

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# *ДЕФЕКТОСКОПИЯ*

№ 12

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*

*1990*

4. Шлеенков А. С., Кротов Л. Н., Щербинин В. Е., Копьев М. А. Многоэлементный преобразователь для магнитной дефектоскопии. — Дефектоскопия, 1987, № 9, с. 60—65.

5. Зацепин Н. Н., Щербинин В. Е., Морозов Е. В., Дубровин В. Н. Установка для контроля швов электросварных труб. — Дефектоскопия, 1972, № 3, с. 86—90.

6. Щербинин В. Е. Контроль швов электросварных труб. — В кн.: Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля. Труды ИФМ УНЦ АН СССР. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1982, с. 75.

7. Шлеенков А. С., Щербинин В. Е., Кротов Л. Н., Бульчев О. А. О возможности измерения внешних магнитных полей по параметрам переходных процессов в цепях с нелинейной индуктивностью. — Дефектоскопия, 1988, № 12, с. 56—65.

8. Кротов Л. Н., Шлеенков А. С., Щербинин В. Е., Бульчев О. А. Преобразователь магнитного поля на основе переходных процессов в цепи с нелинейной индуктивностью. — Дефектоскопия, 1989, № 1, с. 27—33.

9. Hüschebraht G., Schneider P. New Applications of the Computerized Multiprobe Flux Leakage Test System STAR. — Lecture NUCEM GmbH. Hanau, 1986. — 13 S.

УДК 620.179.14

## ИНДУКЦИОННЫЙ ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ТОЛЩИНОМЕР

В. А. Сясько

Описаны схема и алгоритм обработки первичной информации индукционного интегрирующего толщиномера. Приведены основные соотношения для расчета параметров, результаты экспериментальных исследований и технические характеристики.

Для известных индукционных толщиномеров характерно влияние мешающих факторов (температуры окружающей среды, электропроводности  $\sigma$  покрытия и основания, толщины  $T_0$  и магнитной проницаемости  $\mu$  основания, сетевых и высокочастотных наводок и др.) и нестабильности параметров преобразователей на погрешность измерения  $\Delta$  при относительно небольших пределах измерения. Перед началом работы необходимо проводить прогрев, а также калибровку при изменении мешающих факторов [1].

Постоянно уменьшающаяся величина допусков при расширении диапазона толщин  $T$  (до десятков миллиметров) и номенклатуры электропроводящих покрытий на крупногабаритных ферромагнитных основаниях в судостроении и других отраслях промышленности потребовали разработки широкодиапазонного высокостабильного индукционного толщиномера для цеховых условий. Уровень развития современной микроэлектронной техники позволяет при проектировании толщиномеров использовать структурные принципы уменьшения  $\Delta$  и помехоподавляющие методы получения и обработки первичной информации [2, 3].

Для первичного трансформаторного преобразователя индукционного толщиномера с двумя соосными обмотками — измерительной  $W_1$  и источника аксиального магнитного поля  $W$  — представляет интерес использование в качестве первичного информативного параметра напряжения [3, 4]

$$u(T) = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_{t_0}^{t_0+\tau} e(t) dt = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} (\Psi_0 + \Psi_{\text{в}}(T)) = u_0 + u_{\text{в}}(T), \quad (1)$$

где  $e(t)$  — эдс, наведенная на обмотке  $W_1$  при коммутации источника поля  $W$  в момент подключения  $t_0$  к источнику постоянного напряжения  $U$ ;  $\tau_{\text{и}}$  — постоянная времени интегратора;  $\tau$  — время интегрирования (коммутации);  $\Psi_{\text{в}}(T)$  — вносимое потокосцепление, обусловленное магнитными свойствами основания;  $\Psi_0$  — стационарное значение потокосцепления обмоток при  $T = \infty$ ;  $u_{\text{в}}(T)$  — вносимое напряжение.

В [3] показано, что при  $\tau$ , большем времени существования вихревых токов в покрытии и основании (времени нарастания тока  $i(t)$  в источнике поля до стационарного значения  $I_0$ ) и кратном периоде сетевого напряжения  $\tau_c$ , исключается влияние  $\sigma$  покрытия и основания, а также сетевых наводок на  $u(T)$ .

При анализе трансформаторного преобразователя с первичным индуктивным параметром (1) введем следующие допущения: обмотку источника поля с количеством витков  $W$  заменим эквивалентным витком радиусом  $R$  с током  $I=I_0W$  и пренебрежем геометрическими размерами обмотки  $W_1$ , выбрав ее радиус равным эквивалентному  $R_1$  [5], примем  $T_0=\infty$ .

Вычислим  $\Psi_{\text{в}}(T)$  методом зеркальных отображений [5, 6] — введем зеркально расположенный относительно границы раз-

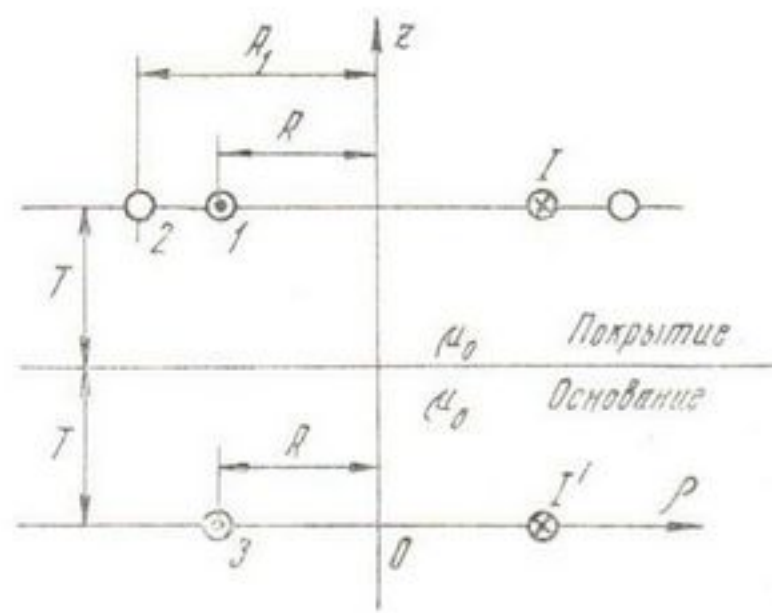


Рис. 1. Расчетная модель трансформаторного преобразователя над ферромагнитным полупространством: 1 — источник поля; 2 — измерительная обмотка; 3 — фиктивная обмотка.

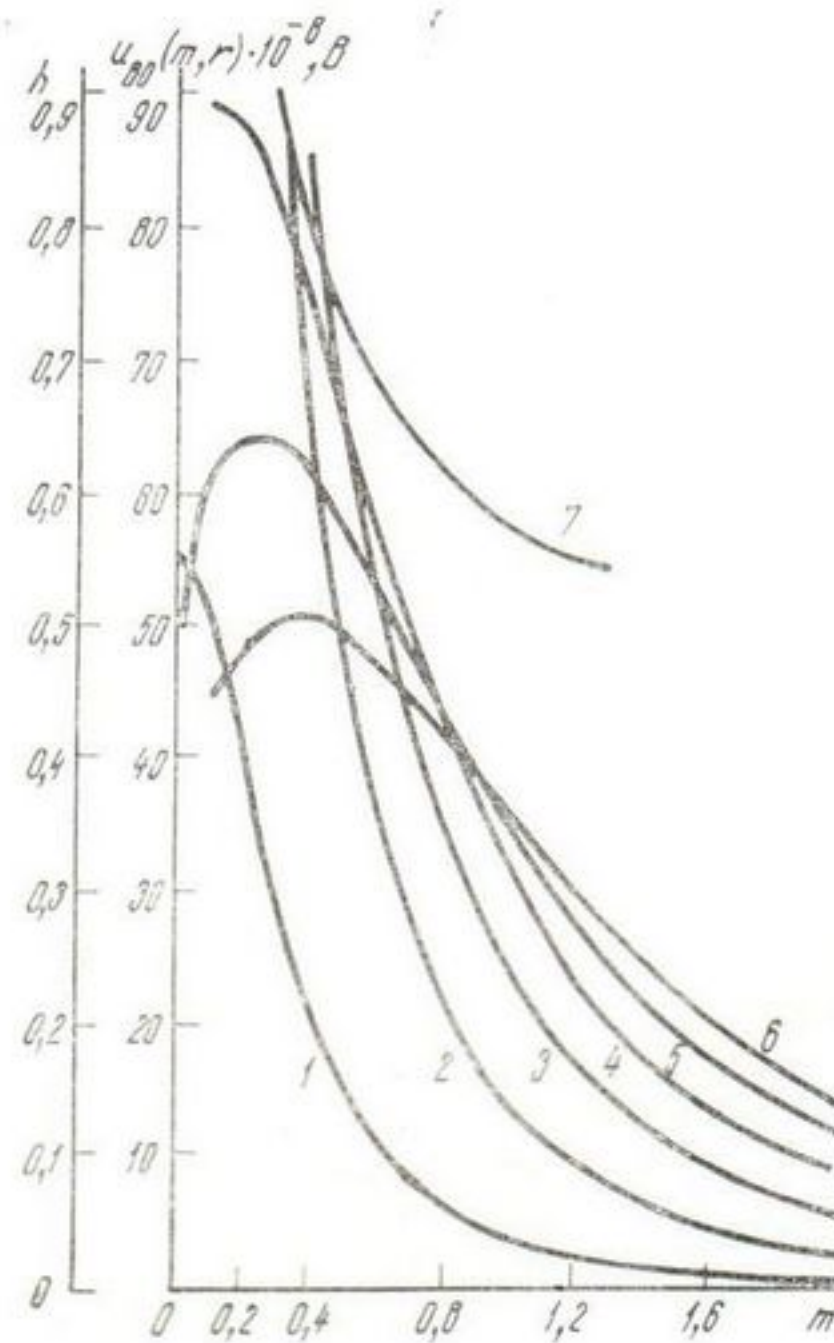


Рис. 2. Зависимость  $u_{\text{в}0}(m, r)$  (кривые 1—6) и  $h(m)$  (кривая 7) при единичных параметрах измерительного преобразователя:

1 —  $r=0.5$ ; 2 — 1; 3 — 1.5; 4 — 2; 5 — 2.5; 6 — 3;  
7 —  $r_1=1$  и  $r_2=1.5$ .

дела покрытие — основание фиктивный виток радиусом  $R$  с током

$$I' = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} I, \quad (2)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость основания. Магнитную проницаемость всего пространства будем считать равной  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$  Гн/м (рис. 1).

Из рис. 1 в соответствии с [5] следует, что вносимое потокосцепление  $\Psi_{\text{в}}(T)$  определяется аксиальной составляющей  $B_z'(z=2T, \rho)$  индукции  $B'$ , создаваемой фиктивной обмоткой, и площадью  $S_{\text{н}}$  поперечного сечения измерительной обмотки

$$\Psi_{\text{в}}(T) = W_1 \int_{S_{\text{н}}} B_z'(z=2T, \rho) dS = 2\pi W_1 \int_0^{R_1} B_z'(z=2T, \rho) \rho d\rho. \quad (3)$$

Для принятой модели [6]

$$B'_z(z = 2T, \rho) = \frac{I' \mu_0}{2\pi} \frac{1}{[(R + \rho)^2 + (2T)^2]^{1/2}} \left[ K(k) + \frac{R^2 - \rho^2 - (2T)^2}{(R - \rho)^2 + (2T)^2} L(k) \right], \quad (4)$$

где  $K(k)$  и  $L(k)$  — полные эллиптические интегралы первого и второго рода;

$$k^2 = \frac{4R\rho}{(R + \rho)^2 + (2T)^2}.$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по (1)–(4) номограммы напряжения  $u_{в0}(m = T/R, r = R_1/R)$  при  $W = W_1 = 1, I_0 = 1$  А,  $R = 1$  м,  $\tau_{н} = 1$  с и  $\mu = \infty$ , с использованием которых можно определить величину вносимого напряжения для заданных  $\mu$  и параметров преобразователя

$$u_{в}(m, r) = I_0 \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{W W_1}{\tau_{н}} R u_{в0}(m, r). \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что при введении в состав трансформаторного преобразователя двух измерительных обмоток с отличающимися  $r_1$  и  $r_2$  и вычислении отношения

$$h(m) = u_{в}(m, r_1) / u_{в}(m, r_2) \quad (6)$$

будет подавляться влияние  $\mu$  на  $h$ . Вместе с тем представленная на рис. 2 (кривая 7) зависимость  $h(m, r_1 = 1, r_2 = 1,5)$  показывает снижение чувствительности преобразователя с информативным параметром (6) примерно в два раза и уменьшение диапазона измеряемых толщин.

Линейное преобразование  $\Psi$  в цифровой код  $N$  может выполняться аналого-цифровым преобразователем на базе двухтактного интегратора и микроконтроллера [4]. В этом случае

$$N = a_0(t) + a_1(t) \Psi(m, T_0, I_0, \mu, \dots), \quad (7)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — коэффициенты градуировочной характеристики преобразования. При данном одноцикловом алгоритме преобразования показания толщиномера будут зависеть от мешающих факторов, а также от коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ .

В соответствии со сказанным выше введем в состав преобразователя две отличающиеся по геометрическим характеристикам измерительные обмотки и выполним последовательно четыре цикла преобразования:

$$\Psi(m_1, r_1) \rightarrow N_1; \quad (8a)$$

$$\Psi(m_1, r_2) \rightarrow N_2; \quad (8б)$$

$$\Psi(m_2, r_1) = \Psi_0(r_1) \rightarrow N_{10}; \quad (8в)$$

$$\Psi(m_2, r_2) = \Psi_0(r_2) \rightarrow N_{20}, \quad (8г)$$

где  $\Psi(m_i, r_j)$  — потокосцепление источника поля и измерительных обмоток на покрытии ( $m = m_1$ ) и вдали от него ( $m_2 \gg m_{\max}$  — максимального значения  $m$ ), после чего вычислим отношение

$$n(m_1) = (N_1 - N_{10}) / (N_2 - N_{20}). \quad (9)$$

Выполнение в (9) вычитания и последующего деления исключает зависимость  $n(m)$  от  $a_0$  и  $a_1$ . Из (1) и (6)–(8) также следует, что  $n(m) = h(m)$ , то есть подавляется влияние  $\mu$  на  $n(m)$ .

На основании выполненных ранее разработок [3, 4] был спроектирован и внедрен на ряде предприятий электромагнитный толщиномер «Константа», цифровая часть которого и основные технические харак-

теристики описаны в [7]. Функциональная схема индукционного измерительного преобразователя и временные диаграммы работы представлены на рис. 3 и 4.

Работа преобразователя синхронизируется с использованием программируемого делителя частоты  $D1$ , на вход  $CLKO$  которого подаются

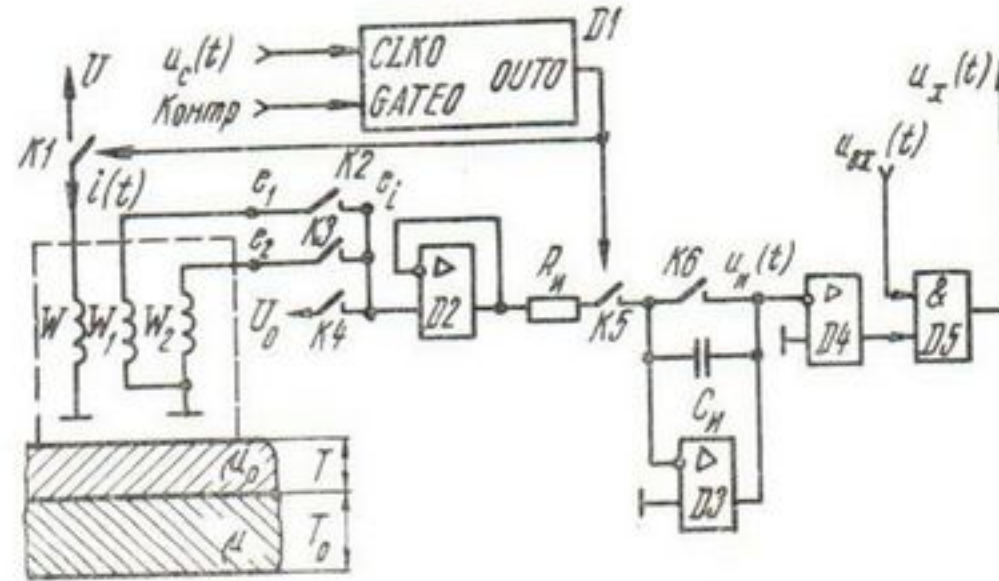


Рис. 3. Функциональная схема измерительного преобразователя толщиномера:

$D1$  — программируемый делитель частоты (КР580ВН53);  $D2-D4$  — операционные усилители (КР544УД1);  $D5$  — К155ЛН1; ключи:  $K1$  — электронный (КТ818);  $K2-K6$  — аналоговые (КР590КН2); обмотки:  $W$  — источник поля,  $W_1, W_2$  — измерительные.

импульсы  $u_c(t)$  с периодом следования  $\tau_c$ , при этом на выходе  $OUTO$  формируются импульсы длительностью  $\tau = b\tau_c$  ( $b = 1, 2, 3, \dots$ ). В момент  $t_0$  начала преобразования замыкается ключ  $K2$ , на вход  $GATEO$  с микроконтроллера подается команда *Контроль*. Во временном интервале

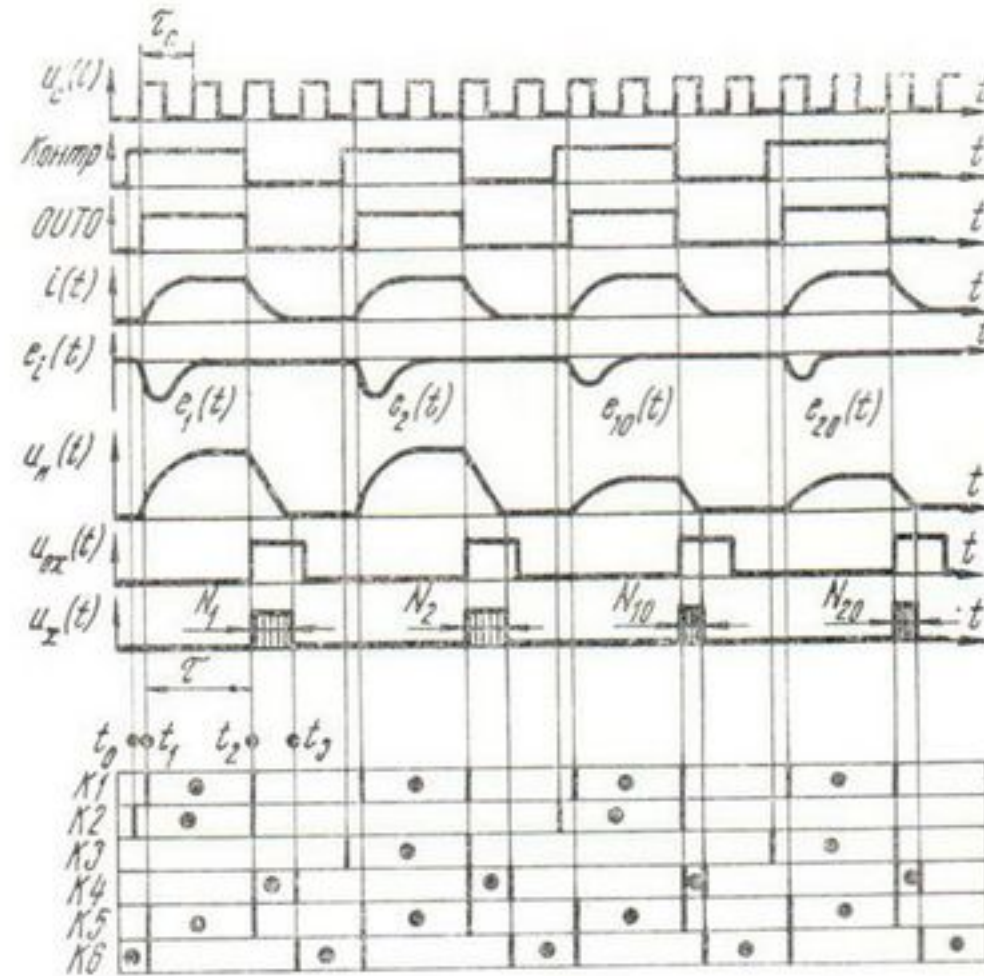


Рис. 4. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу толщиномера, и таблица состояния ключей:

● — замкнутое состояние ключа.

$t_2 - t_1 = \tau$  замыкаются ключи  $K1$  и  $K5$ , ток  $i(t)$  возрастает от нуля до стационарного значения  $I_0$  и осуществляется интегрирование импульса эдс  $e_1(t, m, r_1)$ . В момент  $t_2$  ключи  $K1$  и  $K2$  размыкаются, замыкается  $K4$  и на вход повторителя  $D2$  подается опорное напряжение  $U_0$ , что вызывает линейное уменьшение напряжения  $u_n(t)$  на выходе ин-

тегратора  $D3$ . В момент  $t_3$ , когда  $u_{\text{и}}(t_3) = 0$ , срабатывает компаратор  $D4$  и схема устанавливается в исходное состояние. Импульс  $u_x(t)$  длительностью  $\tau_1 = t_3 - t_2$  с выхода  $D5$  подается на вход микроконтроллера, где заполняется импульсами с частотой следования  $f = 2$  МГц, число которых  $N = f\tau_1$  заносится в память.

Аналогично в конце второго цикла определяется  $N_2$ . Обновление  $N_{10}$  и  $N_{20}$  осуществляется с интервалом 1—5 мин в зависимости от необходимой временной погрешности. При этом на индикатор толщиномера выдается сообщение 0000, означающее, что оператор должен поднять трансформаторный преобразователь над покрытием на высоту  $T \gg T_{\text{max}}$ , после чего определяются значения  $N_{10}$  и  $N_{20}$ .

Итак, в точке контроля по  $N_1$  и  $N_2$ , а также определенным в цикле обновления  $N_{10}$  и  $N_{20}$  вычисляется  $n(T)$  по (9), после чего по градуировочной характеристике вычисляется  $T$  [4]. Градуировочная характеристика снимается при аттестации толщиномера с помощью образцовых мер толщины на заданных основаниях и записывается в его постоянное запоминающее устройство.

В [3] рассмотрены основные источники кратковременной нестабильности показаний интегрирующих толщиномеров, главными из которых являются высокочастотные наводки и падение напряжений во входных цепях за счет протекания в них токов, а также получено условие обеспечения заданной погрешности  $\Delta m$  при толщине покрытия  $m_i$ , которое для индукционного преобразователя можно записать в виде

$$|u_j(m_i, r_j) - u_j(m_i + \Delta m, r_j)| > 4\pi W_j R_j \mu_0 H_{\text{max}} + |\Delta U_j|, \quad (10)$$

где  $H_{\text{max}}$  — амплитуда напряженности поля высокочастотной наводки частоты  $\omega \gg 2\pi/\tau$ ;  $\Delta U_j$  — девиация падения напряжения во входной цепи.

На основании изложенного выше был разработан комплект трансформаторных преобразователей, параметры которых приведены в таблице.

Основные параметры первичных трансформаторных преобразователей

Параметр	Обмотка	Преобразователь		
		1	2	3
Количество витков Диаметр провода, мм	$W'$	$\frac{1300}{0,14}$	$\frac{1000}{0,28}$	$\frac{600}{0,31}$
	$W_1$	$\frac{7000}{0,05}$	$\frac{7000}{0,05}$	$\frac{7000}{0,05}$
	$W_2$	$\frac{7000}{0,05}$	$\frac{10000}{0,05}$	$\frac{10000}{0,05}$
Средний диаметр, мм Сечение, мм <sup>2</sup>	$W'$	$\frac{9,5}{5 \times 5}$	$\frac{13}{10 \times 10}$	$\frac{35}{10 \times 10}$
	$W_1$	$\frac{23}{5 \times 5}$	$\frac{31}{5 \times 5}$	$\frac{55}{5 \times 5}$
	$W_2$	$\frac{34}{5 \times 5}$	$\frac{46}{5 \times 5}$	$\frac{75}{5 \times 5}$
Диапазон контролируемых толщины, мм	—	0,01—12	2—25	5—50

Исследование нескольких вариантов преобразователей позволило сделать вывод о том, что при радиусе  $R$ , превышающем в 3—4 раза ли-

нейные размеры сечений обмоток, погрешность расчета характеристик по (2)—(6) и (10), а также по рис. 1 не превышает 10—15%. Результаты долговременных испытаний толщиномера с указанными в таблице преобразователями, выполненных по аналогии с [4], показали, что плавное изменение температуры от  $-10$  до  $+40^\circ\text{C}$  вызывает дополнительную относительную температурную погрешность  $\delta T_2 \leq 0,002T$ , а также позволили выбрать время обновления  $N_{10}$  и  $N_{20}$  порядка 3 мин. Влияние сетевых и импульсных наводок, электропроводности покрытия и основания, параметров и режимов аналоговой части уменьшено в 50—200 раз.

Влияние магнитной проницаемости основания исследовали на образцах с  $T_0 > R$ . В экспериментах  $\mu$  изменялось от 300 (сталь Ст3) до 50 (сталь АК29). Для первого преобразователя при одноцикловом режиме работы изменение  $\mu$  приводило к погрешности  $\Delta T_1$  от 0,12 мм ( $T = 5$  мм) до 0,2 мм ( $T = 12$  мм), в то время как при использовании преобразователя (9) погрешность  $\Delta T_2 < 0,015$  мм, что соответствует подавлению влияния  $\mu$  примерно в 10 раз. Влияние  $T_0$  исследовали на образцах из стали Ст3. Для второго преобразователя изменение  $T_0$  от 20 до 2 мм во всем диапазоне толщин покрытий вызывает  $\Delta T_2 < 0,3$  мм, в то время как при одноцикловом режиме работы  $\Delta T_1$  достигает 1,2 мм.

Возможность записи до 14 градуировочных характеристик в постоянное запоминающее устройство толщиномера, а также принятые меры уменьшения влияния мешающих факторов позволили для каждого из преобразователей перекрыть широкий диапазон изменения  $\mu$  и  $T_0$  основания, исключив органы регулировки и операции ручной калибровки. Предусмотрена возможность накопления результатов измерения (до 127 точек) и последующего просмотра. Наличие в составе толщиномера микроконтроллера с параллельным интерфейсом позволяет встраивать его в автоматизированные системы контроля.

#### Техническая характеристика толщиномера «Константа»

Диапазон измеряемых толщин, мм . . . . .	0,05—50
Относительная погрешность измерения, мм . . . . .	не более $\pm(0,015T+0,02)$
Относительная магнитная проницаемость основания . . . . .	не менее 30
Толщина основания, мм . . . . .	не менее 2
Радиус изделия в зоне контроля, мм . . . . .	не менее 800
Время измерения в точке контроля, с . . . . .	0,2
Время самопрогрева, мин . . . . .	1
Масса, кг . . . . .	1,1
Питание от сети переменного тока:	
напряжением, В . . . . .	220 (36)
частотой, Гц . . . . .	50
Потребляемая мощность, ВА . . . . .	7

ЦНИИ технологии судостроения  
Ленинград

Поступила в редакцию  
12 февраля 1990 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Кн. 2. Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. — 356 с.
2. Брандорф В. Г., Сясько В. А. Разработка и исследование автоматической сканирующей системы ориентации. — Дефектоскопия, 1984, № 8, с. 66—72.
3. Сясько В. А. Автоматизация неразрушающего контроля крупногабаритных неметаллических изделий: Автореф. канд. дис. — Л.: Северо-Западный заочный политехнический институт, 1988. — 16 с.
4. Брандорф В. Г., Сясько В. А. Интегрирующий электромагнитный толщиномер в составе автоматизированной системы контроля. — Дефектоскопия, 1988, № 3.
5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 488 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1986. — 263 с.
7. Сясько В. А. Электромагнитный толщиномер «Константа». — Тезисы докл. III межотраслевой конференции «Неразрушающие методы контроля изделий из полимерных материалов». — Туапсе, 1989, с. 116—117.