

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# *ДЕФЕКТОСКОПИЯ*

№9

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*

2013

## К ВОПРОСУ О КАЛИБРОВКЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ТОЛЩИНОМЕРОВ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

*А.И. Потапов, В.А Сясько, А.Е. Некий, А.В. Сясько*

**Рассмотрены вопросы градуировки и одноточечной калибровки вихретоковых фазовых преобразователей на примере толщиномеров защитных металлических покрытий.**

**Ключевые слова:** покрытие, толщина покрытия, толщиномер, вихретоковый преобразователь, измерение.

Металлические покрытия, получаемые электрохимическими (гальваническими) способами, имеют широкое применение в машиностроительных производствах. Наиболее распространенным из них является цинковое, что обусловлено следующими причинами [1]:

высокая природная стойкость вследствие образования на цинке в коррозионной среде защитных пленок из продуктов коррозии;

высокая анодность защиты стали в атмосферных условиях и в пресной воде при температурах до 70 °С;

высокая технологичность получения покрытий и сравнительно малая себестоимость.

Срок службы цинкового покрытия определяется прежде всего его толщиной  $T_n$ .

Вихретоковый фазовый метод измерения толщины металлических покрытий основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля первичного измерительного преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля, зависящих от контролируемого параметра  $T_n$  и мешающих параметров: электропроводностей  $\sigma_m$  покрытия и  $\sigma_o$  основания, магнитной проницаемости основания  $\mu_{осн}$ , геометрических характеристик изделия (диаметра  $d$ , шероховатости  $R_z$  и др.), а также величины зазора  $h$  между металлическим покрытием и контактной поверхностью преобразователя.

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1. Преобразователь, представленный на рис. 2, выполнен в малогабаритном цилиндрическом корпусе, соединяемом с электронным блоком кабелем, по которому по дается напряжение питания и организуется канал связи UART14400.

Конструкция чувствительного элемента, имеющего близкие к минимальным технологически достижимые размеры, при указанном диаметре ферритового сердечника обеспечивает эквивалентный радиус обмотки возбуждения  $R \sim 1,5$  мм. Ферритовый сердечник от истирания защищен сменным защитным колпачком, который отлит из стеклонаполненного полимера. Контактная поверхность колпачка квазисферическая. Элементы элек-

---

Анатолий Иванович Потапов, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой приборостроения Национального минерально-сырьевого университета "Горный". Санкт-Петербург. Тел. (+7-921) 9556085. E-mail: [apot@mail.ru](mailto:apot@mail.ru)

Владимир Александрович Сясько, доцент кафедры приборостроения Национально-го минерально-сырьевого университета "Горный", генеральный директор ЗАО "Константа". Санкт-Петербург. Тел. (812) 3722904. 9334343. E-mail: [9334343@rambler.office@constanta.ru](mailto:9334343@rambler.office@constanta.ru)

Антон Евгеньевич Ивкин, канд. техн. наук, ассистент кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета "Горный", Санкт-Петербург. Тел. (812) 3722904. E-mail: [soman\\_86@mail.ru](mailto:soman_86@mail.ru)

Алексей Владимирович Сясько, студент Санкт-Петербургского государственного университета. Тел. 89110948104. E-mail: [office@constanta.ru](mailto:office@constanta.ru)

тронной схемы располагаются на печатной плате, устанавливаемой внутри корпуса преобразователя.

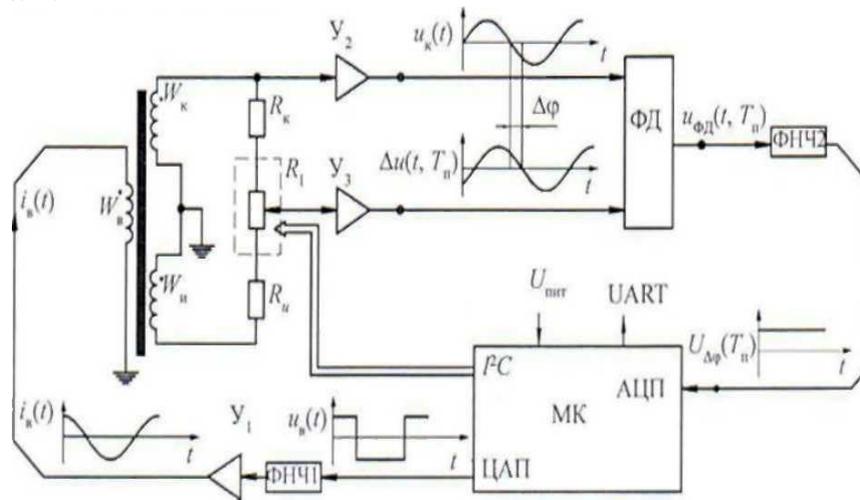


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:

$Y_1$ — $Y_3$  — усилители; ФД — фазовый детектор; ФНЧ1 — ФНЧ2 — фильтры низкой частоты;  $W_e$  — обмотка возбуждения;  $W_k$  и  $W_n$  — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки; МК — микроконтроллер;  $R_1$  — управляемый цифровой балансирующий потенциометр.

Обмотка  $W_e$  возбуждается синусоидальным током  $i_e(t)$  частоты  $f$ . Усиленное разностное (вносимое) напряжение  $\Delta u(t, T_n)$  поступает на фазовый детектор ФД. опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение  $u_k(t)$  с выхода компенсационной обмотки  $W_k$ . Постоянное напряжение  $U_{\Delta\phi}$  на выходе фильтра низкой частоты пропорционально

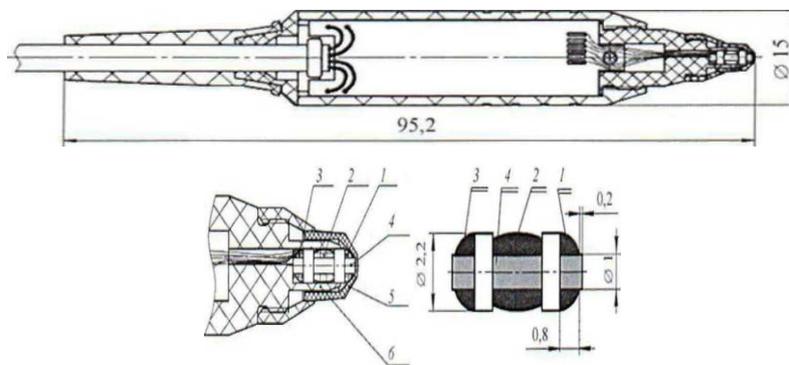


Рис. 2. Накладной вихретоковый фазовый преобразователь с миниатюрным чувствительным элементом и сменным защитным колпачком:

1 — измерительная  $W_u$ ; 2 — возбуждающая  $W_e$ ; 3 — компенсационная  $W_k$  обмотки; 4 — ферритовый сердечник; 5 — защитный колпачок; 6 — корпус.

разности фаз  $\Delta\phi$  напряжений  $u_k(t)$  и  $\Delta u(t, T_n)$ . Балансировку обмоток преобразователя производят с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером. Представленная схема обеспечивает погрешность измерения  $\Delta\phi$  не более  $\pm 0,05^\circ$ . Максимальная частота тока возбуждения составляет 3,7 МГц.

## К вопросу о калибровке вихретоковых фазовых преобразователей...

Для удобства и упрощения аналитического описания чувствительных элементов рассматриваемых вихретоковых преобразователей удобно использовать обобщенный параметр вихретокового контроля

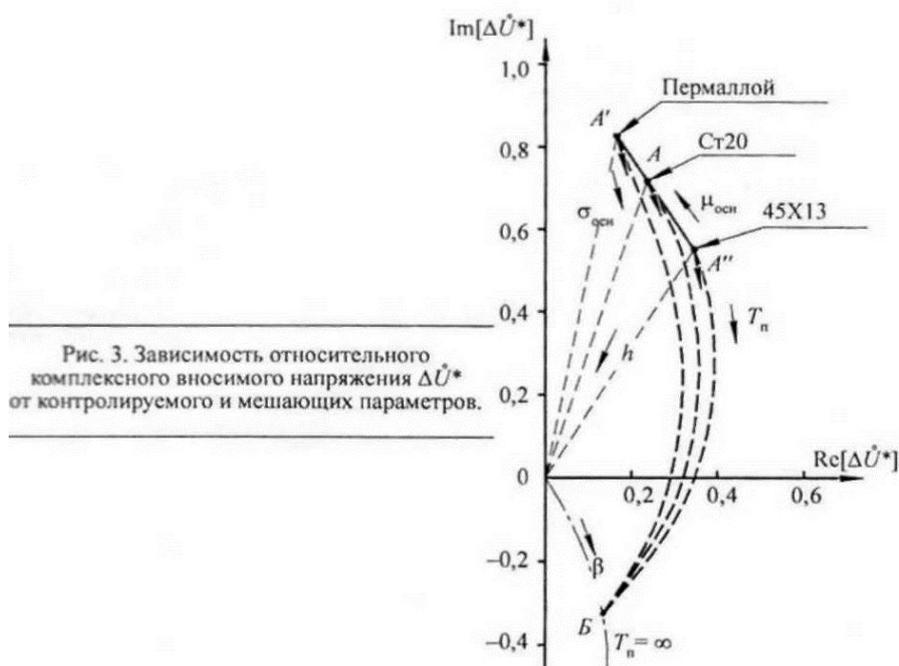
$$\beta = R\sqrt{2\pi f\mu_r\mu_0\sigma}, \quad (1)$$

где  $R$  — эквивалентный радиус обмотки возбуждения;  $\sigma$  — электропроводность материала;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость материала (для неферромагнитных материалов  $\mu_r = 1$ ).

При постоянстве параметров вихретокового преобразователя для задач измерения толщины металлических неферромагнитных покрытий электропроводностью  $\sigma_{\Pi}$  (цинк, хром, кадмий и т. д.) на ферромагнитных сталях электропроводностью  $\sigma_0$  обобщенный параметр будет изменяться от  $\beta_0 = R\sqrt{2\pi f\mu_r\mu_0\sigma_0}$  при  $T_{\Pi} = 0$  до  $\beta_{\Pi} = R\sqrt{2\pi f\mu_r\mu_0\sigma_{\Pi}}$  при  $T_{\Pi} = \infty$ .

В соответствии с [2] глубина проникновения вихревых токов  $\delta = R\sqrt{2}/\beta$ . Для приближенной оценки максимальной измеряемой толщины неферромагнитного электропроводящего покрытия можно использовать выражение

$$T_{\Pi \max} = 1/\sqrt{\pi f\sigma\mu_0}$$



Проанализируем представленную на рис. 3 зависимость относительного комплексного вносимого напряжения  $\Delta\dot{U}^* = \Delta\dot{U}/\Delta\dot{U}^0$  ( $\mu_{осн} = \infty$ ,  $T_{\Pi} = 0$ ) от контролируемого и мешающих параметров при измерении толщины цинкового покрытия на стальных основаниях для преобразователя с частотой возбуждения  $f = 0,2$  МГц и эквивалентными радиусами обмоток  $R = 1,5$  мм.

Дугой  $AB$  на рис. 3 обозначен годограф  $\Delta U^*$  при увеличении толщины покрытия от нуля (точка  $A$ ) до  $T_{\Pi \max}$  (точка  $B$ , соответствующая  $T \gg \delta$ ).

При увеличении  $h$  годограф  $\Delta\dot{U}^*$  для сбалансированного преобразователя будет представлять практически прямую линию, идущую в точку начала координат. Балансировка преобразователя по известным принципам [3] позволяет подавить влияние девиации  $h$  на фазу разностного напряжения в требуемом диапазоне.

Линией  $A'A''$  обозначен годограф  $\Delta\dot{U}^*$  при изменении магнитной проницаемости стального основания. Точка  $A'''$  соответствует наибольшей магнитной проницаемости (электротехническое железо, пермаллой), а точка  $A''$  - наименьшей магнитной проницаемости (высокоуглеродистые легированные ферромагнитные стали).

Изменение  $\sigma_0$  также влияет на  $\Delta\dot{U}^*$ . Девиация электропроводности стали в пределах партии изделий может достигать 3 - 10%, однако из-за своего малого абсолютного значения ( $\approx 1-3$  МСм/м) ее влиянием на результаты измерения можно пренебречь [3].

На рис. 4 представлена зависимость информативного параметра  $\Delta\phi(T_{II})$  для рассматриваемого случая.

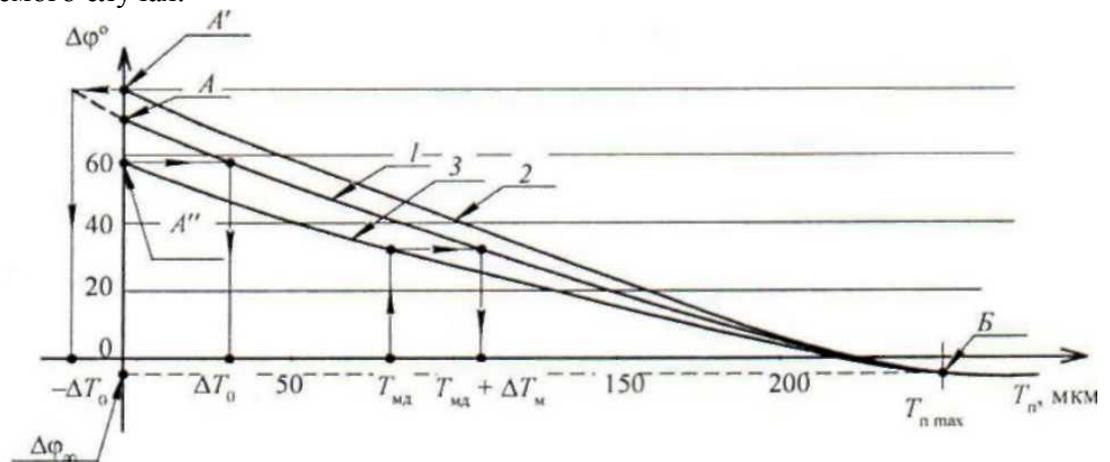


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\phi(T_{II})$  для цинкового покрытия па стальных основаниях:  
1 — Ст20; 2 — пермаллой; 3 — 45Х13.

Изображенная на рис. 4 кривая 7 является градуировочной характеристики кой вихретокового фазового преобразователя, снимаемой на эталонных мерах толщины цинкового покрытия, наносимых на основания из стали Ст20 [5].

Если покрытие нанесено на сталь, магнитная проницаемость которой отличается от магнитной проницаемости стали Ст20, то точка, соответствующая  $T = 0$ , сместится (диапазон смещения от  $A'$  до  $A''$ ) а точка  $B$ , соответствующая расчетному значению  $T_{II \max}$ , останется практически неизменной. Произойдет изменение характеристики преобразования, приводящее к возникновению дополнительной погрешности измерения  $\Delta T_{II}$  ( $\mu$ ).

Для исключения данной дополнительной погрешности измерения в соответствии с существующими методиками измерений необходимо проводить процедуру калибровки измерительного преобразователя. В настоящее время ведущие европейские производители регламентируют двухточечную калибровку вихре-токовых фазовых преобразователей, включающую в себя два этапа [4]:

устранение аддитивной составляющей погрешности  $\Delta T_0$  установкой "нуля" на образце изделия без покрытия; устранение мультипликативной составляющей погрешности ( $\Delta T_0 - \Delta T_M$ ) настройкой верхнего предела измерения с использованием аттестованной натурной меры толщины металлического покрытия  $T_{МД}$  на основании из материала изделия.

При данном методе калибровки действительная толщина покрытия  $T_{IIд}$  равна

$$T_{\text{пд}} = T_{\text{изм}} + \frac{\Delta T_0 - \Delta T_M}{T_{\text{мд}}} T_{\text{изм}} - \Delta T_0 \quad (2)$$

где  $T_{\text{изм}}$  — результат измерения толщины металлического покрытия на изделии по градуировочной характеристике.

Данный метод дает вполне удовлетворительные результаты. Однако для калибровки необходимо изготавливать натурные меры толщины покрытия практически для всех материалов оснований, используемых в производственном процессе. Существенное расширение номенклатуры натуральных мер, а также их высокая стоимость с учетом необходимости аттестации затрудняют и замедляют процесс внедрения средств измерений на предприятиях.

Исключить указанный недостаток позволяет предлагаемый метод одноточечной калибровки (установки "нуля") вихретоковых фазовых преобразователей с использованием специального алгоритма вычислений. Суть метода заключается в том, что максимальной измеряемой толщине покрытия  $T_{\text{п max}}$  соответствует некоторое единственное значение  $\Delta\phi_\infty$ , практически не зависящее от магнитной проницаемости основания, при условии, что  $\sigma_{\text{п}}$  является постоянной величиной (см. рис. 3, 4). Для цинкового покрытия при  $f = 0,2$  МГц и  $R = 1,5$  мм  $T \approx 250$  мкм.

Рассмотрим алгоритм одноточечной калибровки для случая, когда у изделия магнитная проницаемость основания  $\mu_{\text{осн}}$  меньше магнитной проницаемости стали Ст20, используемой для изготовления эталонных мер толщины цинкового покрытия, на которых осуществлялась градуировка преобразователя.

Одноточечную калибровку выполняют по следующему алгоритму. Установив преобразователь на контролируемое изделие без покрытия и проведя измерение, получаем некоторый отличный от нуля результат измерения  $\Delta T_0$ . В качестве второй точки для расчета поправочных коэффициентов будем использовать рассчитанное значение  $T_{\text{п max}}$ . В этом случае при измерениях действительное значение толщины покрытия  $T_{\text{пд}}$  будем вычислять по формуле

$$T_{\text{пд}} = T_{\text{изм}} + \frac{\Delta T_0}{T_{\text{п max}}} T_{\text{изм}} - \Delta T_0 \quad (3)$$

Для рассматриваемого случая при данном методе калибровки  $\Delta T_{\text{п}} (\mu) < \pm (0,01 T_{\text{п}} + 1)$  мкм в диапазоне контролируемых толщин до 100 мкм, что не хуже, чем при рассмотренном выше методе калибровки по двум точкам.

Также следует отметить, что при использовании в качестве оснований эталонных мер толщины стали Ст20 в случае, когда у изделия относительная магнитная проницаемость основания  $\mu_{\text{осн}} > \mu_{\text{Ст20}}$  возникает неопределенность при установке нуля, так как в области отрицательных толщин у прибора отсутствует реальная градуировочная характеристика, что также вызывает погрешность измерения (см. рис. 4). Из этого следует, что основания для комплектов эталонных мер толщины покрытия следует изготавливать из стали, у которой  $\mu_{\text{осн}} \geq \mu_{\text{осн } i}$  для всех изделий.

Использование предлагаемого метода калибровки исключает необходимость изготовления комплектов натуральных мер толщины металлических покрытий, что существенно снижает трудозатраты на подготовку комплекта средств измерений и дает существенный эффект в условиях производств с широкой номенклатурой материалов покрытий и оснований выпускаемых изделий. Предлагаемый подход к изготовлению эталонных мер толщины

рассмотренный метод калибровки нашли практическую реализацию при изготовлении и эксплуатации многофункционального толщиномера гальванических покрытий "Константа К6" и комплекта вихретоковых фазовых преобразователей ФД.

Национальный  
минерально-сырьевой  
университет «Горный»  
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
13 декабря 2012 Г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин В. А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание.- Изд. 5, перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, 1983.-87 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2, кн. 2. Вихретоковый контроль. Изд. 2, испр.- М.: Машиностроение, 2006.- 688 с.
3. Потапов А.И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое, справочное пособие.- СПб.: Гуманистика, 2009.- 904 с.
4. Ноймайер П. Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий.- В мире неразрушающего контроля, 2008, № 2, с. 29-30.
5. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий.-М.: Изд-во стандартов, 2004.-264 с.