

В. А. СЯСЬКО

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ПОДОБНЫЕ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕРОВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматриваются вопросы разработки геометрически подобных магнитоиндукционных преобразователей для толщиномеров защитных покрытий изделий из ферромагнитных материалов. Представлены варианты оптимальных преобразователей и приведены их расчетные модели и основные технические характеристики.

Ключевые слова: магнитоиндукционный преобразователь, покрытие, толщиномер, чувствительность.

Магнитоиндукционный метод измерения толщины h покрытий основан на определении изменения магнитного сопротивления участка цепи: первичный измерительный преобразователь — ферромагнитная контролируемая деталь с покрытием. Обобщенная структурная схема магнитоиндукционного толщиномера представлена на рис. 1, где ИТ — источник тока, ПИП — первичный измерительный преобразователь, ВИП — вторичный измерительный преобразователь, МК — микроконтроллер, Д — дисплей, К — клавиатура.

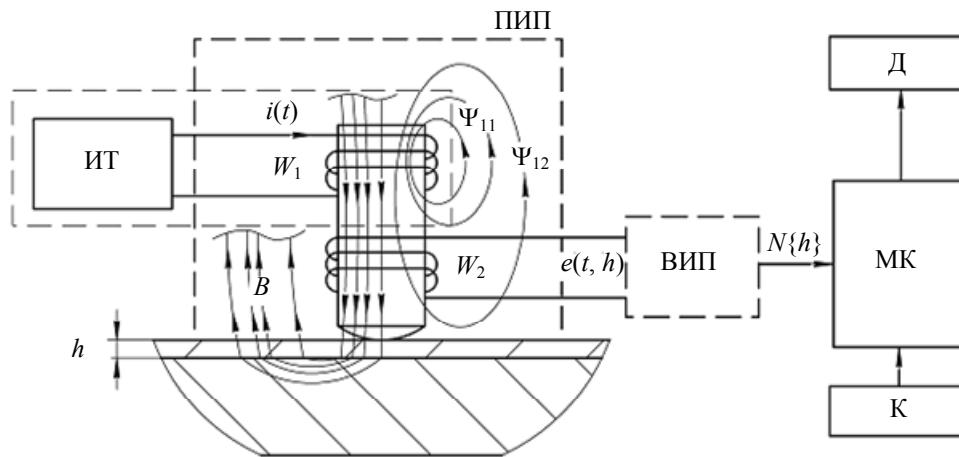


Рис. 1

Наиболее распространенные на практике абсолютные первичные измерительные преобразователи (ИП) состоят из первичной (возбуждающей) W_1 и вторичной (измерительной) W_2 обмоток, намотанных на единый ферромагнитный сердечник. Первичный информативный параметр преобразователя — амплитуда или площадь импульса ЭДС $e(t, h)$, наводимой на обмотке W_2 при питании обмотки W_1 переменным гармоническим или импульсным током $i(t)$ низкой частоты.

Основными показателями качества магнитоиндукционных преобразователей являются:

- чувствительность, определяющая погрешность измерения Δh и достигаемый (при обеспечении заданной величины Δh) диапазон измеряемых толщин h_{\max} ;
- минимально возможный диаметр зоны измерения $D_{\text{изм}}$ на плоской поверхности при требуемых Δh и h_{\max} ;
- износостойкость;
- температурная и временная стабильность показаний прибора.

Для обеспечения требуемых показателей качества необходимо искать решение, учитывающее взаимосвязанные показатели: h_{\max} , Δh и $D_{\text{изм}}$.

Среди абсолютных первичных ИП наибольшее распространение имеют преобразователи с внешним экраном из ферромагнитного материала с осесимметричным магнитным полем [1]. Геометрическая модель такого преобразователя представлена на рис. 2.

При анализе модели примем: $D_c = \text{const}$ — диаметр сердечника (однородный гладкий стержень); D_{21} и D_{22} — внутренние диаметры обмоток W_1 и W_2 соответственно; D_1 и D_2 — наружные диаметры обмоток; D_3 — внутренний диаметр экрана; l_1, l_2, l_3 — „воздушные“ зазоры между основанием сердечника и началом первичной обмотки, началом вторичной обмотки и экраном соответственно; H_1, H_2, H_c — высоты первичной и вторичной обмоток и сердечника соответственно; $R_{сф}$ — радиус сферы контактной поверхности сердечника. Толщину стенки экрана примем постоянной и равной 0,6 мм.

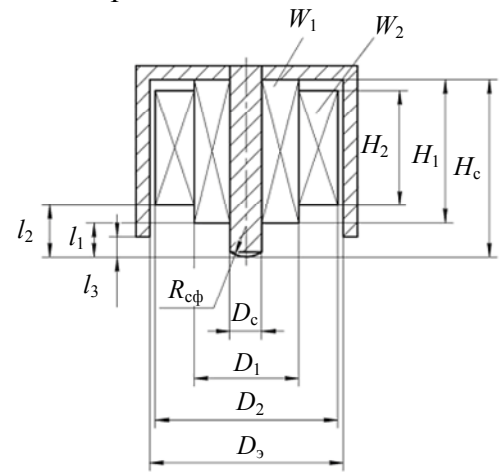


Рис. 2

Внутренний диаметр экрана D_3 , в первом приближении, определяет величины $D_{изм}$ и h_{max} , а остальные геометрические характеристики определяют чувствительность преобразователя. Задача проектирования геометрически подобных первичных магнитоиндукционных преобразователей заключается в расчете соотношения их геометрических характеристик, что позволяет при минимальном значении D_3 определить оптимальное, относительно чувствительности ИП и диапазона контролируемых толщин, значение вносимого потокосцепления.

Потокосцепление вторичной обмотки $\Psi_{12}(h) = \Psi_{12}(h \Rightarrow \infty) + \Psi_{вн}(h)$, где $\Psi_{12}(h \Rightarrow \infty)$ — потокосцепление вторичной обмотки при $h \Rightarrow \infty$ (вдали от ферромагнитного изделия); $\Psi_{вн}(h)$ — вносимое потокосцепление вторичной обмотки при установке преобразователя на покрытие.

При возбуждении обмотки W_1 гармоническим током $i(t)$

$$e(t, h) = -d/dt (\Psi_{12}(h \Rightarrow \infty)) - d/dt (\Psi_{вн}(h)) = e(t, h \Rightarrow \infty) + e_{вн}(t, h).$$

Для постоянных магнитных полей отношение $\psi(h) = 1 + \Psi_{вн}(h)/\Psi_{12}(h \Rightarrow \infty) = 1 + M_{вн}(h)/M_{12}(h \Rightarrow \infty)$ будем называть относительным коэффициентом вносимой взаимоиндукции, где $M_{12}(h \Rightarrow \infty)$ — коэффициент взаимоиндукции обмоток W_1 и W_2 , $M_{вн}(h)$ — вносимый коэффициент взаимоиндукции.

Отношение $(\Psi_{вн}(h_1) - \Psi_{вн}(h_2))/(h_2 - h_1)$ будем называть чувствительностью преобразователя в диапазоне толщин $h_2 \dots h_1$.

При проведении измерений совокупность влияющих факторов вызывает некоторую девиацию (разброс) показаний $N(h)$ на выходе вторичного ИП на величину $\pm \delta N$, что обусловлено сетевыми, импульсными и высокочастотными помехами, а также собственными шумами, нелинейностями, временной и температурной нестабильностью АЦП и ЦАП и микропроцессорных устройств. Соотношением чувствительности преобразователя и δN определяются значения $h_{\text{max}}, \Delta h$.

Для расчета чувствительности первичного ИП в диапазоне измеряемых толщин необходимо рассчитывать значения потокосцеплений $\Psi_{12}(h \Rightarrow \infty)$ и $\Psi_{вн}(h)$ при различных h .

При возбуждении первичной обмотки гармоническим током низкой частоты электрическое поле вихревых токов, возникающих в сердечнике, экране, объекте контроля и электропроводящих покрытиях, пренебрежимо мало. Использование в качестве первичного информативного параметра амплитуды $e(t, h)$ позволяет при анализе электромагнитного поля первичную обмотку и сердечник рассматривать как постоянный магнит [2].

Аналитическое решение системы уравнений, описывающих поле экранированного магнита, представляет собой сложную систему дифференциальных уравнений первого и второго порядка.

В настоящее время для решения задач, связанных с распространением электромагнитных полей, широко применяются численные методы, в частности метод конечных элементов [3]. Этот метод позволяет определять необходимые для расчета чувствительности величины вносимого потокосцепления и вносимого коэффициента взаимоиנדукции для первичных преобразователей со сложной геометрией внешних и внутренних границ.

Под оптимальными геометрическими характеристиками первичного магнитоиндукционного преобразователя будем понимать такие величины и соотношения, при которых достигается максимальная чувствительность во всем или в некоторой области диапазона измеряемых толщин при минимально возможном диаметре зоны измерения.

На основе программных продуктов, реализующих метод конечных элементов, можно сформулировать двухмерную осесимметричную стационарную нелинейную с открытыми границами задачу расчета первичного магнитоиндукционного измерительного преобразователя.

При анализе модели приняты следующие допущения:

- модель полностью стационарна;
- при необходимости обмотки преобразователя могут быть заменены единичными ампер-витками или совокупностью единичных ампер-витков;
- в ферромагнитных частях модели преобразователя отсутствует гистерезис, характеристика намагничивания материала линейная;
- относительная магнитная проницаемость контролируемой детали, сердечника и экрана $\mu_d = \mu_c = \mu_s \approx 2000$ (соответствует магнитомягким сталям), магнитная проницаемость воздуха и обмоток $\mu_v = \mu_{обм} = 1$.

В качестве граничных условий для модели рассматриваемого первичного преобразователя назовем граничные условия первого рода (условия Дирихле), применяемые для задания нулевого значения нормальной составляющей вектора магнитной индукции на оси симметрии и указания о полном затухании поля на бесконечно удаленных границах.

Проанализируем вариант модели преобразователя со следующими основными относительными геометрическими характеристиками: $D_c/D_s = 0,2$; $H_c/D_s = 1,25$; $l_1 = l_2 = l_3$; $R_{сф} = 2D_c$ (рис. 3).

Первичную обмотку представим намотанной бесконечно тонким проводом по всей длине сердечника, т.е. $H_1 = H_c - l_3$ и $D_1 \approx D_c$. Будем считать, что обмотка имеет площадь поперечного сечения S_1 с числом витком W_1 . Плотность тока возбуждения первичной обмотки $j = W_1 I / S_1$, где W_1 — число витков обмотки возбуждения, I — полный ток.

При расчете Ψ_{12} приняты следующие допущения:

- вторичная обмотка с числом витков W_2 разложена на множество (например, $j = I, II, III$) единичных осесимметричных вторичных обмоток; радиусы R_j единичных вторичных обмоток приняты равными $R_I \approx D_c / 2$; $R_{II} = (D_s - D_c) / 4$; $R_{III} \approx D_s / 2$;
- единичные обмотки с одинаковыми радиусами расположены равномерно по высоте сердечника и находятся так близко друг к другу, что по рассчитанным значениям потокосцепления каждой отдельно взятой обмотки можно построить неразрывную функцию изменения потока Ψ_{1j} от толщины покрытия h и высоты сердечника H_c .

Вначале производится расчет потокосцепления Ψ_{1j} каждой единичной измерительной обмотки при разных значениях относительной толщины $h' = h / D_c$ для каждого из радиусов $R_j = (R_I, R_{II}, R_{III})$ и для относительного расстояния $z' = z / H_c$ от контактной поверхности сердечника.

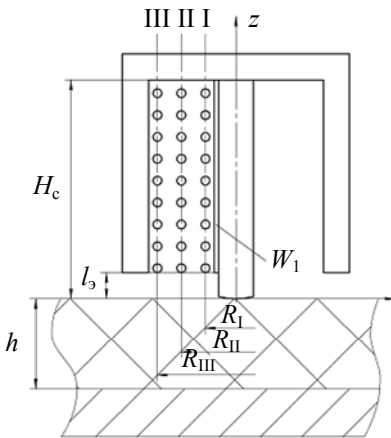


Рис. 3

Затем выполняется расчет функции относительного потокосцепления единичной обмотки $\psi(h'_i, R_j, z')$ для z' . Расчет функций производится для фиксированных значений $h'_i = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ и радиусов R_I, R_{II}, R_{III} .

Особый интерес представляет функция $\psi(h' = 0, R_j, z')$, определяющая диапазон изменения относительного потокосцепления единичной вторичной обмотки в зависимости от ее положения по высоте относительно сердечника при различных значениях радиуса. Максимальное значение $\psi(h'=0, R_j, z')$ достигается для единичных измерительных обмоток, располагающихся непосредственно у основания ($z'=0$). Однако всегда существует воздушный зазор l_2 , поэтому расчет $\psi(h'=0, R_j, z')$ следует начинать при $z' \neq 0$. Характер изменения и абсолютные значения $\psi(h'=0, R_j, z')$ для рядов измерительных обмоток с разными радиусами практически одинаковы. Так, начиная с $z' = 0,1$ результаты расчетов для разных R_j различаются не более чем на 3 %, а при $z' > 0,5$ различие не превышает 2 %. Как правило, на практике зазор l_2 соответствует $z' = 0,1$. Это дает возможность рассматривать один ряд единичных измерительных обмоток, предполагая при этом, что для других рядов результаты будут идентичны.

Расчеты были проведены только для единичных измерительных обмоток радиусом R_{II} , поэтому в выражении $\psi(h'_i, R_j, z')$ переменная R_j не учитывалась.

С увеличением толщины h' исследуемого покрытия чувствительность каждой единичной измерительной обмотки снижается и крутизна характеристики уменьшается. Функция $\psi(h'_i = 0,6, z')$ в этом случае не превышает величину 1,04 даже для единичных измерительных обмоток, расположенных у основания сердечника. При $z' > 0,5$ функция $\psi(h', z' > 0,5) = 1$, что соответствует теоретически достижимому максимуму толщины покрытия.

При расчетах основное внимание было уделено анализу влияния геометрических характеристик первичного преобразователя на его чувствительность и величину относительного потокосцепления. Были оптимизированы отношение D_c / D_3 и расположение обмоток.

В соответствии с результатами анализа магнитоиндукционные преобразователи можно условно разделить на три группы.

1. Малогабаритные преобразователи, предназначенные для измерения толщины гальванических покрытий в диапазоне до 300 мкм на малогабаритных изделиях (в основном это не ферромагнитные электропроводящие защитные покрытия, наносимые электрическим, электрохимическим или химическим способом).

2. Преобразователи общего назначения, предназначенные для измерения толщин в диапазоне до 2 мм (лакокрасочные и другие покрытия, наносимые на изделия сравнительно больших габаритов, с большими радиусами криволинейных поверхностей).

3. Преобразователи, предназначенные для измерения толщин в диапазоне до 30 мм (покрытия на изделиях больших габаритов с квазиплоскими поверхностями).

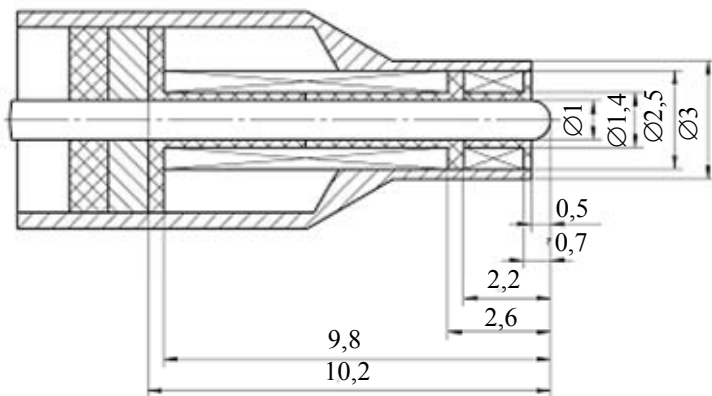
Преобразователи первой группы. К этой группе преобразователей предъявляются следующие основные требования:

- минимальные диаметр зоны измерения и диаметр экрана D_3 ;
- уменьшенный радиус сферы основания сердечника по сравнению с преобразователями других групп (для снижения погрешности, вызванной „качанием“ преобразователей „карандашного“ типа);
- повышенная износостойкость сердечника: требование связано с необходимостью проведения измерений гальванопокрытий большой твердости.

На рис. 4, а представлен преобразователь „карандашного“ типа ИД1 (без наружного подпружиненного корпуса) с уменьшенным радиусом сферы основания сердечника для

минимизации влияния „качания“ при измерениях. Относительные геометрические характеристики преобразователя: $D_c/D_3=0,4$; $H_c/D_3=4,1$; $l_3/D_3=0,2$; $l_2/D_3=0,28$; $H_2/D_3=0,6$; $R_{сф}/D_c=0,5 \Rightarrow \min$; $D_1=D_2=D_3$; $D_{21}=D_{22}=1,4D_c$.

а)



б)

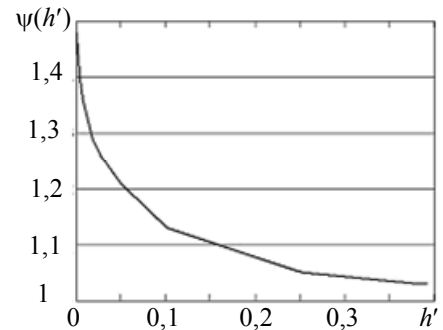


Рис. 4

Сердечник преобразователя изготавливается из конструкционной стали ШХ и покрывается слоем хрома толщиной 7 мкм, что обеспечивает малую истираемость и малую вероятность скола покрытия.

Благодаря симметрии магнитной системы преобразователя обеспечивается возможность проведения измерений с отклонением его оси от нормали к поверхности до 4° .

На рис. 4, б представлена зависимость $\psi(h')$.

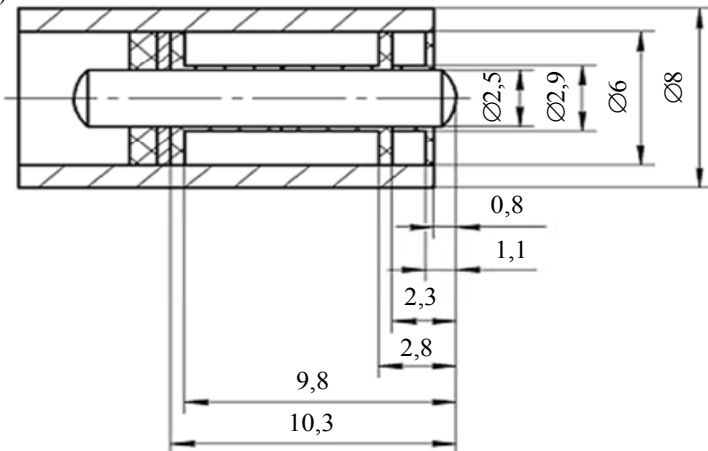
Преобразователи второй группы. Основные требования, предъявляемые к этой группе преобразователей следующие:

- диаметр зоны измерения порядка 5...8 мм;
- большое значение радиуса сферы основания сердечника, что обеспечивает лучшую чувствительность в области значительных толщин;
- повышенная износостойкость сердечника: требование связано с необходимостью проведения измерений со сканированием поверхности.

На рис. 5, а представлена конструкция преобразователя ИД2 с оптимизированными геометрическими характеристиками: $D_c/D_3=0,42$; $H_c/D_3=1,7$; $l_3/D_3=0,13$; $l_2/D_3=0,18$; $H_2/D_3=0,2$; $R_{сф}/D_c=0,7$; $D_1=D_2=D_3$; $D_{21}=D_{22}=1,16D_c$.

На рис. 5, б представлена зависимость $\psi(h')$.

а)



б)

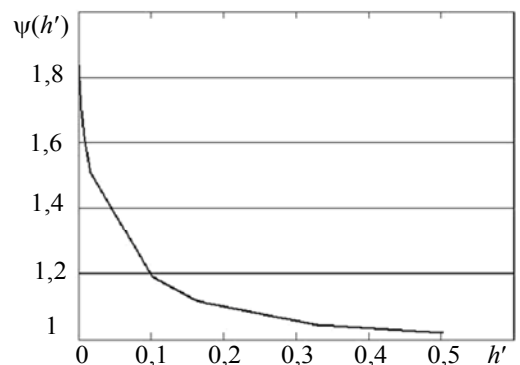


Рис. 5

Преобразователи третьей группы. Основные требования, предъявляемые к этой группе преобразователей:

- диаметр зоны измерения должен обеспечивать минимально возможный краевой эффект;

— радиус сферы основания сердечника близкий к плоскому.

Для измерения больших толщин покрытий можно спроектировать преобразователи с оптимальными геометрическими характеристиками. Для решения этой задачи рассмотрим конструкцию оптимизированного преобразователя ИДЗ (рис. 6, а), имеющего наружный подпружиненный корпус, что обеспечивает перпендикулярность установки к поверхности контролируемой детали. Относительные геометрические характеристики преобразователя: $D_c/D_3=0,45$; $H_c/D_3=0,9$; $l_1/D_3=0,09$; $l_2/D_3=0,13$; $H_2/D_3=0,08$; $R_{сф}/D_c=1,3$; $D_1=D_2=D_3$; $D_{21}=D_{22}=1,08D_c$.

На рис. 6, б представлена зависимость $\psi(h')$.

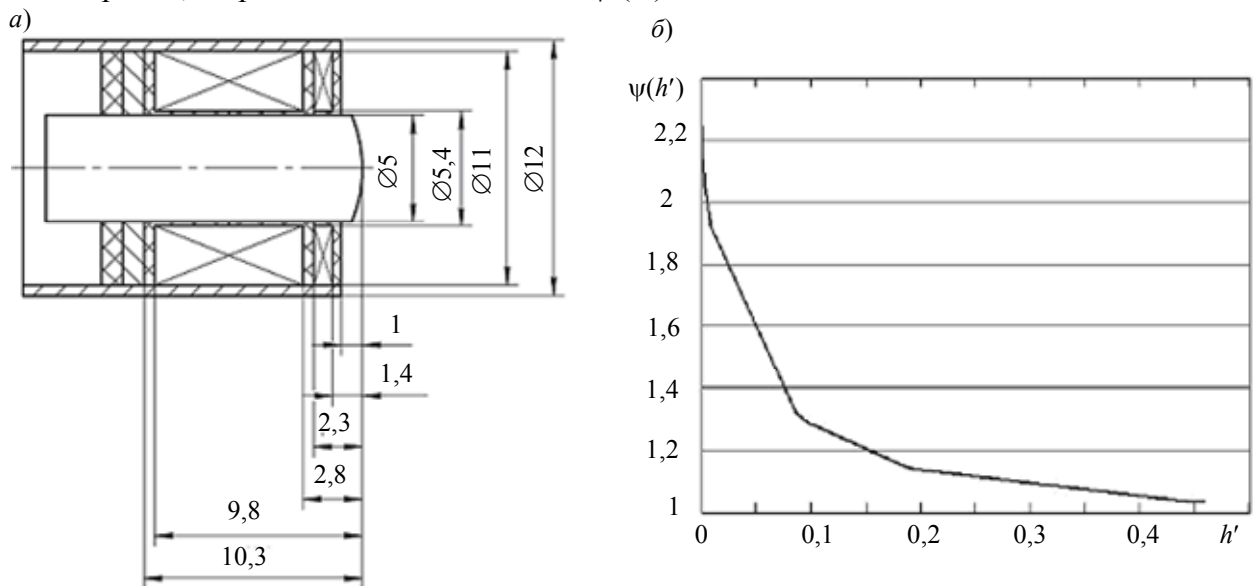


Рис. 6

Как показывает анализ графиков, представленных на рис. 4—6, б, при $\psi(h') > 0,08$ наклон характеристик отличается менее чем на 10 %, что подтверждает возможность проектирования геометрически подобных магнитоиндукционных преобразователей. Различие относительных геометрических характеристик при малых h' обусловлено трудностью реализации их оптимальных значений в силу небольших размеров преобразователей ИД2 и, особенно, ИД1.

Характеристики преобразователей, снятые экспериментально, отличаются от расчетных не более чем на 5—12 %.

На основе выполненных расчетов в ЗАО „Константа“ (Санкт-Петербург) была разработана новая серия износостойких магнитоиндукционных преобразователей для электромагнитных толщиномеров защитных покрытий. Изготовленные преобразователи предназначены для измерения контролируемых толщин в диапазоне от 1 мкм до 20 мм и обеспечивают погрешность измерения на уровне 1—2 %. Применение хромированных сердечников из стали ШХ позволило обеспечить очень низкую истираемость при эксплуатации. Разработка нашла применение в авиа-, судо- и машиностроении, а также на гальванических производствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: Науч.-метод. справ. пособие. СПб: Гуманистика, 2009.
2. Сясько В. А. Интегрирующий электромагнитный толщиномер // Дефектоскопия. 1990. № 12.
3. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа FNSYS: Учеб. пособие. М.: Академия, 2006.

Сведения об авторе

Владимир Александрович Сясько — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный заочный технический университет; кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург;
E-mail: 9334343@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
приборов контроля и систем
экологической безопасности

Поступила в редакцию
24.05.10 г.