

УДК 620.179.14

В.А. Светличный¹, Ю.Е. Хорошайло²¹Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков, Украина²Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ДОПУСТИМОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Рассмотрены вопросы, связанные с неразрушающим вихретоковым контролем ферромагнитных тонких пленок. Выявлен критерий оценки диапазона измерений различных типов вихретоковых преобразователей.

Ключевые слова: бесконтактность измерения, объект контроля, вихретоковый измерительный преобразователь, толщина объекта контроля, относительная погрешность, абсолютная погрешность, характеристика преобразования.

Постановка проблемы

В настоящее время происходит новый качественный скачок в развитии вихретоковых методов и средств неразрушающего контроля промышленных изделий. Достигнутые в течении последних десятилетий успехи в развитии информатики, микроэлектроники и вычислительной техники оказали глубокое воздействие на системы вихретокового неразрушающего контроля промышленной продукции [1]. Это обусловлено переходом от разработки отдельных приборов к созданию полностью автоматизированных программно-управляемых приборов и систем контроля, в которых широко используются микропроцессорная техника. Использование микропроцессоров позволяет программным способом реализовать фазовый, амплитудный и амплитудно-фазовый методы выделения информации, определить вектор напряжения компенсации при раздельном контроле по фазе и амплитуде, осуществить функциональное преобразование сигнала и подавление мешающих факторов [2]. Применение микропроцессорной техники позволяет не только автоматизировать процесс контроля, но и существенно улучшить метрологические и экспериментальные характеристики вихретоковых средств неразрушающего контроля, а также расширить области их применения и возможности [3].

Решение этой задачи невозможно без совершенствования параметров аппаратуры контроля и в частности, улучшения характеристик вихретоковых дефектоскопов применяемых на предприятиях, производящих изделия с защитными покрытиями и применяющих тонкопленочные технологии.

Изложение основного материала

В процессе экспериментальных исследований, нами был изготовлен лабораторный макет вихретокового толщиномера. С помощью которого отрабатывались следующие вопросы: влияние отдельных

параметров ВИП на его характеристику преобразования; выбор рабочей частоты, уточнение особенностей работы трансформаторных ВИП на цилиндрических и плоских катушках; выбор типа измерительного преобразователя и схемы его включения; исследование метрологических показателей устройств; проверка соответствия расчетных теоретических соотношений с экспериментальными; и некоторые другие вопросы аппаратной реализации.

Разработанное устройство предназначено для измерения толщины алюминиевых пленок в диапазоне толщин 0,01 – 2 мкм на диэлектрических подложках (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид устройства

Устройство может быть использовано для измерений толщины и других ферромагнитных пленок (Cu, Au, Ag, Cr и др.)

Структурная схема прибора представлена на рис. 2. Кварцевый генератор КГ служит для генерирования переменного напряжения заданной высокостабильной частоты 100 кГц и возбуждения усилителя мощности УМ. Нагрузкой усилителя мощности является ВИП. Сигнал с выхода ВИП детектируется амплитудным детектором АД и поступает на инвертирующий вход дифференциального усилителя У. На инвертирующий вход подается стабилизирован-

ное напряжение с блока калибровки БК. Выходной обработанный сигнал поступает на индикатор, который представляет собой цифровой вольтметр постоянного тока. Блоки БК, регулировки нуля БРН, регулировки максимума и блок защиты БЗ, а также не показанные на схеме переключатели поддиапазонов и переключатели режима работы прибора служат для разделения всего диапазона измеряемых толщин на поддиапазоны, линейризации шкалы и выравнивания чувствительности на всех поддиапазонах.

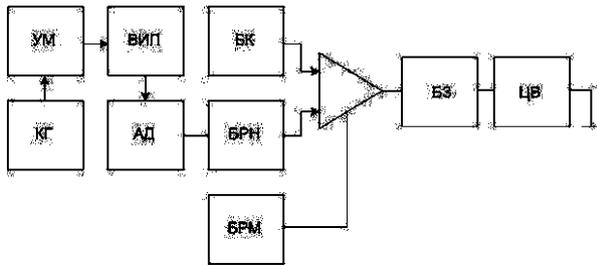


Рис. 2. Структурная схема устройства

Весь диапазон измеряемых толщин разбит на четыре равных поддиапазона, имеющих пределы: 0 – 0,5 мкм; 0,5 – 1 мкм; 1 – 1,5 мкм и 1,5 – 2 мкм.

Предлагается методика оценки диапазона измерений, в пределах которого максимальная ошибка не превышает допустимую.

На основании этой методики оказалось возможным производить сравнительную оценку различных видов вихретоковых измерительных преобразователей

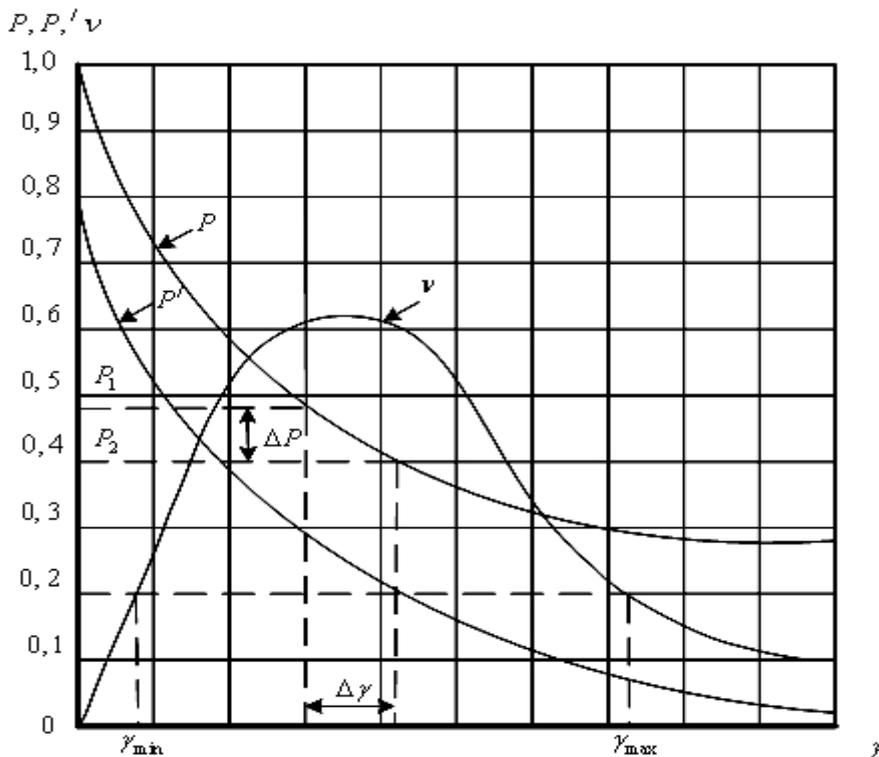


Рис. 3. Критерий максимальной допустимой относительной погрешности

Введем понятие обобщенного точностного параметра измерительной установки

$$v = \frac{\delta_n}{\delta_\gamma}, \quad (1)$$

где δ_n – относительная погрешность измерения выходного напряжения U_2 , которая складывается из погрешности измерительного прибора, нестабильности информационного параметра напряжения, питающего ВИП и т.д.

Будем полагать, что информационным параметром является уровень напряжения, тогда

$$\delta_n = \frac{\Delta U_2}{U_{20}},$$

где ΔU_2 – суммарная абсолютная погрешность; U_{20} – исходное напряжение на выходе; δ_γ – допустимая относительная погрешность измерения контролируемого параметра

$$\delta_\gamma = \frac{\Delta \gamma}{\gamma}, \quad (2)$$

γ и $\Delta \gamma$ – абсолютная величина и абсолютная погрешность измерения контролируемого параметра.

Согласуем погрешность δ_n с относительной характеристикой преобразователя $P(\gamma) = \frac{U(\gamma)}{U_0}$,

представленной на рис. 3

$$\delta_n = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_1 - U_2}{U_0} = \frac{U_1}{U_0} - \frac{U_2}{U_0} = P_1 - P_2 = \Delta P. \quad (3)$$

На рис. 3 показана также производная относительной функции преобразования $P'(\gamma)$

$$\frac{\Delta P(\gamma)}{\Delta \gamma} = P'(\gamma), \quad (4)$$

и учитывая (3), можно записать

$$\delta_n = \Delta \gamma P'(\gamma). \quad (5)$$

Подставив (2) и (5) в выражение для характеристики преобразования при условии $\gamma < 1$ (для тонких пленок) [4 – 6]

$$H_0 \approx \frac{6}{6 + V_2 \gamma} = \frac{3}{3 + V_{20} \mu_0 d R \omega \sigma_{\text{exp}} \left(-\frac{3}{R} h_2 \right)}.$$

Получим

$$v = \gamma P'(\gamma). \quad (6)$$

Функцию (6) назовем функцией относительной погрешности. Характерный вид функции $v(\gamma)$ (6) представлен также на рис. 3.

Воспользовавшись функцией (6) можно найти значения пределов измерения γ_{\min} и γ_{\max} для заданных значений точностного параметра v_{\min} и v_{\max}

$$\begin{aligned} \gamma_{\min} P'(\gamma_{\min}) &= v_{\min}; \\ \gamma_{\max} P'(\gamma_{\max}) &= v_{\max}. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 3 пунктиром показан уровень $v_1 = v_{\min} = v_{\max}$ пределы γ_{\min} и γ_{\max} , соответствующие уровню v_1 .

Из (1) и рис. 3 следует, что с уменьшением погрешности δ_n и увеличением допустимой погреш-

ности δ_γ уровень v_1 понижается, и при форме характеристики $v(\gamma)$, изображенной на рисунке, диапазон измерений расширяется.

Физический смысл функций (6) заключается в том, что при заданном значении параметра $v_1 \leq \gamma P'(\gamma)$ большому абсолютному значению параметра γ может соответствовать меньшее значение производной, т.е. абсолютной чувствительности. Равенству $v_1 = \gamma P' = \text{const}$ соответствует постоянство относительной погрешности измерения во всем диапазоне от γ_{\min} до γ_{\max} . Для обеспечения этого равенства функция $P'(\gamma)$ в пределах γ_{\min} до γ_{\max} должна быть гиперболой.

Для численной оценки значения уровня v_1 рассмотрим такой пример. Пусть относительная погрешность измерения $\delta_n = 1\%$, а допустимая относительная погрешность измерения контролируемого параметра $\delta_\gamma = 5\%$; тогда $v_1 = 0,2$. Если $\delta_\gamma = 10\%$, то $v_1 = 0,1$.

Диапазонность прибора численно можно оценить отношением γ_{\max} и

$$D = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_{\min}}. \quad (8)$$

На основании предложенной здесь методики оценим диапазонность различных типов вихретоковых преобразователей. На рис. 4 представлены функции относительной погрешности для следующих типов ВИП [7, 8]:

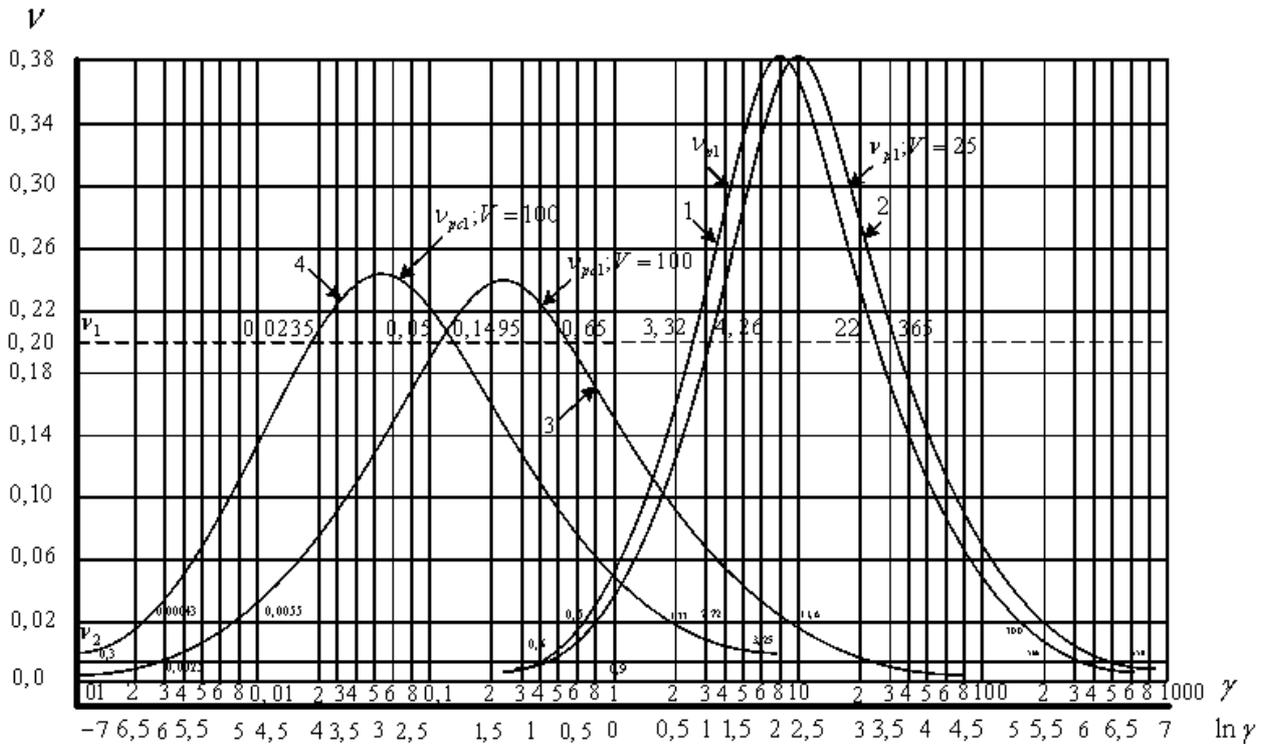


Рис. 4. Функции относительной погрешности для резонансного и аperiodического ВИП

- аперіодический ВИП, питаемый от идеального генератора тока;
- аперіодический ВИП с параметром $V = 25$, питаемый от генератора напряжения;
- резонансный ВИП, имеющий добротность $V = 25$;
- резонансный ВИП, имеющий добротность $V = 100$.

На том же рисунке изображено три уровня значенний точностного параметра $v_1 = 0,2$, $v_2 = 0,02$ и $v_3 = 0,01$. Точки пересечения этих уровней с характеристиками $v(\gamma)$ четырех ВИП дают определить соответствующие значения γ_{\min} и γ_{\max} .

На основании полученных данных в табл. 1 приведены значения коэффициента диапазонности для указанных четырех графиков и трех значений v .

Таблица 1

Значения коэффициента диапазонности

v	Номер графика	D			
		1	2	3	4
v_1	0,2	8,1	8,6	7,2	6,73
v_2	0,02	333	270	2100	6325
v_3	0,1	833	722	7640	8846

Выводы

Из данных рис. 4 и таблицы 1 можно заключить, что при малых уровнях v диапазонность у ВИП резонансного типа большая, чем у аперіодического и превосходит в десятки раз. При этом с увеличением добротности вихретоковых резонансных преобразователей, т.е. с увеличением коэффициента связи K_1 и добротности контура Q_{13} , диапазонность ВИП в области малых уровней v возрастает, а сам диапазон смещается влево, т.е. в область меньших значений γ .

Список литературы

1. *Не разрушающий контроль. Справочник в 7 т.: Т. 2 / Под общ. ред. В.В.Клюева.* – М.: Машиностроение, 2003. – 688с.: ил.
2. Ошеров Р.Г. *Характеристики трансформаторных вихретоковых измерительных преобразователей* / Р.Г. Ошеров, Ю.Е. Хорошайло // *Радиотехника.* – Х.: ХГУ, 1982. – Вып. 60. – С. 132-141.
3. Соболев В.С. *Накладные и экранные датчики* / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

4. Ошеров Р.Г. *Характеристики резонансных трансформаторных вихретоковых измерительных преобразователей* / Р.Г. Ошеров, Ю.Е. Хорошайло // *Радиотехника.* – Х.: ХГУ, 1982. – Вып. 61. – С. 59-70.

5. Светличный В.А. *Не разрушающий контроль пленок и покрытий* / В.А. Светличный // *Системы озброєння і військова техніка* – Х.: ХУПС, 2010. – № 3 (23). – С. 160-162.

6. Горкунов Б.М. *Моделирование вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев металлических изделий* / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Тищенко // *Вісник "ХПІ": зб. наук. пр. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання.* – Х.: НТУ "ХПІ", 2008. – № 48. – С. 150-153.

7. *Не разрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами* / В.Г. Герасимов, Ю.Я. Останин и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.

8. Каневский И.Н. *Не разрушающие методы контроля: учебное пособие* / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

Поступила в редколлегию 19.08.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Синотин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

ОЦІНКА ДІАПАЗОНУ ВИМІРЮВАНЬ НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ ДОПУСТИМОЇ ВІДНОСНОЇ ПОМИЛКИ

В.А. Світличний, Ю.Э. Хорошайло

Розглянуто питання, пов'язані з неруйнівним вихреструмний контролем ферромагнітних тонких плівок. Виявлено критерій оцінки діапазону вимірювань різних типів вихреструмний перетворювачів.

Ключові слова: безконтактність вимірювання, об'єкт контролю, вихреструмний вимірювальний перетворювач, товщина об'єкта контролю, відносна похибка, абсолютна похибка, характеристика перетворення.

ESTIMATION OF THE MEASUREMENT RANGE BASED ON THE CRITERION OF PERMISSIBLE RELATIVE ERROR

V.A. Svetlichnyi, J.E. Khoroshailo

The problems associated with non-destructive eddy current testing of non-ferromagnetic films and coatings. Revealed a measure of the measurement range of different types of eddy current probes.

Keywords: non-contact measurement, the object of control, eddy current transducer, the thickness of the test object, the relative error, absolute error, the characteristic transformation.