

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
и профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой – руководитель
ОАР ИШИТР

_____ А. А. Филипас

«__» _____ 2021 г.

ИНДУКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Микропроцессорная техника и средства автоматизации»
для бакалавров по направлению
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Издательство
Томского политехнического университета
Томск 2021

УДК 681.3

ИНДУКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Микропроцессорная техника и средства автоматизации» для бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»/ Составитель В. В. Курганов. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. - 20 с.

Рецензент доцент, к.т.н. М. В. Скороспешкин

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изучению методическим семинаром ОАР ИШИТР ТПУ

Протокол № _____ от _____ 2021 г.

Зав. кафедрой - руководитель
ОАР ИШИТР

_____ А. А. Филипас

Содержание

	стр.
1 Цель работы	4
2 Основные теоретические положения	4
3 Аппаратура лабораторной установки	13
4 Задание и методические указания на выполнение работы	15
5 Содержание отчёта	18
6 Контрольные вопросы	18
7 Литература	18

1 Цель работы

Целью работы является следующее:

- изучение принципов действия индуктивных преобразователей перемещений;
- экспериментальное исследование промышленных преобразователей перемещений.

2 Основные теоретические положения

Индуктивными называются преобразователи, преобразующие значение измеряемого перемещения в значение индуктивности.

Индуктивность (или **коэффициент самоиндукции**) L – коэффициент пропорциональности между электрическим током I , текущим в каком-либо замкнутом контуре, и магнитным потоком Φ , создаваемым этим током через поверхность, ограниченную этим контуром [1]

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

В данном случае речь идёт об индуктивности одного витка. Если катушка состоит из w витков, выражение модифицируется к следующему виду

$$\Psi = LI, \quad (2)$$

где $\Psi = \sum_{i=1}^w \Phi_i$ – потокосцепление – сумма магнитных потоков через все

витки (так называемый полный поток).

Из выражений (1) и (2) следует

$$L = \frac{w\Phi}{I}. \quad (3)$$

На рисунке 1 представлен простейший индуктивный преобразователь.

Преобразователь состоит из неподвижного магнитопровода 2, на котором расположена катушка 4 с числом витков w_1 , и подвижного магнитопровода 1. Магнитопроводы 1 выполнены из ферромагнитного материала. Последовательно с обмоткой 4 включен миллиамперметр 3. К концам обмотки подано напряжение переменного тока $U_{\sim} = \text{const}$.

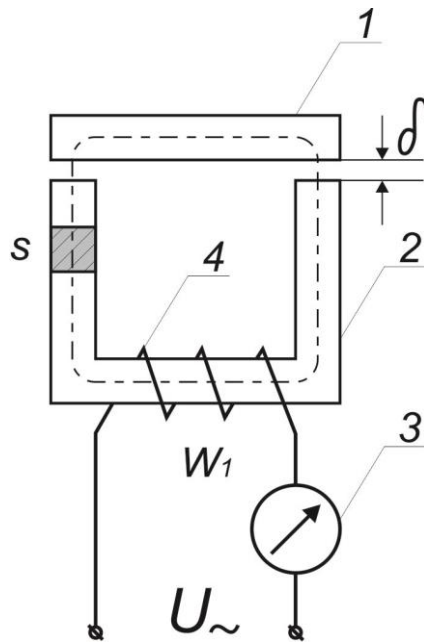


Рисунок 1 - Простейший индуктивный преобразователь

Величина действующего значения тока, протекающего через обмотку w_1 , будет определяться следующим выражением

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_p^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (4)$$

где U – действующее значение напряжения;
 R – активное сопротивление обмотки;
 X_p – реактивное сопротивление обмотки
 L – индуктивность обмотки.

Для определения индуктивности по (3) необходимо определить величину магнитного потока, создаваемого током I , при протекании по обмотке с количеством витков w_1 . Для этого воспользуемся законом Хопкинса, который связывает магнитодвижущую силу F , магнитный поток Φ и магнитное сопротивление цепи R_m

$$F = \Phi R_m. \quad (5)$$

Закон Хопкинса является аналогом закона Ома для магнитных цепей.

Магнитодвижущая сила (МДС) — физическая величина, характеризующая способность электрических токов создавать магнитные потоки – аналог ЭДС в электрических цепях.

$$F = wI, \quad (6)$$

где w – количество витков в обмотке, I – ток в проводнике.

Из выражений (5) и (6) следует

$$\Phi = \frac{wI}{R_M}. \quad (7)$$

Для рисунка 1 выражение можно записать в следующем виде

$$\Phi = \frac{w_1 I}{R_{M.ст.} + 2R_\delta + jX_M},$$

где w_1 – количество витков в обмотке;

$R_{M.ст.}$ – магнитное сопротивление стальной части магнитопровода;

R_δ – магнитное сопротивление воздушной части магнитопровода;

X_M – реактивная составляющая сопротивления магнитной цепи, обусловленная потерями в стали: потерями на вихревые токи (токи Фуко) и потерями на гистерезис.

Способы минимизации реактивной составляющей сопротивления магнитной цепи давно известны.

Потери на вихревые токи

Токи Фуко возникают под воздействием переменного электромагнитного поля в внутри сердечника и по физической природе ничем не отличаются от индукционных токов, возникающих в линейных проводниках. Они вихревые, то есть замкнуты в кольца. Электрическое сопротивление массивного проводника мало, поэтому токи Фуко достигают очень большой силы. В соответствии с правилом Ленца они выбирают внутри проводника такое направление и путь, чтобы противиться причине, вызывающей их.

Для уменьшения вихревых токов используется шихтование. Шихтование это способ изготовления сердечников путём набора из тонких стальных пластин, разделённых изолирующими прослойками. Появление ферритов, немагнитных ферромагнитных материалов с высоким удельным сопротивлением, сделало возможным изготовление этих сердечников сплошными.

Потери на гистерезис

Потери на гистерезис пропорциональны площади гистерезисной петли используемого ферромагнитного материала. Для их уменьшения следует выбирать материал с узкой петлёй гистерезиса.

Что касается магнитного сопротивления стальной части магнитопровода $R_{M.ст.}$, то в сравнении с магнитным сопротивлением воздушной части магнито-

провода R_δ оно значительно меньше. В связи с этим можно записать, что

$$\Phi = \frac{w_1 I}{2R_\delta}. \quad (8)$$

Участки магнитной цепи в виде воздушных промежутков создают только активное магнитное сопротивление, так как на этих участках нет потерь на перемагничивание и вихревые токи. Перейдём от магнитного сопротивления воздушного зазора к магнитной проводимости G_δ

$$R_\delta = \frac{1}{G_\delta}.$$

Для плоскопараллельных воздушных зазоров (рисунок 2), с которыми мы имеем дело, величина проводимости определяется следующим выражением

$$G_\delta = \frac{S_\delta}{\delta} \mu_0 = \frac{S_\delta}{\delta} 4\pi \cdot 10^{-7}, \quad (9)$$

где S_δ и δ – сечение и длина воздушного зазора соответственно, μ_0 – магнитная проницаемость.

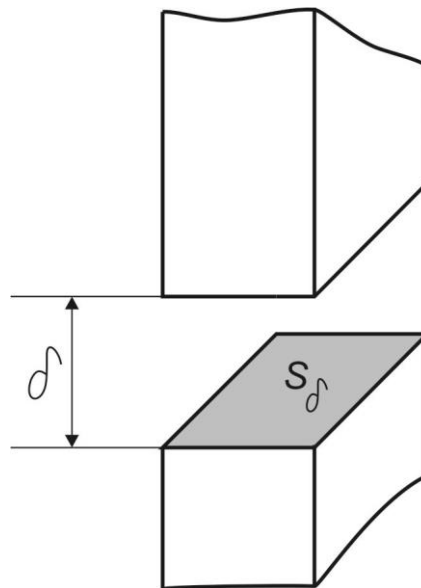


Рисунок 2 - Плоскопараллельный воздушный зазор

Для получения окончательного результата запишем выражение (3) с учётом (8) и (9), и подставим в (4)

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega w_1^2 S_\delta 4\pi \cdot 10^{-7}}{2\delta} \right)^2}}. \quad (10)$$

Выражение (10) является базовым для индуктивного преобразователя. Характеристика преобразователя в общем случае является нелинейной, но при определённых условиях может считаться линейной. Одним из условий линейности характеристики является нулевое или близкое к нему активное сопротивление обмотки R . В случае выполнения этого условия выражение (10) примет вид

$$I = \frac{\delta U}{\omega w_1^2 S_\delta 2\pi \cdot 10^{-7}},$$

из которого следует, что действующее значение тока в обмотке индуктивного преобразователя прямопропорционально величине воздушного зазора. Зависимость $I = f(\delta)$ представлена прямой (теоретическая) на рисунке 3. Однако при определённой величине воздушного зазора активным сопротивлением обмотки нельзя пренебречь, что в практических измерениях оказывает влияние на линейность зависимости $I = f(\delta)$.

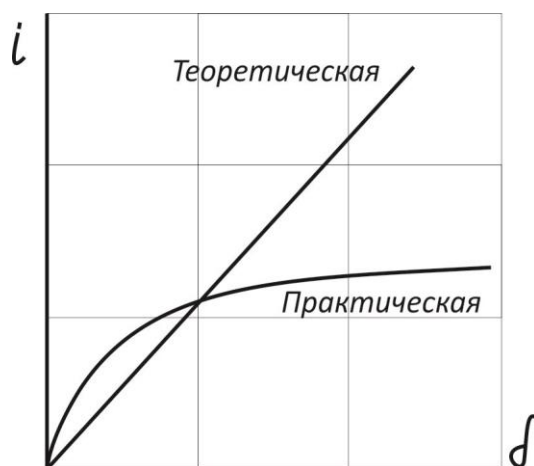


Рисунок 3 - Зависимость тока в цепи от величины зазора

Действительно, с ростом воздушного зазора ток в обмотке возрастает, а поток в магнитной цепи уменьшается. Это уменьшение потока происходит за счет роста магнитного сопротивления воздушного зазора и увеличения падения напряжения на активном сопротивлении обмотки. В результате при увеличении зазора ток в обмотке будет нарастать не пропорционально, как это следует из выражения (10), а значительно медленнее (рисунок 3, кривая - практическая).

Возвращаясь к рисунку 1 можно добавить следующее. Если подвижный магнитопровод жестко соединить с объектом, перемещение X которого измеряется, то при изменении X изменяется и величина воздушного зазора δ , кото-

рая в общем случае является эквивалентом перемещения. Изменение δ приводит к изменению магнитного сопротивления цепи, которое влечёт за собой изменение магнитного потока, а, следовательно, и индуктивности L катушки. Изменение индуктивности приводит к изменению действующего тока в обмотке.

Если на магнитопровод (рисунок 4) поместить не одну, а две обмотки с числом витков w_1 и w_2 соответственно, то при изменении воздушного зазора будет изменяться взаимная индуктивность обмоток

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$

где k - коэффициент связи обмоток w_1 и w_2 , характеризующий степень индуктивной связи между обмотками.

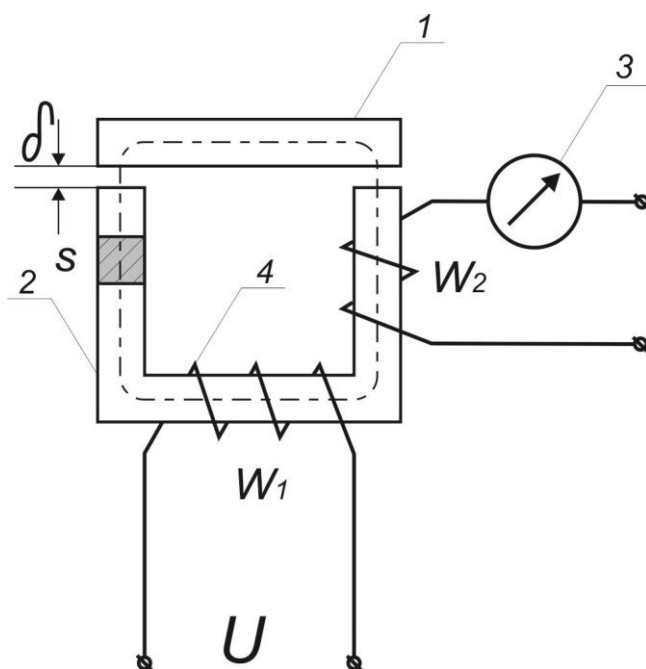


Рисунок 4 - Трансформаторный преобразователь перемещения

Коэффициент связи изменяется от 1 до 0 зависит от взаимного расположения обмоток. Чем ближе друг к другу расположены обмотки, тем больше коэффициент и, наоборот, при увеличении расстояния между обмотками он стремится к нулю.

При изменении тока i_1 в первой катушке согласно закону электромагнитной индукции во второй катушке индуцируется ЭДС взаимной индукции

$$E_2 = -M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

Изменение взаимной индуктивности вследствие изменения зазора δ приводит к изменению индуцируемой ЭДС. Преобразователи, которые преобразуют механическое перемещение в значение взаимной индуктивности обмоток, называют трансформаторными.

Преобразователи, представленные на рисунках 1 и 4, называются преобразователями с замкнутой магнитной цепью, или преобразователями с малым воздушным зазором. Измеряемое перемещение в таких преобразователях составляет 1...5 мм.

На рисунке 5а представлен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой обмотку (катушку) 1, внутри которой может перемещаться сердечник 2, выполненный из магнитно-мягкого материала.

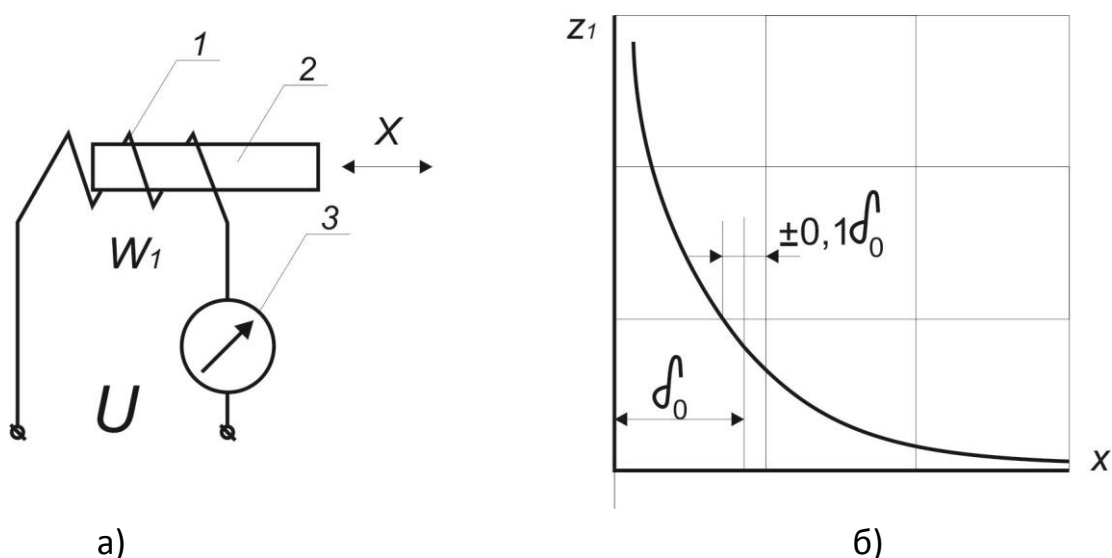


Рисунок 5 - Индуктивный преобразователь с разомкнутой магнитной цепью

Сердечник связан с объектом, перемещение которого измеряется. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности обмотки и, соответственно тока в цепи, которое фиксируется измерительным прибором 3. Такой тип преобразователя применяется для измерения перемещений от 5 до 100 мм.

Для рассмотренных преобразователей, как уже отмечалось ранее, суммарное сопротивление стальной части магнитопровода, включающей активную и реактивную составляющие, значительно меньше сопротивления воздушного зазора. В связи с этим можно записать

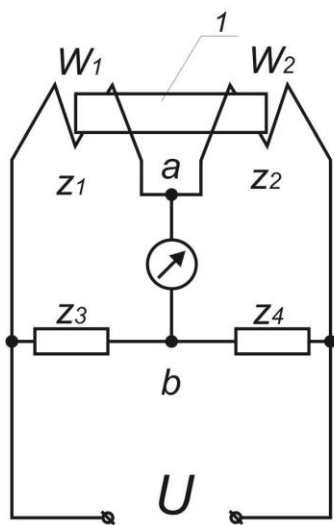
$$L = \frac{w^2 S \delta 4\pi \cdot 10^{-7}}{2\delta} \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что индуктивность обмотки, а, следовательно, и индуктивное сопротивление обмотки с изменением зазора δ изменяется по гиперболическому закону, что для измерительного прибора крайне нежелательно. На рисунке 5б представлена зависимость суммарного сопротивления обмотки индуктивного преобразователя от величины воздушного зазора δ . Для уменьшения погрешности, вызванной нелинейностью характеристики, рабочий диапазон измеряемых перемещений ограничивают величиной $X = \pm 0,1\delta_0$, где δ_0 - начальное значение воздушного зазора в магнитной цепи. Данное ограничение позволяет аппроксимировать функцию преобразования $z_1 = \varphi(\delta)$ прямой линией с небольшой погрешностью.

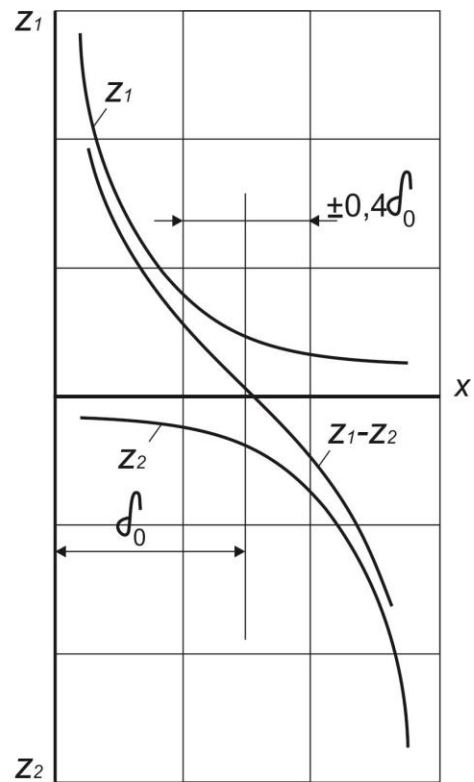
Для увеличения диапазона измерения перемещения используют дифференциальные индуктивные преобразователи, схема которого представлена на рисунке 6.

Две идентичные по параметрам обмотки с числом витков w_1 и w_2 соответственно имеют общий стальной сердечник 1, симметрично расположенный внутри обмоток. В этом случае индуктивные сопротивления обмоток $w_1 L$ и $w_2 L$ равны, а, следовательно, равны и их комплексные сопротивления Z_1 и Z_2 . Если эти обмотки включить в плечи моста (рисунок 6а), в котором $Z_3 = Z_4$, то при среднем положении сердечника ток в измерительной диагонали $a-b$ будет равен нулю. Такое положение сердечника следует принять за δ_0 .

При смещении сердечника 1 на величину измеряемого перемещения X вправо индуктивное сопротивление обмотки w_1 уменьшится, а катушки w_2 - возрастёт, что приведёт к разбалансу моста и появлению тока в измерительной диагонали $a-b$. Причём если при смещении вправо от δ_0 ток в измерительной диагонали будет одной полярности, то при смещении влево полярность тока изменится.



а)



б)

Рисунок 6 - Дифференциальный индуктивный преобразователь

На рисунке бб представлены зависимости комплексных сопротивлений Z_1 и Z_2 обмотки w_1 и w_2 соответственно и результирующего сопротивления $Z_1 - Z_2$ от перемещения X . Диапазон псевдолинейной (близкой к линейной части, которая может быть аппроксимирована прямой с погрешностью не более 1%) части результирующей кривой значительно больше, чем у каждой кривой отдельно. Этот результат позволяет значительно расширить рабочий диапазон дифференциального преобразователя с $\pm 0,1\delta_0$ до $\pm 0,4\delta_0$

3 Аппаратура лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.1, на котором введены следующие обозначения:

ТРМ - измеритель;

ИДП - индуктивный датчик перемещения;

ПО - подвижный объект;

ДПТ - двигатель постоянного тока.

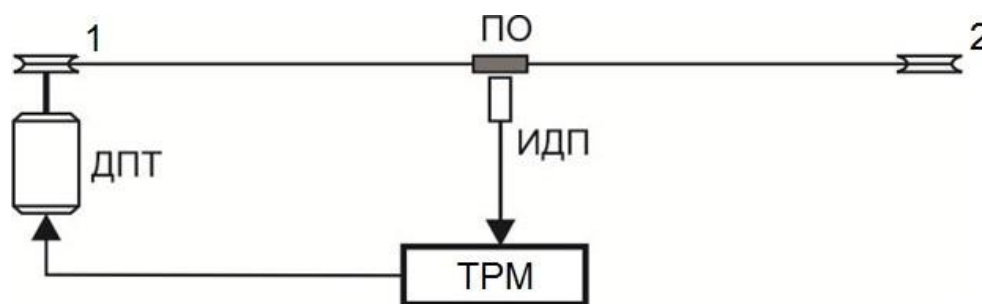


Рисунок 3.1 - Функциональная схема лабораторной установки

Работа станда.

Между двумя роликами 1 и 2, один из которых приводится в движение двигателем постоянного тока, перемещается ПО. ИПД закреплён неподвижно. Ток 4...20 мА, пропорциональный положению ПО, передаётся в измеритель ТРМ.

Внешний вид лабораторной установки приведён на рисунке 3.2 и 3.3.

На рисунке 3.2 приведена динамическая часть установки, на рисунке 3.3 - лабораторный стенд, включающий измеритель ТРМ, секундомер, органы управления.

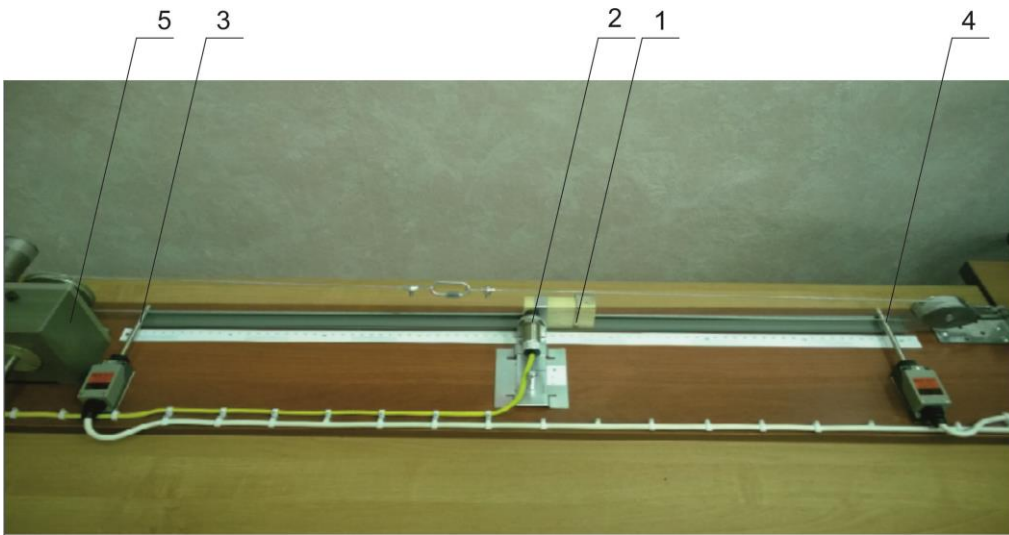


Рисунок 3.2 - Динамическая часть установки

1 - подвижный объект; 2 - индуктивный датчик положения; 3 - конечный выключатель левый (КВЛ);
4 - конечный выключатель правый (КВП); 5 - двигатель постоянного тока с редуктором

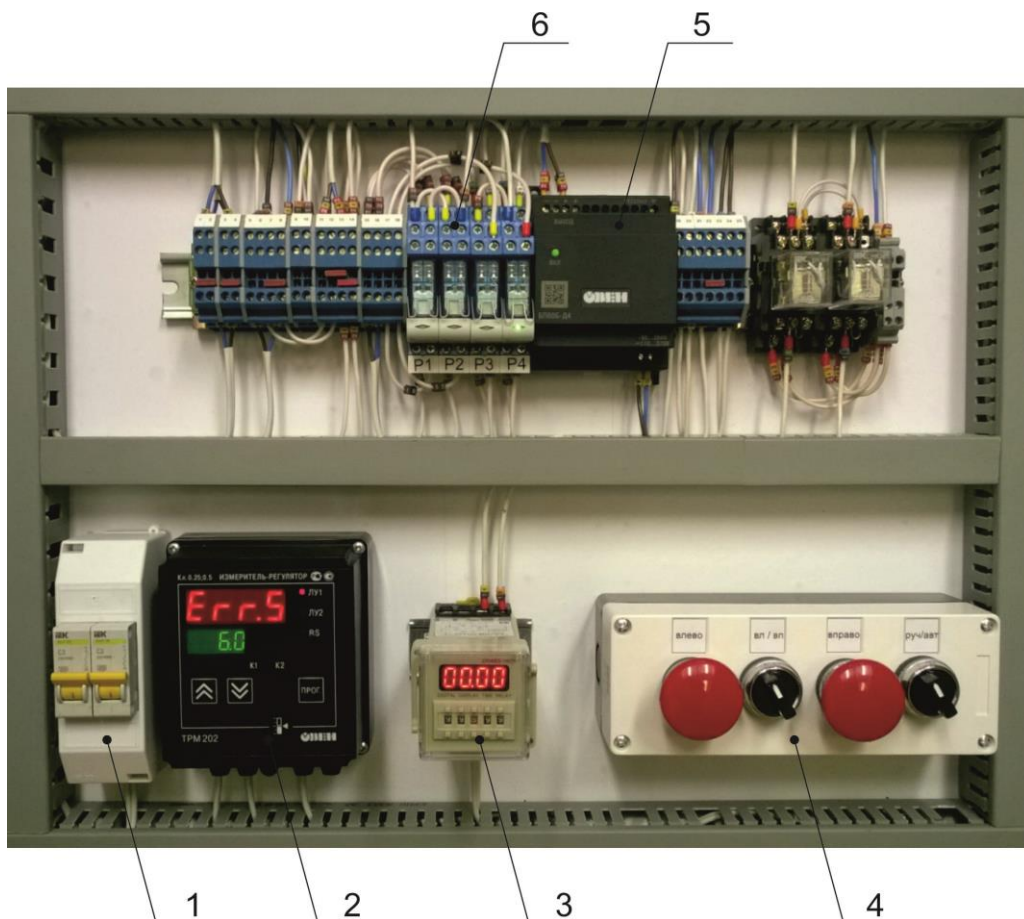


Рисунок 3.3 - Лабораторный стенд

1 - автоматический выключатель стенда, двухполюсный; 2 - измеритель TPM; 3 - секундомер;
4 - органы управления; 5 - источник питания 24 VDC; 6 - электромагнитные реле

4 Задание и методические указания на выполнение работы

- 1 Изучите теоретическую часть настоящих методических указаний к выполнению лабораторной работы.
- 2 Ознакомьтесь с электрической и механической схемами установки.
- 3 Изучите расположение элементов системы на стенде.
- 4 Ознакомьтесь с техническими характеристиками приборов и органами управления, расположенными на стенде.
- 5 Опробуйте работу стенда:
 - установите переключатель режима «Ручной/Автоматический» в положение «Ручной»;
 - переместите объект с помощью органов управления из одного крайнего положения в другое;
 - измените величину напряжения питания двигателя постоянного тока и качественно оцените его влияние на скорость объекта;
 - обратите внимание на изменение тока датчика положения при прохождении мимо него объекта.
- 6 Измерение чувствительности датчика положения.
 - 6.1 Ознакомьтесь со способами ручного перемещения подвижного объекта вдоль оси l и датчика перемещения вдоль оси h .
 - 6.2 Снимите зависимость $I = f(l)$, где I - ток датчика положения, l - положение датчика относительно подвижного объекта, для фиксированных значений h . Для h задать следующие значения: 1, 2, 3, 4, 5 мм. В качестве нулевой точки следует выбрать точку с минимальным выходным токовым сигналом (см. рисунок 4.1). Все кривые представьте на одном графике.

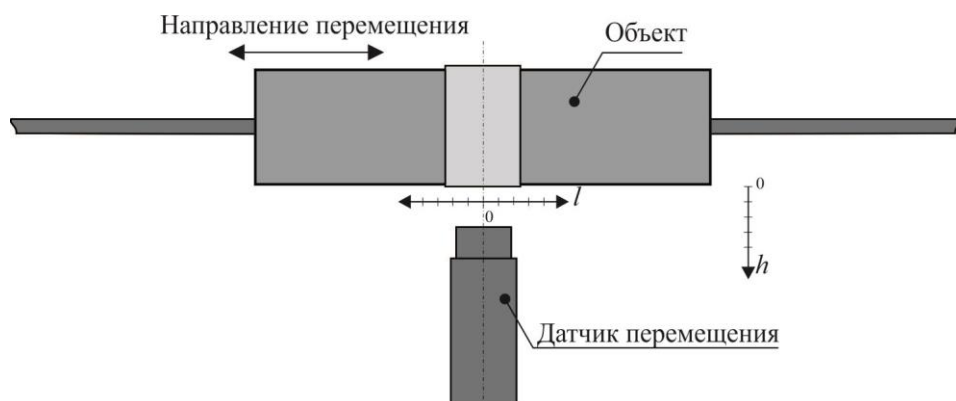


Рисунок 4.1 - Положение объекта в исходном состоянии

- 6.3 По полученным в п. 6.2 результатам постройте зависимость $k = f(h)$ для положения $l=0$. Чувствительность датчика положения рассчитайте следующим образом $k = I/h$. В соответствии с вариантом, проверьте полученные результаты для положения $l \neq 0$.
- 6.4 Установите датчик положения от прибора на расстоянии h в соответствии с вариантом. На приборе установите границу контроля $1,5I_0$ (I_0 - минимальное значение тока для заданного значения h).

Таблица – Варианты заданий

Вариант	Значение l , мм	Значение h , мм
1	2	2
2	4	3
3	6	4
4	3	5
5	5	1

- 7 Постройте зависимость $v = f(u)$, где v - скорость движения объекта; u - напряжение, подаваемое на двигатель постоянного тока (ДПТ). Скорость движения объекта следует считать постоянной.
- 7.1 Кнопками «Вправо/влево» установите объект в крайнее левое положение до срабатывания конечного выключателя КВЛ.
- 7.2 На монтажном поле выполните коммутацию цепей управления таймером. В цепь «Сброс» включите нормально разомкнутый контакт КВЛ, а в цепь «Стоп» - нормально разомкнутый контакт КВП. В таком состоянии на лицевой панели таймера должны гореть нули.

- 7.3 На источнике питания установите напряжение 2,5 В и ток 1,5 А. Нажмите кнопку «вправо» и удерживая её дождитесь перемещения объекта вправо до останова (срабатывания КВП).
- 7.4 Зафиксируйте время движения и рассчитайте скорость. Повторите эксперимент для напряжений 4, 6, 8 В.
- 8 Определение интервала опроса измерителя регулятора.
- 8.1 Переведите переключатель режима «Ручной/Автоматический» (руч/авт) в положение «Автоматический» (авт). Такое положение переключателя режима обеспечит автоматический останов объекта (двигателя) при достижении входным сигналом датчика перемещения величины уставки, при движении объекта в любом направлении.
- 8.2 Для заданного значения h экспериментально, изменяя напряжение на двигатель, определите максимальную скорость движения объекта, при которой происходит останов объекта. При этом объект должен пересекать осевую линию.
- 8.3 Рассчитайте максимальный и минимальный интервал работы прибора. Для расчетов примите следующее: измерение сигнала и соответствующая реакция на него происходят в соседних циклах. Пояснения к расчету интервала представлены на рисунке 4.2. Полученные результаты сравните с реальным интервалом работы.

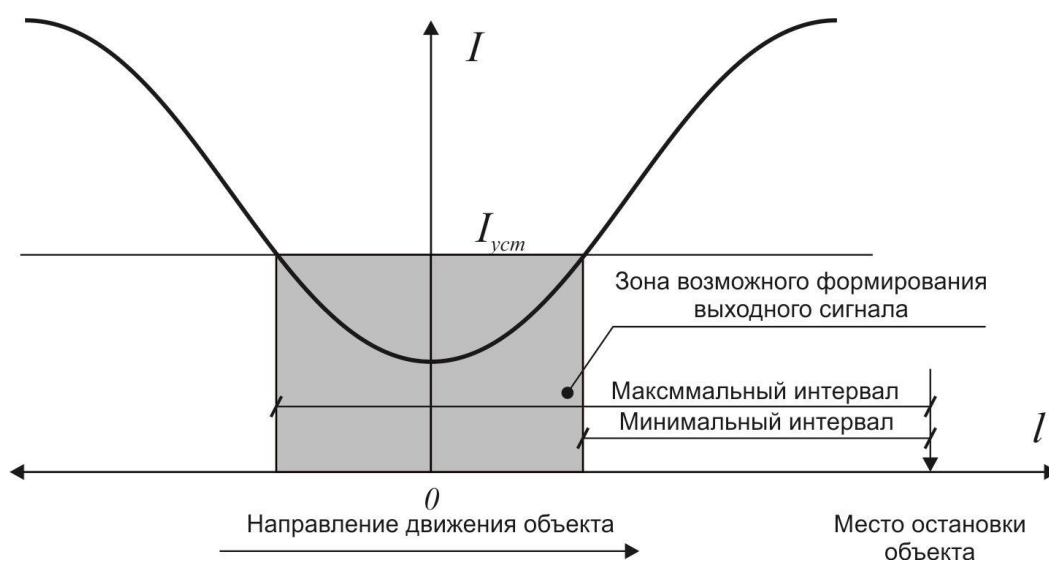


Рисунок 4.2 - Пояснения к расчету интервала работы прибора

5 Содержание отчёта

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с установленными правилами и содержать следующее.

- 1 Титульный лист с указанием номера и названия работы, фамилии студентов, выполнивших работу, дату выполнения.
- 2 Цель работы.
- 3 Электрическую схему стенда.
- 4 Необходимые таблицы, расчёты, графики и выводы по работе.
- 5 Ответы на контрольные вопросы.

6 Контрольные вопросы

- 1 Что такое индуктивность?
- 2 В каком случае индуктивность можно считать постоянной?
- 3 Приведите примеры положительного и отрицательного влияния индуктивности в практических задачах.

7 Литература

1. Исследование линейного измерительного преобразователя индукционного типа с плоскими многополюсными обмотками, Лузинский В.Т. Дис.: Москва, 2004. – 223 с.
2. Индуктивные датчики [Электронный ресурс] <http://www.wikipedia.org>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 10.04.2016).
3. Индуктивные датчики с аналоговым выходом [Электронный ресурс] <http://www.sensor.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.04.2016).

Для замечаний

Индуктивный преобразователь перемещения

Методические указания к выполнению лабораторной работы




Составитель Курганов Василий Васильевич

Подписано к печати « ____ » _____ 2021 г.

Формат 60x84-16. Бумага «Классика»

Печать RISO. Усл. печ. л. 1.16. Уч. – изд. л. 1.05.

Заказ № _____ . Тираж 20 экз.

	<p>Томский политехнический университет Система менеджмента качества Томского политехнического университета сертифицирована NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000</p>	
<p>ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.</p>		