

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОЛОВЯННЫХ СПЛАВОВ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА

Рассмотрены вопросы разработки вихретокового амплитудно-фазового толщиномера защитных оловянных покрытий на изделиях из цветных металлов с отстройкой от мешающих параметров.

The problems of development of eddy current amplitude-phase coating thickness gauge measuring tin alloys on non-ferrous metals with detuning from the nuisance parameters are solved.

Ключевые слова: толщина, покрытие, олово, толщиномер, измерение, вихретоковый, амплитудно-фазовый.

Key words: thickness, coating, tin, measurement, eddy current, amplitude-phase.

Сплавы олова с висмутом, свинцом, цинком, кобальтом и кадмием широко применяются для покрытия изделий из меди, латуни и бронз в различных отраслях промышленности, главным образом в электротехнической. Диапазон толщин покрытий составляет от 0,5 до 21 мкм [1]. Электропроводность сплавов олова σ_n лежит в диапазоне от ~ 6 до $\sim 9,5$ МСм/м, а оснований σ_o от ~ 16 (латуни марок ЛС и ряд бронз) до ~ 60 МСм/м (медь, серебро). Изделия могут быть как крупногабаритными, так и малоразмерными (зона измерения диаметром 2...5 мм при минимальной толщине стенки до 0,3 мм), в том числе с шероховатой поверхностью (до $Rz \approx 5...15$ мкм).

Рассмотрим решение указанных задач измерения толщины покрытий с использованием вихретокового вида контроля.

Объект контроля представляет собой электропроводящее ферромагнитное покрытие толщиной T_n и электропроводностью σ_n на ферромагнитном электропроводящем основании электропроводностью σ_o . Вихревые токи, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_n объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости от толщины покрытия T_n . Так, если толщина покрытия $T_n = 0$, то $\sigma_n = \sigma_o$. При увеличении толщины покрытия от нуля до $T_n = \infty$, интегральная электропровод-

ность объекта контроля будет изменяться от σ_o до σ_n [2].

Широко используемый вихретоковый фазовый метод измерения толщины металлических покрытий основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля первичного преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, зависящих от T_n , σ_n , σ_o и геометрических характеристик основания и покрытия (диаметра d , шероховатости Rz и др.), а также величины зазора h между металлическим покрытием и контактной поверхностью преобразователя. С использованием этого метода разработаны приборы для измерения толщины электропроводящих ферро- и ферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях. Разработан ряд приборов для измерения толщины электропроводящих ферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях при условии, что относительная электропроводность покрытия $k = \sigma_n/\sigma_o \approx 6...30$ (например, покрытие из меди на основании из коррозионно-стойкой стали, серебро на латуни). Для задач контроля толщины покрытий из оловянных сплавов относительная электропроводность покрытия составляет $k \approx (0,11...0,55) \ll 1$. Это накладывает существенные ограничения на применение вихретокового фазового метода из-за практического отсутствия чувствительности в области толщин покрытий до 20 мкм [3]. Рассмотрим

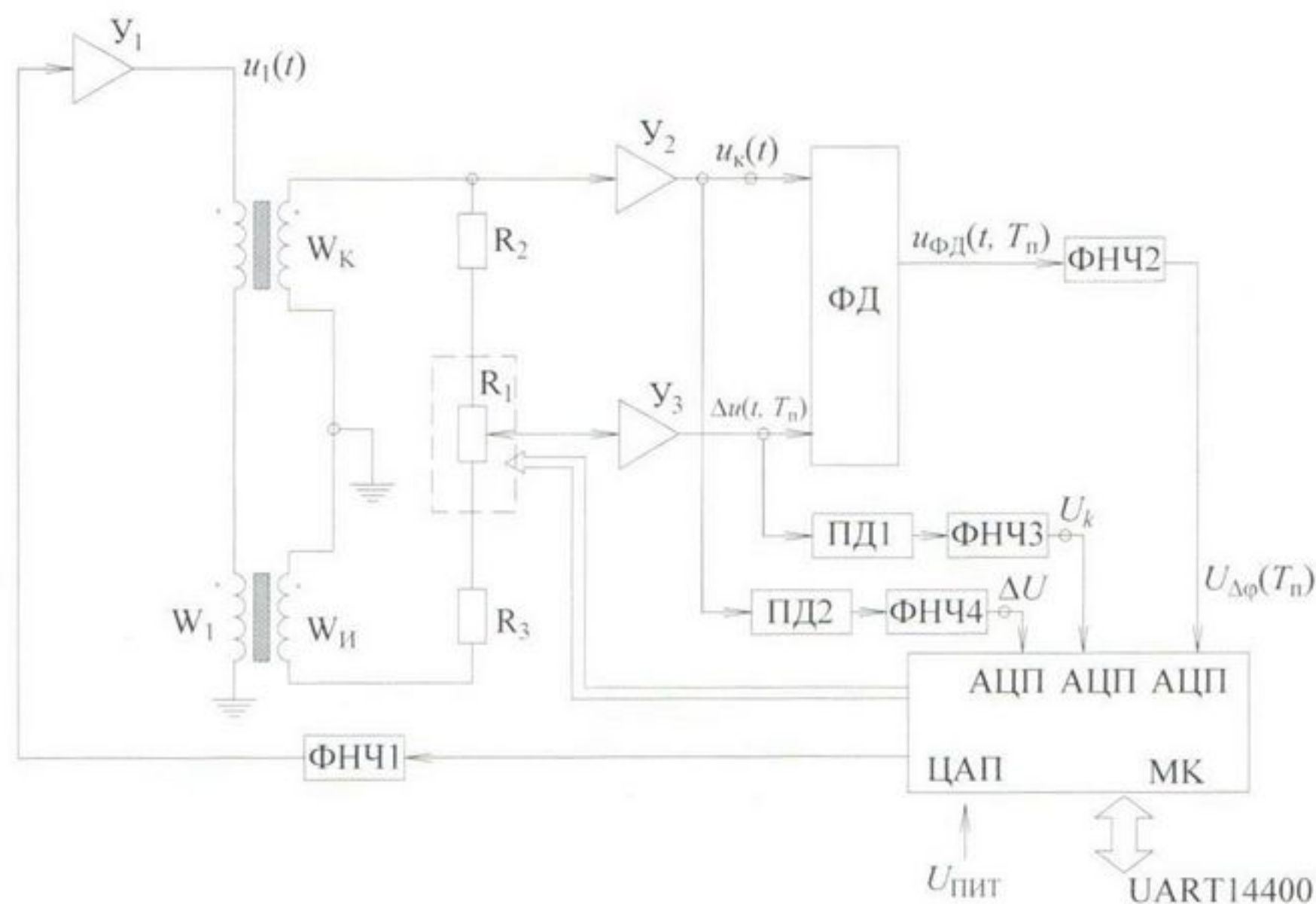


Рис. 1. Структурная схема вихретокового амплитудно-фазового преобразователя:
 Y_1 – Y_3 – усилители; ФД – фазовый детектор; ФНЧ₁–ФНЧ₄ – фильтры низкой частоты;
 W_1 – обмотка возбуждения; W_k и $W_{и}$ – дифференциально включенные
 компенсационная и измерительная обмотки; ПД1 и ПД2 – пиковые детекторы; МК –
 микроконтроллер; R_1 – управляемый цифровой балансировочный потенциометр

мотке, изображена на рис. 1. Преобразователь выполнен в малогабаритном цилиндрическом корпусе, соединяемом с электронным блоком кабелем, по которому подается напряжение питания и организуется канал связи UART14400 (рис. 2) для связи с блоком обработки и представления результатов измерений.

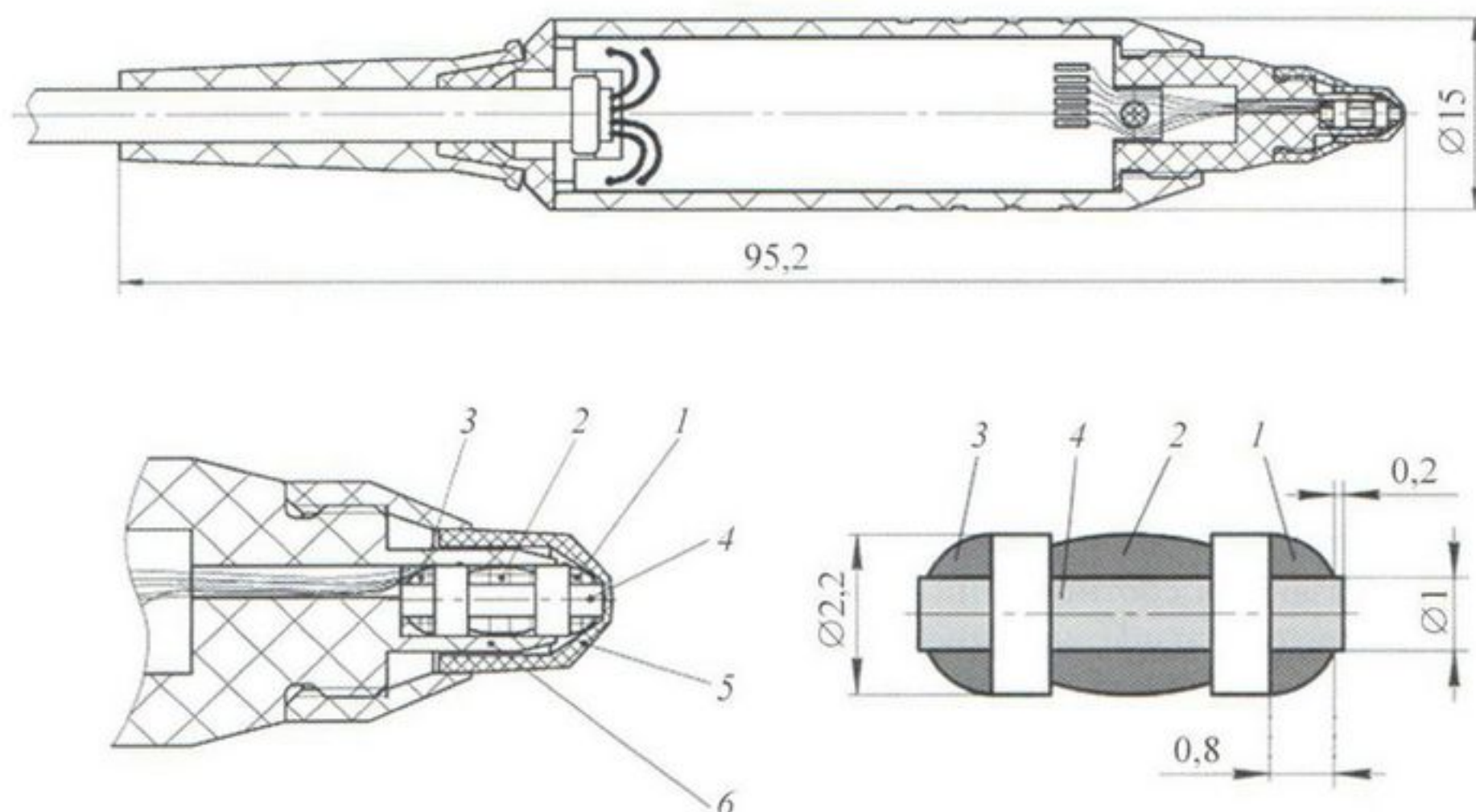
Витки обмоток и ферритовый сердечник фиксируются вместе клеем, а удерживающие элементы соединяются с корпусом таким образом, чтобы усилие нажатия на стержень не передавалось обмоткам. Чувствительный элемент имеет близкие к минимальным технологически достижимые размеры. Ферритовый сердечник от истирания защищен сменным защитным колпачком. Колпачок отлит из стеклонаполненного полимера. Контактная поверхность колпачка квазисферическая. Элементы электронной схемы располагаются на печатной плате, также устанавливаемой внутри корпуса преобразователя.

возможность применения вихретокового амплитудно-фазового метода для решения таких задач измерения.

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового амплитудно-фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной об-

мотке, изображена на рис. 1. Преобразователь выполнен в малогабаритном цилиндрическом корпусе, соединяемом с электронным блоком кабелем, по которому подается напряжение питания и организуется канал связи UART14400 (рис. 2) для связи с блоком обработки и представления результатов измерений.

Рис. 2. Накладной амплитудно-фазовый преобразователь с миниатюрным чувствительным элементом и сменным защитным колпачком:
 1 – измерительная $W_{и}$;
 2 – возбуждающая W_1 ;
 3 – компенсационная W_k обмотки;
 4 – ферритовый сердечник;
 5 – защитный колпачок; 6 – корпус



Обмотка W_1 запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ 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 разности фаз $\Delta\phi$ между напряжением $u_k(t)$ и разностным (вносимым) напряжением $\Delta u(t, T_n)$. Постоянные напряжения U_k и ΔU прямо пропорциональны амплитудам напряжений $u_k(t)$ и $\Delta u(t, T_n)$. Балансировка обмоток преобразователя проводится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Максимальная частота тока возбуждения $f_{\max} = 1,8$ МГц, погрешность измерения разности фаз не более $\pm 0,05^\circ$, погрешность измерения амплитуд напряжений не более $\pm 0,1$ мВ.

Для расчета параметров измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр β , равный:

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

где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; σ – электропроводность материала; μ_0 – магнитная постоянная.

Конструкция чувствительного элемента, представленного на рис. 2, при указанном диаметре ферритового сердечника обеспечивает эквивалентный радиус обмотки возбуждения $R \approx 1,5$ мм.

Вариация T_n будет приводить к изменению σ_n и, соответственно, β . Для обеспечения приемлемой чувствительности величину $\beta(\sigma_n)$ следует выбирать на уровне порядка 5...30 [4].

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную измеряемую толщину покрытия $T_{n\max}$ и минимальную толщину основания $T_{o\min}$, представляет собой

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f\sigma\mu_0}}. \quad (2)$$

В соответствии с [5] диапазон измерения $T_{n\max} = (0,6...0,8)\delta$, а минимальная допустимая толщина основания $T_{o\min} = 2,5\delta$.

Из указанных соотношений и формулы (2) следует, что оптимальное значение частоты преобразователя $f_{\text{опт}}$ равно

$$f_{\text{опт}} \approx (0,36...0,64)/(\pi\mu_0\sigma_n T_{n\max}^2). \quad (3)$$

Для обеспечения оптимального β значение эквивалентного радиуса R обмотки W_1 для вихретокового фазового преобразователя необходимо выбирать из условия

$$R = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi f\sigma_n\mu_0}}. \quad (4)$$

При анализе характеристик преобразователей следует учесть влияние мешающих параметров:

- зазора h между преобразователем и покрытием;
- диаметра d основания в зоне измерения и его вариации;
- шероховатости Rz поверхности изделия;
- вариации электропроводности основания и покрытия.

Граничными задачами измерения являются следующие:

- 1) олово–свинец/латунь ЛС59 ($\sigma_n/\sigma_o \sim 6,5$ МСм/16,5 МСм/м);
- 2) олово–свинец/медь ($\sigma_n/\sigma_o \sim 6,5$ МСм/59 МСм/м).

Показанный на рис. 3 преобразователь обеспечивает максимальную частоту возбуждения $f = 1,8$ МГц.

Для рассматриваемых материалов глубина проникновения вихревых токов будет следующей: для сплава олово-свинец $\delta_{o.c} \approx 133$ мкм, для латуни $\delta_{\text{лат}} \approx 90$ мкм, для меди $\delta_m \approx 45$ мкм. Соответственно, обобщенные параметры будут иметь значения: $\beta_{o.c} \approx 14$, $\beta_{\text{лат}} \approx 22$, $\beta_m \approx 42$.

Напряжение на измерительной обмотке равно сумме напряжения \dot{U}_0 , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого (разностного) напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$, возникающего вследствие влияния изделия с покрытием: $\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}$.

Относительное вносимое напряжение определяется по формуле [4]

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вн}}^* &= \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} = \frac{j\pi\mu_0 R_b R_n}{M} \int_0^\infty J_1(\lambda R_b) J_1(\lambda R_n) e^{-\lambda|z_b+z_n|} \chi_0 d\lambda; \\ \chi_0 &= \frac{(\lambda - q_1)(q_1 + q_2)e^{T_n q_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1)e^{-T_n q_1}}{(\lambda + q_1)(q_1 + q_2)e^{T_n q_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1)e^{-T_n q_1}}, \quad (5) \\ q_i &= \sqrt{\lambda^2 + j\mu_0\sigma_i\omega}, \end{aligned}$$

где T_n – толщина покрытия; R_b – радиус обмотки возбуждения; R_n – радиус измерительной обмотки; z_n, z_b – расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия соот-

ветственно; $J_1(\lambda R_i)$ – функция Бесселя первого порядка; λ – параметр преобразования; $\sigma_i = \sigma_n$ – электропроводность покрытия; $\sigma_i = \sigma_0$ – электропроводность основания; M – коэффициент начальной взаимной индукции между обмотками; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока возбуждения.

При расчетах можно принять радиусы обмоток равными радиусу ферритового сердечника [3].

Амплитуда и фаза относительного вносимого напряжения определяется выражениями

$$U_{\text{вн}}^* = |\dot{U}_{\text{вн}}^*| = \sqrt{\text{Re}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]^2 + \text{Im}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]}{\text{Re}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]} \quad (6)$$

На рис. 3 представлена рассчитанная в соответствии с (5) зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ для граничной задачи олово–свинец/медь (кривая 2). На участке $A-B$ в диапазоне $T_n \approx 0...15$ мкм $\Delta\varphi$ практически не изменяется, а годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n)$ совпадает с направлением линии отвода 1. На участке $C-D$ чувствительность преобразователя $\Delta(\Delta\varphi)/\Delta T_n$ с учетом погрешности измерения разности фаз позволяет проводить измерения T_n с абсолютной погрешностью на уровне $\pm(1...1,5)$ мкм.

Для обеспечения возможности измерения тонких покрытий необходимо перенести точку начала отсчета, соответствующую $T_n = 0$, на участок $C-D$ кривой 2. Это возможно введением "дистанционной шайбы" из материала, соответствующего или близкого по электропроводности материалу покрытия (например, сплава олово–свинец), толщиной порядка $T_n' = 15...60$ мкм, между ферритом и покрытием. В этом случае, при изменении T_n от нуля до $T_{n \text{ max}}$ годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n)$ будет между точками $C-E$. Линия отвода 3 (при $T_n = 0$) свяжет точку C с точкой F на кривой 4 – годографе $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n', h = \infty)$.

На рис. 4 представлены зависимости $\Delta\varphi(T_n)$ для различных значений T_n' , подтверждающие изложенное.

Для задачи олово–свинец/латунь зависимости носят аналогичный характер. Для устранения зоны нечувствительности необходимо выбирать $T_n' = 10...40$ мкм, однако чувствительность $\Delta(\Delta\varphi)/\Delta T_n$ в зоне измерения будет примерно в 2 раза ниже, что приведет к увеличению абсолютной погрешности измерения.

В качестве материала "дистанционной шайбы" можно применять коррозионно-стойкую сталь,

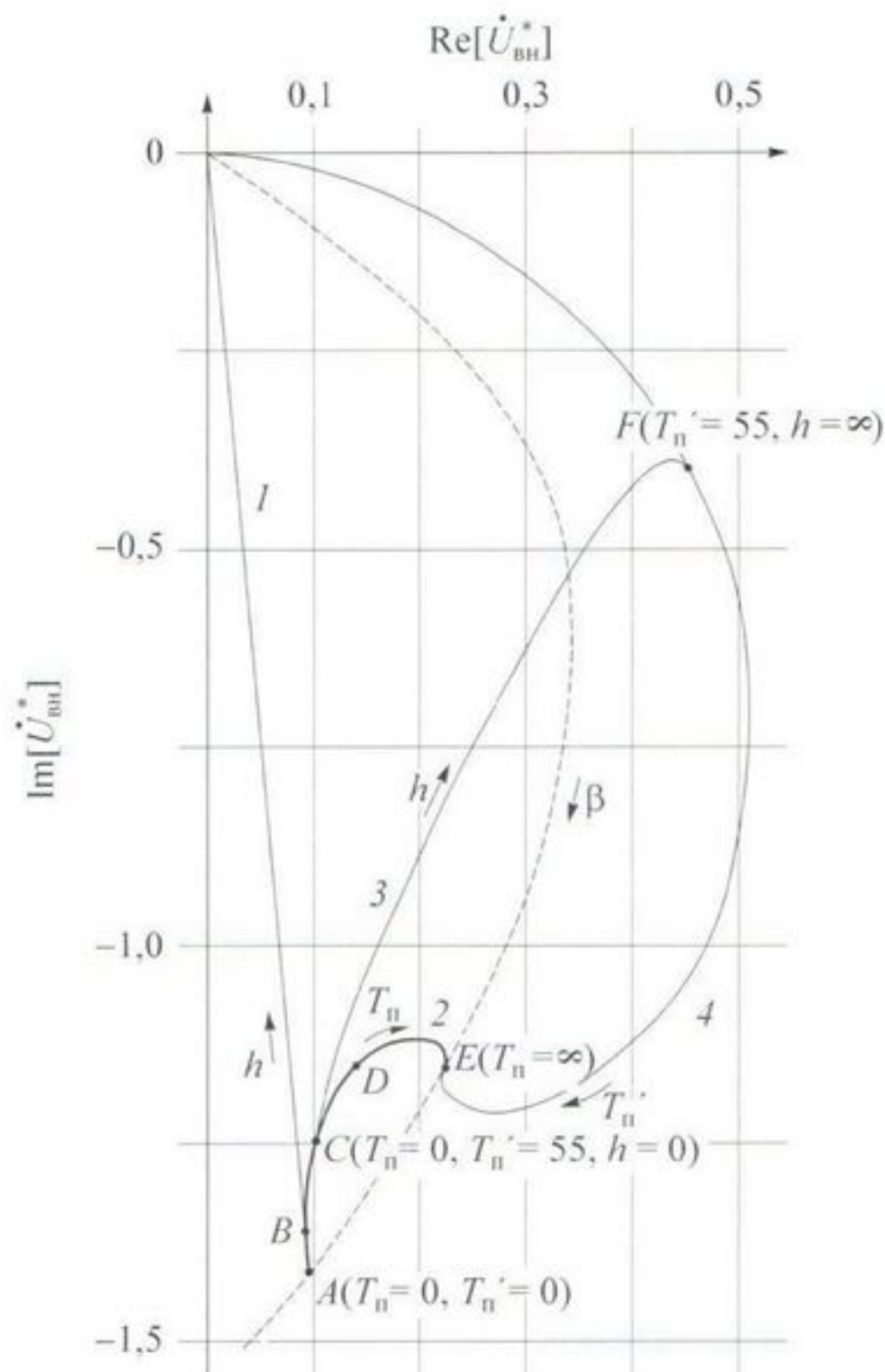


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от измеряемого и влияющих параметров

имеющую существенно меньшую истираемость. Для достижения аналогичного эффекта ее толщина $T_n'' \approx T_n' \sqrt{\sigma_n / \sigma_{\text{н}}}$, где σ_n – электропроводность покрытия (в рассматриваемом случае олово–свинец), $\sigma_{\text{н}}$ – электропроводность коррозионно-стойкой

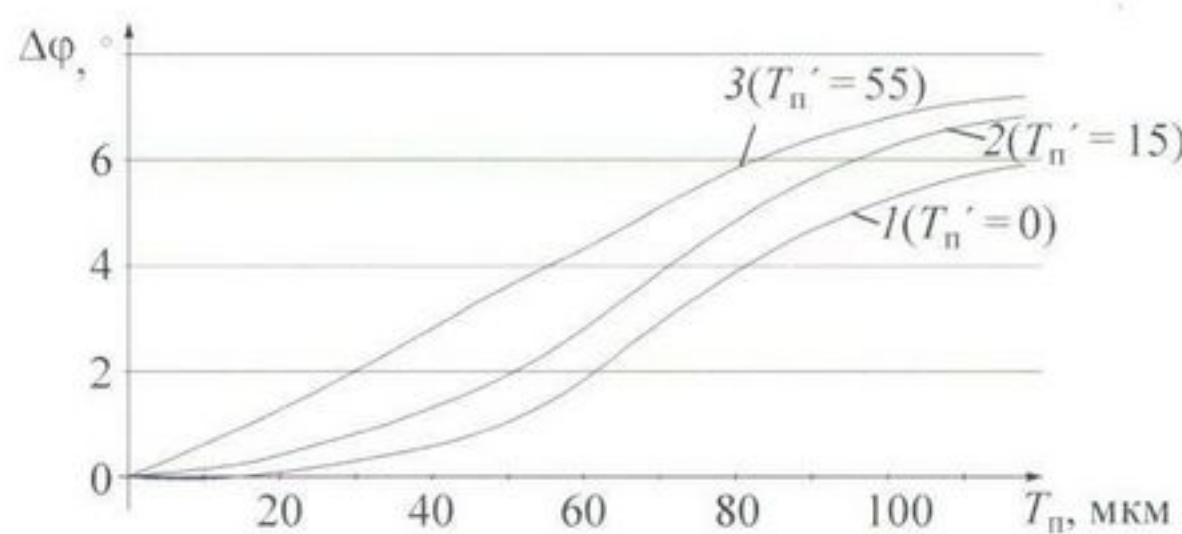
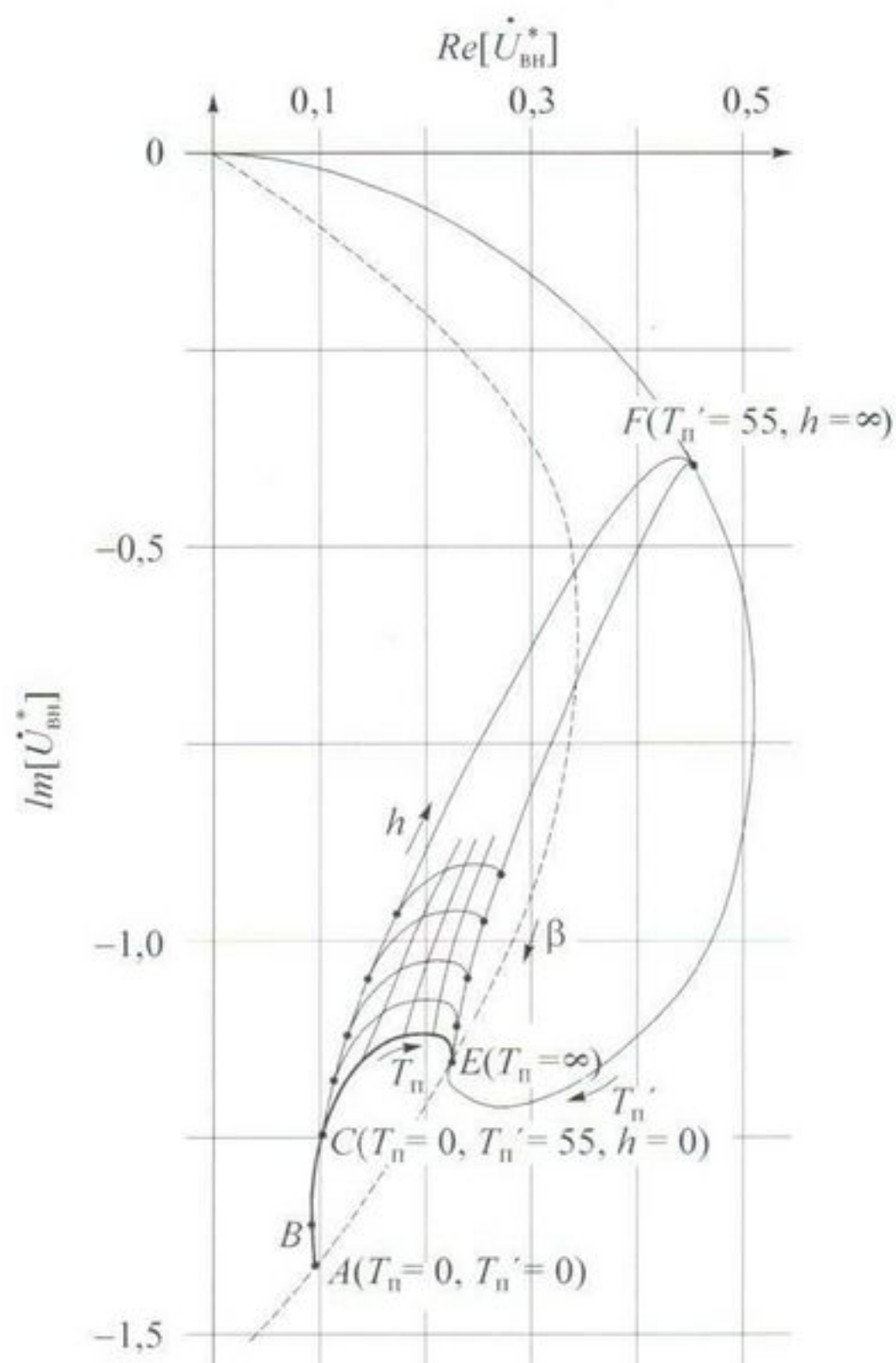


Рис. 4. Зависимость фазы разностного напряжения от толщины оловянно-свинцового покрытия на меди: 1 – для стандартного преобразователя; 2 и 3 – для преобразователя с "дистанционной шайбой" толщиной 15 и 55 мкм соответственно

Рис. 5. Сетка годографа $\dot{U}_{ин}^*(T_n, h)$

стали. Дистанционная шайба диаметром порядка 3 мм, повторяющая профиль опорной поверхности сменного защитного колпачка, должна наклеиваться на его наружную поверхность (см. рис. 2, поз. 5).

Основными мешающими параметрами при измерениях оловянных покрытий являются шероховатость поверхности основания Rz и диаметр d (кривизна), а также их вариация. Этим параметрам можно поставить в соответствие эквивалентные зазоры h' между опорной поверхностью преобразователя и покрытием [6]. Так, $d = 25$ мм соответствует $h' \approx 40$ мкм, $d = 10$ мм соответствует $h' \approx 100$ мкм.

Для отстройки от влияния h (следовательно, от влияния вариации d и Rz) при измерениях градуировочная характеристика преобразователя должна представлять собой семейство зависимостей $U_{\Delta\varphi}(T_n, h)$ и $\Delta U(T_n, h)$, снимаемых на мерах толщины T_n покрытия, нанесенных на образцовые основания, при нескольких значениях зазоров h . Образцовые основания идентичны или близки по электропроводности материалу основания контролируемых изделий. Градуировочная характеристика соответствует

представленной на рис. 5 сетке годографа $\dot{U}_{ин}^*(T_n, h)$ при фиксированной толщине шайбы T_n' (или аналогичной по эффекту шайбе из коррозионно-стойкой стали толщиной T_n''). Градуировочные характеристики хранятся в энергонезависимой памяти преобразователя.

Калибровка прибора (при необходимости) представляет собой процедуру установки чувствительности с использованием комплекта мер толщины покрытие/основание и установку нуля на образце реальной продукции без покрытия. Калибровка прибора может выполняться также на образцах продукции. Для этого вначале необходимо изготовить образец толщины покрытия на изделии или на образце-свидетеле. Оптимальным для этих целей, по мнению авторов, является метод шарового микрошлифа [7], позволяющий измерять толщину покрытий с погрешностью не более $\pm 0,5$ мкм на плоских и криволинейных изделиях, в том числе малоразмерных.

Разработанные в соответствии с изложенным преобразователи в комплекте с прибором "Константа К6" (вариант гальванический) позволяют измерять толщину покрытий из оловянных сплавов с электропроводностью от 6 до 9,5 МСм/м на основаниях из цветных металлов с электропроводностью от 16 до 60 МСм/м. Минимальный диаметр оснований $d_{\min} = 2$ мм, максимальная шероховатость $Rz_{\max} \approx 20$ мкм. Основная допустимая погрешность измерения ΔT_n не более $\pm(1...2)$ мкм в зависимости от к. Прибор может быть укомплектован рабочими эталонами второго разряда покрытие/основание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. М.: Изд-во стандартов, 2004. 264 с.
2. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: науч., метод., справ. пособие. СПб.: Гуманистика, 2009. 904 с.
3. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. М.: Энергия, 1978. 184 с.
4. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. Кн. 2. Вихретоковый контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
5. ISO 21968. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials – Measurement of coatings thickness – Phase-sensitive eddy-current method.
6. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Вихретоковая толщинометрия ферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов // Мир измерений. 2010. № 6. С. 18–23.
7. Randall N. Finer particle size allows better coating characterisation with the Calotest // Application Bulletin. № 5. URL: <http://www.csm-instruments.com/en/>