

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОКД
_____ Суржиков А.П.
«__» _____ 2018 г.

ПОВЕРКА МАГНИТНОГО ТОЛЩИНОМЕРА МТ2003

Методические указания

к проведению лабораторной работы по курсу:
«Метрологическое обеспечение измерений, контроля и диагностики»
для студентов, обучающихся по направлениям:
12.04.01 – «Приборостроение», 27.03.02 – «Управление качеством»

Томск 2018

УДК 006.915.1; 620.191

Поверка магнитного толщиномера МТ2003. Методические указания к проведению лабораторной работы по курсам: «Метрологическое обеспечение измерений, контроля и диагностики» для студентов направления 12.04.01 – «Приборостроение», 27.03.02 – «Управление качеством».

Составители: доцент ОКД ИШНКБ ТПУ Калиниченко А.Н.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании
ОКД ИШНКБ «___» _____ 201__ г. протокол №__.

Руководитель ОКД

д.ф.-м.н. _____ А.П.Суржиков

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение физической сущности магнитной толщинометрии и области применения магнитных толщиномеров.
2. Изучение устройства и принципа действия магнитного толщиномера МТ2003.
3. Получение навыков практической работы с толщиномером МТ2003.
4. Оценка метрологических характеристик толщиномера МТ2003.
5. Изучение методики проведения поверки магнитного толщиномера МТ2003.
6. Проведение поверки прибора и оформление протокола поверки

1. ОСНОВЫ МАГНИТНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

Принцип действия магнитных толщиномеров.

Принцип действия магнитных толщиномеров основан на регистрации изменений величины и топографии внешнего магнитного поля, вызываемых контролируемым изделием.

Представим себе источник магнитного поля в виде постоянного магнита, расположенный вблизи контролируемого листа (рис. 1).

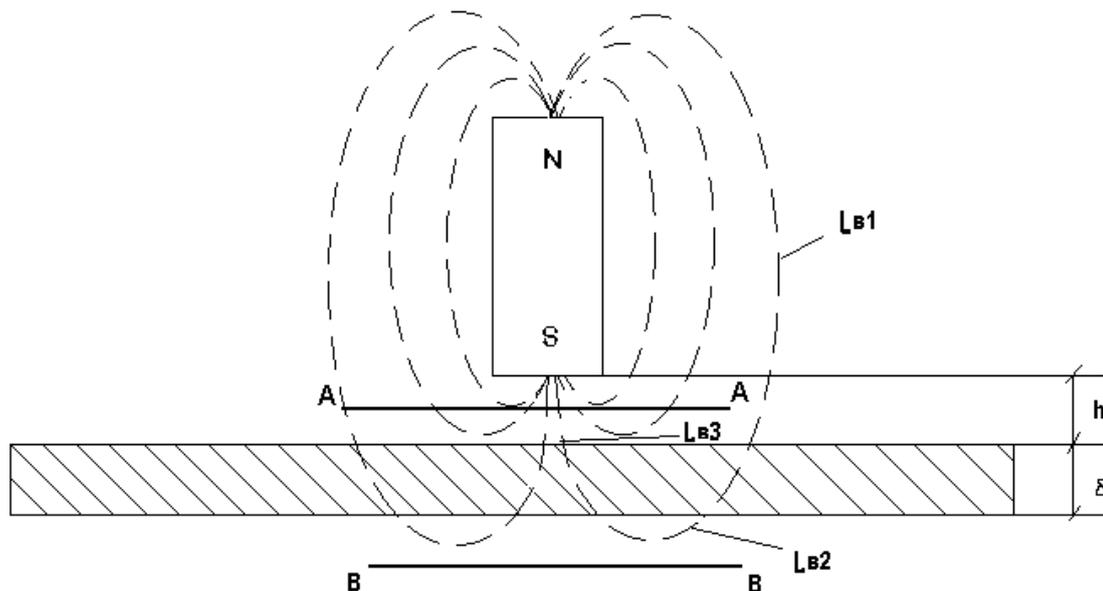


Рис. 1 Взаимодействие поля постоянного магнита с ферромагнитным листом

Для силовой линии намагничивающего поля справедливо уравнение для намагничивающей силы источника поля:

$$F_M = H_B \cdot l_B + H_M \cdot l_M, \quad (1)$$

где: l_B - длина магнитной силовой линии в воздухе;

l_M - длина магнитной силовой линии в металле;

H_B, H_M - напряженность магнитного поля в воздухе и металле соответственно.

Из условия непрерывности линий магнитной индукции следует, что индукция поля на границе раздела воздух – металл:

$$\begin{cases} B_{\text{возд}} = \mu_0 \cdot H_B \\ B_{\text{металла}} = \mu_0 \cdot \mu_M \cdot H_M \\ B_{\text{возд}} = B_{\text{металла}} = B \end{cases} \quad (2)$$

Отсюда следует, что

$$F_M = \frac{B}{\mu_0} \cdot \left(l_B + \frac{l_M}{\mu_M} \right), \quad (3)$$

Поскольку обычно $l_M \leq l_B$, а относительная магнитная проницаемость $\mu_M \gg 1$, то

$$F_M \approx \frac{B \cdot l_B}{\mu_0}, \quad (4)$$

откуда

$$B = \frac{F_M \cdot \mu_0}{l_B} = \frac{F_M \cdot \mu_0}{l_{B1} + l_{B2} + l_{B3}}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что индукция в точках воздушного пространства, расположенных над ферромагнитным листом со стороны источника поля, например, на площадке, ограниченной контуром диаметра АА, зависит от толщины листа δ и зазора h . При уменьшении h индукция B возрастает, так как уменьшаются l_{B1} и l_{B3} . При увеличении δ и $h = \text{const}$ индукция B также будет возрастать, так как уменьшается l_{B2} .

Индукция поля в контуре ВВ с увеличением толщины листа падает, так как увеличивается экранирующее действие листа.

Проведенные рассуждения показывают лишь качественную сторону процесса контроля толщины. Количественное решение задачи связано с решением трехмерной задачи магнитостатики.

Магнитные толщиномеры применяют в основном для измерения толщины проводящих и непроводящих покрытий на ферромагнитной основе:

- защитные антикоррозионные покрытия на стали – цинковые, хромовые покрытия с толщиной 10-50 мкм;
- защитные лакокрасочные покрытия с толщиной 0,1-0,5 мм;
- защитные пленочные покрытия (нефтепроводы, газопроводы, коммунальное хозяйство) с толщиной 0,2-2 мм.

Известные технические решения магнитных толщиномеров отличаются лишь способами регистрации напряженности и индукции поля в точках пространства, окружающих источник.

В зависимости от способа регистрации различают три группы толщиномеров:

- **пондеромоторные толщиномеры,**
- **магнитоэлектрические толщиномеры,**
- **индукционные толщиномеры.**

Пондеромоторные магнитные толщиномеры.

Действие пондеромоторных толщиномеров основано на измерении силы отрыва постоянных магнитов или электромагнитов от контролируемого изделия (рис. 2).

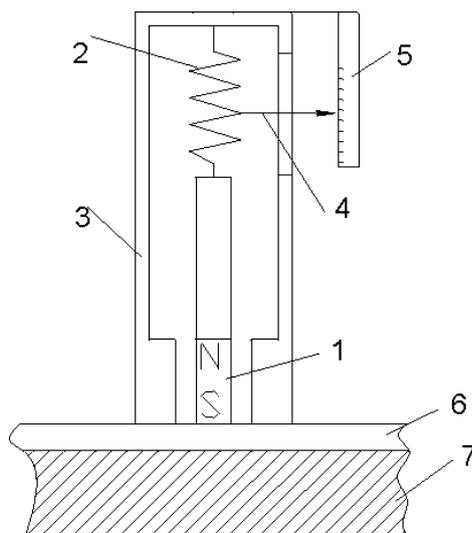


Рис.2 Условная схема пондеромоторного толщиномера:

- 1- постоянный магнит; 2- пружина динамометра; 3- корпус; 4- указатель; 5- шкала;
6- покрытие; 7- ферромагнитная основа.

Сила отрыва постоянного магнита (1) пропорциональна квадрату индукции в зазоре между ферромагнитным изделием и магнитом (в нашем случае зазор – это толщина немагнитного покрытия (6), а индукция зависит от величины зазора. При сжатии пружины (2) в момент отрыва магнита (1) от поверхности детали стрелка (4) фиксирует показание на шкале (5). Это показание условно и переводится в значение толщины в микрометрах при помощи графика, прилагаемого к паспорту прибора. Наиболее известными приборами этой группы являются толщиномеры Акулова Н.С. марки МТА-1, МТА-2 и МТА-3, предназначенные для измерения толщины покрытий в диапазонах 1 – 1500 и 1 – 50 мкм с погрешностью менее 5%.

На результаты измерения толщины покрытий в значительной степени влияют магнитные свойства материала подложки. Поэтому магнитные толщиномеры (всех трех групп) калибруются с помощью рабочих образцов, изготовленных, из той же стали, что и контролируемая деталь с покрытием заданной толщины.

Состояние поверхности (шероховатость) оказывает влияние на погрешность магнитного толщиномера. Поэтому значения приводимых погрешностей относятся к обработке, определяемой шероховатостью поверхности не более $R_z=20$ мкм, что соответствует 5-му классу чистоты поверхности. Если это особо

не оговорено, погрешности приводятся в отношении к соответствующим пределам измерения.

Основной недостаток пондеромоторных толщиномеров – цикличность результата измерения, связанная с необходимостью тщательного измерения силы до момента отрыва магнита. Это обстоятельство затрудняет автоматизирование процесса контроля.

Магнитоэлектрические толщиномеры.

В магнитоэлектрических толщиномерах (рис. 3) для регистрации изменений магнитного поля, вызванных вариацией контролируемой толщины, используется индикатор магнитного поля (4) (феррозондовый преобразователь или преобразователь Холла). Указанные преобразователи реагируют на изменение напряженности магнитного поля в цепи электромагнита (1) при изменении расстояния между ним и ферромагнитным изделием (2) из-за наличия немагнитного покрытия (3).

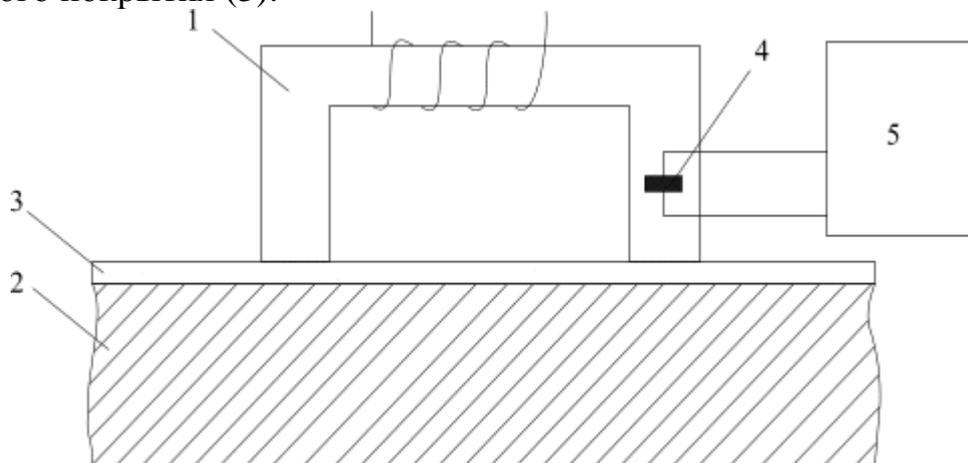


Рис. 3 Магнитоэлектрический толщиномер:

1-магнитопровод; 2- магнитное основание; 3- немагнитное покрытие; 4- индикатор магнитного поля; 5-измерительная схема.

Индукционные толщиномеры.

Для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе широкое распространение получили индукционные толщиномеры.

Их действие основано на определении изменения магнитного сопротивления магнитной цепи, состоящей из ферромагнитной основы (деталь), преобразователя прибора и немагнитного зазора между ними, который является объектом измерения. Преобразователь индукционного толщиномера представляет собой систему из трех катушек, размещенных на общем ферромагнитном сердечнике (рис. 4). Для уменьшения влияния края изделия на точность измерения стремятся локализовать магнитное поле преобразователя в месте его взаимодействия с контролируемым изделием. С этой целью удлинняют сердечник, заостряют и округляют его конец.

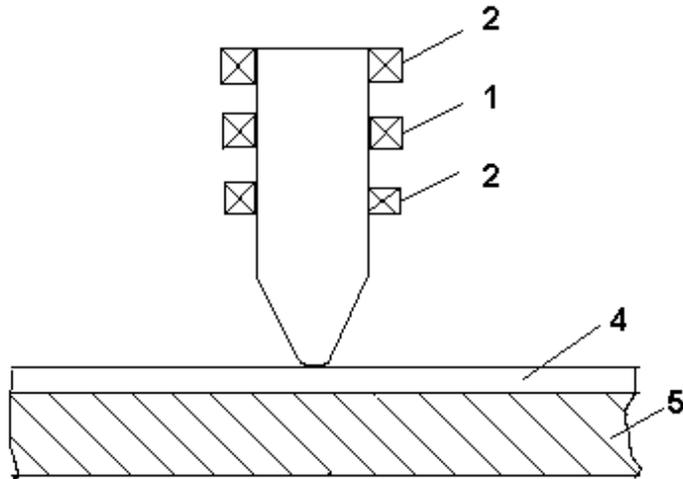


Рис. 4 Индукционный преобразователь толщиномера:
 1 – возбуждающая катушка; 2 – измерительные катушки; 3 – ферромагнитный сердечник;
 4 – покрытие; 5 – ферромагнитная основа.

Достоинства магнитных толщиномеров:

1. Возможность локального контроля толщины.
2. Портативность приборов (вес в среднем 0,1-0,3 кг), возможность запоминания и обработки результатов измерений.

Недостатки магнитных толщиномеров:

1. Контроль производится контактным способом, что предъявляет дополнительные требования к форме и чистоте поверхности изделия.
2. Влияние магнитных свойств материала на показание прибора.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАГНИТНОГО ТОЛЩИНОМЕРА МТ2003

Магнитный толщиномер МТ2003 предназначен для измерения толщин немагнитных токопроводящих и диэлектрических покрытий, нанесенных на ферромагнитное основание. Толщиномер может быть использован в цеховых и лабораторных условиях при наличии следующих факторов:

1. температура окружающей среды должна быть от 0 °С до +50 °С;
2. относительная влажность воздуха до 80% при 25 °С;
3. атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа.

Технические характеристики:

1. Диапазон измерений толщиномера МТ2003 от 5 до 2000 мкм.
2. Предел допускаемой абсолютной основной погрешности ($\delta_{\text{осн}}$) в миллиметрах не превышает величины: $\delta_{\text{осн}} = \pm(0,03 \cdot x + 1)$ мкм, где x – измеряемое значение, мкм.

3. Указанное значение погрешности обеспечивается при выполнении следующих условий:

- расстояние от края преобразователя до края основания не менее 8,0 мм;
- толщина основания не менее 0,8 мм;
- радиус кривизны поверхности основания объекта контроля не менее 20 мм.

4. Предел допускаемой дополнительной погрешности при изменении температуры окружающего воздуха от нормальной на каждые 10 °С в пределах рабочего интервала температур не превышает половины предела допускаемой основной погрешности.

5. Питание толщиномера МТ2003 осуществляется от четырех батарей типа А316 (АА). Возможно также использование батареи «Корунд» при замене батарейных клемм.

6. Ток, потребляемый от батареи, не более 20 мА.

7. Время установления рабочего режима при изменении температуры окружающего воздуха не более 15 мин.

8. Продолжительность работы толщиномера при питании его от батареи типа А316 не менее 24 ч, при этом непрерывная работа не более 4 часов. Примечание. В течение времени работы толщиномера МТ2003 допускается производить подстройку путем калибровки через каждый час.

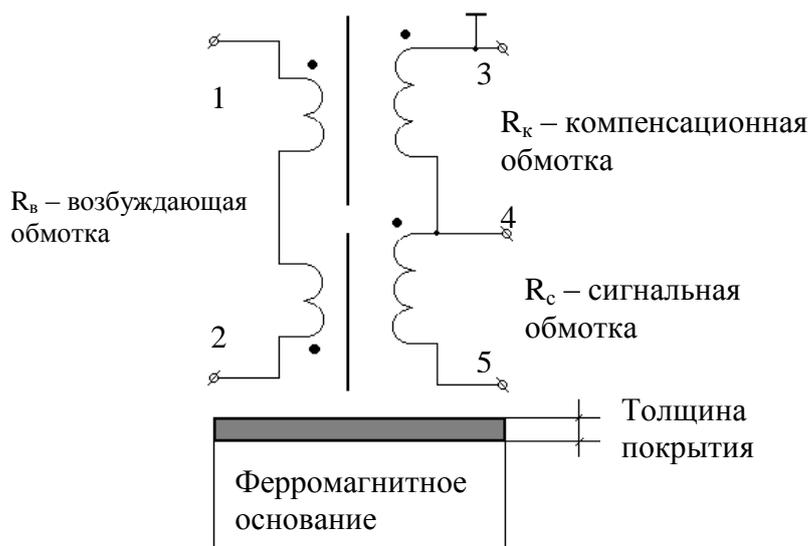
9. Толщиномер МТ2003 снабжен функцией автоматического отключения питания после двухминутного перерыва в работе.

10. Процесс измерения в толщиномере МТ2003 активизируется только при поднесении МИП к ферромагнитному изделию. Окончание измерения инициируется сдвоенным звуковым сигналом.

3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТОЛЩИНОМЕРА МТ2003

Принцип работы толщиномера МТ2003.

3.1.1 Принцип работы толщиномера заключается в регистрации изменения индукционного сопротивления, вносимого в магнитно-индукционный преобразователь (МИП) дифференциального типа при приближении его к поверхности металлического основания ОК. МИП выполнен по схеме дифференциального трансформатора. На рис. 5 приведена схема МИП.



Цвета проводников

1	2	3	4	5
Красн.	Черн.	Экран	Белый	Зелен.

Обмотки	Сопротивление обмоток (Ом)
Возбуждающая обмотка	36
Сигнальная и компенсационная обмотки	30, 30

Рис. 5 Схема магнито-индукционного преобразователя.

Измеряемая величина толщины покрытия определяется расстоянием между МИП, установленном на покрытие, и поверхностью металлического ферромагнитного основания. Регистрация изменений параметров МИП осуществляется путем его включения в качестве нагрузки низкочастотного генератора и измерения амплитуды напряжения на сигнальной обмотке.

3.1.2 Помимо расстояния между МИП и поверхностью ферромагнитного изделия выходной сигнал на ВТП воздействует также, не подлежащие измерению, другие свойства и параметры ОК, в первую очередь магнитная проницаемость μ и удельная электрическая проводимость σ ферромагнитного изделия. Практически это проявляется в том, что при одинаковой толщине покрытия, но различных μ и (или) σ основания показания прибора будут отличаться, хотя должны быть одинаковы. Для отстройки влияния удельной электрической проводимости

частота тока возбуждения МИП выбрана низкой и равной 275 Гц. Для минимизации влияния магнитной проницаемости рекомендуется применять процедуру калибровки, а в качестве образца основания использовать основание изделия, на котором предстоит проводить измерения толщин покрытий.

3.1.3 Напряжение на сигнальной обмотке МИП является нелинейной функцией от измеряемой толщины, поэтому в толщиномере осуществляется операция линеаризации, обеспечивающая прямопропорциональную зависимость показаний прибора от толщины покрытия.

Толщиномер (рис. 6) включает в себя генератор (1), у которого в качестве нагрузки используется возбуждающая катушка магнитоиндукционного преобразователя (2). Напряжение с сигнальной обмотки МИП поступает на сигнальный канал (4), где оно фильтруется и детектируется. Выходные напряжения с сигнального и опорного каналов поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) цифрового блока (5) в качестве измеряемого и опорного напряжений соответственно. Цифровой блок (5) проводит операции линеаризации и калибровки толщиномера. Блок питания (7) обеспечивает необходимые напряжения для питания электронных узлов толщиномера и обесточивает схему при двухминутном отсутствии измерений или внешних управляющих сигналов.

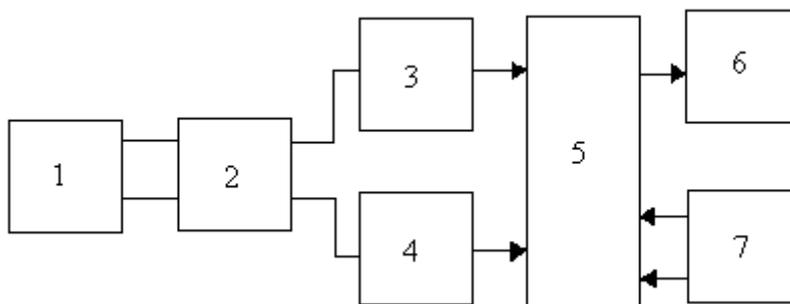


Рис. 6 Функциональная блок-схема толщиномера МТ2003:

1. Генератор тока.
2. Преобразователь.
3. Опорный канал.
4. Сигнальный канал.
5. Цифровой блок.
6. Индикатор.
7. Устройство питания.

3.1.4 На передней панели толщиномера (сверху вниз, слева направо) расположены следующие органы регулировки и управления:

- **жидкокристаллический двухстрочный индикатор** для цифровой индикации результатов измерений и отображения режимов работы прибора;
- **кнопка ВКЛ – ВЫКЛ** для выключения толщиномера;
- **кнопка ВВЕСТИ**;
- **кнопка ВЫБОР РЕЖИМА** – кнопки со стрелками, которыми осуществляют переключение режимов и необходимые установки внутри режимов.

На задней панели толщиномера расположена крышка батарейного отсека. На верхнем торце толщиномера расположен разъем для подключения магнитоиндукционного преобразователя.

4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЛЩИНОМЕРА.

4.1. В качестве метрологического обеспечения в комплект толщиномера входят **мера толщины и образец основания.**

4.2. **Мера толщины** – предназначена для калибровки и проверки работоспособности прибора. Мера толщины представляет собой диэлектрическую пластину толщиной от 50 до 1500 мкм с отклонением $\pm 1\%$. Мера толщины должна содержаться в полиэтиленовом пакете и периодически протираться спиртом от грязи, которая может привести к искажению результатов калибровки прибора.

4.3. **Образец основания** предназначен для калибровки при подготовке толщиномера к работе и при проверке его работоспособности. При калибровке на образец основания накладывают меру толщины. Образец основания представляет собой ферромагнитный (сталь 20) диск диаметром 50мм толщиной 4мм.

5. ПОРЯДОК РАБОТЫ С ТОЛЩИНОМЕРОМ

5.1 Подготовка толщиномера к работе.

5.1.1 Включить толщиномер, нажав кнопку ВКЛ-ВЫКЛ.

5.1.2 Прогреть прибор в течение 1 минуты.

5.1.3 Подготовить образец основания и меру толщины для калибровки толщиномера.

Для достижения максимальной точности измерений образец основания по марке материала, по шероховатости и кривизне должен соответствовать контролируемому изделию. Желательно использовать непосредственно участок контролируемого изделия без покрытия. Мера толщины должна быть близка к среднему значению диапазона измерений.

5.1.4 Кнопками со стрелками ВЫБОР РЕЖИМА установить режим калибровки толщиномера, при этом должна появиться надпись «КАЛИБРОВКА» на верхней строке индикатора, и нажать кнопку ВВЕСТИ – должна появиться надпись СКОМПЕНСИРУЙТЕ ДАТЧИК.

5.1.5 По этой команде поместить датчик на расстоянии не менее 10 см от металлических предметов и нажать кнопку ВВЕСТИ, после звукового сигнала должна появиться надпись УСТАНОВИТЕ ДАТЧИК НА ОБЪЕКТ.

5.1.6 Установить меру толщины на основание и установить преобразователь на меру толщины. На индикаторе должно появиться показание, равное значению меры толщины с точностью равной погрешности измерения ($\delta_{\text{осн}} = \pm(0,03x + 1)$ мкм, где x – измеряемое значение, мкм). Повторить процедуру 3 раза.

5.1.7 При отличии показаний от значения меры толщины кнопками ВЫБОР РЕЖИМА установить значение меры толщины на индикаторе с требуемой точностью. Если же показания соответствуют значению меры толщины, данный пункт пропустить.

5.1.8 После установки требуемого значения, не снимая преобразователь с меры толщины, нажать кнопку ВВЕСТИ - появляется надпись «ИЗМЕРЕНИЕ». Затем нажать повторно кнопку ВВЕСТИ, должна появиться надпись ГОТОВ..., что означает – прибор готов к измерению.

5.2 Работа с толщиномером в основном режиме.

5.2.1 После проведения калибровки (п.п. 5.1.3 – 5.1.8) толщиномер готов к измерениям в основном режиме.

5.2.2 При каждом измерении прибор подает двоякий звуковой сигнал. При проведении серии измерений в правой части индикатора будет отображаться максимальное (вверху) и минимальное (внизу) значение в серии. Если измерение проводилось в разных точках объекта контроля, это позволяет оценить разброс значения толщины покрытия на детали.

6. ПОВЕРКА ТОЛЩИНОМЕРА

6.1 Операции и средства поверки

При проведении поверки должны быть выполнены операции и применены средства поверки со следующими характеристиками:

1.	Внешний осмотр	Средства измерений, входящие в комплект толщиномера и предназначенные для их настройки
2.	Опробование	Все вышеперечисленные средства
3.	Определение основной погрешности толщиномера	Образцовые меры толщины покрытий по ГОСТ 25177-82

Допускается применять другие вновь разработанные или находящиеся в применении средства поверки, прошедшие метрологическую аттестацию в органах государственной или, с их разрешения, ведомственной службы а удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8.502-84.

6.2 Условия поверки и подготовка к ней

При проведении поверки должны быть соблюдены нормальные условия по ГОСТ 8.396-80.

Перед проведением поверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

- выдержать толщиномер и средства поверки не менее 12 ч в нормальных условиях;
- образцовые меры толщины покрытий (далее - меры) и средства для настройки толщиномера расконсервировать, промыть авиационным бензином по ГОСТ 1012-72, протереть чистой сухой салфеткой из мягкой льняной или хлопчатобумажной ткани по ГОСТ 8.352-79 и до применения выдержать в нормальных условиях не менее 1 ч;
- проверить размагниченность мер по ГОСТ 8.352-79.

6.3. Проведение поверки

6.3.1. Внешний осмотр

При внешнем осмотре толщиномера должно быть установлено:

1. соответствие комплектности проверяемого толщиномера указанной в паспорте, за исключением расходуемой части ЗИП (предохранители, комплектующие изделия и т. п.);
2. наличие маркировки (обозначения толщиномера, товарный знак предприятия изготовителя, год выпуска);
3. наличие клейма в месте, делающем невозможным вскрытие толщиномера без нарушения клейма;
4. отсутствие на толщиномере и средства измерения, входящих в его комплект, следов коррозии, грязи, механических повреждений, которые могут повлиять на работоспособность толщиномера;
5. плавность перемещения подвижной части преобразователя с нормируемым усилием;

6. надежное закрепление органов управления и индикаторов;
7. четкость нанесения надписей, гравировки шкал.

6.3.2 Опробование

При опробовании толщиномер подготавливают к работе в соответствии с его инструкцией по эксплуатации. Толщиномер настраивают в соответствии с инструкцией по эксплуатации и на каждом поддиапазоне проводят пробные наблюдения, при этом проверяют качество работы переключателей и плавность работы органов управления.

6.3.3 Определение основной погрешности толщиномера

Поверяемый толщиномер настраивают по мерам со значениями, близкими к крайним значениям поддиапазона, в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Выбирают три меры, значения толщины h_u которых равномерно распределены по шкале настроенного поддиапазона. На каждой мере проводят по пять измерений. Результаты измерений заносят в таблицу протокола поверки приведенном в приложении 1. При данном методе поверки вариация показаний отсутствует, поэтому систематическую составляющую погрешности толщиномера определяют по формуле:

$$\tilde{\Delta}_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n},$$

где $\Delta_i = h_u - h_i$ - разность номинального значения меры и показания поверяемого толщиномера при i -м измерении.

Случайную составляющую погрешности толщиномера определяют по формуле:

$$\dot{\Delta} = t \cdot \sigma$$

где t - коэффициент Стьюдента. При доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе наблюдений $n = 5$ коэффициент Стьюдента $t = 2,78$;

σ - среднее квадратичное отклонение случайной составляющей погрешности поверяемого толщиномера, определяемое по формуле:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \tilde{\Delta}_c)^2}}{\sqrt{n \cdot (n-1)}},$$

основную погрешность поверяемого толщиномера определяют по формуле:

$$\Delta = \tilde{\Delta}_c + \dot{\Delta}$$

основная погрешность не должна превышать предела допускаемой основной погрешности толщиномера для всех контрольных точек поверяемого поддиапазона. В противном случае наблюдения для данного поддиапазона необходимо повторить. При повторном превышении допускаемой основной погрешности толщиномер бракуют.

7 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 7.1 Цель работы
- 7.2 Устройство и принцип работы толщиномера МТ 2003.
- 7.3 Процедура настройки и поверки толщиномера.
- 7.4 Расчеты погрешностей
- 7.5 Ответы на контрольные вопросы
- 7.6 Выводы
- 7.7 Заключение о метрологических характеристиках толщиномера МТ2003.

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие индикаторы магнитных полей используются в магнитостатических толщиномерах?
2. Почему в индукционных магнитных толщиномерах выбирают низкую рабочую частоту?
3. Какая конструкция индукционного преобразователя используется в толщиномере МТ2003?
4. Какие конструктивные меры применяют в магнитных толщиномерах для уменьшения влияния края на результат измерения?
5. Почему в паспортных данных на толщиномер МТ2003 введено ограничение на толщину ферромагнитного основания?
5. Можно ли прибором МТ2003 измерять толщину покрытия 3 мкм?
6. Какие виды погрешности возникают при измерении толщины покрытий с помощью толщиномера и чем они обусловлены?
7. Что такое основная, систематическая и случайная погрешности? Какая между ними взаимосвязь?
8. Какие условия предъявляются к поверке прибора? Чем это вызвано?

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Толщиномер покрытий типа _____

Заводской № _____

изготовленного _____

принадлежащего _____

поверенного с помощью _____

№ набл	Показания						Разность показаний				Составляющие погрешности		Основная погрешность Δ	Допустимая погрешность
	$h_{и}$	h_i					$\Delta_i = h_i - h_{и}$				$\tilde{\Delta}_c$	$\dot{\Delta}$		

По результатам поверки толщиномер покрытий признан _____ к эксплуатации.

Руководитель лаборатории _____

Поверитель _____

Дата поверки _____ « _____ » _____ 20 _____ г.