

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Общая теория электромеханического преобразования энергии  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Система управления линейным актуатором пропорционального гидрораспределителя»

Студент

С.В. Макаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.А. Денисов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	3
1. Конструкция пропорционального гидравлического распределителя прямого действия с линейным позиционным актуатором	8
1.1. Механика пропорционального гидрораспределителя прямого действия	8
1.2. Функциональная схема гидравлического распределителя	10
1.3. Характеристики пропорционального гидрораспределителя	13
2. Математическое моделирование режимов работы линейным актуатором с позиционным управлением	16
3. Система измерения линейного положения актуатора	18
3.1. Измерительный линейный дифференциальный трансформатор	18
3.2. Технические требования, предъявляемые к датчикам положения	36
4. Микроконтроллерная система управления актуатором	64
4.1. Микроконтроллерная система управления пропорциональным гидрораспределителем	64
4.2. Преобразователь сигналов LVDT – датчика	66
4.3. Преобразователь тока питания катушки актуатора	73
4.4. Испытательный стенд гидроаппаратуры	79
Заключение	84
Список использованных источников	86

## ВВЕДЕНИЕ

Системы гидропривода в настоящее время широко используются в современном промышленном технологическом оборудовании: термопластавтоматы (рисунок 1), штамповочные станки, металлообрабатывающие станки и т.д.

Гидроприводом называется совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение механизмов и машин посредством рабочей жидкости, находящейся под давлением, с одновременным выполнением функций регулирования и реверсирования скорости движения выходного звена гидродвигателя.



Рисунок 1 - Термопластавтомат с гидроприводом подачи расплава пластмассы

Гидроприводы могут быть двух типов: гидродинамические и объемные. В гидродинамических приводах используется в основном кинетическая энергия

потока жидкости. В объемных гидроприводах используется потенциальная энергия давления рабочей жидкости.

Объемная гидропередача, являющаяся силовой частью гидропривода, состоит из объемного насоса (преобразователя механической энергии приводящего двигателя в энергию потока рабочей жидкости) и объемного гидродвигателя (преобразователя энергии потока рабочей жидкости в механическую энергию выходного звена).

Устройства управления предназначены для управления потоком или другими устройствами гидропривода. При этом под управлением потоком понимается изменение или поддержание на определенном уровне давления и расхода в гидросистеме, а также изменение направления движения потока рабочей жидкости. К устройствам управления относятся: гидрораспределители, служащие для изменения направления движения потока рабочей жидкости, обеспечения требуемой последовательности включения в работу гидродвигателей, реверсирования движения их выходных звеньев и т.д.; регуляторы давления (предохранительный, редуцирующий, переливной и другие клапаны), предназначенные для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме; регуляторы расхода (делители и сумматоры потоков, дроссели и регуляторы потока, направляющие клапаны), с помощью которых управляют потоком рабочей жидкости; гидравлические усилители, необходимые для управления работой насосов, гидродвигателей или других устройств управления посредством рабочей жидкости с одновременным усилением мощности сигнала управления.



Рисунок 2 - Гидравлический пропорциональный распределитель потока прямого действия

Регулирующая гидроаппаратура изменяет давление, расход и направление потока рабочей жидкости за счет частичного открытия рабочего проходного сечения.

Вспомогательные устройства обеспечивают надежную работу всех элементов гидропривода. К ним относятся: кондиционеры рабочей жидкости (фильтры, теплообменные аппараты и др.); уплотнители, обеспечивающие герметизацию гидросистемы; гидравлические реле давления; гидроемкости (гидробаки и гидроаккумуляторы рабочей жидкости) и др.

Гидролинии (трубы, рукава высокого давления, каналы и соединения) предназначены для прохождения рабочей жидкости по ним в процессе работы объемного гидропривода. В зависимости от своего назначения гидролинии, входящие в общую гидросистему, подразделяются на всасывающие, напорные, сливные, дренажные и гидролинии управления. Также в гидролинии могут включаться аккумуляторы давления для обеспечения динамических перегрузок.

Кроме этого встраиваются различные измерительные устройства: манометры, датчики расхода и давления, измерители перемещения и т.д.

Широкое распространение гидропривода объясняется тем, что этот привод обладает рядом преимуществ перед другими видами приводов машин:

1.Бесступенчатое регулирование скорости движения выходного звена гидропередачи и обеспечение малых устойчивых скоростей.

2. Небольшие габариты и масса. Время разгона, благодаря меньшему моменту инерции вращающихся частей не превышает долей секунды в отличие от электродвигателей, у которых время разгона может составлять несколько секунд.

3. Частое реверсирование движения выходного звена гидропередачи.

4. Большое быстродействие и наибольшая механическая и скоростная жесткость. Механическая жесткость - величина относительного позиционного изменения положения выходного звена под воздействием изменяющейся внешней нагрузки. Скоростная жесткость - относительное изменение скорости выходного звена при изменении приложенной к нему нагрузки.

5. Автоматическая защита гидросистем от вредного воздействия перегрузок благодаря наличию предохранительных клапанов.

6. Хорошие условия смазки трущихся деталей и элементов гидроаппаратов, что обеспечивает их надежность и долговечность.

7. Простота преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное и возвратно-поворотные без применения каких-либо механических передач, подверженных износу.

Одним из ключевых компонентов регулирования расхода или давления является пропорциональный клапан пропорционального или сервоуправления. При передаче механического усилия от регулирующего актуатора на золотник клапана, данный клапан является клапаном прямого действия.

В настоящее время электронная система управления строится на основе аналоговой электроники – операционных усилителях. Данные системы управления несмотря на то, что обладают высоким быстродействием, имеют ограниченные функциональные возможности, сложности с интеграцией с

современными системами автоматизированного управления, а также большие габариты. В тоже время уровень современных микроконтроллеров позволяет реализовать системы управления на базе интегрированных высокопроизводительных микроконтроллеров.

Целью диссертационной работы является: разработка микроконтроллерной системы позиционного управления линейным актуатором гидравлического распределителя прямого действия.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ конструкция пропорционального гидравлического распределителя прямого действия с линейным позиционным актуатором
2. Математическое моделирование режимов работы линейным актуатором с позиционным управлением
3. Разработать система измерения линейного положения актуатора повышенной точности
4. Разработать систему управления актуатором на базе современных микроконтроллеров

## 1 Конструкция пропорционального гидрораспределителя прямого действия

### 1.1 Механика пропорционального гидрораспределителя прямого действия

Для пропорционального управления величиной и направлением потока широко применяется пропорциональный гидрораспределитель, который может быть использован для регулирования положения и скорости рабочего механизма технологического оборудования. Данный гидрораспределитель является механотронным модулем, объединяющим гидравлический регулятор, электромеханические управляющие устройства, системы измерения и управления.

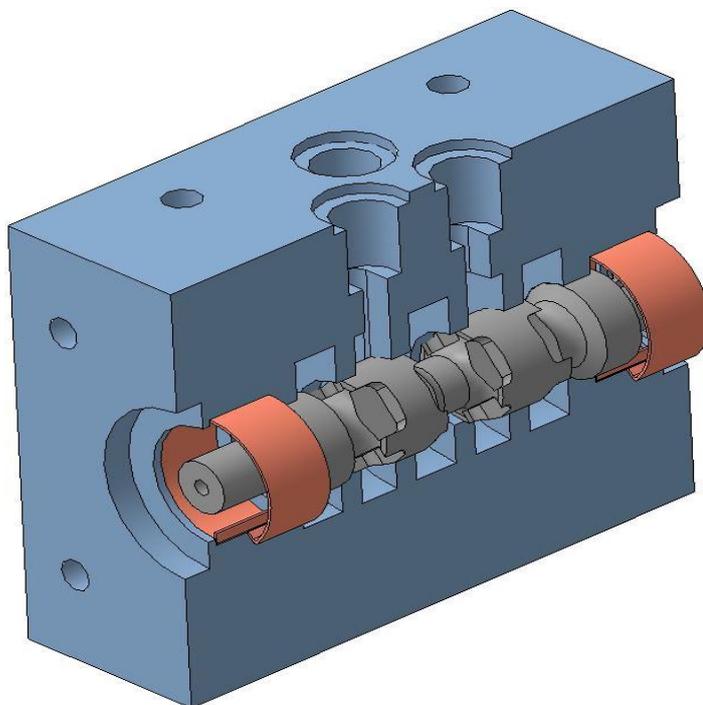


Рисунок 3 - Механика гидрораспределителя (корпус с золотником)

На рисунке 3 показан пропорциональный гидрораспределитель прямого управления для монтажа на плите в разрезе.

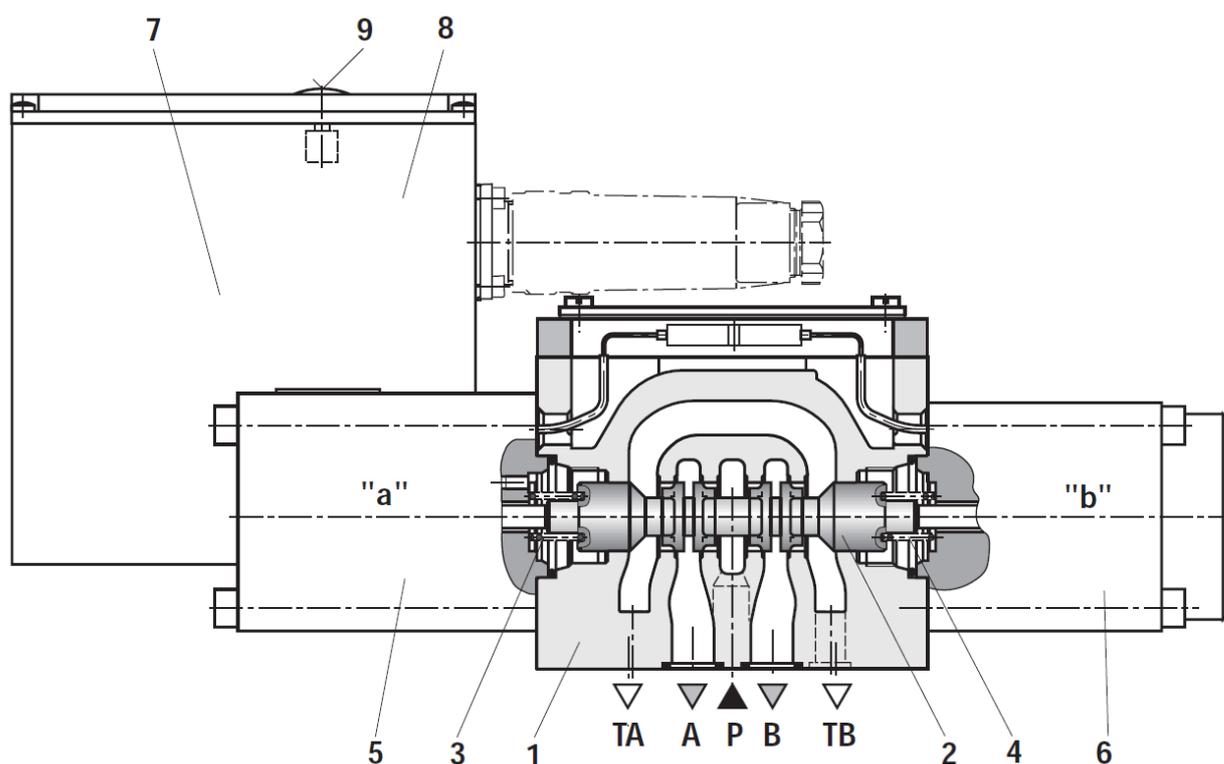


Рисунок 4 - Пропорциональный 4/3-распределитель прямого управления

Основными деталями распределителя являются:

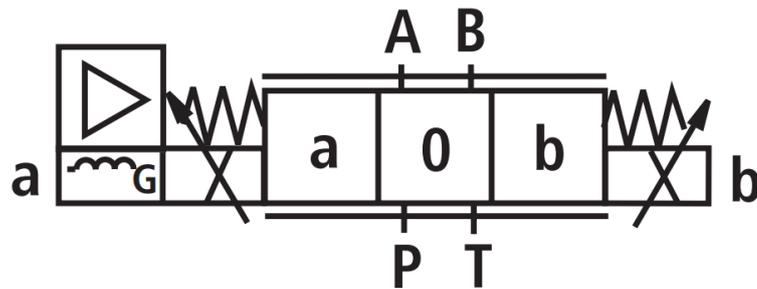
- Корпус (1) с установочной плоскостью,
- золотник (2) с уравновешенными пружинами(3 и 4),
- электромагниты (5 и 6),
- датчик положения золотника,
- встроенная управляющая электроника(8).

Принцип действия: при обесточенных электромагнитах (5 и 6) золотник (2) устанавливается пружинами (3 и 4) в среднее положение с перекрытием каналов А и В; золотник (2) смещается при подаче напряжения на один из электромагнитов пропорционально уровню задающего сигнала, например при протекании тока в электромагните «b», соединяются каналы Р с А и В с Т через дросселирующие сети, обеспечивающие линейную характеристику расхода.

Измерение фактического положения золотника производится линейным датчиком положения (линейный дифференциальный измерительный трансформатор), сопряженным механически с золотником.

## 1.2 Функциональная схема гидравлического распределителя

На рисунке 5 представлена функциональная схема системы управления пропорциональным гидрораспределителем с двумя управляющими соленоидами. На рисунке 6 гидравлическая схема гидрораспределителя.



Общая схема пропорционального распределителя

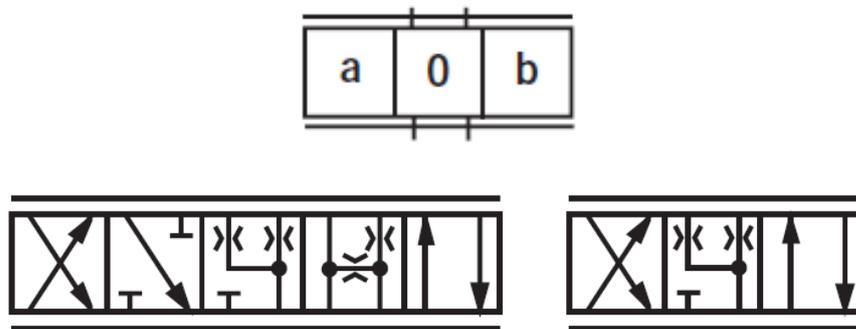


Рисунок 6 Гидравлическая схема

Разъем	Управляющая электроника	Распределитель
--------	-------------------------	----------------

Страна индуктивного датчика положения

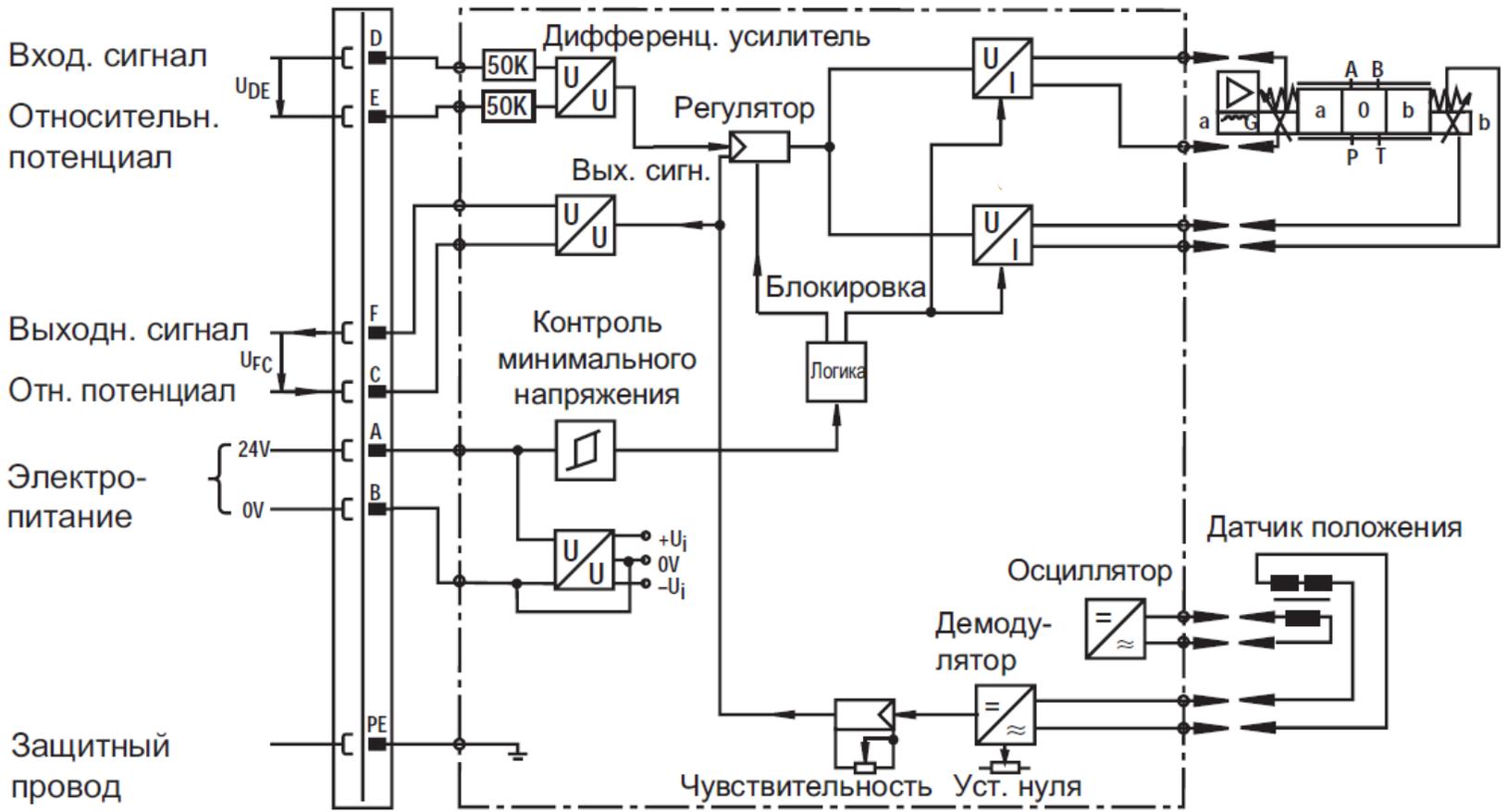


Рисунок 5 - Функциональная схема пропорционального гидрораспределителя прямого действия

В таблице 1 приведены параметры подсоединения электрических сигналов

Таблица 1 - Таблица подсоединения и технические параметры

	Контакт	Сигнал
Питание	A	24В постоянного тока, 19,4В до 35В Максимальный ток 2,8А (типоразмер 10) Максимальный импульсный ток 4А
	B	0В
Относительный потенциал выходного питания	C	По отношению к контакту F
Входной дифференциальный усилитель Входной сигнал	D E	$\pm 10В$ входной сигнал, входное сопротивление $>50кОм$ (позитивный входной сигнал на D относительно потенциала на E соответствует потоку от P к A и от B к T, негативный входной сигнал на D относительно потенциала на E соответствует потоку от P к B и от A к T)
Выходной сигнал	F	$\pm 10В$ выходной сигнал, предельная нагрузка 2 мА (положительный сигнал на F соответствует потоку от P к A)
	PE	Соединен с радиатором и корпусом распределителя

Линейный актуатор, применяемый в составе пропорциональных гидравлических распределителей состоит из силового соленоида – объекта управления, который производит перемещение сердечника соединенного с золотником гидравлического распределителя, который подпружинен с противоположной стороны. В общем случае данная система является двухмассовой с наличием упруго-диссипативных сил. К сердечнику соленоида прикреплен активный элемент датчика положения – линейного дифференциального трансформатора.

Система управления обеспечивает регулирование тока, протекающего через катушку в зависимости от текущего положения и приложенного механического усилия.

С целью разработки комплектной системы управления требуется провести разработку силового соленоида с моделированием различных режимов работы, датчика положения на основе линейного дифференциального трансформатора с преобразователем сигналов.

Блок управления соленоидом состоит из силового преобразователя тока катушки, системы обработки сигналов датчика положения, микроконтроллерной системы управления, интерфейса и блока питания электроники.

### 1.3 Характеристики пропорционального гидрораспределителя

Расходная характеристика гидрораспределителя «давление-сигнал» показана на рисунке 7, переходный процесс при ступенчатом воздействии входного сигнала на рисунке 8, амплитудно-частотная характеристика пропорционального гидрораспределителя на рисунок 9. (перепад давления 10 атм, вязкость масла  $46 \text{ мм}^2/\text{с}$ , температура  $40^\circ\text{C}$ )

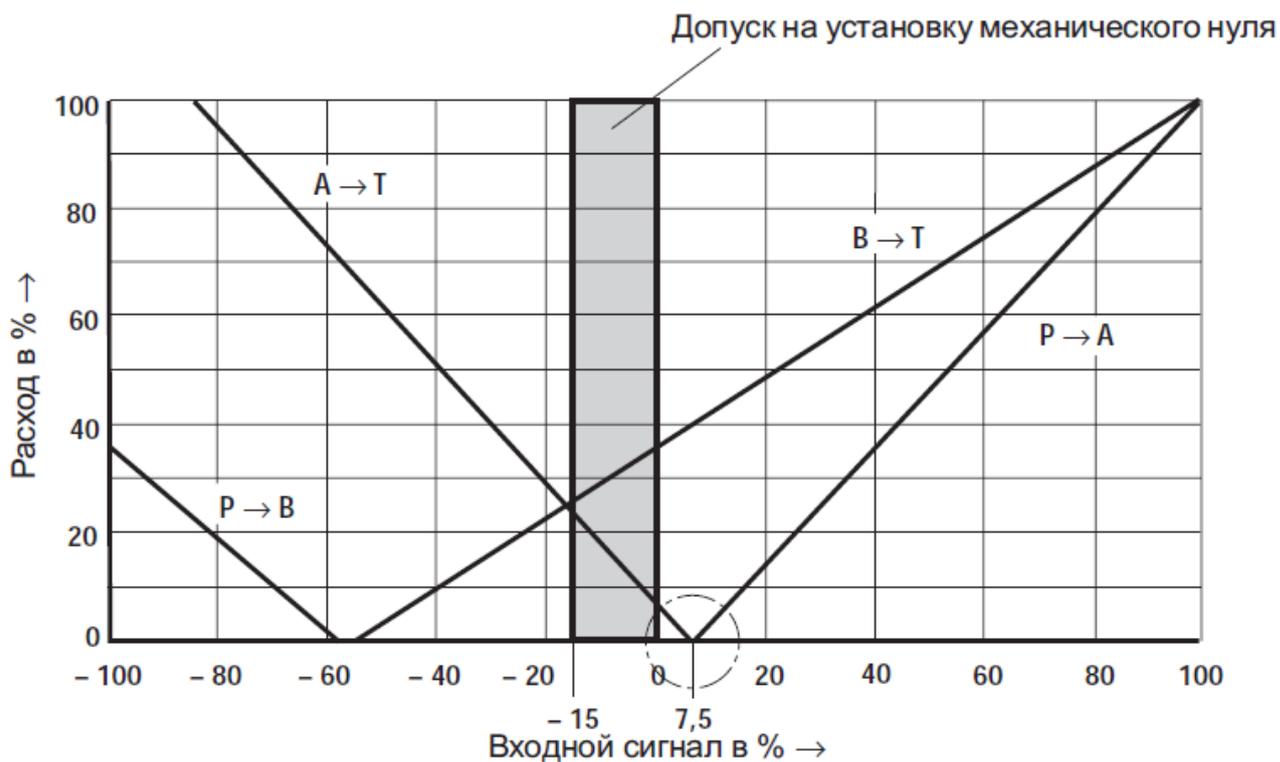


Рисунок 7 - Задающая характеристика «давление – сигнал»

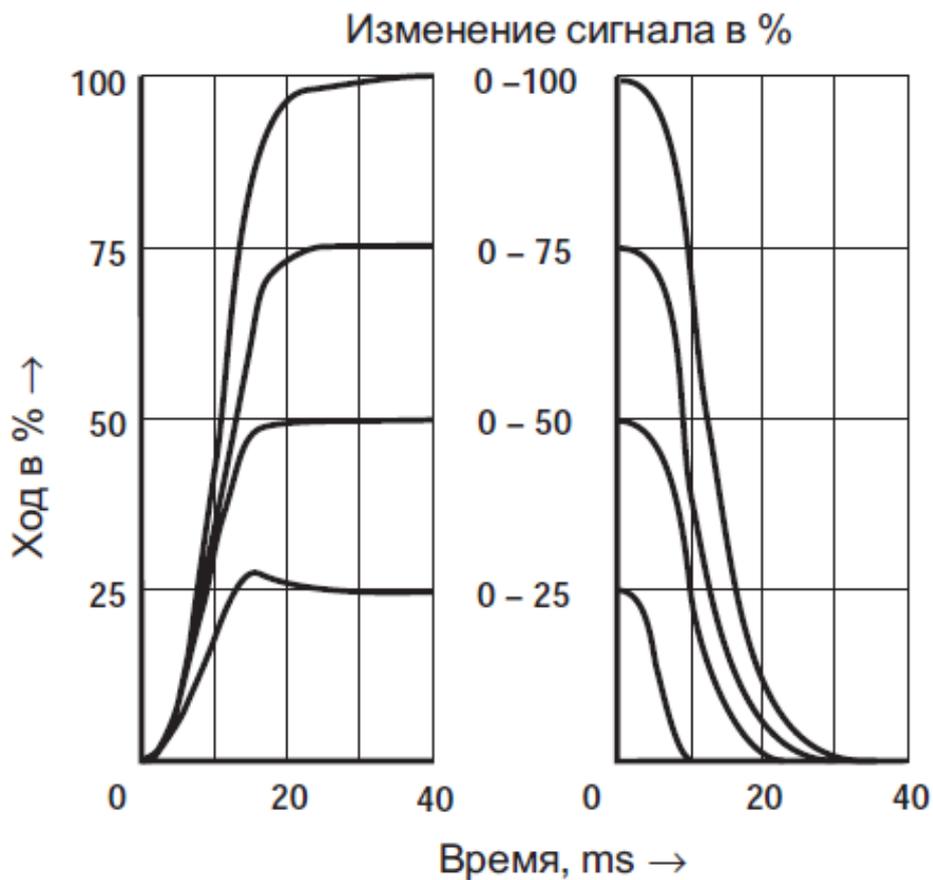


Рисунок 8 - Переходный процесс при ступенчатом входном сигнале

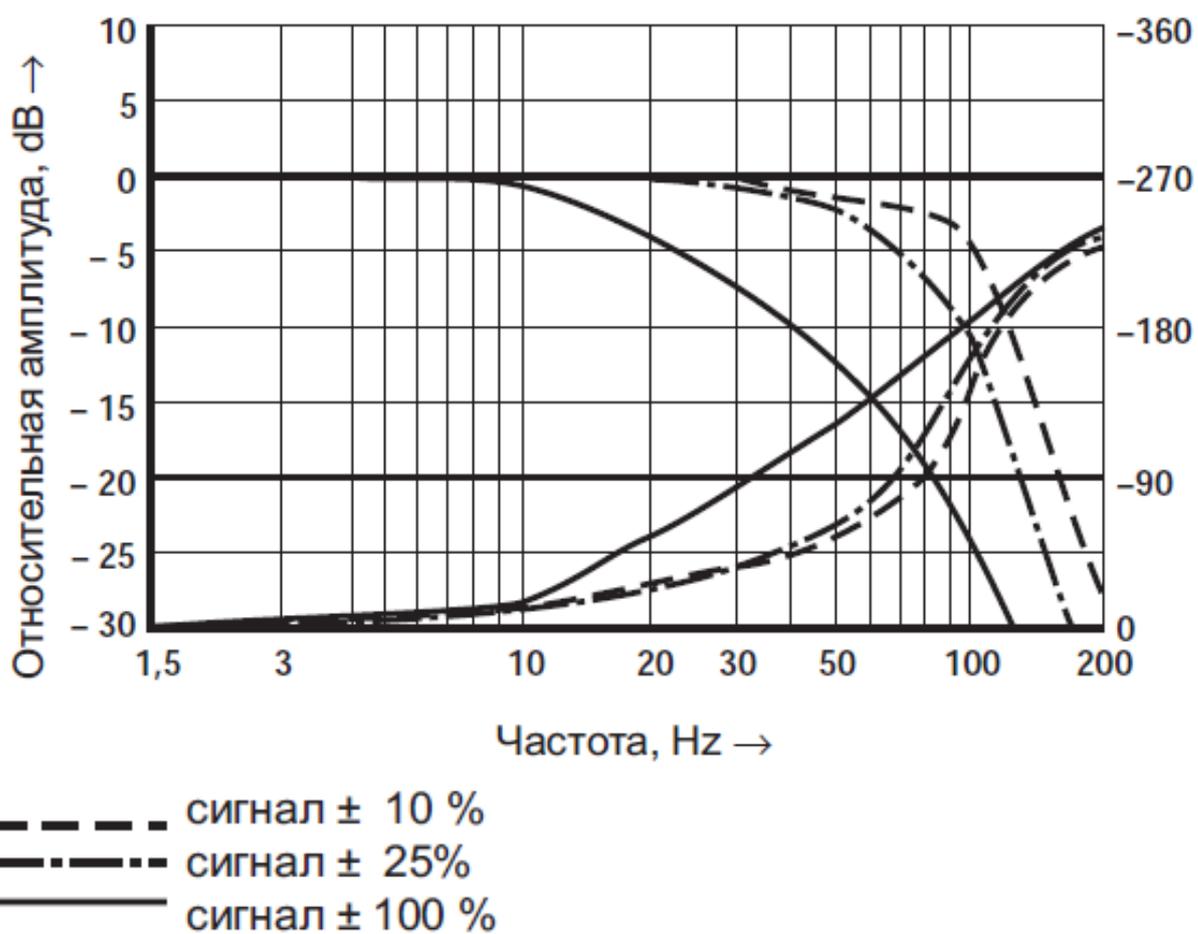


Рисунок 9 - Амплитудно-фазо-частотная характеристика пропорционального гидрораспределителя

## 2 Математическое моделирование режима работы соленоида актуатора

В системе Simulink Matlab было произведено моделирование режима работы соленоида (рисунок 9).



Рисунок 10 - Соленоид актуатора с датчиком положения сердечника

Производится задание тока, подаваемого на катушку, моделируется механическое усилие сердечника соленоида с заданием значения присоединенной массы, упруго диссипативных свойств и задание усилия противодействующей пружины (рисунок 10).

На рисунке 10 показана осциллограмма перемещения сердечника соленоида на заданное расстояние 5 мм, а также реакция на ступенчатое приложение внешнего усилия.

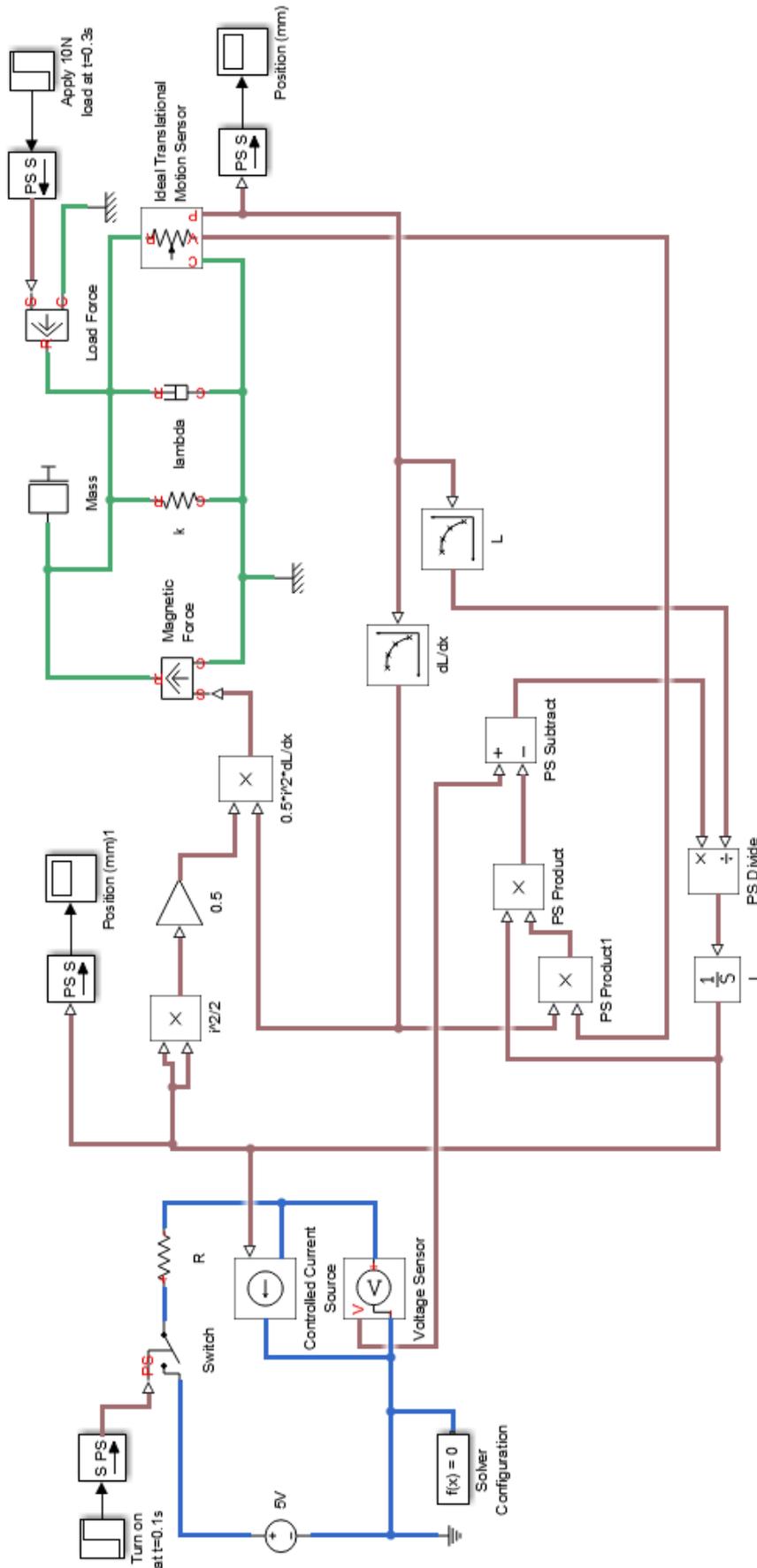
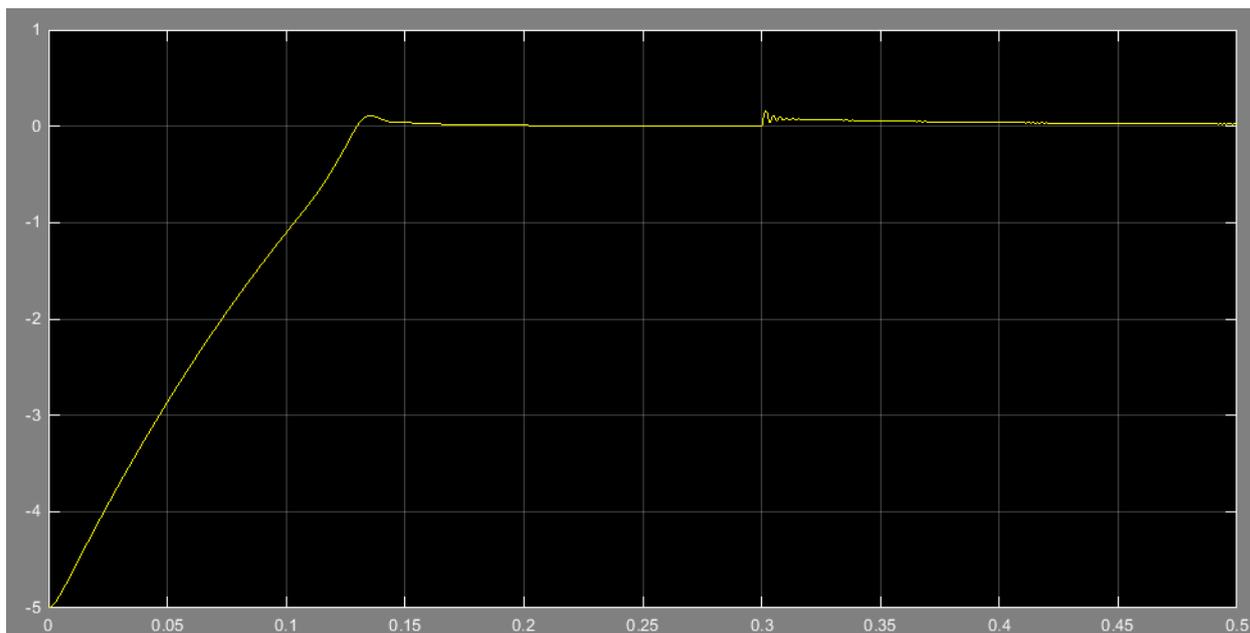


Рисунок 11 - Математическая модель соленоида в системе Simulink Matlab

Перемещение,

мм



Время, с

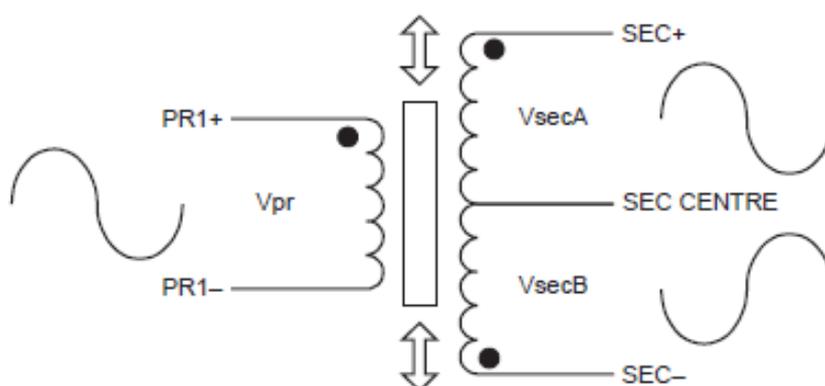
Рисунок 12 - График смещения сердечника соленоида (приложение внешней нагрузки 20 Н на 0.3 с)

### 3 Система измерения положения золотника

#### 3.1 Измерительный линейный дифференциальный трансформатор

В качестве датчика положения для измерения малых перемещений золотника наиболее часто применяются линейные дифференциальные измерительные трансформаторы (LVDT). Это объясняется их малыми габаритами, высокой степенью защиты от внешних воздействий, в том числе механических, а также высокой точностью измерения и широким частотным диапазоном.

Принцип действия дифференциального трансформатора (рисунке 10) заключается в подаче гармонического высокочастотного сигнала на первичную обмотку датчика с последующим измерением относительного значения амплитуды с вторичных обмоток. Точность измерения положения данных датчиков может достигать значения 0.01% от полного диапазона измерения. Для повышения точности измерения положения дополнительно предлагается использовать программную коррекцию выходной характеристики в микроконтроллерной системе управления.



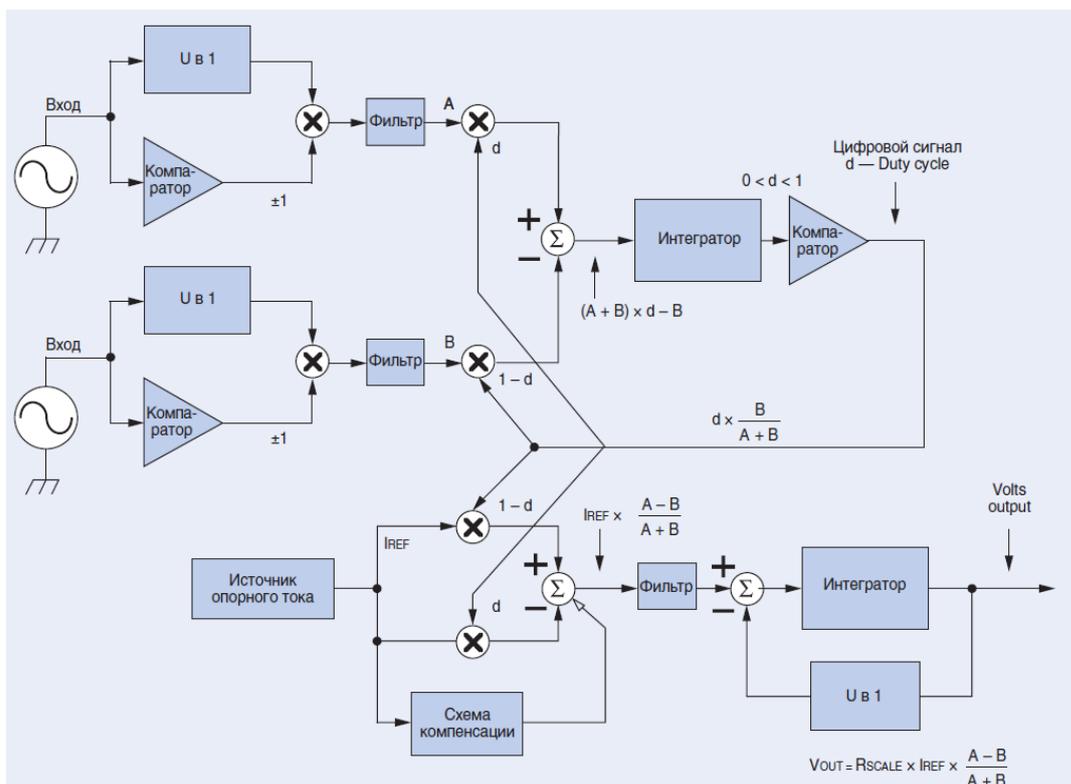


Рисунок 13 - Принцип действия линейного дифференциального измерительного трансформатора

LVDT-датчик абсолютного положения (LVDT – linear variable differential transformer) - линейный дифференциально-трансформаторный измерительный электромеханический преобразователь перемещения объекта, к которому он присоединен механически, в соответствующий пропорциональный электрический сигнал.

Диапазон измеряемых перемещений от микрометров до сотен миллиметров. Линейность выходного сигнала достигает 0,1% от полного диапазона измерения.

Датчик состоит из двух магнитосвязанных обмоток – первичной и вторичными обмотками, внутри которых перемещается сердечник из магнитной стали укрепленный на немагнитном держателе, который механически связан с объектом измерения.

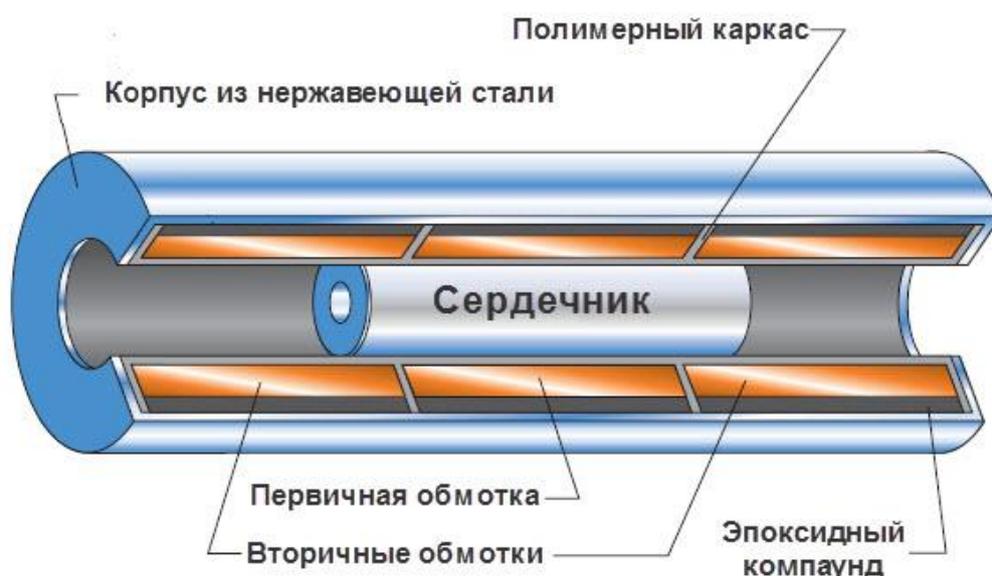


Рисунок 14 LVDT-датчик

На первичную обмотку LVDT-датчика подается напряжение переменного тока фиксированной амплитуды и частоты, называемое первичным возбуждением. Выходной электрический сигнал LVDT-датчика является дифференциальным напряжением переменного тока между двумя вторичными обмотками, которое изменяется в соответствии с осевым положением сердечника внутри катушки LVDT-датчика. Выходное напряжение переменного тока преобразуется с помощью электронной схемы обработки сигнала с высоким уровнем напряжения постоянного тока или тока, который является более удобным для использования.

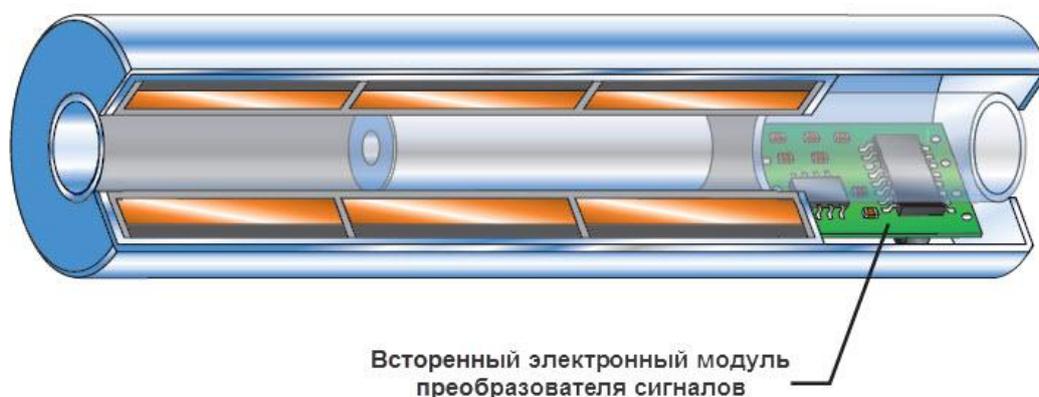


Рисунок 15 LVDT-датчика со встроенным преобразователем

Электронный преобразователь сигналов, который может быть встроен в LVDT-датчик подает на первичную обмотку переменный ток заданной частоты и амплитуды, и измеряет сигналы с вторичных обмоток, которые преобразует в электронный сигнал, пропорциональный дифференциальному сигналу относительно заданного сигнала, с коррекцией выхода.

Преимущества LVDT-датчиков:

- Отсутствие трения при перемещении сердечника относительно датчика – отсутствие механических помех
- Высокая разрешающая способность, ограниченная разрешающей способностью электронного преобразователя
- Неограниченный механический ресурс
- Чувствительность только к осевому перемещению
- Защита от повреждения при непредвиденном перебеге сердечника в датчиках с двумя открытыми сторонами
- Возможность механически изолировать перемещаемый сердечник от датчика, что актуально для объектов под давлением
- Высокая устойчивость к воздействию окружающей среды
- Абсолютный выходной сигнал датчика
- Повторяемость нулевого положения датчика, не требующего повторного обнуления
- Высокие динамические характеристики датчика, обусловлены малой инерционностью сердечника и ограниченными временем отклика электронного преобразователя

LVDT-датчик является электрическим трансформатором, он требует переменного тока по амплитуде и частоте отличных от типовых, чтобы работать должным образом (как правило, 3 V<sub>rms</sub> на 3 кГц). Формирование возбуждающего сигнала является одной из нескольких функций электроники LVDT-датчика, которую также иногда называют блоком формирования сигнала LVDT-датчика.

Другие функции включают в себя преобразования выходного

напряжения переменного тока низкого уровня LVDT-датчика в сигнал постоянного тока высокого уровня, который более удобен в использовании, получение информации о направлении из 180 градусов выходного фазового сдвига в качестве перемещения сердечника LVDT-датчика через нулевую точку, а также осуществляет электрически регулируемый выход нулевого уровня.

Выходной сигнал электроники LVDT-датчика может изменяться в широком диапазоне, в том числе типовых уровней микросхем и блоков управления для OEM заказчиков, а также модулей и готовых лабораторных приборов пользователей. Эти простые в использовании датчики перемещения обладают всеми преимуществами с входом и выходом постоянного напряжения. Конечно, LVDT-датчик со встроенной электроникой не могут быть использованы для некоторых применений или не подходят для некоторых установок.

Первичная обмотка LVDT-датчика,  $P$ , питается от источника переменного тока с постоянной амплитудой. Получаемый магнитный поток замыкается по сердечнику через соседние вторичные обмотки  $S1$  и  $S2$ . Если сердечник расположен на посередине между  $S1$  и  $S2$ , напряжения  $E1$  и  $E2$ , индуцированные в соединенных друг с другом обмотках  $S1$  и  $S2$  магнитным потоком соответственно равны. В этой исходной средней позиции сердечника, называемой нулевой точкой, выходное дифференциальное напряжение,  $(E1 - E2)$  равно нулю.

Значение  $E_{out}$  при максимальном смещении сердечника от нулевого положения зависит от амплитуды напряжения первичного возбуждения и коэффициент чувствительности конкретного LVDT-датчика, но, как правило, в несколько вольт RMS(среднеквадратичное напряжение). Фазовый угол выходного напряжения переменного тока  $E_{out}$  относительно напряжения возбуждения первичной обмотки, остается постоянным, пока центр сердечника не проходит нулевую точку, где угол сдвига фаз резко меняется на 180 градусов.

180 градусов фазового сдвига может быть использовано для определения направления сердечника в нулевой точке с помощью соответствующей схемы. На рисунке показано также, что выход LVDT-датчика линейный на заданном диапазоне основного перемещения, датчик может быть использован в расширенном диапазоне со небольшим снижением линейности выходной характеристики.

LVDТ-датчики имеют некоторые существенные особенности и преимущества, большинство из которых вытекают из его фундаментальных физических принципов работы или из материалов и решений, используемых в конструкции.

- Использование без трения

Одной из самых важных преимуществ LVDT-датчика является работа без трения. При обычном использовании, нет механического контакта между сердечником и катушкой LVDT-датчика в сборе, так нет сухого трения, растяжения и другой источников механических помех. Эта функция особенно полезна при тестировании материалов, измерения смещения вибрации, и систем неразрушающего контроля высокого разрешения.

- Бесконечная разрешающая способность

Поскольку LVDT-датчик работает на электромагнитных принципах в сочетании работы без трения, он может измерять бесконечно малые изменения позиции сердечника. Эта бесконечная разрешающая способность ограничена только шумом в сигнале преобразователя LVDT-датчика и разрешения выходного сигнала. Эти же факторы дают LVDT-датчику высокую повторяемость.

- Неограниченный механический ресурс

Из-за того, что обычно нет контакта между сердечником и катушкой конструкции LVDT-датчика, детали не могут тереться друг о друга или изнашиваться. Это означает, что LVDT-датчик имеет неограниченный механический ресурс. Этот фактор особенно важен для высокой надежности таких, как самолеты, спутники и космические аппараты, а также ядерных

установок. Это также весьма желательно во многих промышленных и управления технологическими процессами автоматизации производства систем.

- Защита от повреждения при перебеге

Внутренний канал большинства LVDT-датчика открыт на обоих концах. В случае непредвиденного перебега, сердечник полностью проходит через узел катушки датчика без повреждения. Это невосприимчивость к превышению положения сердечника делает LVDT-датчик идеальным для таких приложений, как тензометров, которые используются при контроля материалов на растяжение.

- Одноосевая чувствительность

LVDT-датчик реагирует на движение сердечника вдоль оси катушки, но, как правило, нечувствительны к радиальному перемещению сердечника. Таким образом, как правило, LVDT-датчик может функционировать без отклонений в приложениях со смещенными или изгибающимися движущимися элементами, а также в тех случаях, когда сердечник не перемещается точно по прямой линии.

- Раздельная катушка и сердечник

Поскольку только сердечником и катушка LVDT-датчика связаны через магнитное поле, узел катушки может быть изолирован от сердечника путем вставки немагнитной трубки между сердечником и каркасом. При такой конструкции жидкость под давлением может содержаться внутри трубки, в которой сердечник свободно перемещаться, в то время как сборка катушка изолирована от жидкости под давлением. Эта конструкция часто применяется в LVDT-датчиках, используемых в обратной связи по положению золотника в гидравлических пропорциональных и/или сервоклапанов.

- Устойчивость к воздействию окружающей среды

Материалы и конструктивные решения, используемые в сборке LVDT-датчика, обеспечивают его устойчивость к различным условиям окружающей

среды. Заливка обмоток эпоксидным компаундом обеспечивает влагостойкость, а также способность переносить значительные ударные нагрузки и высокий уровень вибрации во всех направлениях. Высокая магнитная проницаемостью внутреннего магнитного экрана минимизирует возмущение от внешних магнитных полей переменного тока.

Корпус и сердечник изготовлены из коррозионно-стойких металлов, корпус также выступает в качестве дополнительного магнитного экрана. А для тех применений, где датчик должен выдерживать воздействие агрессивных горючих сред или паров жидкостей, или действуют в жидкости под давлением, корпус и узел катушки могут быть герметично сварены.

Обычные LVDT датчики может работать в очень широком диапазоне температур, но, при необходимости, они могут быть получены в эксплуатации до криогенных температур или с помощью специальных материалов, работают при повышенных температурах и уровнях радиации, найденных во многих атомных реакторов.

- Повторяемость нулевого положения

Расположение внутренней нулевой точки LVDT-датчика стабильно и повторяемо при широком диапазоне рабочих температур. Это позволяет использовать LVDT-датчик положения в высокопроизводительных системах управления с обратной связью серво баланса инструмента

- Быстрая динамическая характеристика

Отсутствие трения в обычном функционировании позволяет LVDT-датчику очень быстро реагировать на изменение положения сердечника. Динамический отклик LVDT-датчика ограничен только инерционным эффектом от небольшой массы сердечника. Чаще всего, реакция системы измерения с LVDT-датчиком определяется характеристиками электронного преобразователя.

- Абсолютный выходной сигнал

LVDT-датчик является устройством с абсолютным выходным сигналом, в отличие от дополнительных устройства вывода. Это означает,

что в случае потери питания, данные о положении выдаваемые LVDT-датчиком не будут потеряны. Когда измерительная система перезапускается, выходное значение LVDT-датчика будет таким же, как это было до сбоя питания.

Расчет режима работы линейного дифференциального трансформатора датчика положения сердечника

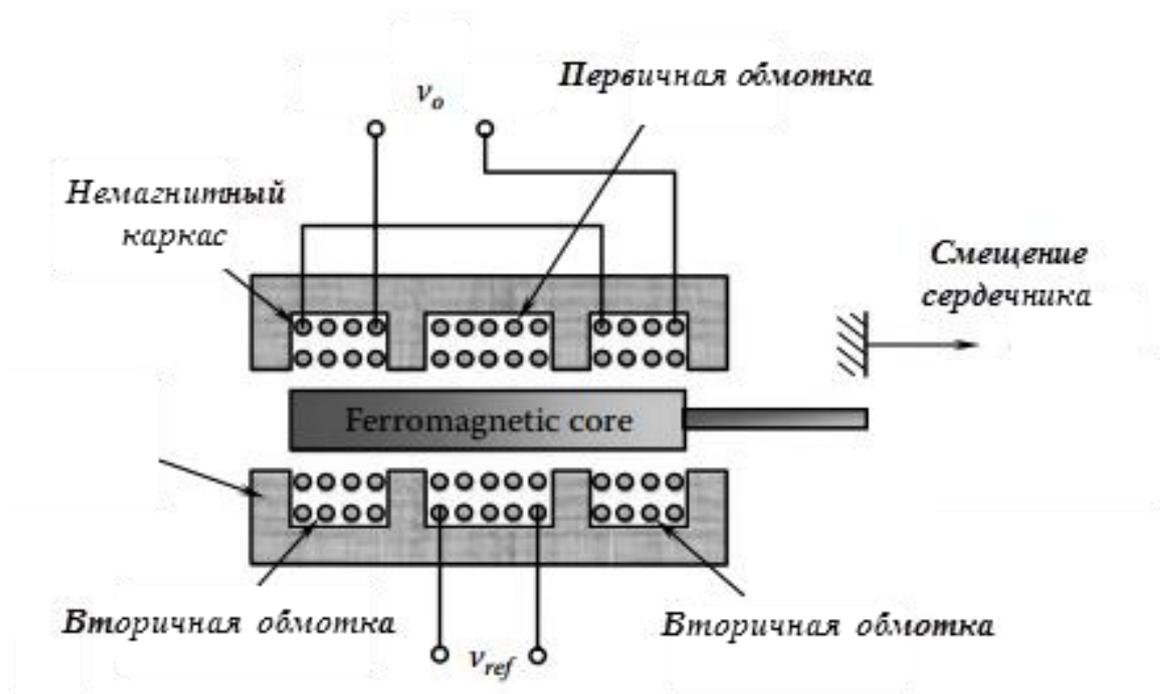


Рисунок 16 - Конструкция линейного дифференциального трансформатора

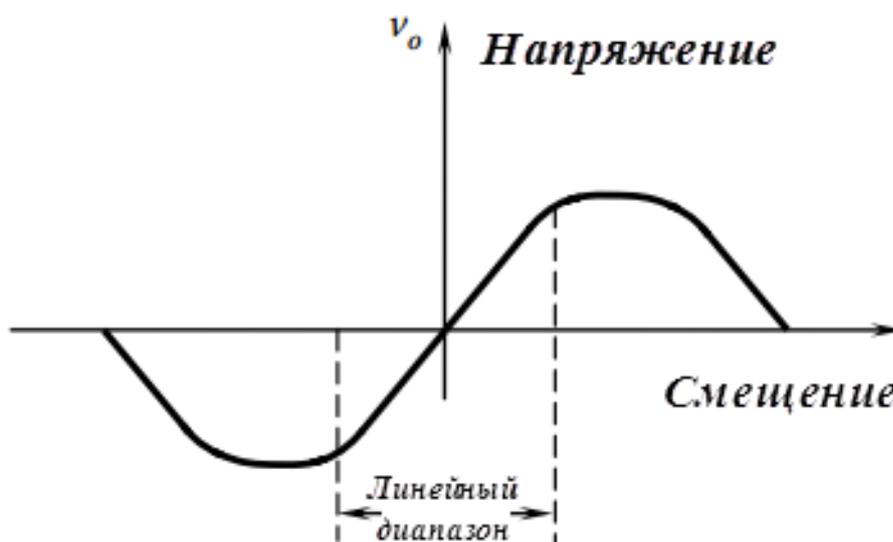


Рисунок 17 - Диаграмма выходного напряжения

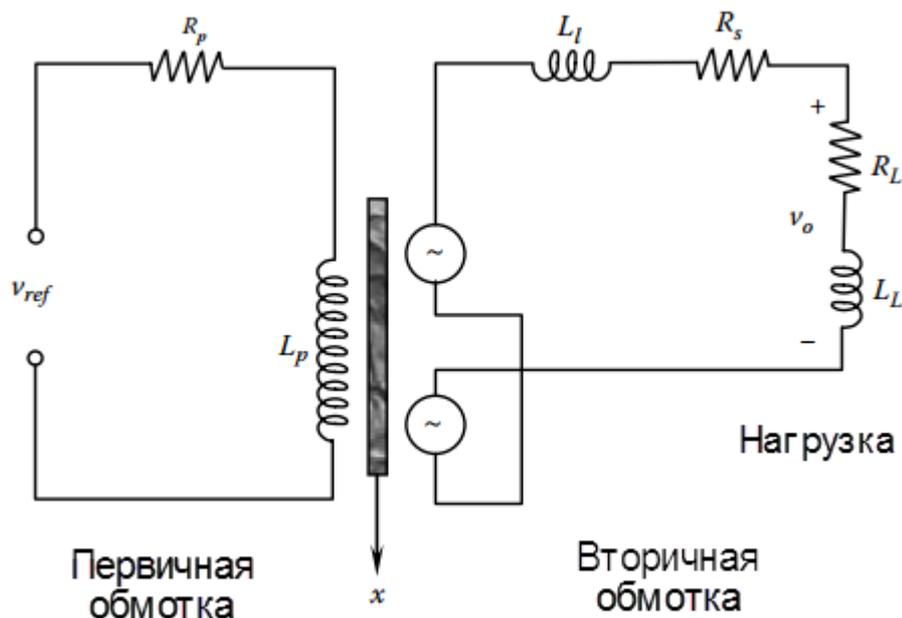


Рисунок 18 - Схема замещения линейного дифференциального трансформатора

$R_p$  – активное сопротивление первичной обмотки

$L_p$  – индуктивность первичной обмотки

$R_s$  – суммарное активное сопротивление вторичных обмоток

$L_s$  – суммарная индуктивность вторичных обмоток

$R_L$  – активное сопротивление нагрузки

$L_L$  – индуктивность нагрузки

Напряжение намагничивания первичной обмотки

$$U_p = U_{ref} j\omega L_p / (R_p + j\omega L_p)$$

Магнитный сердечник длиной  $L$  перемещается на расстояние  $x$  относительно нулевого положения. Наведенное напряжение в первом сегменте вторичной обмотки:

$$U_a = U_p k_a \frac{L}{2+x} \quad (3.1)$$

во втором сегменте

$$U_b = U_p k_b \frac{L}{2-x} , \quad (3.2)$$

где коэффициенты  $k_a$  и  $k_b$  – нелинейные функции от положения сердечника и частоты тока.

Напряжение вторичной обмотки состоящей из двух сегментов:

$$U_S = U_a - U_b = U_p k_a \frac{L}{2+x} - k_b \frac{L}{2-x} \quad (3.3)$$

В идеальном случае коэффициенты  $k_a$  и  $k_b$  одинаковы. В данном случае при смещении относительно нулевого положения  $x=0$  выходное напряжение  $U_S$  тоже будет равно нулю. При наличии различий коэффициентов  $k_a$  и  $k_b$ , на выходе появляется напряжение

$$U_S = U_a + U_b = U_p \frac{L}{2} k_a - k_b \quad (3.4)$$

называемое квадратурной ошибкой.

Для малых значений смещений  $x$  при разложении в ряд Тейлора

Напряжение вторичной обмотки

$$U_S = U_p k_a \frac{L}{2} + \frac{\partial k_a}{\partial x} \frac{L}{2} x - k_b \frac{L}{2} + \frac{\partial k_b}{\partial x} \frac{L}{2} x \quad (3.5)$$

При  $k_a = k_b = k_0$

$$U_S = 2U_p \frac{\partial k_0}{\partial x} \frac{L}{2} x \quad (3.6)$$

или

$$U_S = U_p k x, \quad (3.7)$$

где

$$k = 2 \frac{\partial k_0}{\partial x} \frac{L}{2} \quad (3.8)$$

Напряжение вторичной обмотки, относительно приложенного напряжения

$$U_S = U_{ref} j\omega L_P / (R_P + j\omega L_P) k x \quad (3.9)$$

Выходное напряжение

$$U_0 = U_{ref} \frac{j\omega L_P}{R_P + j\omega L_P} \frac{R_L + j\omega L_L}{R_L + R_S + j\omega L_L + L_S} k x \quad (3.10)$$

Для малых смещений выходное напряжение пропорционально величине смещения  $x$ .

Фаза выходного напряжения

$$\varphi = 90^\circ - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_P}{R_P} + \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_L}{R_L} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_L + L_S}{R_L + R_S} \quad (3.11)$$

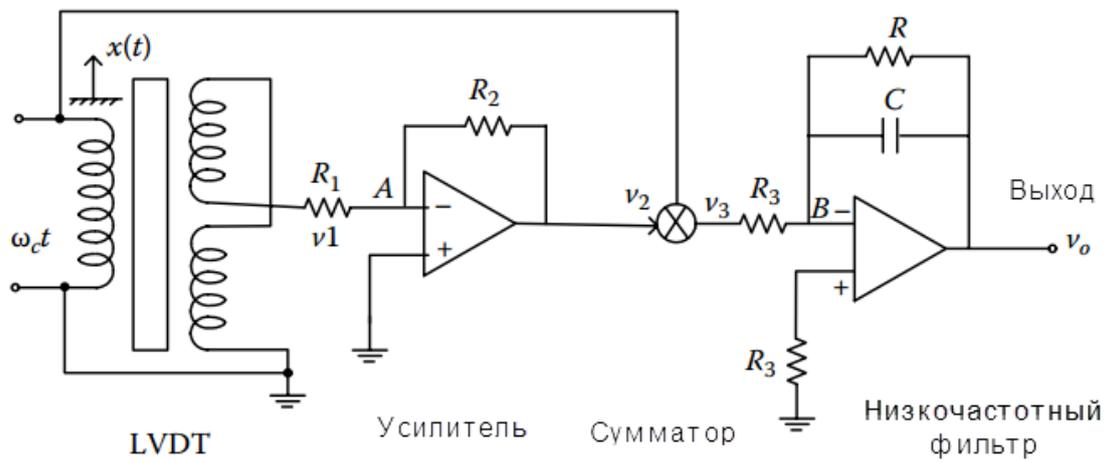


Рисунок 19 - Схема обработки сигналов датчика

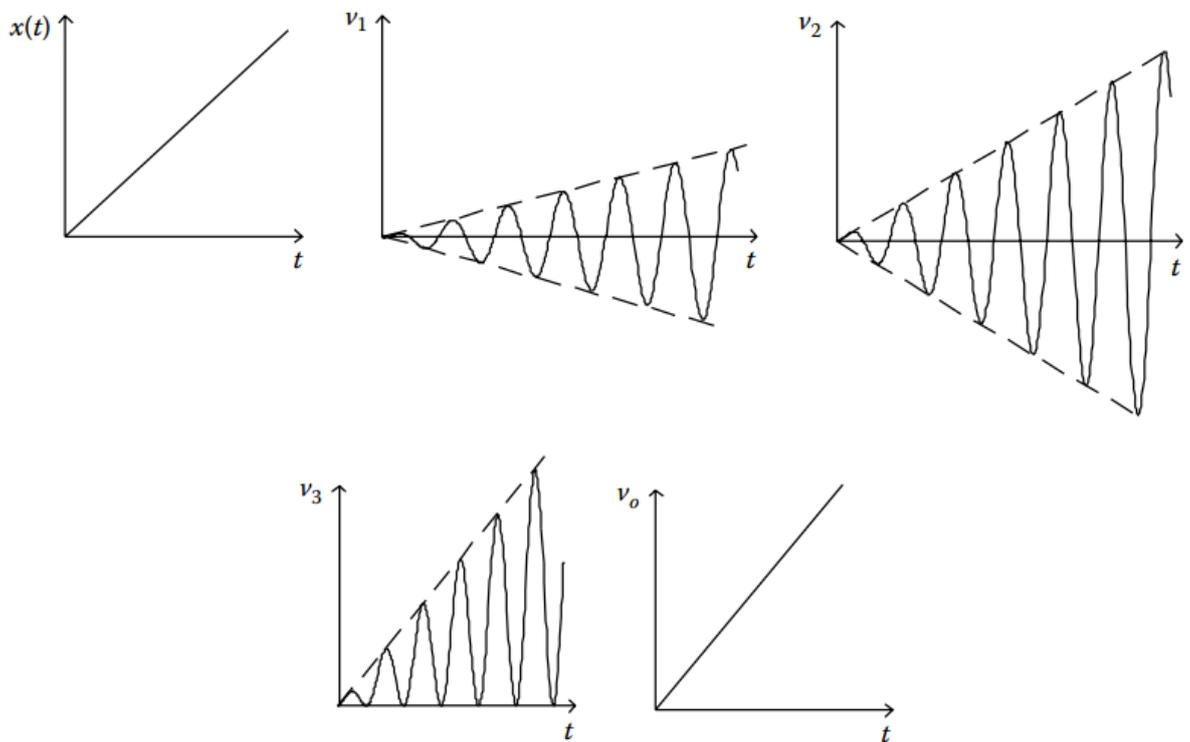


Рисунок 20 - Осциллограммы сигналов

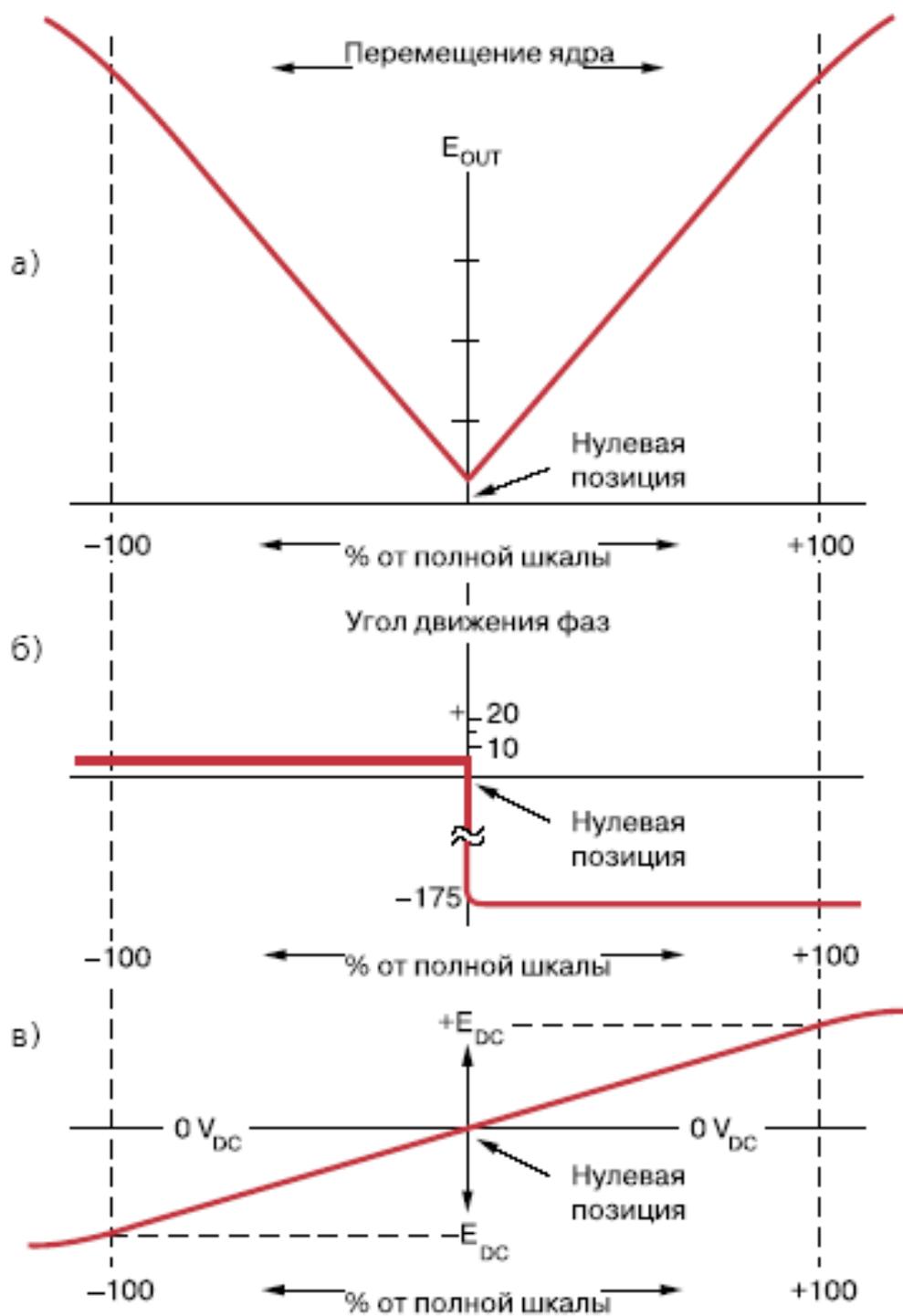


Рисунок 21 - Параметры сигнала LVDT-датчика

а) дифференциальное напряжение

б) сдвиг фазы дифференциального напряжения относительно  
первичного напряжения

в) знакопеременный выходной сигнал постоянного тока

В качестве датчика положения для измерения малых перемещений рабочих органов регулирующих аппаратов, в том числе золотников пропорциональных гидравлических распределителей, широко применяются датчики перемещения - линейные дифференциальные измерительные трансформаторы (LVDT). Это объясняется их малыми габаритами, высокой степенью защиты от внешних воздействий, в том числе механических, а также высокой точностью измерения и широким частотным диапазоном.

Принцип действия измерительного дифференциального трансформатора (рисунок 1) заключается в подаче гармонического высокочастотного сигнала на первичную обмотку датчика с последующим измерением относительного значения амплитуды с вторичных обмоток. Точность измерения положения данных датчиков может достигать значения 0.01% от полного диапазона измерения.

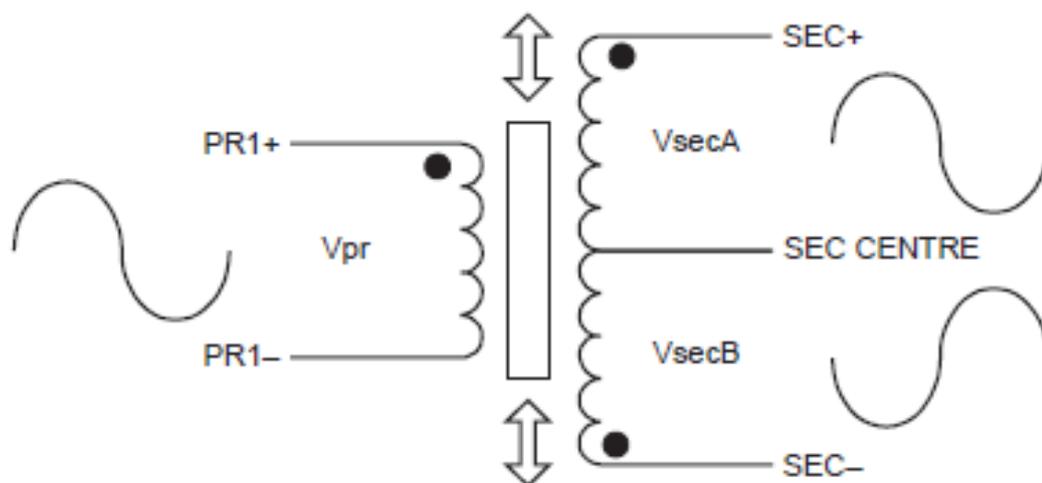


Рисунок 22 - Принцип действия измерительного дифференциального трансформатора

Типовая конструкция измерительного линейного дифференциального трансформатора представлена на рисунке 2.

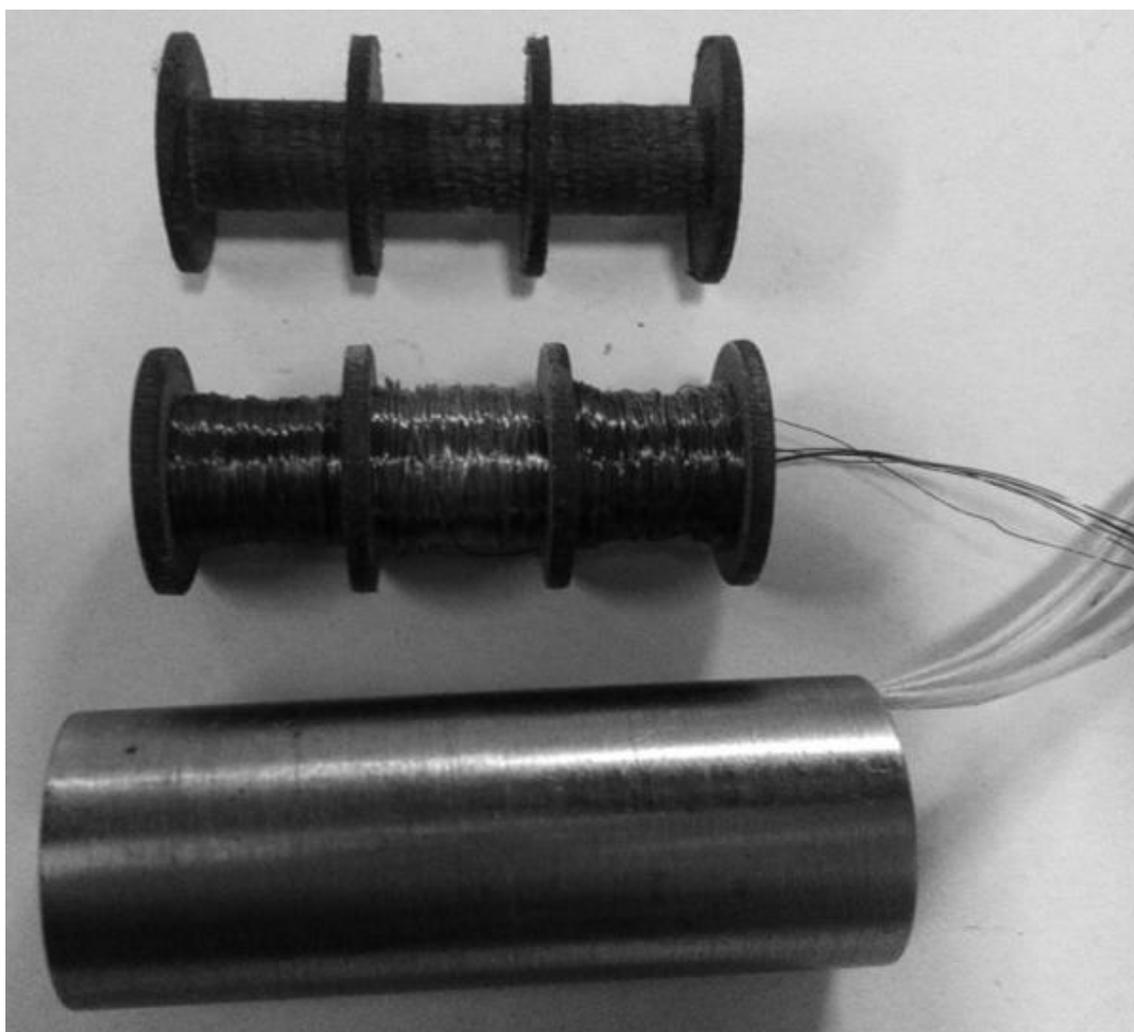


Рисунок 23 - Конструкция датчика перемещения (каркас, каркас с обмотками, датчик в сборе)

Датчик состоит из магнитосвязанных первичной и вторичных обмоток намотанных на немагнитном каркасе и магнитного корпуса. Амплитуда выходного синусоидального сигнала относительно задающего синусоидального сигнала пропорционально положению магнитного сердечника, перемещаемого внутри обмоток.

Точность выходного сигнала определяется параметрами намотки обмоток, геометрическими размерами элементов датчика и свойствами материалов, из которых они изготовлены, а также погрешностью электронной схемы обработки.

Для отработки конструкции датчика перемещения разработан испытательный стенд (рисунок 3), состоящий из исследуемого датчика,

магнитного сердечника, жестко соединенного с измерителем перемещений (точность измерения до 0.01 мм), электронного преобразователя, реализованного на базе специализированной микросхемы AD598 ф. Analog Devices, включенной по типовой схеме (рисунок 4) и прецизионного вольтметра.

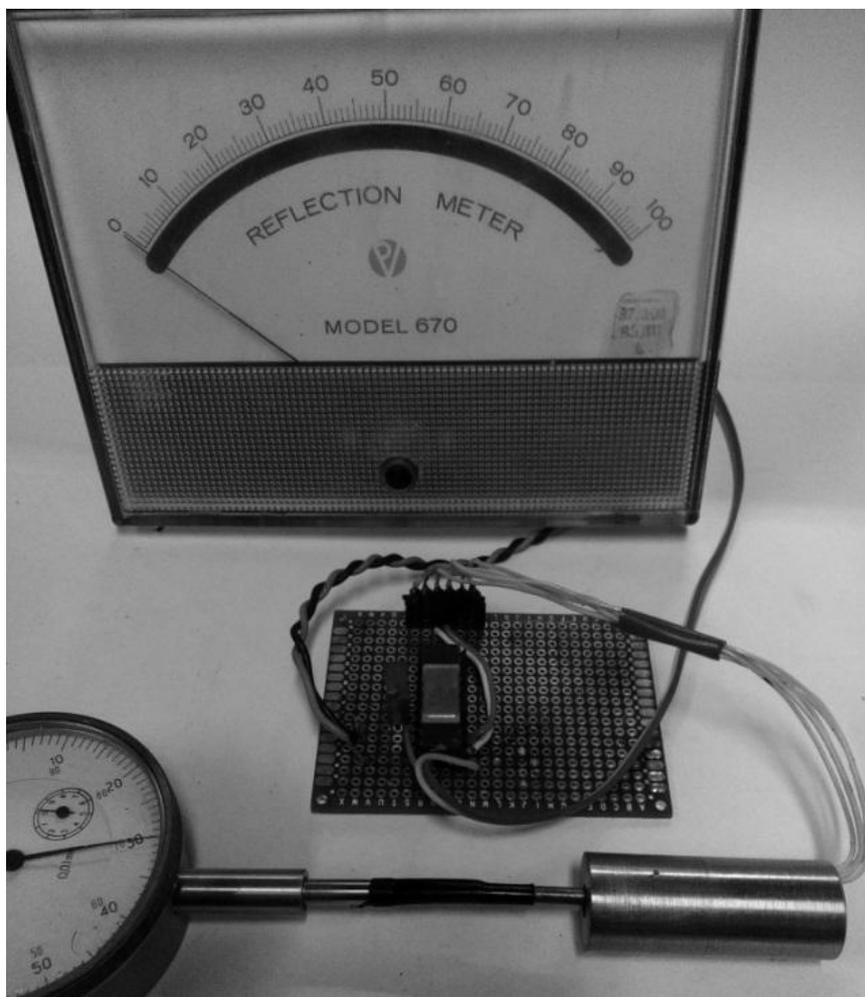


Рисунок 24 - Испытательный стенд системы перемещения

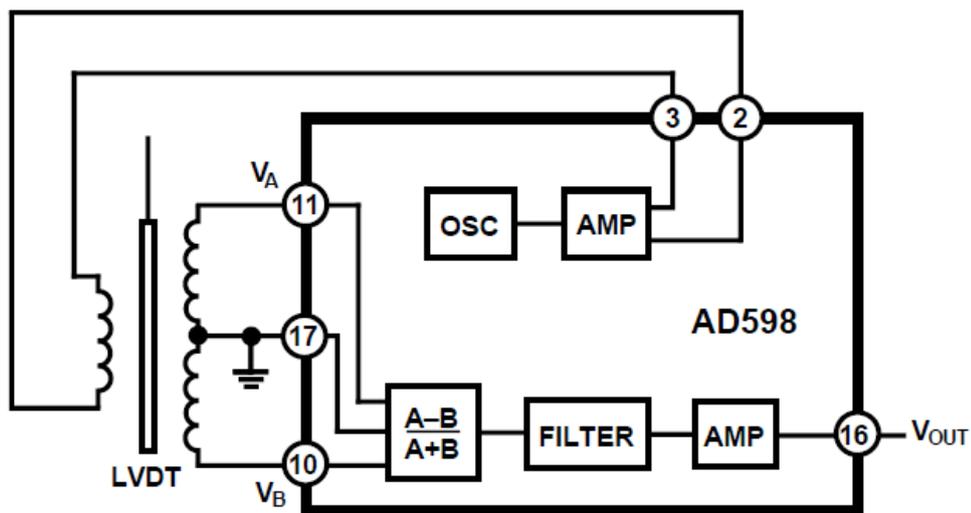


Рисунок 25 - Функциональная схема преобразователя сигнала на базе микросхемы AD598 ф. Analog Devices

Зависимость выходного сигнала измерительной системы представлена на рисунке 5, а ошибка рассогласования относительно идеальной линейной характеристики показана на рисунке 6. Нелинейность на рабочем диапазоне измеряемых величин  $\pm 5$  мм не более 1%.

С целью повышения точности измерительной системы и обеспечения инвариантности относительно разброса технологических параметров изготовления датчика предлагается реализовать интегрированную измерительную систему, состоящую из датчика и электронного преобразователя с введением программной коррекции выходного сигнала, путем компенсации ошибки рассогласования, получаемого при юстировке датчика положения. Для реализации данной схемы коррекции, система преобразования сигналов датчиков реализуется на базе высокопроизводительного микроконтроллера.

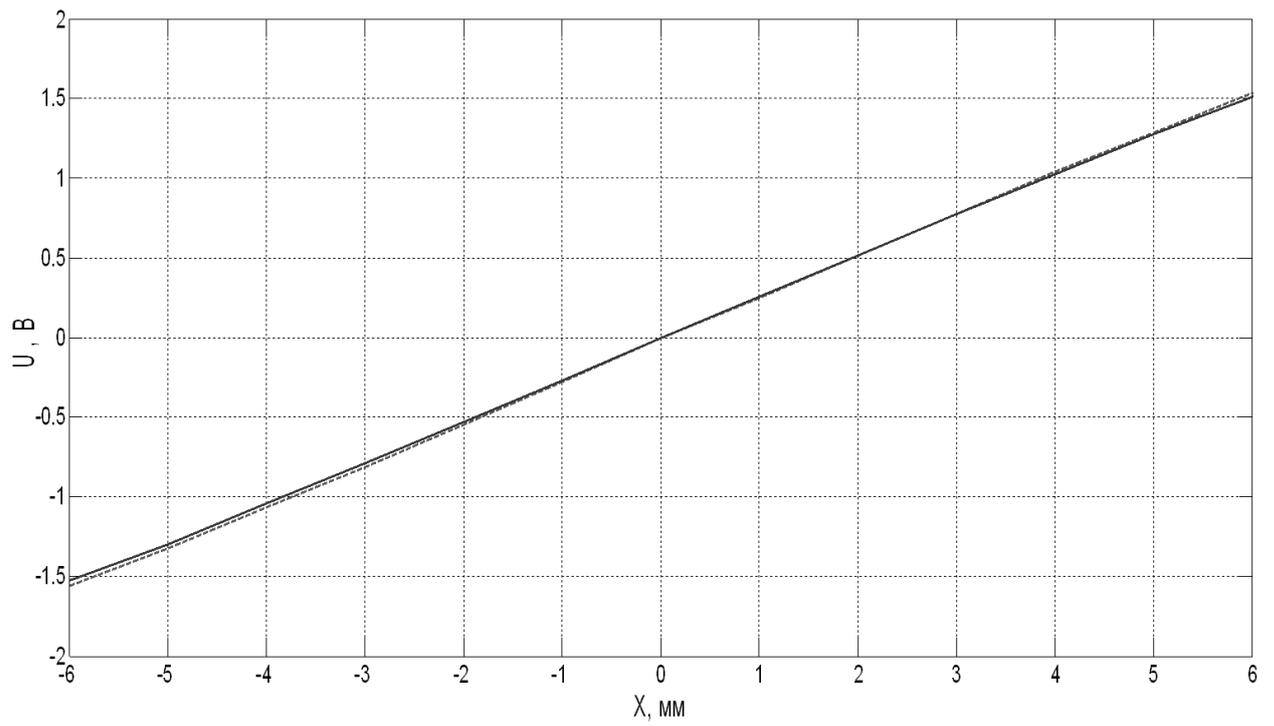


Рисунок 26 - Зависимость выходного напряжения от перемещения сердечника и идеализированная линейная характеристика

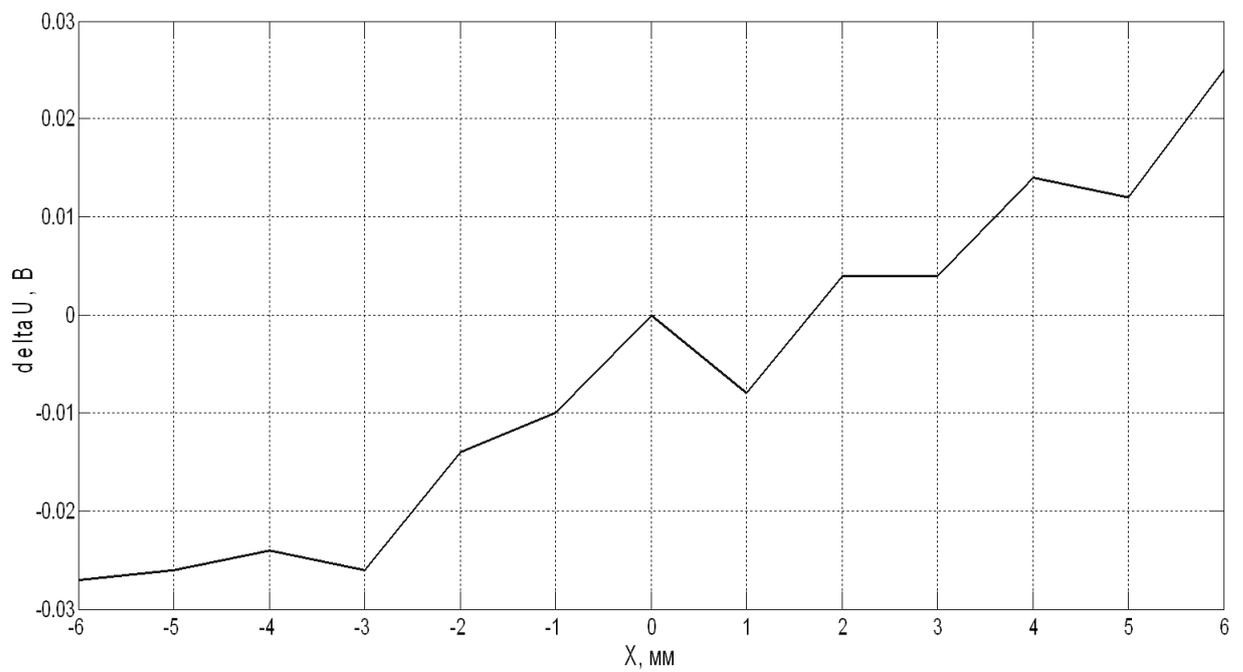


Рисунок 27 - Ошибка рассогласования выходного сигнала положения

## 3.2 технических требованиях, предъявляемых к датчикам положения

### 3.2.1 Специфика датчиков положения

Список параметров, которые важны, чтобы определить в характеристике датчика положений, может несколько отличаться от тех, которые были бы важны, чтобы определить в, например, датчик для газового анализа. По сравнению с другими датчиками у датчика положений можно перечислить следующие требования: электроснабжения, диапазон рабочей температуры и нелинейность, но будут различия, связанные с определенным методом измерения. Спецификация датчика положений должна указать, измеряет ли она линейное или угловое движение, если чтение абсолютное или возрастающее, и использует ли она контакт или бесконтактное ощущение и приведение в действие. С другой стороны газовая селекция датчика указала бы, какой газ обнаружен, как хорошо это игнорирует другие составные газы, если это измеряет газ объемом процента или парциальным давлением и сроком годности. Таким образом, там существуют много технических требований, которые важны, описывая исполнительную способность преобразователя положения и его пригодности для использования в данном применении. Эти технические требования представлены здесь.

### 3.2.2 Диапазон измерения

Для того, чтобы обеспечить точные показания, у измеряемой величины или физического измеряемого количества, должен быть диапазон, который является в пределах способности преобразователя. У преобразователя положения может быть имеющий размеры диапазон, определенный от нуля до полного масштаба, или это может быть определено как  $\pm$  полномасштабных диапазонов (FSR). Распространено с LVDT, например, определить биполярные диапазоны, такие как  $\pm 100$  миллиметровый FSR. В этом случае и с  $\pm 10$  В постоянного тока определенная продукция, выходное

напряжение изменилось бы от  $-10\text{ В}$  постоянного тока к  $+10\text{ В}$  постоянного тока для измеряемой величины, изменяющегося от  $-100\text{ мм}$  до  $+100\text{ мм}$ . В центре перемещения значение было бы нулем. Так как преобразователь в качестве примера определен по диапазону  $-100$  к  $+100\text{ мм}$ , диапазон полного масштаба составляет  $200\text{ мм}$ . Если бы соответствующий диапазон продукции составлял  $\pm 10\text{ В}$  постоянного тока, то полный спектр произведен (FRO) охватил бы  $20\text{ В}$  постоянного тока. Это суммы, используемые, когда другие параметры определены как процент FSR или FRO. Например, с LVDT и преобразователь сигнала, определенным для максимального нулевого изменения  $1,0\%$  за  $100^\circ\text{C}$ , FSR  $\pm 100\text{ мм}$  и FRO  $\pm 10,0\text{ В}$  постоянного тока,  $100^\circ\text{C}$ , изменение температуры может произвести ошибку  $2,0\text{ мм}$  или  $0,20\text{ В}$ .

В магниторезистивном датчике положения чувствительный элемент измеряет период времени, начинающийся с одного конца, таким образом делая абсолютное, основанное на ноле измерение. Несмотря на это, возможно произвести преобразователь, имеющий биполярный диапазон, добавляя погашение, включенное в пределах электроники создания условий сигнала; но у наиболее распространенной конфигурации должен быть ноль к (униполярному) диапазону полного масштаба с нулем, располагаемым около одного конца преобразователя. Пример униполярного диапазона - продукция  $0,0\text{ В dc}$  к  $+10,0\text{ В}$  постоянного тока, соответствуя входному положению ноля к  $1,0\text{ м}$ .

### 3.2.3 Ноль-интервал

Термин ноль-интервал используются, чтобы описать измеряемую величину и/или выход преобразователя. В униполярном масштабе ноль - самое низкое значение, и промежуток - различие между полномасштабными и нулевыми значениями. Например, преобразователь положения может иметь имеющий размеры диапазон  $0,0$  к  $1,0\text{ м}$  и выход  $4,0$  к  $20,0\text{ мА}$ . В этом случае у входа измеряемой величины есть ноль  $0,0\text{ м}$  и полный масштаб  $1,0\text{ м}$ .

Интервал - также 1,0 м. У выхода также есть смещение. У выхода есть ноль 4,0 мА и полный масштаб 20 мА. Интервал - поэтому 16,0 мА. Так 16 мА промежутка продукции представляет и пропорционален, 1 м входа измеряемой величины. Чувствительность выхода таким образом 16.0 пА/мм. Эта чувствительность продукции означает, что от любой отправной точки в имеющем размеры диапазоне, продукция изменится на 16,0 пА для каждого миллиметра изменения положения.

Понимание различия среди ноля, интервала и полного масштаба важно, расследуя ошибки, начиная со знания, является ли ошибка нулевым изменением, или изменение промежутка может указать на ошибочный источник. Если, например, Вы – для измерения температуры используете преобразователь положения с выходом 4 - 20 мА, соответствуя входному диапазону от 0 до 100 мм, Вы сначала установили бы положение в ноль. Выход составит приблизительно 4 мА. Поскольку температура различна, изменения в выходе зарегистрировано как «нулевая» ошибка.

Затем, положение установлено в 100,0 мм. Выход составит приблизительно 20 мА. После нового изменения температуры по тому же самому диапазону сделайте запись изменений продукции как ошибки FRO. Вычтите нулевую ошибку из ошибки FRO найти ошибку интервала. Анализируя эти ошибки, источник (источники) любых температурных проблем чувствительности может быть определен. Параметры, которые вызывают нулевую ошибку, возмещены - связанные ошибки. Они могут быть механическими, такими как тепловое расширение повышающейся особенности или прута привода головок, или электрическими, такими как дрейф входного напряжения усилителя или изменения сопротивления в схеме сепаратора напряжения.

Параметрами, которые вызывают ошибку интервала, являются связанные с выгодой ошибки. Они могут также быть механическими, такими как изменяющийся параметр пружины; или электрический, такие как изменение в выходе транзистора, изменение сопротивления в обратной связи

усилителя или емкость изменяет в конденсаторе сцепления для переменного тока. Знание этой причинно-следственной связи помогает вести усилия в поиске неисправностей ошибок преобразователя, а также проектируя датчик или преобразователь, чтобы встретить технические требования, требуемые на стадии разработки нового продукта.

#### 3.2.4 Воспроизводимость

Когда преобразователь реализован по ряду условий, и затем точно те же самые условия соблюдают снова, различие между последовательными чтениями называют воспроизводимостью. Это обычно проверяется, поддерживая зафиксированную температуру, влажность и другие условия окружающей среды и затем осуществляя преобразователь, изменяя измеренное значение между фиксированными точками. Например, ядро LVDT может быть осуществлено с нуля, к полному масштабу, к нулю, затем к половине масштаба. Точка данных взята в последнем положении. Тогда движение ядра продолжено к полному масштабу, к нулю, затем к половине масштаба снова. Вторая точка данных взята. Это сделано неоднократно, чтобы получить ряд данных. Стандартное отклонение этого набора данных - воспроизводимость.

Возможно, теоретически, иметь воспроизводимость, у которой есть меньшая стоимость, чем точность измерения, добавляя шум к системе и делая статистический анализ получающегося набора данных; но это не полезно кому-то использующему преобразователь. Таким образом, указанная воспроизводимость не должна быть меньше, чем указанная точность измерения. Это гарантирует, что для пользователя возможно воспроизвести указанный уровень работы. Воспроизводимость может быть самой важной особенностью преобразователя, если оборудование получения в состоянии дать компенсацию за нелинейность, температурные эффекты, ошибку калибровки, и так далее. Это вызвано тем, что воспроизводимость -

единственная особенность преобразователя, которая не может быть дана компенсацию. Кроме того, во многих системах управления воспроизводимость более важна, чем точность преобразователя, потому что система может часто программироваться, чтобы обеспечить продукцию, желаемую в ответ на данный вход от преобразователя, пока вход, полученный от преобразователя, всегда является тем же самым для данного набора условий.

### 3.2.5 Нелинейность

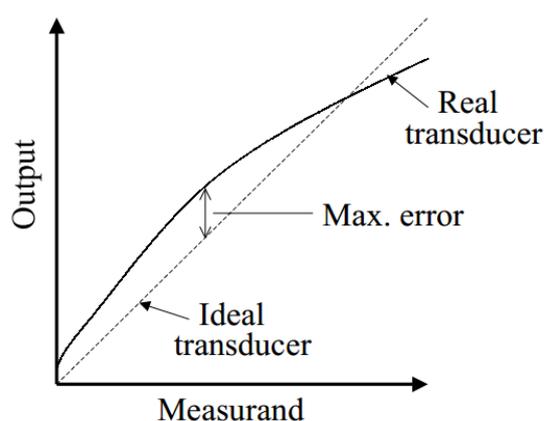


Рисунок 28 - Нелинейность измерения

Набор выходных данных, полученных из теоретически прекрасного (идеального) линейного преобразователя положения, осуществляя его всюду по указанному операционному диапазону и делая запись выходных данных против входного удара, должен сформировать прямую линию из нуля, читающего к полномасштабному чтению. В реальном преобразователе данные не формируют совершенно прямую линию, и конечные точки не точно на указанном нуле и полномасштабных пунктах. Это показывают в рисунке 2.1, несколько преувеличенном для ясности. Максимальное количество различия между особенностью преобразователя и идеальной особенностью - максимальная ошибка. Об этом можно было сообщить как процент полного спектра и назвать точностью процента, но вместо этого, о точности обычно сообщают как отдельные компоненты, включающие его.

Это соответствующее, так как есть другие компоненты, которые ограничивают точность преобразователя в данном применении. Термин групповая статическая ошибочная должным образом использован, чтобы указать на сумму эффектов нелинейности, воспроизводимости и гистерезиса. О воздействии на окружающую среду, как правило, сообщают отдельно. Сама нелинейность, однако, может интерпретироваться несколькими способами, как представлено затем. Воспроизводимость и гистерезис представлены в следующих разделах.

Как правило, самая важная особенность точности преобразователя - нелинейность. Прямая линия оттянута, который близко приближает особенность преобразователя. Различие между прямой линией и идеальной линией - ошибка калибровки. Ошибка калибровки может быть сломана далее в нулевое погашение и выгоду (или промежуток) ошибка. Различие между прямой линией и особенностью преобразователя - нелинейность, сообщил как процент полного спектра. Ошибочная спецификация нелинейности часто упоминается неправильно как преобразователь «линейность». Например, если максимальная ошибка (между особенностью преобразователя и прямой линией) составляет 0,5 мм, и полномасштабный диапазон составляет 100 мм, нелинейность составляет 0,5%. Это кажется достаточно простым, но есть много способов прибыть в «лучшую» прямую линию, которая близко приближает особенность преобразователя, и с которым будут сравнены выходные данные преобразователя.

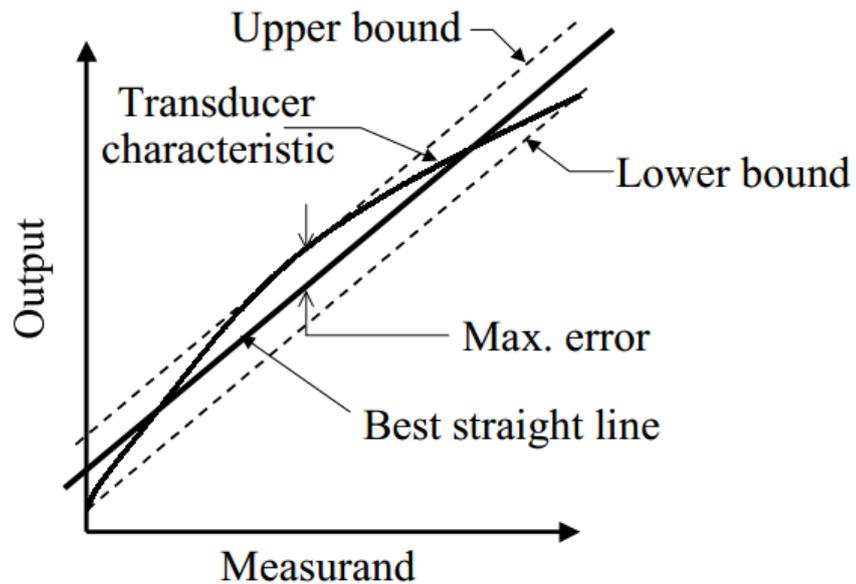


Рисунок 29 - Нахождение наилучшей линейной характеристики

Лучшую прямую линию (BSL) можно также назвать линейризованной прямой линией или независимым BSL. Когда BSL или хорошо-пригодная прямая линия - все, что называют как ссылка нелинейности в спецификации, или независимый BSL называют, не требуется, что любой отдельный момент на BSL оттянут через любую определенную точку данных особенности продукции преобразователя. BSL не должен проходить ноль или полномасштабный вход или любую конечную точку данных о датчике. Цель только, чтобы найти прямую линию, которая прибывает самая близкая к соответствию всем пунктам выходных данных преобразователя. Установленная нелинейность - тогда максимальное отклонение любой точки данных от этой прямой линии. Хороший способ визуализировать это показывают в рисунке 29.

Две линии помещены в граф характеристики преобразователя, один выше и один ниже линии, представляющей данные о преобразователе. Их называют *верхними* и *низкими* границами. Две параллельных линии должны быть принесены максимально близко друг к другу, охватывая все данные о преобразователе между ними. Они не должны быть параллельны данным о преобразователе. Третья прямая линия тогда помещена вдоль центра между двумя параллельными строками. Эта третья линия - лучшая прямая линия.

Максимальное отклонение (ошибка) между этой линией и данными о преобразователе, выраженными как процент полного спектра, является преобразователем нелинейность BSL. Эта линия может быть определена в форме Y-точки-пересечения как, где  $m$  - наклон линии, и  $B$  - Y-точка-пересечения.

$$Y = mX + B \quad (3.12)$$

Это означает, что  $m$  - коэффициент масштабирования, и  $B$  - нулевое смещение.

Можно визуализировать ту половину расстояния между двумя параллельными строками, продвинутыми, граф (измеренный вертикально) является нелинейностью BSL, будучи абсолютной величиной амплитуды максимального отклонения продукции от прямой линии. Метод для вычисления BSL, не используя граф, однако, может не быть очевидным на первый взгляд. Практический способ найти эту линию от данных первый, чтобы найти линию наименьших квадратов через данные (см. “Наименьшие квадраты Прямолинейная Нелинейность”), и используйте это, чтобы получить уравнение линии в форме Y-точки-пересечения (уравнение (3.12)). Тогда используйте повторяющийся метод с небольшими изменениями в наклоне ( $m$ ) и точка пересечения (если), пока уравнение линии не найдено, который приводит к минимальному отклонению от данных о преобразователе.

#### Основанная на ноле нелинейность

Когда это желаемо, чтобы гарантировать, что датчик указывает на ноль, когда измеряемая величина является нулем, основанная на ноле нелинейность может быть определена. Это может быть необходимо, когда признак отрицательного положения не имел бы смысла, и оборудование, получающее сигнал преобразователя, не может сделать исправление. В этом случае один конец прямой линии установлен равным нулю измеряемая величина/ноль пункт продукции (в графе, происхождении), и другой конец

линии перемещен вверх или вниз (изменяющий наклон) до уменьшения максимального отклонения выходных данных датчика.

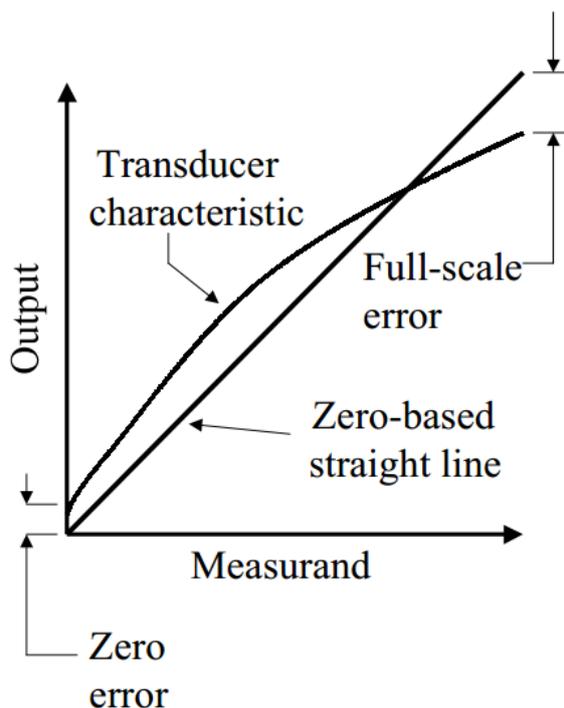


Рисунок 30 - Основанная на нуле нелинейность

Обычно будут один или несколько пунктов на особенности датчика, которые падают выше прямой линии, а также одного или более пунктов, которые падают ниже его. В однородно кривой характеристики как в рисунке 30 будет один максимум где-нибудь около середины и другого близкого полного масштаба. Эти две величины ошибки должна быть приблизительно тем же самым, если прямая линия должным образом помещена.

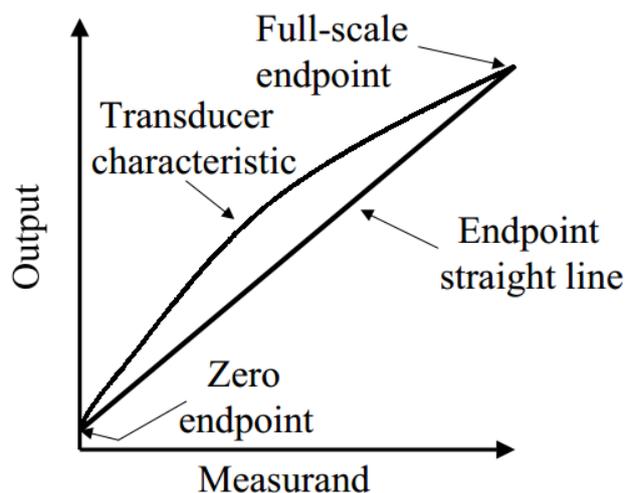


Рисунок 31 - Нелинейность конечной точки

Прямая линия может быть оттянута между продукцией преобразователя на нуле измеряемой величины, и на полном масштабе (эти два пункта называют конечными точками). Максимальное отклонение между этой линией и данными о преобразователе называют нелинейностью конечной точки. Производители преобразователей предпочитают определять нелинейность согласно одному из других методов, тем не менее, потому что величина нелинейности конечной точки находится в диапазоне два раза числа, полученного одним из других методов. Нелинейность конечной точки может представлять интерес для пользователя, у оборудования которого нет средства для исправления ошибок выгоды преобразователя.

Наименьшие квадраты прямолинейная нелинейность. Нелинейность, основанная на регрессе наименьших квадратов (LSR) входных данных против выходных данных, является самым популярным типом характеристики, потому что это может легко быть вычислено. Недостаток - то, что это может быть очень близко к оптимальной линии, но является не обязательно абсолютной лучшей прямой линией, так как это - статистическая оценка. Степень, которой линия LSR фактически представляет «лучшую» прямую линию, зависит от числа взятых точек данных и неоднородность или неустойчивая природа данных. Результат будет менее представительным, когда данные не будут следовать за непрерывной гладкой кривой. Однако,

это - самый популярный способ найти BSL, так как легко осуществить математически.

Если прямая линия LSR представлена, поскольку  $Y = mX + B$ , наклон  $m$ , может быть найден

$$m = \frac{\sum_{d=1}^n X_d Y_d}{\sum_{d=1}^n X_d^2} \quad (3.12)$$

где  $X_d$  и  $Y_d$  - данные от входа измерения и выхода преобразователя, соответственно, и  $n$  - число точек данных. Однажды найденный наклон  $m$ ,  $Y$ -точка-пересечения, которая приводит к самому низкому полному отклонению, должна быть найдена. Тогда о максимальном отклонении сообщают как нелинейность наименьших квадратов. Легко осуществить на ряде данных, используя карманный калькулятор или программу электронной таблицы.

В калькуляторе выберите линейную функцию регресса. Войдите во вход измеряемой величины данные последовательно как набор величин для первой переменной двух - переменное множество. Войдите в соответствующие выходные данные датчика как в набор величин для второй переменной множества. Выберите вычислить функцию.

В программе электронной таблицы выберите линейный инструмент регрессионного анализа, это выполняет линейный регресс, используя метод наименьших квадратов, чтобы соответствовать прямой линии через данные, отобранные как входные колонки данных в электронной таблице. Например, в Excel, загрузите аналитический пакет инструмента. Тогда выберите инструмент регрессионного анализа. Сделайте электронную таблицу с одной колонкой входа измерения данными против второй колонки с соответствующими выходными данными датчика по полному спектру эксплуатации преобразователя. Выберите вход измеряемой величины данные (первая колонка) как вход  $X$  диапазонов. Выберите выходные данные (вторая колонка) как вход  $Y$  диапазон. Тогда вычислите наклон линии LSR,

используя наклонную функцию. Найдите точку пересечения Y-, используя функцию точки пересечения. Это обеспечит наклон и Y-точку-пересечения линии регресса наименьших квадратов. Затем, “линия LSR” (третья колонка) сделана, используя наклон, и Y-точка-пересечения относилась к X диапазонам (первая колонка) согласно формуле  $Y = mX + b$ . Тогда вычислите ошибки (четвертая колонка) как различие между вторыми и третьими колонками. Максимальное количество в ошибочной колонке (четвертая колонка) является нелинейностью наименьших квадратов.

После того, как функции электронной таблицы используются, чтобы найти наклон и точку пересечения линии наименьших квадратов, ошибка нелинейности наименьших квадратов определена как максимальная разница между данными о преобразователе и наименьшими квадратами данные BSL, разделенные на FRO. Наклон и константы точки пересечения для конкретного преобразователя могут быть введены или загружены в оборудование, используя преобразователь, таким образом, позволив оборудованию исправить сигнал преобразователя улучшить полную системную точность.

#### 3.2.4.1 Гистерезис

Относительно выходного сигнала преобразователя положения гистерезис - изменение между высококлассными и низкокачественными подходами к тому же самому положению. Более определенно, когда датчик постоянно указывает на выход увеличения (перемещающийся высококлассный), пересекаясь через положение, а измеряемой величины, затем полностью изменяя направление и постоянно указывая на считывания уменьшения (перемещающийся низкокачественный), снова проходя через положение а, будут незначительные различия в чтении, зарегистрированном для увеличения и уменьшения подходов к положению а. Положение а показывают как пункт на более низкой кривой, соответствуя увеличению измеряемой величины. Различный выход показывают для того же самого

пункта *a* на верхней кривой, соответствуя уменьшению измеряемой величины. Различие между двумя пунктами - максимальная ошибка из-за гистерезиса.

В датчике положения, основанном на использовании магнитного поля, например, одна причина гистерезиса - магнитный остаточный магнетизм материала, который затрагивается магнитным полем. Первоначально ненамагниченный материал сначала следовал бы за линией (*a*) по воздействию силы намагничивания. Поскольку внешняя область (намагничивающий силу) растет, магнитный материал становится намагниченным. Затем когда сила намагничивания уменьшена, остаточный магнетизм того материала заставляет часть магнитного поля оставаться в магнитном материале, это стало несколько «намагниченным». После того полевая сила в материале следовала бы за линиями (*b*) и (*c*), когда подвергнуто дальнейшим сокращениям и увеличениям намагничивания силы. Область остатка может привести к ошибке в выходном сигнале преобразователя. Измерение магнитного остаточного магнетизма материала - ценность плотности потока,  $B$ , сохраненный с силой намагничивания,  $H$ , удаленный, после намагничивания материала к насыщенности.

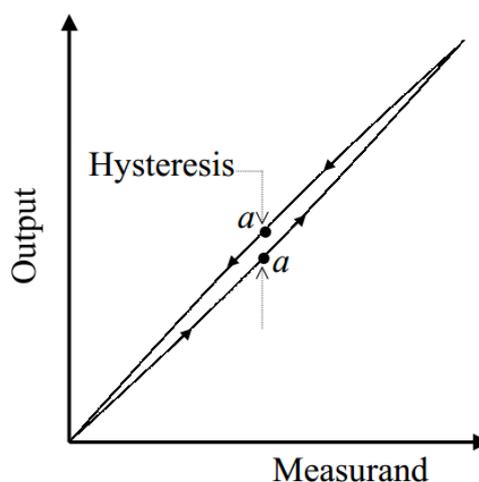


Рисунок 31 - Гистерезис выходного сигнала

Принятый способ измерить гистерезис в выходе преобразователя положения первый, чтобы осуществить преобразователь всюду по его

полному спектру, чтобы иметь восстанавливаемую отправную точку. Тогда положение различно гладко, чтобы переместить measurand, начинающийся с нулевого значения, до полного масштаба, и затем назад к нулю, делая запись данных в приблизительно однородно расположенных пунктах вдоль диапазона измеряемой величины. Высококласные и низкокачественные следы подготовлены. Тогда максимальное отклонение между этими двумя отмечено. Об этом отклонении сообщают как гистерезис и определяют как процент полного масштаба. Как правило, максимальная ошибка будет посреди удара. В LVDT, который едет и в положительном и в отрицательном направлении относительно пустого или нулевого положения, максимальная ошибка гистерезиса обычно вокруг пустого пункта. Иногда биполярный диапазон LVDT будет иметь униполярную спецификацию гистерезиса, а также один для биполярной операции, или сообщит о пустом гистерезисе отдельно.

Связанный параметр потенциометрических датчиков - ошибка трения, из-за трения скользящего ползунка. Это обычно включается в значение гистерезиса, как описано выше, но не всегда. В применении потенциометра, которое будет сопровождаться постоянной вибрацией, будет значительно уменьшен эффект трения дворника. Чтобы указать на это, ошибка гистерезиса с измерением без трений иногда заявляется в спецификации датчика контакта. Во время тестирования вибрация применена, чтобы преодолеть трение и позволить дворнику двигаться в пункт без трений. Это также называют механическим возбуждением.

### 3.2.7 Калиброванная точность

Преобразователь показывает данную точность, включая нелинейность, гистерезис, температурную чувствительность, и так далее; однако, фактическая работа в применении также затронута точностью, с которой продукция преобразователя была калибрована к известному стандарту. Для датчика положений длины для справочной точности могут быть измерены с

линейным кодирующим устройством, лазерный интерферометр или другой метод ощущения, способный к точности достаточно выше, чем ожидаемый от измеряемого датчика. Нормальное требование - то, что справочный стандарт должен показать ошибку в 10 раз меньше, чем то из устройства, которое будет проверено. В этом случае ошибка в справочном устройстве может быть по существу проигнорирована. Иногда, тем не менее, это отношение ошибки не практически доступно. Используя отношение меньше чем 10, пособие должно быть сделано для этого, оценивая данные.



Рисунок 32 - Линейный энкодер

Калиброванная точность - абсолютная точность отдельной калибровки преобразователя и включает точность используемого стандарта, а также способность метода калибровки произвести урегулирование, которое соответствует стандарту. Например, если урегулирование сделано, повернув регулирование потенциометра, оператор пытается получить урегулирование, которое приводит к конкретному чтению продукции. Оператор будет в состоянии достигнуть этого в пределах некоторого уровня допуска. Допуск станет частью калиброванной спецификации точности, в дополнение к любому пособию, сделанному из-за точности справочного стандарта, который использовался. Вместо того, чтобы определять калиброванную точность 99,9%, например, более распространено перечислить ошибку калибровки 0,1%. Оценивая полный ошибочный бюджет применения, ошибка калибровки должна быть включена, а также нелинейность,

гистерезис, температурная ошибка и другие факторы.

### 3.2.8 Дрейф

Дрейф охватывает изменения в выходе преобразователя, которые происходят даже при том, что нет никаких изменений в измеряемой величине или условиях окружающей среды. Единственная переменная, измеряя дрейф, является затраченным временем. В преобразователе положения это означает, что нет никакого изменения положения (привод головок датчика обычно запирается в постоянное положение для этого теста). Тест запущен при постоянной температуре, постоянной влажности, постоянном напряжении электроснабжения, постоянном импедансе груза, и так далее, в то время как продукция преобразователя зарегистрирована. О дрейфе сообщают в двух компонентах: короткий - и долгосрочный дрейф, и выражен как процент полнофункциональной продукции. На типичном преобразователе положения краткосрочный дрейф - это, которое происходит меньше чем за 24 часа. Об этом сообщают как ошибка в проценте FRO в час. Долгосрочный дрейф определен таким же образом, но период времени в месяц. На некотором оборудовании справочного сорта долгосрочный период времени дрейфа может быть в год.

Источники краткосрочного дрейфа включают такие вещи как шум, нестабильность в электронных схемах, механическая нестабильность, недостаточное электрическое или механическое демпфирование и восприимчивость к случайному электрическому шуму низкого уровня в окружающей среде, тогда как долгосрочный дрейф происходит из изменений в особенностях электрической детали и механическом изнашивании. Например, электролитические конденсаторы могут изменить значение емкости или эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), поскольку электролит сохнет с возрастом. Механические компоненты могут подвергнуться изнашиванию или усталости. Идентификация типа опытного

дрейфа (краткосрочный или длительный срок) может дать ключ к разгадке возможных источников дрейфа.

### 3.2.9 Значение точности

Инженер, которому задают работу с осуществлением преобразователя положения в систему управления, должен определить, будет ли система управления способна к показу указанной точности положения, включая элемент обратной связи (преобразователь положения), который запланирован, чтобы использоваться. Ошибки могут быть разделены на категории или статического или динамического типа. Статические ошибки в преобразователе, как правило, включают нелинейность, гистерезис и воспроизводимость. Динамические ошибки включают изменение фазы или изменение амплитуды из-за частотной характеристики преобразователя, изменение амплитуды из-за демпфирования фактора, и так далее. Об ошибках из-за условий окружающей среды обычно сообщают отдельно и включают ошибки от изменений в температуре, влажности, влажности, давлении, соленых брызгах, и так далее.

Спецификация преобразователя положения, вероятно, не перечислит полную ошибку, которая может ожидаться, который включал бы комбинацию всех статических и динамических ошибок (т.е., работа по диапазону температур, включая нелинейность, гистерезис, и т.д.). Скорее все технические требования будут перечислены индивидуально, и это до пользователя, чтобы решить, как сложить или иначе принять решение использовать указанные ошибки в определении пригодности преобразователя для получения желаемой производительности системы. Некоторые источники ошибки будут относиться к заявлению, рассмотренному, и некоторые не будут. Например, требование может включать широкий диапазон температур, но только медленно изменение измеренного значения. В этом случае температурная ошибка будет важна, но

не частотная характеристика, изменение фазы или фактор демпфирования. Кроме того, динамические ошибки могут иногда быть очень явными и должны каждый быть рассмотрены подробно. Статическая ошибочная группа включает несколько ошибок, однако, все из которых могут быть в том же самом диапазоне величины. Эти ошибки должны быть сложены в некотором роде и оценены для их накопленного эффекта на выполнение применения преобразователя.

Если бы все отдельные технические требования были просто объединены как арифметическая сумма, то это могло бы использоваться в качестве полной спецификации точности. Выполнение этого, однако, не было бы реалистично. Маловероятно, что все ошибки каждый были бы в его максимуме одновременно, и в то же время, для каждого, чтобы действовать в направлении худшего случая так, чтобы их эффекты добавили. Вместо этого некоторые ошибки будут положительными, и некоторые ошибки будут отрицательными. Некоторые ошибки будут близким максимумом, другие будут вокруг среднего числа, некоторые, вероятно, будут ниже среднего. Один способ суммировать эти ошибочные технические требования статистически в дизайне промышленных изделий состоит в том, чтобы использовать оценку суммы квадратов корня (RSS). В методе RSS согласован каждый отдельный ошибочный процент, результаты добавлены вместе, тогда квадратный корень этой суммы вычислен.

$$e_{\text{sum}} = \pm \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2} \quad (3.13)$$

или

$$e_{\text{sum}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j^2} \quad (3.14)$$

где  $e$  - отдельный источник ошибки, и  $n$  - число ошибочных источников. В использовании этого метода предполагается, что каждая ошибка действует независимо и имеет равномерно симметрическое распределение. Этот простой RSS статистическая сумма решает для

интервала  $\sigma$ , составляя приблизительно 63% экземпляров продукта, под предположениями о примере.

### 3.2.10 Температурные эффекты

Снова и снова опыт показал, что самое большое препятствие для полной точности в измерении и системе управления обычно происходит из-за температурной чувствительности преобразователя и связанной схемы (если это не фактически температурный датчик). Развитие температурной характеристики чувствительности и осуществление изменений, чтобы уменьшить это часто являются главной частью программы развития в дизайне нового преобразователя. У коммерческих продуктов, которые будут, вероятно, использоваться в закрытом помещении, есть типичная спецификация диапазона температур 0 к 70°C. У наружных и промышленных датчиков есть операционный диапазон -40 к 85°C. У автомобильных датчиков есть несколько диапазонов, в зависимости от того, где они будут установлены в автомобиле. Устройства моторного отсека и те около других источников тепла, таких как система выпуска или отверстия амортизатора или клапаны, располагаются до 150°C и иногда выше. У датчиков для использования в пассажирском салоне может быть более узкий диапазон рабочей температуры.

В дополнение к диапазону рабочей температуры может быть диапазон температур хранения, и будет температурная спецификация чувствительности, в то время как в рабочей температуре располагаются. Температура хранения применяется, когда датчик не требуется, чтобы работать и является спецификацией жизнеспособности (любой эффект на калибровку может также быть отмечен). Спецификация чувствительности рабочей температуры, однако, иногда является самой важной спецификацией производительности системы. На линейном преобразователе положения должна быть температурная спецификация чувствительности для ноля и для

промежутка. Промежуток - различие между нулевым чтением и полномасштабным чтением

Нулевое изменение происходит из-за теплового коэффициента расширения, деформирования и перемены механических компонентов, а также изменений в напряжении погашения операционных усилителей, несоответствии температурных коэффициентов мостовых схема резистора, и так далее. Изменение промежутка происходит из-за изменений в факторе выгоды с температурой, которая может быть механической или электрической в происхождении. Чтобы измерить изменение промежутка, нулевое изменение сначала измерено. Тогда полномасштабное изменение измерено. Изменение промежутка получено, найдя различие между нулевым изменением и полномасштабным изменением.

Нулевые изменения могут быть даны компенсацию, выбрав тепловые коэффициенты расширения материалов строительства, например, или выбрав усилитель с низким входным дрейфом напряжения погашения с температурой (или стабилизированный вертолет).

### 3.2.10 Время отклика

Время отклика, конечно, является количеством времени, истекшим между применением изменения в измеренном значении к входу преобразователя и получающимся признаком того изменения в продукции преобразователя. Это простое объяснение просит о большем количестве детали, тем не менее, пытаюсь составлять фактические различия между изменениями в измеренном значении и выходном сигнале датчика. Таким образом, полное время отклика в полностью заглушенной системе может быть далее разделено на *задержку* перед началом ответа, время, постоянное основанный на естественной частоте и демпфировании, и стабилизации или урегулировании времени, в то время как к заключительному чтению приближаются.

Задержка - время, которое проходит между началом изменения в измеряемой величине и началом изменения в продукции датчика. Это может произойти из-за задержки распространения электронных компонентов или эквивалента в механических, пневматических, или других типах компонентов. Время постоянный или главный компонент времени отклика обычно основано на естественной частоте чувствительного элемента, максимальное время между образцами датчика типа выборки или частотой фильтра где-нибудь в пути прохождения сигнала. Вместе с фактором демпфирования это заканчивается в большую часть указанного времени отклика. Это обычно определяется, с входом шага, как время между началом ответа до достижения 63% заключительного ответа,  $t_2 - t_1$ .

Заключительная продукция, как правило - уровень, который был бы обозначен после ожидания задержки плюс пять раз константы для стабилизации продукции после изменения шага в измеренном значении ( $t_3 - t_0$ ).

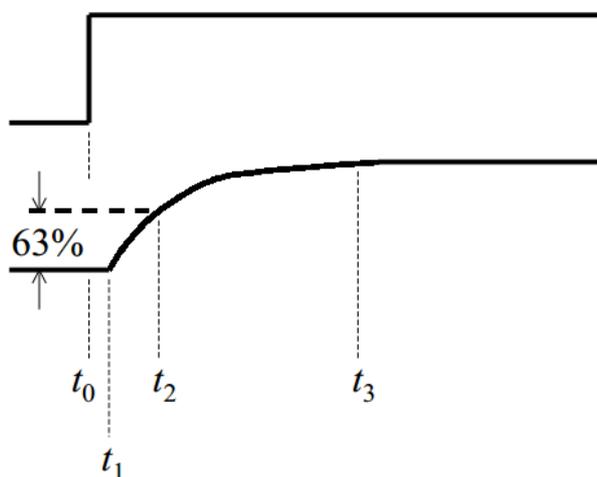


Рисунок 33 - Входной и выходной сигнал

Количество изменения в продукции после ожидания в один - пять раз константы обычно определяется комбинацией механического демпфирования и электронной фильтрации. Большинство преобразователей положения включает фильтр нижних частот в свою выходную цепь. Фильтры высшего порядка предлагают более острый темп сокращения и поэтому могут иметь расчетную операционную частоту ( $f_0$ ), который ближе к

естественной частоте системы датчика, таким образом имея более короткое время урегулирования, чем можно было иметь, используя фильтр более низкоуровневый. Это может появиться как более быстрое время отклика или как уменьшенная ошибка для данной частоты изменения в измеренном значении. Решение для фильтра Баттерворта обычно используется для максимально плоского ответа амплитуды, тогда как решение Бесселя может использоваться для постоянного изменения фазы по диапазону частоты. Решение для фильтра Чебышева предложит более быстрый уровень спада с изменяющейся частотой, но за счет добавления ряби амплитуды сигнала в полосе пропускания. Это не обычно желаемо в преобразователе положения и может дать чрезмерно более высокую ошибку, когда скорость или сигналы ускорения получены из сигнала положения.

Альтернативно, иногда время отклика заявлено как время между 10 и 90% заключительного ответа продукции на вход шага. Это менее определенное и может потребовать, чтобы тестирование проверило, что работа подходит для Вашего заявления, если время отклика важно. Информация о времени отклика, данная до сих пор, основана на амплитуде продукции как процент ожидаемой амплитуды. В режиме реального времени системы обратной связи, может также быть важно посмотреть на задержку фазы от входа измеренного значения, чтобы сигнализировать о продукции, в дополнение к изменению амплитуды продукции. Комбинация могла быть определена, например как -3 дБ в 1 кГц с задержкой фазы на  $10^\circ$ . Это означало бы, что с измеренным значением, варьирующимся как волна синуса частоты 1 кГц, выходное напряжение преобразователя будет 0.707 из теоретической продукции и отсроченный на  $10^\circ$  по сравнению с измеренным значением.

### 3.2.11 Типы выходных сигналов

Продукция преобразователя поставляется во многих изменениях аналоговых и цифровых форматов. Популярные аналоговые выходы включают от 0 до 10 В постоянного тока,  $\pm 10$  В постоянного тока, от 0 до 5 В постоянного тока, 4 – 20 мА постоянного тока.

Расчитанный пульс и ШИМ часто называют цифровыми выходами, потому что они подходят, чтобы соединяться непосредственно к цифровым схемам, но являются, фактически, аналоговыми сигналами, потому что они могут быть непрерывными без квантования. Расчитанный пульс и PWM действительно, однако, обычно обеспечивают свой сигнал на тех же самых уровнях напряжения как цифровые сигналы (как правило, где 0 В постоянного тока представляют логический низкий уровень, и +5 В постоянного тока представляет логический высокий уровень), или альтернативно, в напряжениях и импедансах согласно различным отличительным стандартам сигнала.

Производитель преобразователей обеспечивает минимальную спецификацию сопротивления нагрузки. Если клиент применяет сопротивление груза ниже, чем это, работа продукции может быть ухудшена, из-за ограничения на текущую ведущую способность усилителя продукции. Текущие выходные цепи петли, включая 4 - 20 мА и 1 - 5 мА, управляются в низкоомной схеме или могут иметь резистор груза точности в рамках заявления клиента преобразовать ток в напряжение (см. рисунок 2.13). 4-к преобразователю с 20 мА обычно используется с точностью 250-Q резистор груза, чтобы преобразовать продукцию в 1 - 5 В. (Это использование все еще сохраняет главное преимущество использования текущей петли; падения напряжения вдоль кабеля проигнорированы.) Производитель преобразователей обеспечивает спецификацию сопротивления максимальной нагрузки. Если клиент применяет сопротивление груза выше, чем это, работа продукции может быть ухудшена,

из-за отсутствия достаточно высокого напряжения, чтобы вести ток продукции.

Преобразователи с текущей производительностью могут управляться с отдельным входом электроснабжения (три или четыре провода), или мощность и сигнал могут быть включены на одной паре проводов (два провода). Единственный тип пары называют петлей - приведенный в действие передатчик, двухпроводный передатчик или передатчик. Преимущество приведенного в действие петлей передатчика состоит в том, что только двумя проводами нужно управлять, экономя инсталляционную стоимость. Это особенно важно со взрывобезопасными системами, где каждый неоснованный проводник, входящий в опасную зону, должен быть защищен устройством барьера безопасности (см. Раздел 2.16). С приведенным в действие петлей передатчиком передатчик (преобразователь положения, например) приведен в действие по той же самой паре проводов, как используются, чтобы указать на сигнал преобразователя. Минимальный уровень сигнала 4 мА достаточен, чтобы управлять преобразователем и указывает на минимальное чтение измеренного значения.

### 3.2.12 Шок и вибрация

Большинство преобразователей положения подвергнется некоторому уровню шока и воздействия вибрации во время нормальной эксплуатации. Эта спецификация используется, чтобы квалифицировать датчик к двум целям: Как нормальное потрясет, и уровни вибрации затрагивают точность, и сколько времени преобразователь прослужит под более высокими уровнями шока и вибрации перед неудачей?

Инсталляционные компоненты и техника могут иметь значение в работе и жизнеспособности преобразователя в ответ на данный вход вибрации, таким образом увеличиваясь или уменьшая восприимчивость к шоку и вибрации. Опоры, сделанные из резинового состава, могут улучшить

надежность преобразователя положения, например, уменьшив пиковую амплитуду вибрации, но могут также уменьшить точность преобразователя, позволив движению произойти между гребнем установки датчика и твердой горой датчика (эластомер, вставляемый между этими двумя).

Когда-то во время разработки преобразователя положения, образец должен быть установлен, намеченным способом, в приспособление теста на вибрацию. Работа и жизнеспособность проверены за расширенное время в нескольких дискретных частотах и амплитудах. Просмотр частоты также сделан, чтобы найти любые тенденции преобразователя резонировать в особых частотах. Если какие-либо резонирующие частоты найдены, дизайн может быть изменен, чтобы удалить или расхолодить нежеланный резонанс. Альтернативно, преобразователь может быть проверен в течение расширенного времени в каждой найденной резонирующей частоте, чтобы удостовериться, что надлежащая работа и надежность сохраняются. Система вибрации включает источник сигнала, усилитель мощности, садового, приспособление установки преобразователя и акселерометр. Охлаждение также обычно требуется. Уровень вибрации и частота подтверждены, установив, что один или несколько акселерометров к преобразователю или установка приспособления, телеграфировали к устройству водителя/считывания.

Тестирование вибрации, проводимое в лаборатории, сделано, чтобы удостовериться, что дизайн не содержит главных недостатков. Дополнительный тест на вибрацию обычно проводится в гарантированной лаборатории тестирования, чтобы удостовериться, что отраслевые стандарты выполнены. В то же время механические тесты шока выполнены. Лаборатории развития не свойственно иметь испытательное оборудование шока на территории. Тестирование шока может быть сделано, пропустив преобразователь и приспособление predetermined расстояние в калиброванную область остановки, или движущаяся масса может быть сброшена на приспособление установки преобразователя. Автор также

посетил средство, где более крупное оборудование было погружено в плату за воду, и заряды взрывчатого вещества использовались, чтобы произвести шок. Связанный тест - испытание методом сбрасывания. Это может обычно выполняться в лаборатории развития. Преобразователь исключен из определенной высоты (обычно, настольной высоты) на бетонный пол.

### 3.2.13 Требования питания

Более старое промышленное оборудование часто требовало  $\pm 15$  В постоянного тока. Это было необходимо, чтобы управлять аналоговыми усилителями в пределах преобразователей, контроллеров, и так далее. С доступностью более низкого напряжения и более низких усилителей мощности, начинающихся в середине 1970-х, однако, было уменьшено требование для отрицательного напряжения питания. К 1990-м редко использовалось отрицательное напряжение электроснабжения. Это с тех пор стало стандартом для основных промышленных преобразователей, которые будут связаны или в +15В или в +24В энергосистемы, отрицательная сторона электроснабжения, названного *распространенным* (и часто основываться в некоторый момент в системе). Чтобы позволить преобразователю работать или с +15-или с +24В электроснабжение, это должно быть разработано для операции от 13,5 до 26,5 В. Это получено (приблизительно) как 15 В минус 10% и 24 В +10%. Дополнительные 10% на обоих концах диапазона напряжения поставки допускают изменение в калибровке от одного электроснабжения до следующего, изменений в напряжении поставки с линией и изменением груза, и это допускает долгосрочный дрейф напряжения электроснабжения.

Мобильное оборудование, с другой стороны, обычно работает от номинального 12-или 24-вольтной системы, и 42-вольтные автомобильные системы скоро ожидаются. Так как у мобильной окружающей среды есть тарификационная система, высокий стартовый груз и возможное

разъединение батареи (который иначе обычно предоставляет груз тарификационной системе), намного более широкий диапазон напряжения электроснабжения должен быть приспособлен, чем просто номинальное напряжение батареи. Например, в 12-вольтовой автомобильной системе, напряжение батареи во время поворота могло составить 8 В или ниже, в то время как нормальное функционирование преобразователя с этим напряжением поставки все еще ожидается. Когда батарея заряжается при нормальных условиях круиза, его напряжение может составить больше чем 14 В.

Характерный для всех преобразователей, независимо от того, какой тип электроснабжения определен, является потребностью в соответствующем проектировании схем, чтобы обеспечить защиту против обратной полярности связей электроснабжения, перенапряжения, и закорачивание продукции приводит к власти или земле. Кроме того, много мобильных приложений требуют, чтобы защита от любой комбинации miswiring входа и выхода вела, включая закорачивание любого из них, чтобы привести в действие или основать потенциалы. Иногда возможно ограничить добавленный расход защиты перенапряжения в преобразователе для автомобильного применения, определяя, что это быть связанным с 5В питания, доступную от бортового контроллера или блока управления двигателем (ECU)

## 4. Микроконтроллерная система управления актуатором

### 4.1 Микроконтроллерная Система управления пропорциональным гидрораспределителем

Система управления механотронным модулем пропорционального гидравлического распределителя является многоконтурной с соподчинением контуров: контур задания тока управляющих катушек и контур регулирования положения золотника распределителя прямого действия. Также при организации регулирования давления или расхода в гидросистеме, а также регулирования скорости или перемещения рабочего органа может быть добавлен внешний контур регулирования с установкой соответствующей измерительной системы.

В качестве аппаратной части реализации системы управления реализуется на основе современных микроконтроллеров с программируемой структурой (PSoC), включающей в себя встроенные аппаратные ядра (ЦАП, память), программируемые цифровые и аналоговые блоки.

Микросхемы, объединяющие стандартное микропроцессорное ядро с программируемой логикой на одном кристалле (SoC), находят все более широкое применение. Компания Cypress предлагает собственную разработку систем на кристалле - PSoC (Programmable System-On-Chip). Отличительной особенностью кристаллов Cypress PSoC является интеграция аппаратного микроконтроллерного ядра и программируемых цифровых и аналоговых блоков различных типов. Широкий выбор пользовательских функций, реализуемых на программируемых блоках, позволяет существенно уменьшить количество внешних компонентов на плате и дает возможность на базе одной микросхемы реализовать большое число различных устройств.

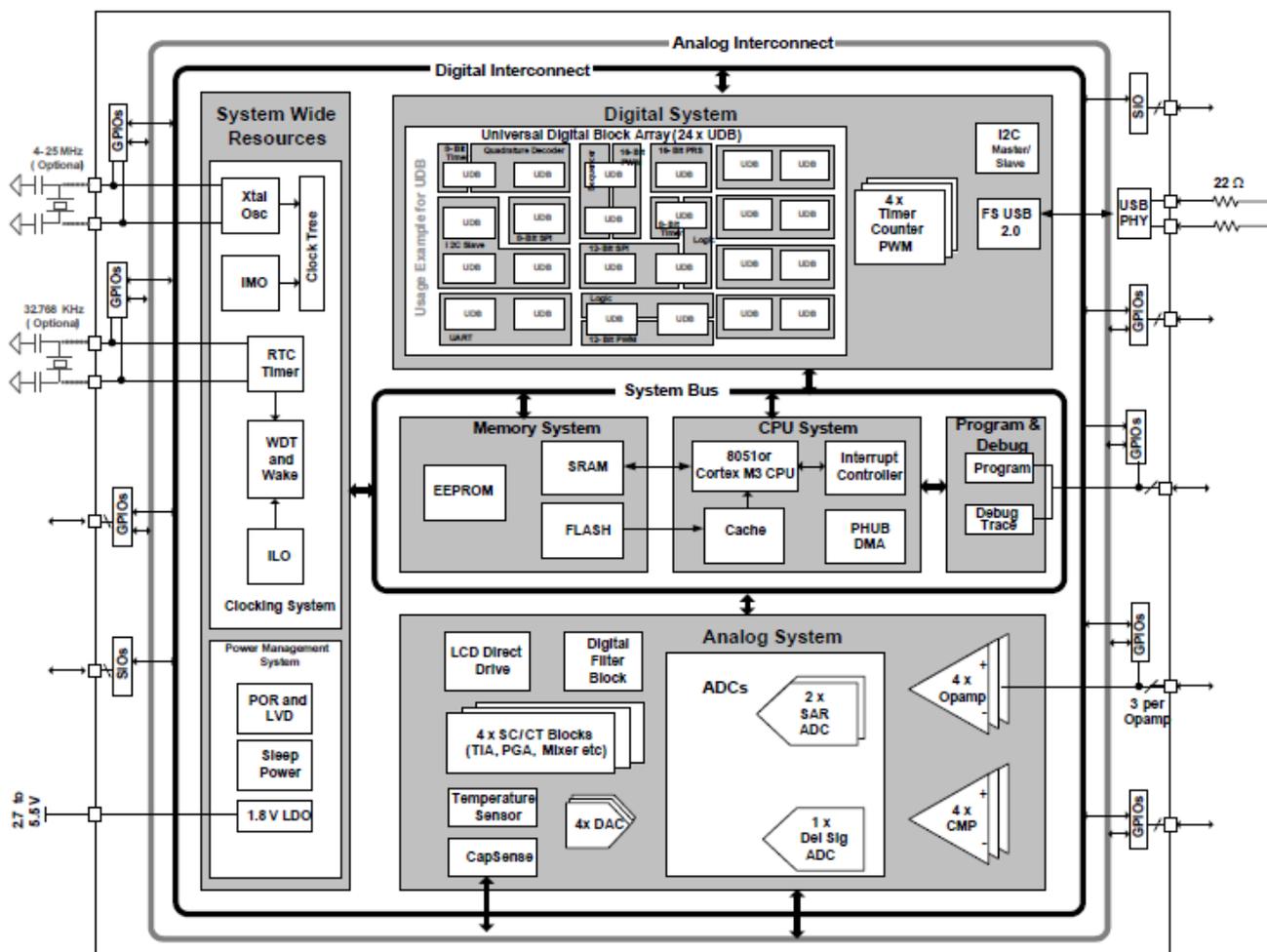


Рисунок 34 - Архитектура PSoC

Программирование блоков осуществляется на функциональном уровне, разработчик выбирает необходимую ему функцию из библиотеки и задает необходимые параметры работы и производит необходимую коммутацию с другими частями проекта. Такой подход позволяет достаточно быстро и легко познакомиться с микроконтроллерами PSoC и сократить временные затраты на разработку.

- цифровые блоки основного типа для построения таймеров, счетчиков, ШИМ;
- цифровые блоки для построения коммуникационных периферийных узлов UART, SPI, IRDA.;
- аналоговые блоки для построения усилителей, компараторов и других линейных устройств (СТ);

- аналоговые блоки на переключаемых конденсаторах для построения фильтров, ЦАП, АЦП (SCA, SCB).

Построение системы управления механотронным модулем гидрораспределителя на базе PSoC позволит получить современное универсальное техническое решение аппаратной реализации с расширенными функциональными характеристиками и малыми габаритными.

#### 4.2. Преобразователь сигналов LVDT датчика

Подключение LVDT (линейно-регулируемый дифференциальный трансформатор) к микроконтроллеру является широко распространенным, так как LVDT требует возбуждения своего входа переменным током и измерения выходного переменного сигнала для определения положения его подвижного сердечника. Большинство микроконтроллеров не имеют средств для выработки требуемых сигналов переменного тока, и таким образом, требуют использования внешней схемы для получения синусоидального сигнала с постоянной частотой и амплитудой, не содержащего гармоник. Преобразование амплитуды и фазы выходного сигнала LVDT в вид, пригодный для обработки встроенным АЦП микроконтроллера так же обычно требует использования внешней схемы.

В отличие от обычных микроконтроллеров, PSoC микроконтроллеры компании CYPRESS SEMICONDUCTOR Corp содержат конфигурируемые пользователем логические и аналоговые блоки, что упрощает генерацию и измерение сигналов переменного тока. Микросхемы PSoC имеют функции, необходимые для генерации аналоговых сигналов без постоянного вмешательства со стороны процессора.

Гибкие аналоговые и цифровые блоки PSoC могут возбуждать LVDT и измерять его выходной сигнал без использования каких бы то ни было внешних схем. Приведена законченная схема подключения к LVDT,

показаны внутренние блоки PSoC микроконтроллера. PSoC использует пару конфигурируемых пользователем блоков с переключаемыми конденсаторами для реализации низкочастотного и полосового фильтров.

Можно получить высококачественный синусоидальный сигнал, генерируя прямоугольный и подавая его на фильтр с переключаемыми конденсаторами через модулятор, встроенный в первый блок с переключаемыми конденсаторами. При прохождении прямоугольного сигнала через узкополосный полосовой фильтр, настроенный на его основную частоту, подавляется большая часть его гармонических составляющих.

Для получения высочайшего качества синусоидального сигнала от полосового фильтра на переключаемых конденсаторах, используйте наибольшую возможную передискретизацию – величина коэффициента приблизительно 33 – или 33 шага на период синусоиды. Получаемая в результате синусоида, достаточно гладкая для возбуждения LVDT, который подавляет все нежелательные гармоники высшего порядка. Масштабирование с помощью усилителя с программируемым усилением внутреннего источника опорного напряжения PSoC обеспечивает грубое управление амплитудой прямоугольного напряжения до его прохождения через фильтр. Для компенсации постоянной составляющей выходного сигнала, внутреннее опорное аналоговое напряжение 2,6В после усиления выдается на вывод, служащий аналоговой землей для LVDT.

Выходным сигналом LVDT является синусоидальное напряжение с изменяющейся амплитудой, сдвиг фаз которого по отношению к напряжению возбуждения изменяется и может иметь значительную величину, иногда превосходя  $180^\circ$ . Сигнал с LVDT подается на один из усилителей с программируемым коэффициентом усиления PSoC, с выхода которого после синхронного выпрямления с помощью модулятора, сигнал поступает на фильтр нижних частот на переключаемых конденсаторах.

Выпрямленный сигнал попадает на выходную линию и один из встроенных в PSoC АЦП на переключаемых конденсаторах.

Обработка выходного сигнала LVDT синхронным выпрямителем и фильтром нижних частот обеспечивает получение сигнала постоянного тока, который может быть подан на АЦП или напрямую в аналоговую схему обратной связи. В микроконтроллере PSoC, фильтр нижних частот на переключаемых конденсаторах и АЦП используют общий тактовый сигнал, управляющий обоими блоками. В результате, скорость преобразования 11-битного сигма-дельта АЦП, входящего в PSoC, составляет приблизительно половину от частоты настройки фильтра нижних частот. Частота напряжения пульсаций синхронного выпрямителя равна удвоенной частоте сигнала возбуждения и легко подавляется фильтром нижних частот.

Настройка частоты фильтра нижних частот на одну треть частоты возбуждения, позволяет проводить измерения выходного сигнала LVDT с 11-битным разрешением и стандартной девиацией в 1МЗР (младший значащий бит) или менее. Опираясь на внутреннюю тактовую частоту PSoC, 24МГц, логические блоки, сконфигурированные как последовательность счетчиков, вырабатывают все цифровые тактовые сигналы, необходимые аналоговым блокам с переключаемыми конденсаторами.

После подачи питания или сброса, центральный процессор PSoC конфигурирует все аналоговые и цифровые блоки и приступает к выполнению своих задач. Как только это произойдет, аппаратная часть подает возбуждение на LVDT и измеряет его выходной сигнал с частотой 500 выб/с без вмешательства центрального процессора. При работе центрального процессора на частоте 12МГц, обработка результатов АЦП и прерываний занимает менее 3% его ресурсов.

Избыток ресурсов может быть использован для вычисления позиции LVDT и для отображения результатов в текстовом формате на ЖКИ модуле. Четыре аналоговых блока, пять логических блоков, и множество линий

ввода-вывода остаются свободными для использования в более сложной аппаратуре.

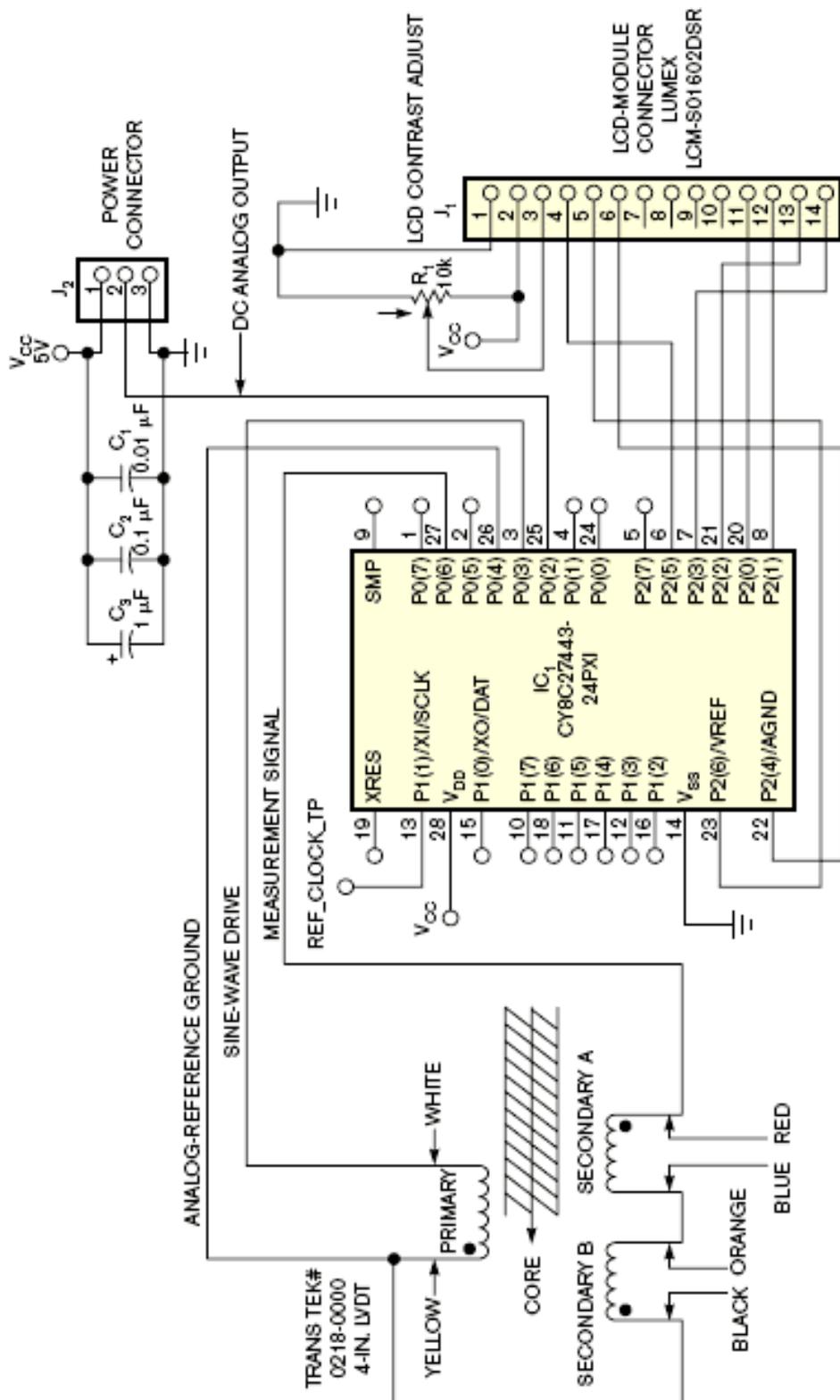


Рисунок 35 - Схема подключения LVDT датчика и PSoC контроллера

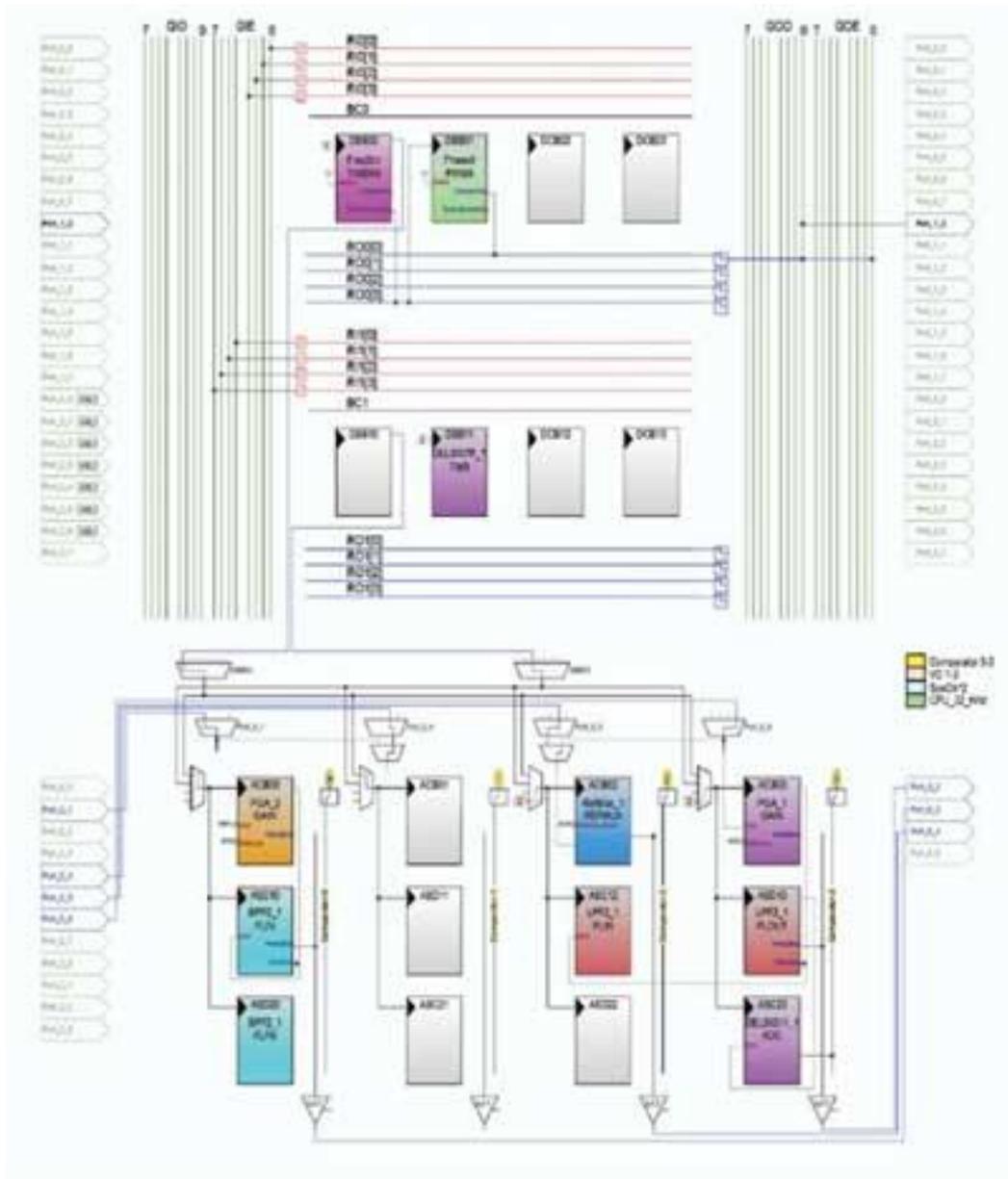


Рисунок 36 - Конфигурация внутренних блоков PSoC микроконтроллера

Преобразователь сигналов датчика LVDT реализованный на базе аналоговой электроники с использованием операционных усилителей. Схема состоит из двух частей: задающего генератора синусоидального сигнала и блока преобразования сигналов вторичной обмотки.

Генератор синусоидального сигнала состоит из генератора прямоугольных импульсов, двух интеграторов с охватом обратной связью, и усилителя мощности.

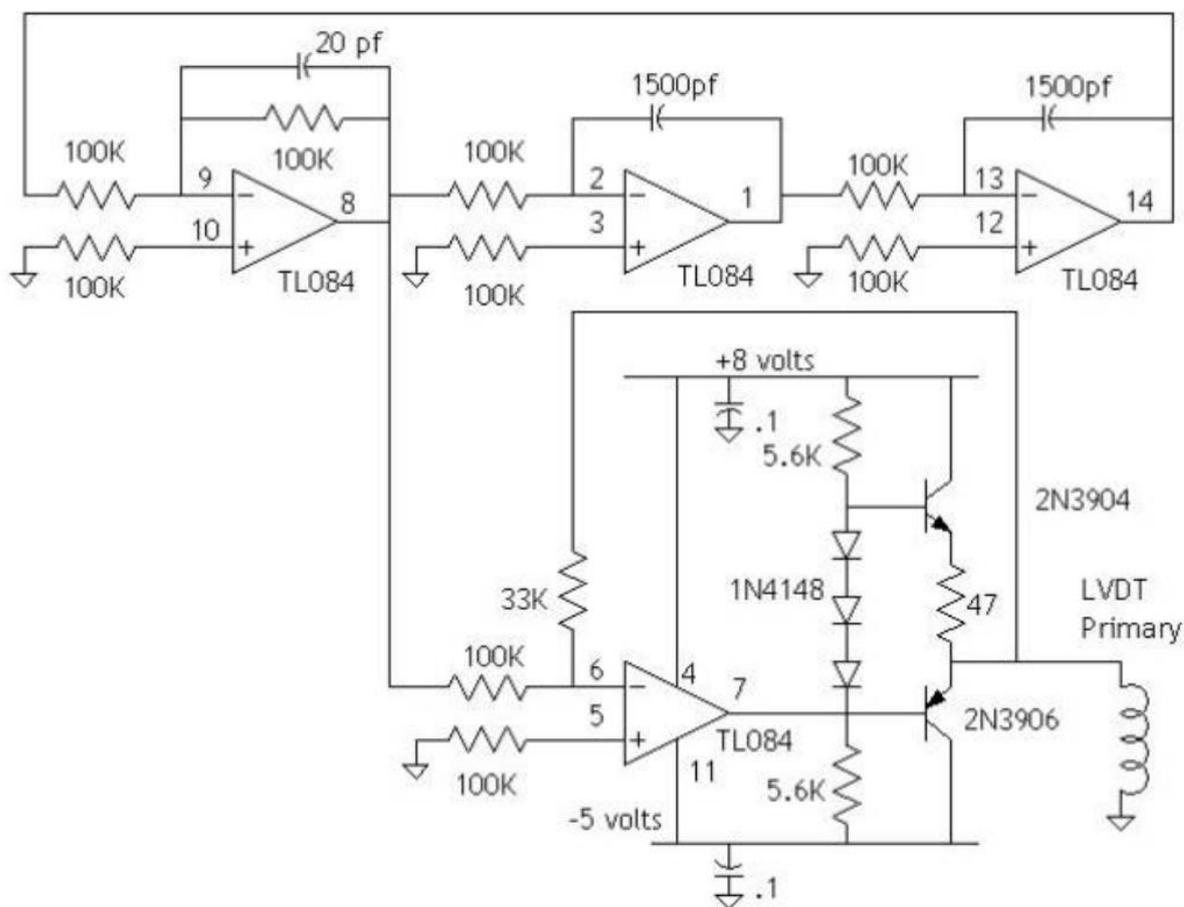


Рисунок 37 - Принципиальная схема генератора синусоидального сигнала питания первичной обмотки

Синусоидальные сигналы со вторичных обмоток выпрямляются блоками выпрямителей. После суммирования выпрямленных сигналов производится фильтрация выходного сигнала с приведением к уровню 0-5В для полного диапазона измерения.

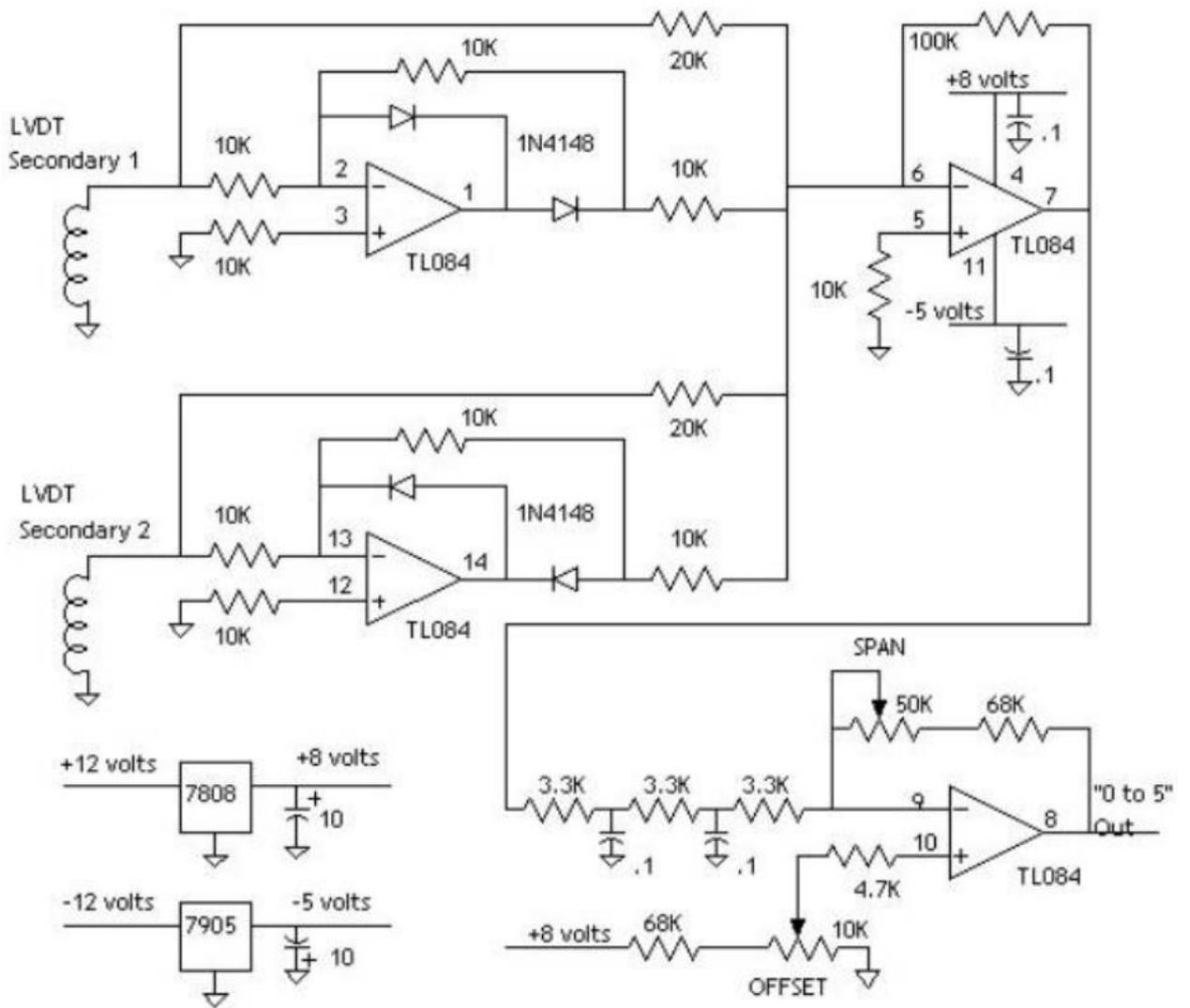


Рисунок 38 - Принципиальная схема преобразователя сигналов вторичных обмоток

### 4.3 Преобразователь тока питания катушки актуатора

Преобразователь тока предназначен для питания катушки актуатора с регулировкой тока, протекающего через катушку актуатора от 0 до максимального установленного тока. Регулировка тока производится с помощью широтно-импульсной модуляции подаваемого напряжения питания. В результате амплитуда и частота генерируемых усилителем импульсов остаются постоянными, а ширина импульса определяется величиной входного сигнала управления.

Входное напряжение питания постоянного тока:

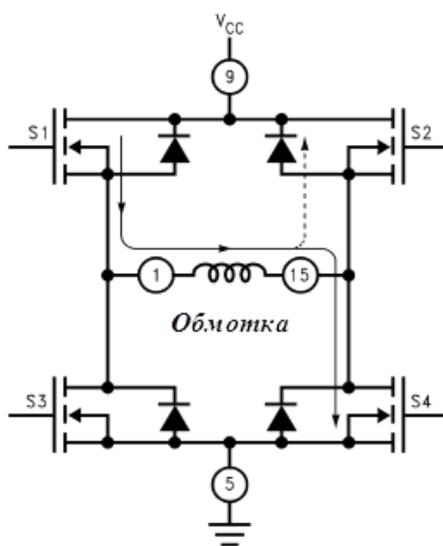
номинальное напряжение: 24В

минимальное напряжение: 18В

максимальное напряжение: 36В

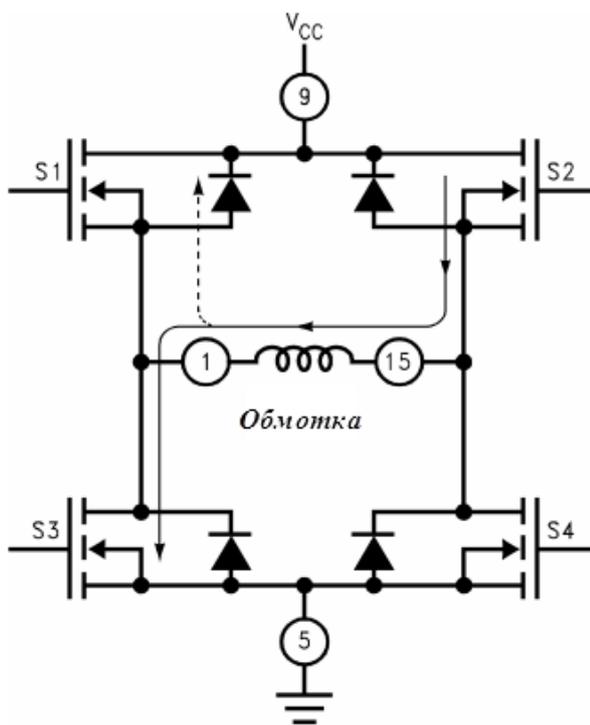
Для обеспечения заданного тока протекающего через катушку соленоида требуется реализовать замкнутый контур регулирования тока по отклонению с измерением фактического тока для сравнения с заданным значением.

Для задания двунаправленного тока, протекающего через катушку предлагается построить силовой преобразователь по принципу полного моста (рисунок 39)



—————> S1 and S4 ON  
 - - - - -> S1 ON

а)



—————> S2 and S3 ON  
 - - - - -> S2 ON

б)

Рисунок 39 - Полномостовой преобразователь постоянного тока

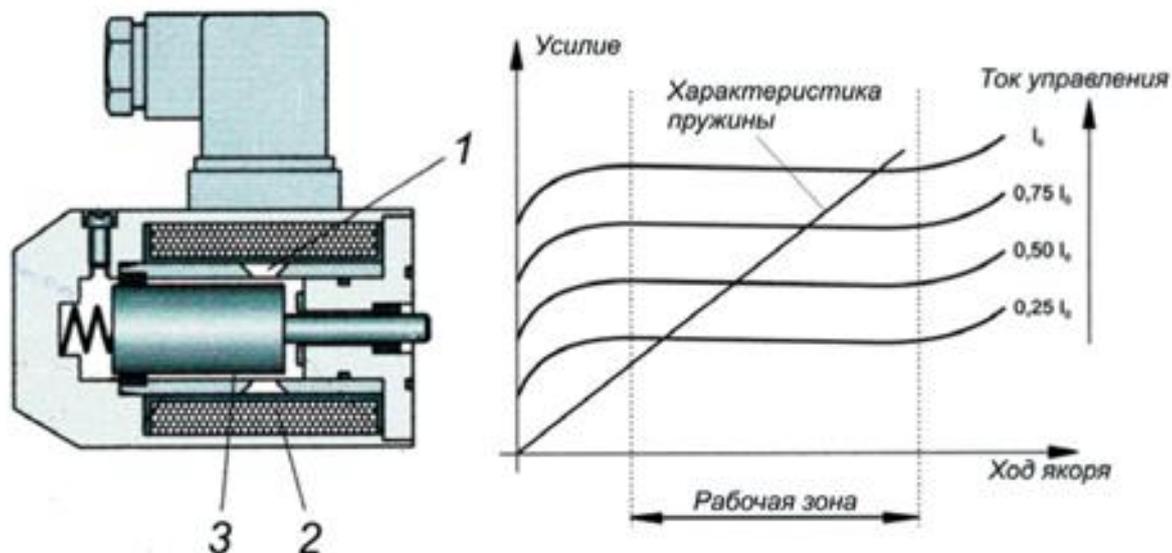
Катушка актуатора является активно-индуктивной нагрузкой.

Параметры катушки actuатора:

Активное сопротивление: 2.1 Ом

Индуктивность: 14.8 мГн

Максимальный ток обмотки: 2.5 А



1- вставка из немагнитного материала, 2- катушка, 3- ферромагнитный якорь

Рисунок 40 - Принцип действия пропорционального электромагнита

В конструкции пропорционального электромагнита (рисунок 40) в отличие от дискретных электромагнитов постоянного тока предусмотрена конусная вставка 1 из немагнитного материала, изменяющая форму линий магнитного поля. В результате управляющий ток в катушке 2 создает электромагнитное поле, вызывающее продольное смещение ферромагнитного якоря 3 с силой, пропорциональной силе тока. Якорь взаимодействует с подпружиненным запорно-регулирующим элементом гидроаппарата (золотником, конусом предохранительного клапана, втулкой дросселя), причем наложение линейной характеристики пружины на силовую характеристику магнита показывает, что осевое смещение (ход) якоря пропорционально току управления.

Аппараты с пропорциональным электроуправлением применяются в основном для дистанционного управления параметрами гидропривода,

возможно также их использование в качестве звеньев замкнутых систем автоматического регулирования. В комплект поставки обычно входит встроенный или расположенный отдельно электронный блок, обеспечивающий согласование с ДОС, стабильность тока управления в обмотке магнита независимо от ее нагрева и колебаний напряжения в сети, пропорциональную зависимость тока управления от входного сигнала, согласование с маломощными управляющими устройствами и стандартными полевыми шинами (CAN-bus, Profibus и др.), возможность линейного нарастания тока управления за время 0,1...5 с при ступенчатом входном сигнале (рампа), регулирования амплитуды осцилляции и установки начального тока (настройка нуля), а также прямого подключения задающих резисторов.

При этом пульсирующий характер сигнала, поступающего в обмотку пропорционального электромагнита, вызывает соответствующие колебания якоря и, возможно, золотника гидрораспределителя, что позволяет существенно снизить трение и улучшить характеристики аппарата в целом.

С целью сокращения габаритов силового модуля встроенной электронной системы управления актуатором, применим микросхему-драйвер с интегрированной силовой частью и системой управления.

LMD18245 – преобразователь постоянного тока по схеме полный мост, с интегрированным токовым шунтом и драйвером управления

Основные характеристики:

- Максимальное напряжение питания 55В, продолжительный ток 3А, максимальный пиковый ток 6А
- Низкое активное сопротивление сток-исток  $R_{DS}$  силовых ключей – 0.3Ом
- Встроенные обратные диоды
- Встроенный низкоомный токовый шунт
- Встроенный 4-битный цифроаналоговый преобразователь задатчика тока

- TTL и CMOS совместимые входы
- Защита от перегрева с отключением силовых ключей (155<sup>0</sup>С)
- Защита от превышения тока
- Защита от короткого замыкания выходов

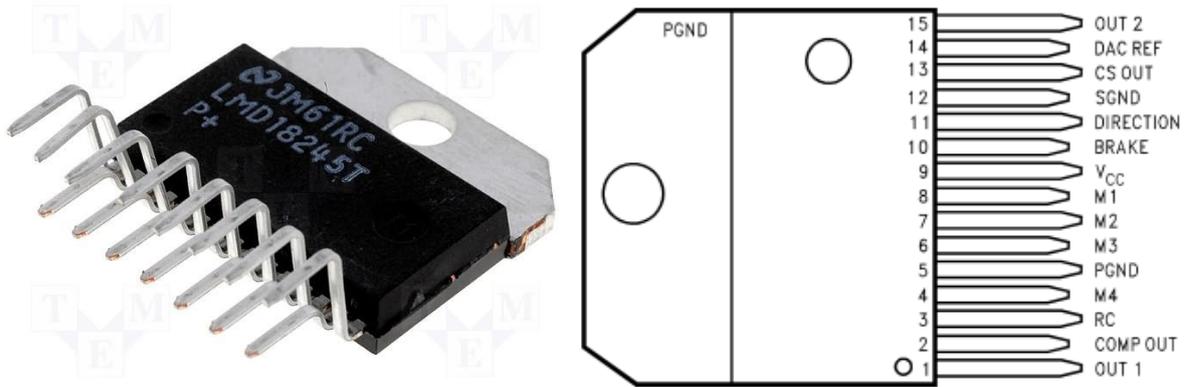


Рисунок 41 - Схема подключения микросхемы LMD18245 в корпусе TO-220

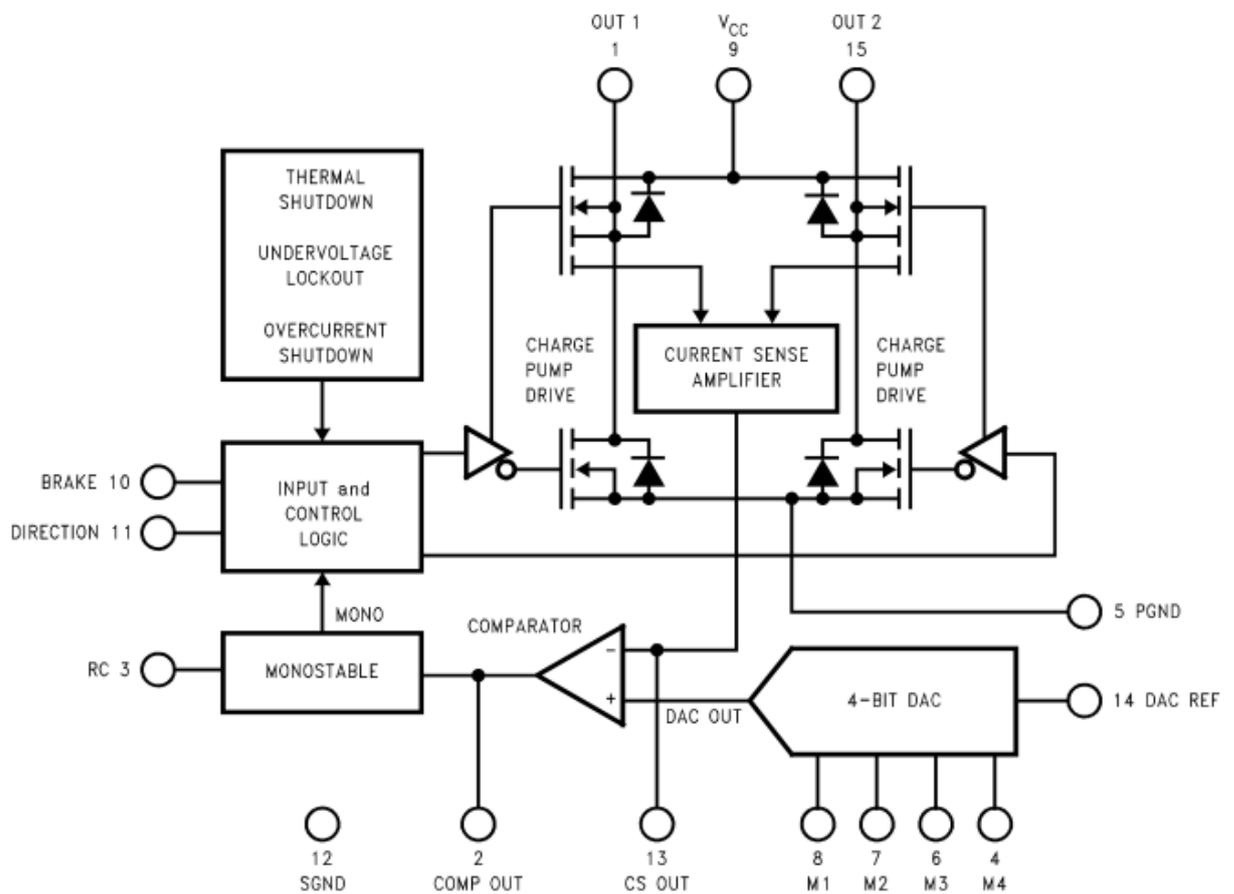


Рисунок 42 - Функциональная блок-схема микросхемы LMD18245

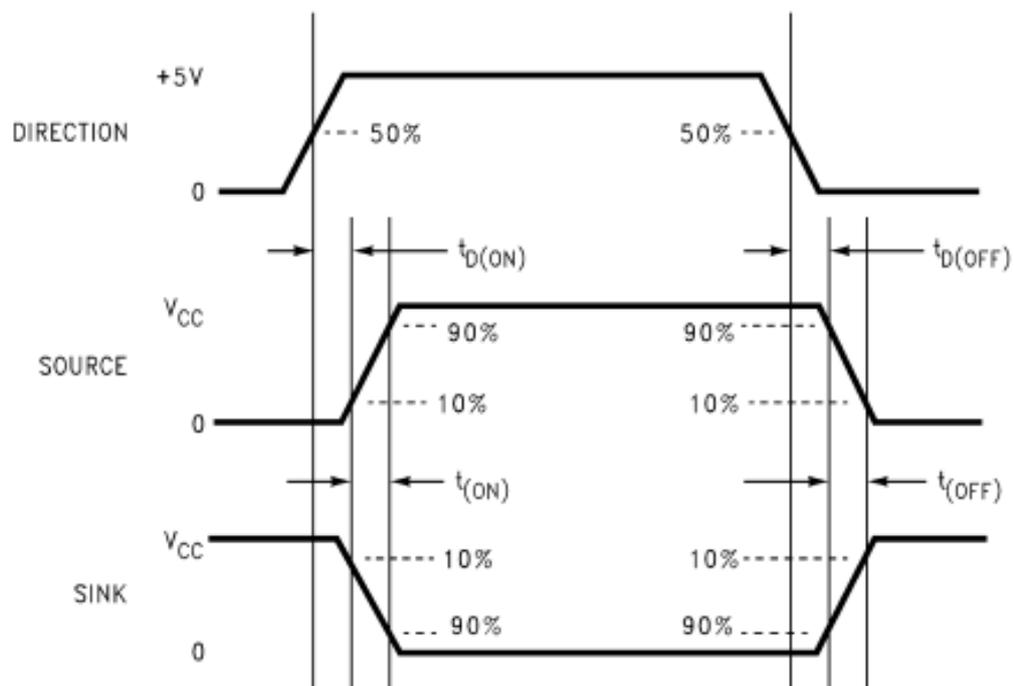


Рисунок 43 - Временная диаграмма работы силовых ключей

На базе типовой схемы включения микросхемы разработана принципиальная схема силового модуля (рисунок 44)

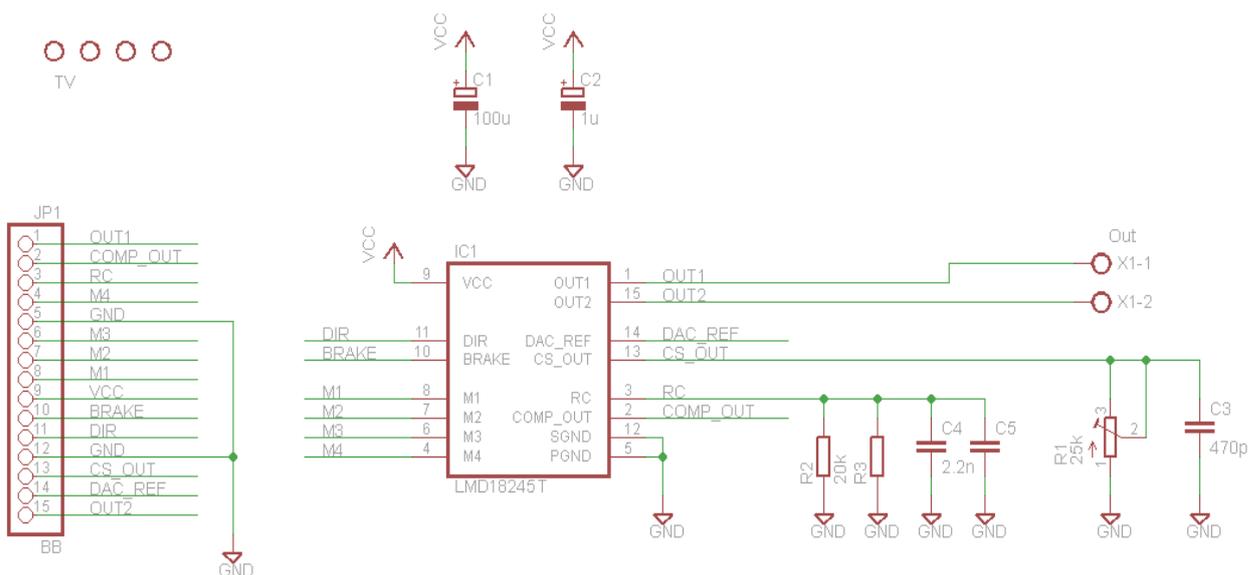


Рисунок 44 - Принципиальная схема силового модуля преобразователя тока

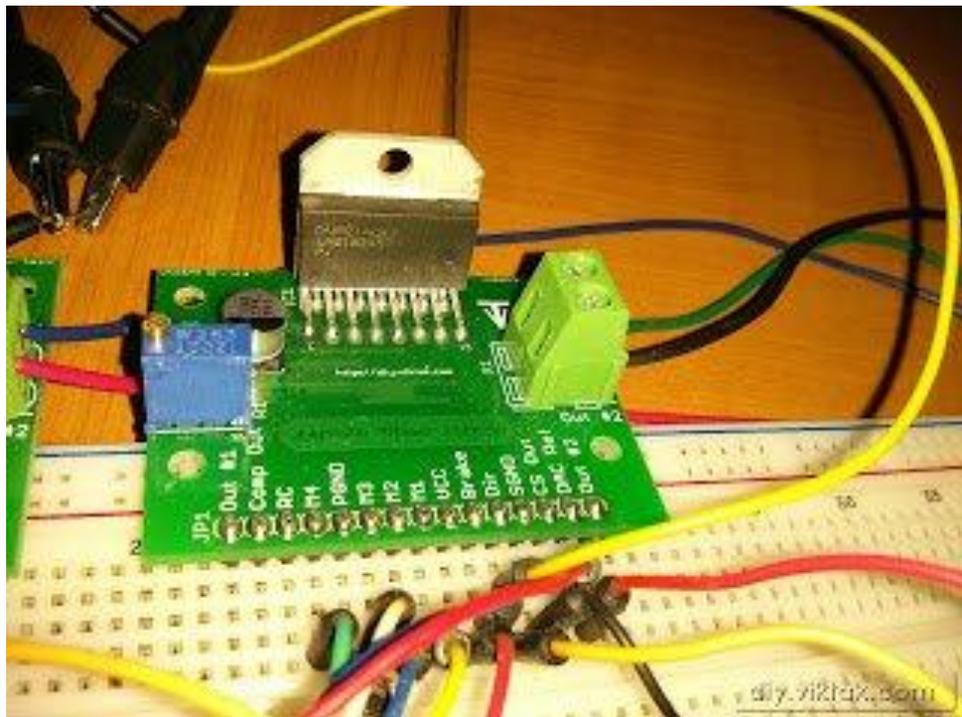


Рисунок 45 - Макет силового модуля

#### 4.4. Испытательный стенд гидроаппаратуры

Для испытания, проверки и регулировки серво и пропорциональных гидравлических распределителей и измерения характеристик разработан испытательный стенд гидроаппаратуры, позволяющий симитировать работу гидроаппаратов при номинальных режимах работы.

Разработана конструкция испытательного стенда, гидравлическая схема которого приведена на рисунке 1.

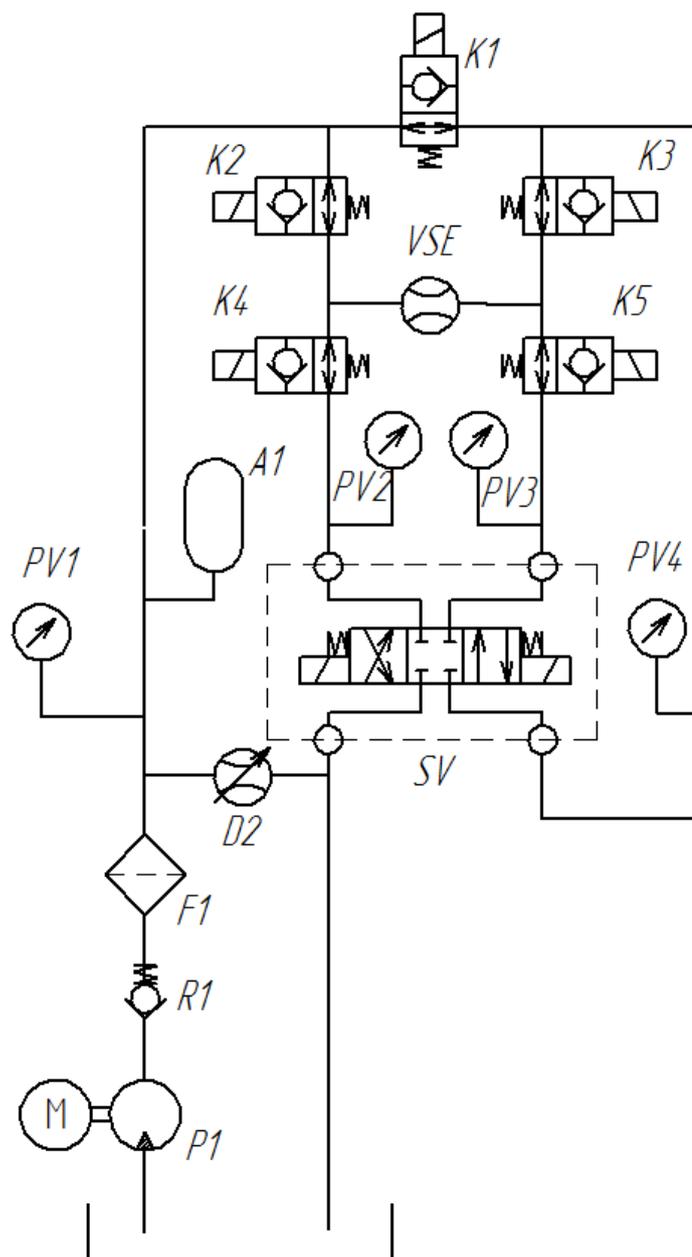


Рисунок 46 - Гидравлическая схема испытательного стенда

Система управления реализована на базе персонального компьютера с использованием технологии виртуальных приборов, реализуемых программным путем.

Задание аналоговых задающих сигналов управления и измерение сигналов: давления в гидросистеме, расход через каналы гидрораспределителя, задающего напряжения, производится системой ввода-вывода сигналов на базе модуля ЦАП-АЦП.

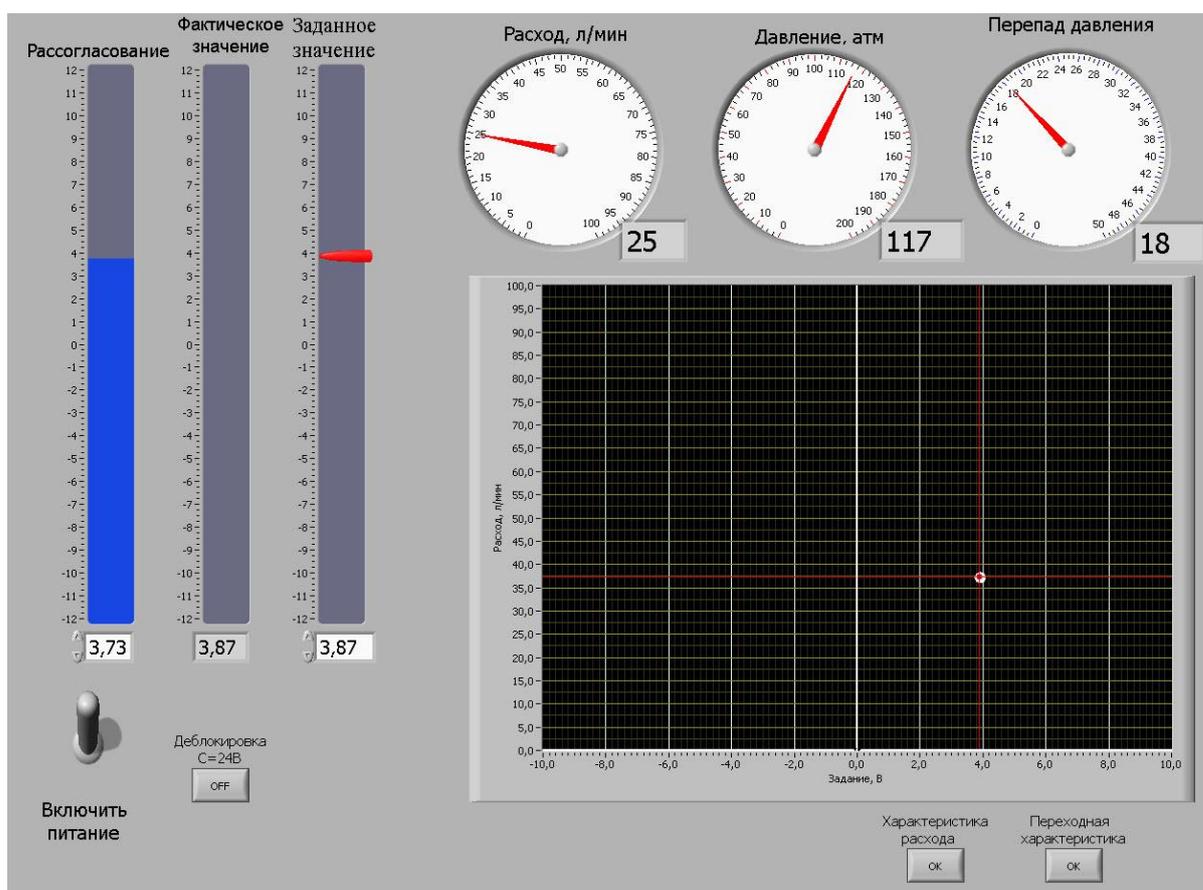


Рисунок 47 - Виртуальная панель управления испытательным стендом гидрораспределителей

Основные технические параметры испытательного стенда:

- Расход до 60 л/мин, рабочее давление до 200 бар
- Система очистки масла с 10мкм фильтром
- Смонтировано в едином блоке с организацией рабочего места оператора
- Система защиты и контроля

- Система управления на базе персонального компьютера и платы ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов
  - Работа в ручном и автоматических режимах
  - Снятие статических и динамических характеристик:
    - ✓ Переходная характеристика
    - ✓ Расходная характеристика
    - ✓ Замер утечек по отдельным каналам
    - ✓ Амплитудно-фазочастотная характеристика
  - Автоматические режимы тестирования
  - Математическая обработка результатов измерения с выводом результатов
  - Питание клапанов постоянным током с напряжением 24В,  $\pm 15В$
  - Автоматический выбор подключения клапана - выбор источника задания  $\pm 10В$ ,  $\pm 10мА$ ,  $\pm 20мА$ ,  $+4...20мА$ , выбор канала обратной связи  $\pm 10В$ , 2-8В,  $\pm 10мА$
  - Микроконтроллерная система управления
- Внешний вид испытательного стенда с рабочим местом оператора показан на рисунке 3



Рисунок 48 - Внешний вид испытательного стенда

Разработанный испытательный стенд гидроаппаратуры позволяет в ручном или автоматических режимах производить проверку исправности, юстировку параметров, настройку характеристик гидравлических пропорциональных и серво клапанов, а также производить осцилографирование статических и динамических характеристик распределителей.

## Заключение

В работе проведено проектирование линейного позиционного актуатора для гидравлического распределителя прямого действия пропорционального регулирования расхода, который широко применяется в системе гидравлического привода.

Система управления реализована на базе современного микроконтроллера с интеграцией цифровой и аналоговой части.

Основные научные и практические результаты, достигнутые в работе, заключаются в следующем:

1. В качестве объекта управления выделен механотронный модуль линейного актуатора соленоидного типа с интегрированным линейным датчиком перемещения на базе линейного измерительного дифференциального трансформатора.
2. Для повышения точности системы измерения датчика положения применен программный алгоритм коррекции выходного сигнала при юстировке
3. Проведено математическое моделирование в программе Simulink MATLAB соленоида актуатора где производится задание тока, подаваемого на катушку, моделируется механическое усилие сердечника соленоида с заданием значения присоединенной массы, упруго диссипативных свойств и задание усилия противодействующей пружины.
4. Электронная система управления линейным актуатором реализована на базе PSoC микроконтроллера, в котором цифровой микроконтроллер и набор перестраиваемых аналоговых блоков реализован в единой микросхеме. Данное техническое решение позволит расширить функциональные возможности системы управления в плане интерфейсов управления, а также снизить габариты системы управления, что важно для встраиваемых систем.

5. Для проверки статических и динамических режимов работы гидравлических регулирующих аппаратов разработан испытательный стенд с использованием виртуальной панели управления на базе ПО LABVIEW.

## Список использованных источников

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 2013. – 475 с.
2. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления: Учебн. для вузов./ В.Н.Афанасьев, В.Н.Колмановский, В.Р. Носов. – 4-изд., испр. и дополн. – М.: Высшая школа, 2013. – 614 с.
3. Барышев Г.А., Муромцев Д.Ю., Орлов В.В. Основы автоматики и систем автоматического управления: Лабораторный практикум. Тамбов: Изд-во ТамГТУ, 2013. – 80 с.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / изд. 5-е., перераб. и доп. – СПб, из-во “Профессия”, 2014. – 752 с.
5. Водовозов В.М. Курсовое проектирование электропривода: Учебное пособие. – СПб.: изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
6. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования / Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2014. – 365 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2012. – 230 с.
8. Громов А.К.. Электромеханическое преобразование энергии. Письменные лекции. – Иваново: ИГЭУ
9. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс – СПб: Питер, 2013. – 432 с.
10. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Копылова Б.И. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2012. – 832 с.

11. Дубровский И.Л. Микропроцессорное управление электроприводами промышленных роботов: Учебное пособие/И. Л. Дубровский, А. П. Дамбраускас, А. А. Рыбин. Красноярск: КГТУ, 2013. – 88 с.
12. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – Спб: Питер, 2012.
13. Дьяконов В.П. MATLAB6/6.1/6.5 + Simulink4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя – М.: Солон-Пресс.- 2012. – 768 с.
14. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия “Библиотека профессионала”. – М.: Солон-Пресс, 2015.
15. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода: Учебное пособие для студентов вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
16. Ещин Е.К. Моделирование систем управления электромеханическими объектами. Письменные лекции. – Кузбасс: КузГУ, 2012
17. Загидуллин Р.Ш. LabView в исследованиях и разработках. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 352с.
18. Кузминский А. Программируемые системы на кристалле компании Cypress Semiconductor. Компоненты и технологии, №2, 2013
19. Кочубиевский Н. Д. Системы нагружения для исследования и испытаний машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 2015.
20. Кузин Ф.А. Диссертация: Методика написания. Правила оформления. Порядок защиты. Практическое решение для докторантов, аспирантов и магистрантов. – 3-е изд., доп. – М., 2012. – 320 с.
21. Лагузов П. Преобразователи сигналов LVDT-датчика от Analog Devices. Мир электронных компонентов, №1, 2009
22. Леонтьев А.Г. Микропроцессорные электромеханические системы: Учебное пособие. – СПб.: СПбГТУ, 2012.
23. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред.

- Пупкова К.А., Егупова Н.Д. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана – 2014. – 640 с.
24. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Пупкова К.А., Егупова Н.Д. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана – 2014. – 741 с.
25. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. Пупкова К.А., Егупова Н.Д. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана – 2014. – 741 с.
26. Михайлов О.П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 2012. - 224 с.
27. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления: Научное издание. – СПб.: “Невский диалект”, 2012.
28. Потемкин В.Г. Ведение в MATLAB. – М.: Диалог-МИФИ, 2012. – 247 с.
29. Рыбин А.А. Микропроцессорные устройства управления и их программное обеспечение. Учебное пособие для студентов специальности 210300 – "Роботы и робототехнические системы", КГТУ. – Красноярск, 2013. – 99 с.
30. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука. Физматлит, 2013. – 320 с.
31. Слепокуров Ю.С. MATLAB 5. Анализ технических систем: Учеб. пособие./ Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2012. – 167 с.
32. Теория автоматического управления. / Под ред. А. А. Воронова. – Ч. 1, 2. – М.: Высшая школа, 2015. – 382 с.
33. Теория автоматического управления. Изд. 2/ Под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 2012. – 432 с.

34. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: монография - Омск: Издательство ОмГТУ, 2012 – 176с.
35. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2012
36. Шмитт А. Учебный курс гидравлики в 4 томах. «Маннесманн Рексрот ГмбХ»
37. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.4. Использование электрической энергии/ Под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. Попов А.И.). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2012. – 696 с.
38. Nyse David S. Linear position sensors: theory and application. A John Wiley & SONS, Inc., Publication , 2013
39. Richard Ed., Dorf C. The Electrical Engineering Handbook. Boca Ration: CRC Press LLC, 2016.
40. Data Acquisition Toolbox for use with MATLAB. User's Guide./ The MathWorks, Inc., [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
41. RRS29 067/6.99 Пропорциональный 4/3-распределитель прямого действия, с электрическим управлением, тип 4WRSE.ф. Mannesman Rexroth.