

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой ФМПК  
\_\_\_\_\_ Суржиков А.П.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

## **ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ**

### **Методические указания**

по подготовке и выполнению лабораторной работы по курсам  
«Физические методы контроля» для студентов направления 27.04.02 -  
«Управление качеством» и «Магнитный, электрический, вихретоковый контроль»  
для студентов направления 12.03.01 - «Приборостроение»

Томск 2017

УДК 620.179.14

Измерение удельной электропроводности немагнитных металлов методом вихревых токов. Методические указания по подготовке и выполнению лабораторной работы по курсам «Физические методы контроля» для студентов направления 27.04.02 - «Управление качеством» и «Магнитный, электрический, вихретоковый контроль» для студентов направления 12.03.01 - «Приборостроение».

Составители:            доцент кафедры ФМПК Толмачев И.И.  
                                  доцент кафедры ФМПК Калиниченко А.Н.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании  
кафедры ФМПК «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. протокол № \_\_.

Зав. кафедрой ФМПК

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ А.П. Суржиков

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является: изучение принципа действия вихретоковых измерителей электропроводности; изучение устройства и технических характеристик измерителя удельной электропроводности ВЭ-17НЦ/5.

## 2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.1. Изучить принцип действия вихретоковых измерителей электропроводности и конструкцию накладного вихретокового преобразователя (НВТП).

2.2. Изучить инструкцию по эксплуатации прибора ВЭ-17НЦ/5.

2.3. Подготовить прибор к работе в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

2.4. Измерить удельную электропроводность различных немагнитных образцов, сравнить результаты измерения со справочными данными.

2.5. Исследовать влияние зазора между НВТП и поверхностью объекта контроля на погрешность измерения.

2.6. Исследовать влияние толщины объекта контроля на погрешность измерения удельной электропроводности.

2.7. Исследовать влияние края объекта контроля на погрешность измерения удельной электропроводности.

## 3. ПРИНЦИП ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Удельная электропроводность  $\sigma$  сплавов зависит от температуры и химического состава сплава (процентного содержания примесей). В некоторых случаях существует корреляция между электропроводностью металла и его механическими и структурными характеристиками, т.е. электропроводность является структурочувствительной характеристикой металла или сплава и по значению электропроводности можно проводить, например, разбраковку по маркам сплава. В случае немагнитных металлов и сплавов отсутствует влияние магнитной проницаемости объекта контроля на результат измерения и задача измерения электропроводности немагнитных металлов решается с высокой точностью методом вихревых токов. При этом обычно используют накладные вихретоковые преобразователи (НВТП), обеспечивающие высокую локальность контроля и возможность контроля тел сложной формы.

НВТП состоит из возбуждающей обмотки ВО (рис.1, а), измерительной обмотки ИО и компенсационной обмотки КО, закрепленных на диэлектрическом каркасе. Преобразователь устанавливается на объект контроля КО с толщиной  $T$ , при этом плоскость измерительной обмотки ИО отстоит от поверхности объекта контроля на расстоянии  $h$ .

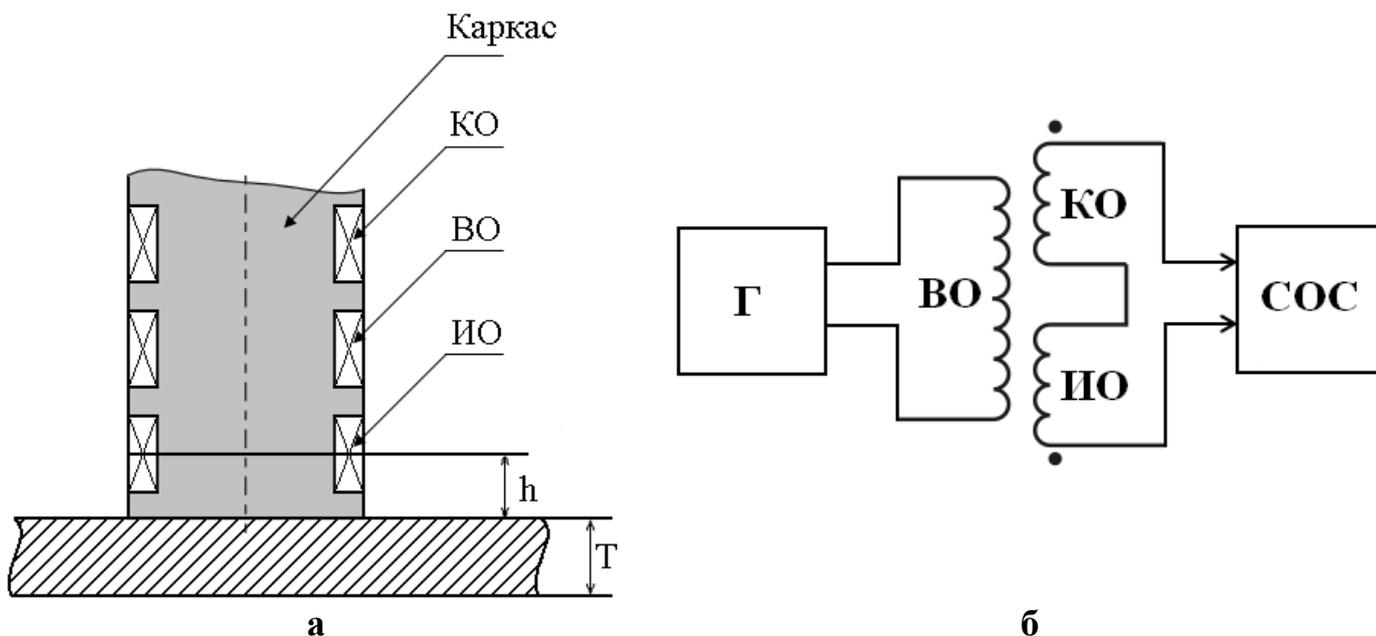


Рис.1. Конструкция НВТП (а) и схема подключения преобразователя к генератору Г и схеме обработки сигналов СОС (б)

На рис. 1.б показана схема соединения обмоток НВТП с генератором Г и схемой обработки сигналов СОС. Измерительная и компенсационная обмотки соединены последовательно встречно, выполнены с высокой геометрической и электрической точностью.

Возбуждающая обмотка НВТП наводит в объекте контроля вихревые токи, плотность и пространственное распределение которых зависит от электропроводности  $\sigma$  материала объекта контроля, от зазора  $h$  и от частоты  $\omega$  возбуждающего поля. Наведенные в ОК вихревые токи создают свое электромагнитное поле, возбуждающее в измерительной обмотке э.д.с., которая называется вносимой  $E_{вн}$  и функционально связана с величинами  $\sigma$ ,  $h$ , и  $\omega$ .

$$E_{вн} = f(\sigma, h, \omega) \quad (1)$$

Вносимая э.д.с. наводится, в основном, в измерительной обмотке, приближенной к поверхности объекта контроля и практически не наводится в компенсационной обмотке. В отсутствии объекта контроля в измерительной и компенсационной обмотке наводятся равные величины э.д.с.  $E_0$ , которая называется начальной э.д.с. За счет встречного включения обмоток эти э.д.с. вычитаются и выходное напряжение НВТП на воздухе (без объекта контроля)  $\approx 0$ , а на объекте контроля  $I_{ВТП} \approx I_{ВН}$ . Если при контроле обеспечить  $\omega = \text{const}$ , то  $E_{вн} = f(\sigma, h)$  т.е. вносимое напряжение будет нести полезную информацию о электропроводности объекта контроля и мешающую информацию о зазоре. Аналитическое выражение (1) сложно и ненаглядно, поэтому пользуются обычно графическим представлением этой зависимости (рис.2) для нормированного значения вносимой э.д.с.:

$$E_{вн}^* = E_{вн}/E_0 \quad (2)$$

что позволяет исключить зависимость от частоты и геометрических размеров НВТП.

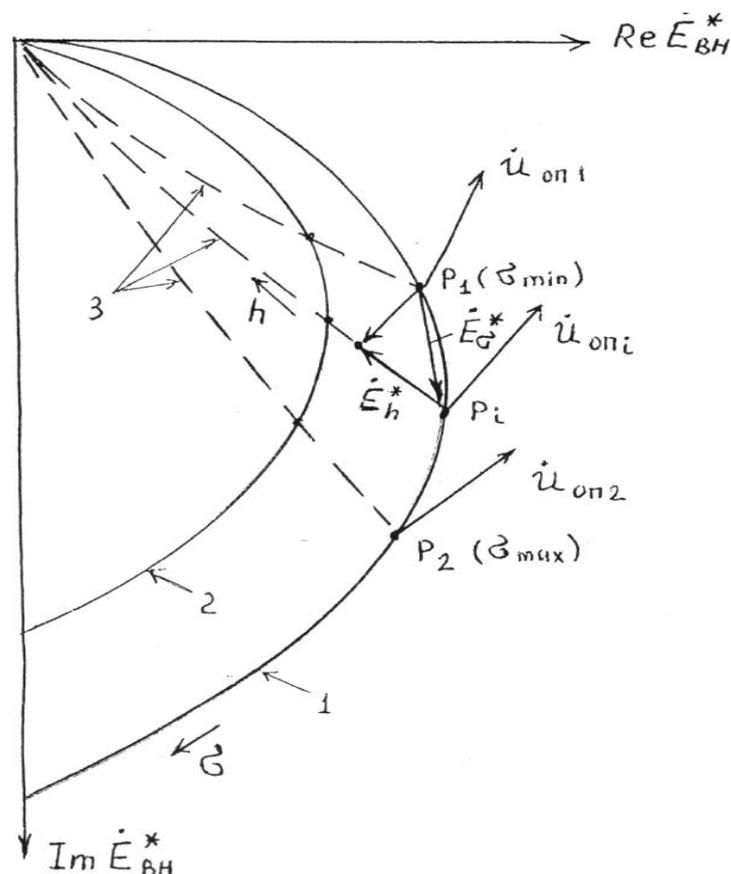


Рис 2. Комплексная плоскость вносимой э.д.с. накладного ВТП:  
 1, 2 - годографы удельной электропроводности; 3 - годографы зазора;  
 $OP_1$  - вектор вносимой э.д.с. для объекта контроля с минимальной электропроводностью;  $OP_2$  - вектор вносимой э.д.с. для объекта контроля с максимальной электропроводностью.

Рассматриваемая зависимость представляется на комплексной плоскости вносимой э.д.с. с осями координат, образованными вещественной частью  $Re E_{вн}^*$  и мнимой частью  $Im E_{вн}^*$  вносимой э.д.с.

На комплексной плоскости нормированная вносимая э.д.с  $E_{вн}^*$  изображается вектором  $OP_i$ , причем для точки  $P_i$  существует однозначный набор параметров  $\sigma$ ,  $h$ , и  $\omega$ .

Линии, описываемые вектором  $OP_i$  при изменении влияющих параметров, называются в общем случае годографами э.д.с. В частных случаях, при изменении только одного параметра, линии называются годографами соответствующего влияющего параметра. Например, при изменении частоты возбуждающего тока конец вектора  $OP_i$  будет описывать линии, называемые годографами частоты, при изменении  $\sigma$  годографами электропроводности, а при изменении зазора  $h$  годографами зазора.

На рис.2 линия 1 является годографом электропроводности в диапазоне изменения  $\sigma$  от 0 до  $\infty$  при постоянной частоте и зазоре, равном нулю (зазор может быть равен нулю только теоретически). Линия 2 - годограф электропроводности при зазоре, отличном от нуля. При любых других значениях зазора годографы электропроводности подобны приведенным и отличаются от

них размером. С ростом зазора модуль вектора  $OP_i$  уменьшается и в пределе при  $h \rightarrow \infty$  годограф электропроводности стягивается в точку, лежащую в начале координат.

Если  $\sigma$  и  $\omega$  постоянны, а будет изменяться зазор  $h$ , то конец вектора  $OP_i$  (точка  $P_i$ ) будет перемещаться по пунктирной линии от точки  $P_i$ ; лежащей на годографе 1, к началу координат, таким образом, годографы зазора и годографы электропроводности криволинейны. На практике это означает, что при изменении электропроводности  $\sigma$  в интересующем нас диапазоне (например, ему соответствует точки  $P_1$  и  $P_i$  на годографе электропроводности) и при изменении зазора  $h$  в заданном диапазоне (по условиям контроля, например, при контроле под слоем защитного диэлектрического покрытия), изменение модуля и фазы вносимого напряжения  $E_{вн}$  могут иметь равный порядок. Это учитывается при разработке аппаратуры для измерения электропроводности.

В серийно выпускаемом измерителе электропроводности ВЭ-20Н для исключения влияния зазора на результат измерения применяется амплитудно-фазовый способ обработки сигнала НВТП. Амплитудно- фазовый детектор (АФД) - это устройство, выходной сигнал  $U_{вых}$  которого пропорционален проекции входного сигнала  $U_{вх}$  на направление вектора опорного напряжения  $U_{опорн}$ .

$$U_{вых} = U_{вх} \cos(U_{вх} U_{опорн}) \quad (3)$$

Например, для рабочей точки  $P_i$  составляющая выходного сигнала НВТП, обусловленная изменением зазора  $h$ , обозначена вектором  $E_h^*$ . Для подавления этой составляющей сигнала вектор опорного напряжения  $U_{опн}$  должен иметь направление, составляющее  $90^\circ$  с направлением вектора  $E_h^*$ . При выполнении этого условия выходное напряжение АФД будет нечувствительно к колебаниям зазора и, следовательно, будет обеспечена отстройка от влияния мешающего фактора.

Более совершенной разработкой является измеритель электропроводности ВЭ-17НЦ15. В этом приборе используется зависимость фазы вносимого напряжения  $E_{вн}^*$  от электропроводности. Структурная схема прибора приведена на рис.4.

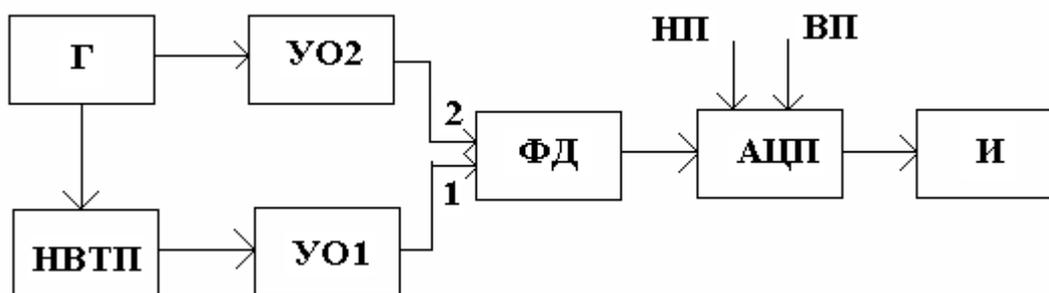


Рис.4. Структурная схема измерителя электропроводности. ВЭ-17НЦ/5

Задающий генератор  $\Gamma$  частотой 100 кГц питает обмотку возбуждения НВТП (рис.1). Разность напряжений измерительной и компенсационной обмоток поступает на усилитель ограничитель  $У01$  и далее на первый вход фазового детектора  $\Phi Д$ . Напряжение с генератора через усилитель ограничитель  $У02$  поступает на второй (опорный) вход фазового детектора. Фаза напряжения на

втором входе ФД постоянна, а фаза напряжения на первом входе ФД несет информацию об электропроводности объекта контроля (рис.2). Фазовый детектор преобразует разность фаз в постоянное напряжение, которое поступает на блок аналого-цифрового преобразователя АЦП. Поскольку зависимость фазы вносимого напряжения НВТП от электропроводности нелинейна, то блок АЦП осуществляет преобразование постоянного напряжения в цифровую форму с одновременной линейризацией зависимости (способом кусочно-линейной аппроксимации кривой), изменяя коэффициент передачи АЦП в точках излома аппроксимирующей прямой. В АЦП происходит также установка нижнего предела НП и верхнего предела ВП измерения при калибровке прибора.

Отстройка от влияния зазора реализована в приборе следующим способом. Для НВТП линия влияния зазора не является прямой (рис.5), поэтому фаза вносимого напряжения  $OP_1$  зависит от зазора. Если необходимо отстроиться от влияния зазора в диапазоне от  $h_1$  до  $h_2$  необходимо провести касательную  $MM$  к линии зазора в точке  $h_{cp}$  (среднее значение зазора от  $h_1$  до  $h_2$ ) и выбрать новое начало координат комплексной плоскости  $O'$ . Очевидно, что фаза вектора  $O'M$  очень слабо зависит от зазора в диапазоне от  $h_1$  до  $h_2$ , т.е. происходит отстройка от влияния зазора. Для того, чтобы на практике вместо фазы вектора  $OP_1$  измерить фазу вектора  $O'M$ , необходимо к вектору вносимого напряжения  $OP_1$  постоянно суммировать дополнительный вектор  $OO'$ . Для получения вектора  $OO'$  применен следующий прием - в НВТП измерительная и компенсационная обмотки выполнены с разным количеством витков, причем так, что разность начальных э.д.с. этих обмоток (в отсутствие объекта контроля) равна вектору  $OO'$ . При установке на объект контроля на выходе НВТП появляется сумма напряжений  $OP_1 + OO'$ , т.е. напряжение  $O'M$ .

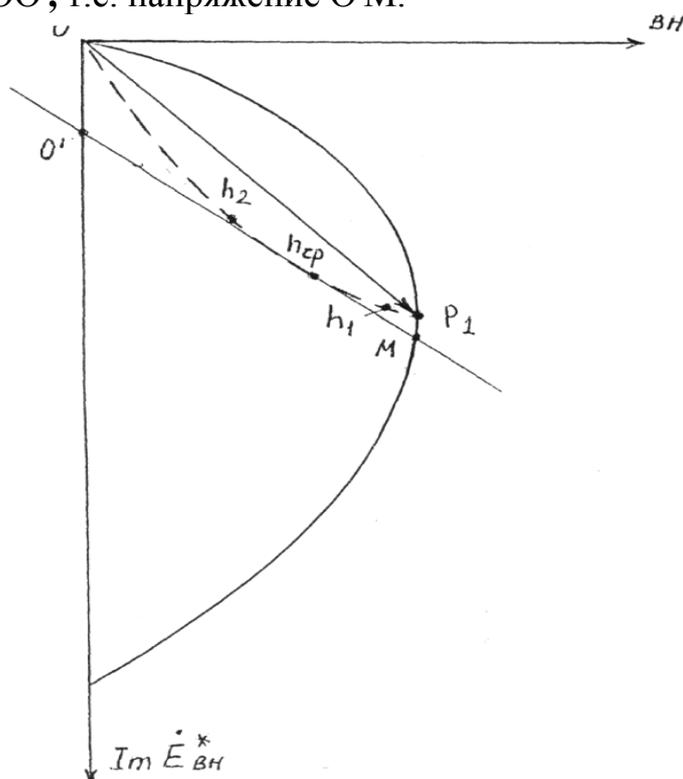


Рис. 5. Отстройка от влияния зазора при измерении электропроводности фазовым способом путем смещения начала координат комплексной плоскости.

#### **4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА ВЭ-17НЦ/5**

- 4.1. Диапазон измерений 10 - 35 МСм/м.
- 4.2. Основная относительная погрешность не более  $\pm 2\%$ .
- 4.3. указанная погрешность обеспечивается при условиях:
  - зазор между преобразователем и объектом контроля не более 0,2мм;
  - шероховатость контролируемой поверхности не ниже  $R_z=80$ ;
  - толщина объекта контроля не менее 1,0мм;
  - радиус кривизны поверхности не менее 30мм;
  - расстояние от центра преобразователя до края объекта контроля не менее 5мм;
  - угол отклонения оси преобразователя от нормали к объекту контроля не более  $10^\circ$ .
- 4.4. Дополнительная температурная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха, не более 0,5 основной погрешности на  $10^\circ\text{C}$ .
- 4.5. Нестабильность показаний не более  $\pm 1$  единицы младшего разряда.
- 4.6. Измеритель не требует прогрева после включения питания. Рабочий режим устанавливается сразу после включения.
- 4.7. Режим работы циклический, с однократным запуском и запоминанием результата измерения.
- 4.8. В процессе работы допускается подстройка прибора внешними органами через каждые 30 мин.

#### **5. ПОДГОТОВКА ПРИБОРА К РАБОТЕ**

- 5.1. Для настройки прибора необходимо воспользоваться специальным имитатором электропроводности, представляющим металлическую пластинку с напыленным электропроводным слоем и линейкой. Электропроводность пластинки плавно изменяется и имеет значения, приведенные в табл.1.
- 5.2. Установить преобразователь на имитатор электропроводности в точку со значением электропроводности 10 МСм/м.
- 5.3. Нажать кнопку включения питания на корпусе преобразователя.
- 5.4. Вращением регулировки НП нижнего предела шкалы измерения установить на индикаторе прибора показание 10 МСм/м.
- 5.5. Установить преобразователь на имитатор электропроводности в точку со значением электропроводности 30 МСм/м.
- 5.6. Нажать кнопку включения питания на корпусе преобразователя.
- 5.7. Вращением регулировки ВП верхнего предела шкалы измерения установить на индикаторе прибора показание 30.0 МСм/м.
- 5.8. Повторить процедуру по п.п. 5.2 - 5.7 несколько раз, добиваясь точной настройки (с допустимым отклонением  $\pm 1$  единица младшего разряда).

Таблица 1

Значение имитатора электропроводности, МСм/м	Деление шкалы имитатора, мм
8	14,5
10	29,0
15	67,5
20	92,0
30	111,5
40	138,5

## 6. ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКТ

В состав лабораторного комплекта входят:

- Вихретоковый измеритель электропроводности **ВЭ-17НЦ/5**.
- Имитатор электропроводности.
- Набор образцов разной толщины из бронзы, меди и дюралюминия.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить принцип отстройки от влияния зазора при измерении электропроводности в приборе ВЭ-17НЦ/5.
2. Почему толщина образца влияет на погрешность измерения удельной электропроводности?