой массива данных с акселерометра позволяют определить моменты прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек и избавиться от необходимости использования в системах динамометрирования отдельного датчика положения, например, на основе эффекта Холла. В системах динамометрирования акселерометр может быть совмещен в одном корпусе с датчиком усилия. Это значительно упрощает систему, улучшает ее эксплуатационные характеристики за счет уменьшения числа рассредоточенных датчиков и кабельных соединений между ними.

Однако такой метод определения параметров движения штока требует сложной математической обработки данных в микроконтроллере датчика. Поэтому в таком датчике используется микроконтроллер Microchip с наибольшим объемом памяти программ и данных PIC18F4620.

Сравнивая надежность механических концевых выключателей с надежностью интегрального акселерометра можно сказать, что срок службы последних составляет 15 лет и вероятность отказа порядка  $10^{-6}$ . Механические датчики положения и перемещения, работающие на открытом воздухе в широком температурном диапазоне в условиях агрессивной среды, как правило, не выдерживают более одного года.

По сравнению с использованием бесконтактных датчиков положения применение акселерометра повышает надежность системы за счет уменьшения общего количества датчиков и кабельных соединений между ними. Следует отметить, что датчик на основе акселерометра является универсальным, годным как для цепных установок, так и для традиционных балансирных станков-качалок. В настоящее время авторами ведется разработка новой системы динамометрирования с акселерометром на предприятии НПП «Грант» (<http://www.grant-ufa.ru>).

### Литература

1. Тахаутдинов Ш.Ф. и др. Обработка практических динамограмм на ПЭВМ.- Казань: Новое Знание, 1997.- 76 с.
2. Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи.- Альметьевск: Изд-во АО «Татнефть», 1998.- С. 20–26.
3. Гудинаф Ф. Интегральные акселерометры // Электроника. 1993. № 7–8. С. 50–57.
4. McCoy. Method and apparatus for measuring pumping rod position and other aspects of a pumping system by use of an accelerometer Pat. USA № 5406482, pr. 11.04.95.
5. Doscher J. Accelerometer Design and Applications. Analog Devices. 1998.