

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ե. Տ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ. Բ. ՆԵՐՏԵՅԱՆ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ
 ЩЕЛЕВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ

В измерительных системах, предназначенных для измерения геометрических размеров в металлургической промышленности, широкое применение нашли толщиномеры, основанные на различных физических принципах. Среди них наиболее эффективными являются вихретоковые преобразователи трансформаторного типа (ВТП) [1]. Однако известные ВТП по принципу их построения имеют ограниченную область применения и, в частности, не применяются при измерении толщины высокоэлектропроводных металлов в процессе их прокатки.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия ВТП, позволяющего с высокой точностью измерить толщину листов, лент и фольги непосредственно при их прокатке.

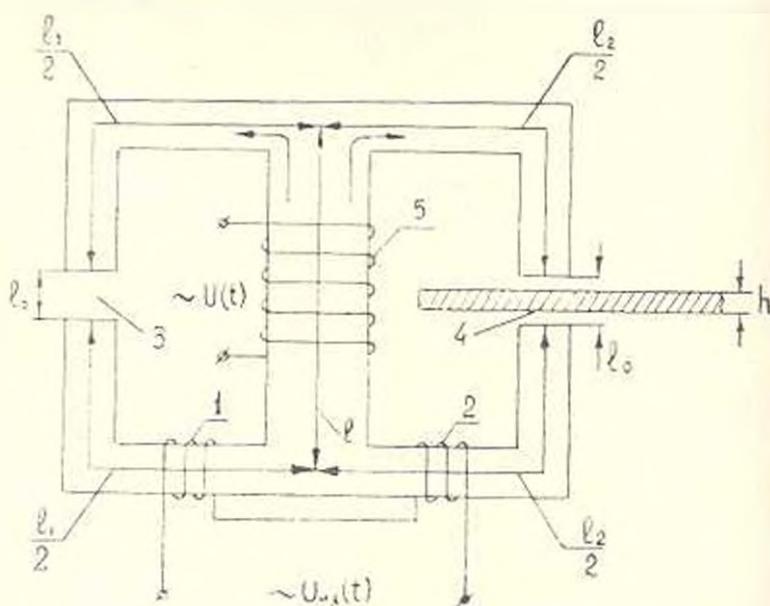


Рис. 1. Конструкция вихретокового преобразователя трансформаторного типа.

Измеритель толщины состоит из трехстержневого симметричного магнитопровода (рис. 1), боковые стержни которого снабжены дифференциальными вихретоковыми датчиками.

рещиально включенными измерительными обмотками 1 и 2 и имеют зазоры 3 и 4, в одном из которых помещают контролируемое изделие. На среднем стержне намотана обмотка возбуждения 5. При подключении обмотки возбуждения к источнику питания, ввиду идентичности магнитных потоков боковых стержней, на зажимах измерительной обмотки сигнал отсутствует. Если в один из зазоров внести контролируемое изделие, то на выходе измерительной обмотки появится сигнал, пропорциональный толщине контролируемого изделия.

Наиболее сложной задачей для таких измерителей является определение выражения для выходного сигнала в зависимости от измеряемой толщины h . Для этой цели воспользуемся обозначениями рис. 1. Составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = ri + W' \frac{d\Phi}{dt}; \\ iW + l_2 = Hl + H_0 l_0 + H_{01} l_0; \\ iW = Hl + H_1 l_1 + H_{01} l_0; \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(t)$, r — напряжения возбуждения и активное сопротивление обмотки возбуждения; Φ , Φ_1 , Φ_2 — потоки соответствующих участков магнитной цепи измерителя; l и l_1 , l_2 — средняя длина неразветвленной и разветвленных частей магнитной цепи; l_0 — длина воздушных зазоров; W' — число витков намагничивающей обмотки; H_0 , H , H_1 , H_2 , H_{01} — магнитные напряженности поля соответствующих участков; i_1 — эквивалентный вихревой ток в проводящем материале, внесенный в воздушный зазор измерителя.

Выражение для тока i_1 можно получить, исходя из закона электромагнитной индукции [2]:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (2)$$

Представим, что магнитная индукция в воздушном зазоре, где помещен электропроводящий лист (рис. 2), изменяется законом $B(t) = B_m \sin \omega t$. Для простоты примем, что магнитный поток обхватывает лист площадью, имеющий круглую форму диаметром $2a$.

Левая часть уравнения (2) представляет суммарную э.д.с., наведенную в проводящем листе, и поэтому

$$e = \oint \vec{E} d\vec{l} = 2\pi R E(R),$$

где R — текущий радиус площади S , обхватываемый магнитным потоком $\Phi_1 = B(t) S$.

С учетом последнего, выражение (2) примет вид

$$2\pi R E(R) = -\pi R^2 B_m \cos \omega t.$$

Напряженность электрического поля в проводящем листе определяется:

$$E(R) = \frac{\omega B_m}{2} R \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

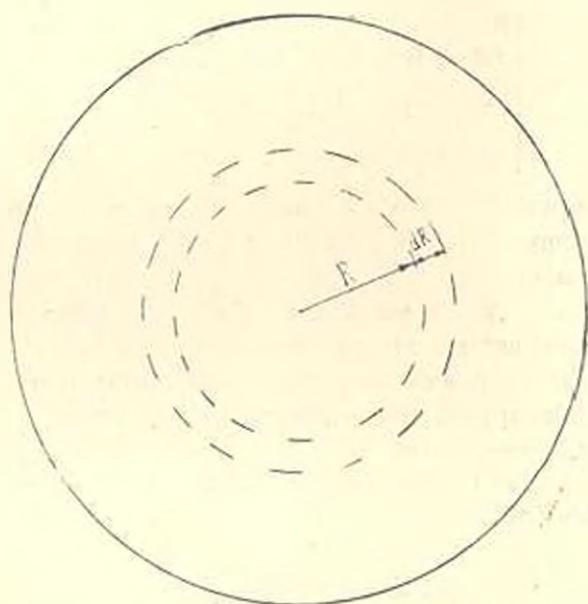
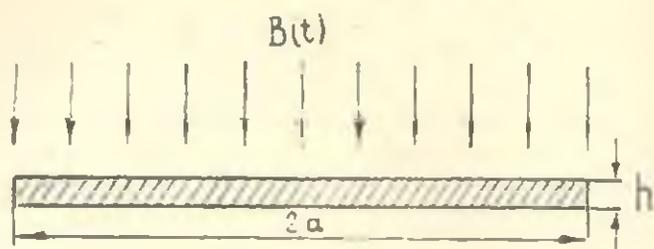


Рис. 2. К определению эквивалентного вихревого тока в проводящем изделии.

при этом плотность тока проводимости в листе будет:

$$z(R) = \gamma E(R) = \frac{\gamma \omega B_m}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

где γ — удельная электрическая проводимость листа. Окончательно получим выражение для тока в проводящем листе:

$$i_z = \int_S z(R) dS = \int_0^a z(R) h dR,$$

где $dS = h dR$; h — измеряемая толщина листа, или

$$i_1 = \gamma \omega h \frac{B_m a^{3/2}}{4\pi} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\gamma \omega h}{4\pi} \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

Считая, что сечения стержней магнитопровода одинаковые и равны S' , для напряженностей поля отдельных участков получим:

$$H = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi}{2S'}; \quad H_1 = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi_1}{S'}; \quad H_2 = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi_2}{S'};$$

$$H_{01} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Phi_1}{S'}; \quad H_{02} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Phi_2}{S'}.$$

Учитывая эти выражения, второе и третье уравнения из системы (1) перепишем в таком виде:

$$iW + l_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} \Phi_1 + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \Phi_1;$$

$$iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} \Phi_1 + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \Phi_2.$$

Последние выражения с учетом четвертого уравнения из системы (1) примут вид:

$$iW + l_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + \left(\frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \right) \Phi =$$

$$= \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + K_1 \Phi_1;$$

$$iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_1 + \left(\frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \right) \Phi_2 = \frac{l \Phi_1}{\mu \mu_0 2S'} + K_2 \Phi_2,$$

где

$$K_1 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'}; \quad K_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'}.$$

Ввиду симметрии магнитной цепи можно принимать, что $l_1 = l_2$ и при этом $K_1 = K_2 = K$.

Так как магнитопровод ВТП имеет воздушные зазоры, то с небольшим допущением можно принимать, что $\mu = \text{const}$. Если к обмоткам возбуждения приложено напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону, то процессы, происходящие в измерителе, будут аналогичными. Тогда исходная система уравнений может быть представлена в комплексной форме:

$$\begin{cases} U = rI + j\omega W' (\Phi_1 + \Phi_2); \\ iW + i_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + K\Phi_1; \\ iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_1 + K\Phi_2; \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \end{cases} \quad (4)$$

Для подтверждения теоретических результатов были изготовлены измерители с различными конструктивными параметрами. Например, преобразователь с параметрами: $l_1 = l_2 = 721 \text{ мм}$; $l = 54 \text{ мм}$; $l_0 = 2 \text{ мм}$; $S = 64 \text{ мм}^2$; $W = 500$; $W_1 = 800$; материал сердечника — Э44, и при $U_0 = 6 \text{ В}$; $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ имел следующую характеристику, снятую для алюминия марки А-99 (табл.).

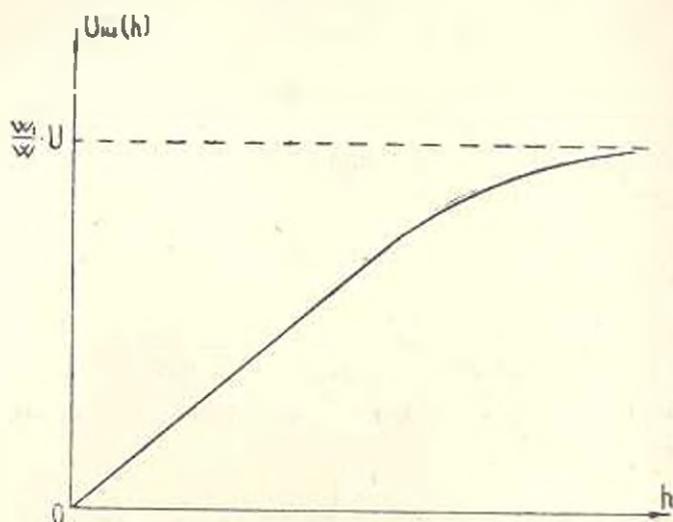


Рис. 3. Выходная характеристика преобразователя.

Таблица

U_{ω}	теор., мВ	42,5	83,2	147	198,8	212,5	246,5	293	334,6	378,2	418,3
	исп., мВ	40,7	80,9	140	160,6	200,3	239,4	279,8	319,6	359,6	399,7
h	мм	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

Опытный образец толщиномера имеет следующие технические характеристики.

1. Диапазон измерений, мм 0... 1000
2. Погрешность измерений, % от верхнего предела измерений ± 2
3. Температура окружающей среды, °С -10 до +40
4. Относительная влажность до 95%
5. Температура контролируемой ленты, °С -10 до +165
6. Скорость перемещения ленты, м/с 0 до 10
7. Напряжение питания, В 220
8. Частота, Гц 50
9. Потребляемая мощность, Вт 10
10. Масса, кг 5
11. Габариты, мм 120×200×250

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения по сравнению с активным значительно больше ($\omega L \gg r$), поэтому последним можно пренебречь. Учитывая это, из системы (4) получим:

$$\Phi_1 = \frac{U}{W} \frac{4\pi(l_1 + l_0\mu)}{4\pi\omega(l_1 + 2l_0\mu + l_1)j - \omega^2\gamma h\mu\mu_0 S'};$$

$$\Phi_2 = \frac{4\pi(l_1 + l_0\mu) + j\omega\gamma h\mu\mu_0 S'}{4\pi(l_1 + l_0\mu)} \Phi_1.$$

Суммарное напряжение на зажимах измерительной обмотки при встречном включении будет:

$$U_{из} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 = j\omega W_1 \Phi_2 - j\omega W_1 \Phi_1, \quad (5)$$

где W_1 — число витков измерительных обмоток.

С учетом значения Φ_1 и Φ_2 выражение (5) примет вид:

$$\dot{U}_{из} = U \frac{W_1}{W_2} \left| \frac{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2 (l_1 + \mu l_0)^2} + j \frac{8\pi\omega\mu\mu_0 S' \gamma h (l_1 + \mu l_0)}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2 (l_1 + \mu l_0)^2} \right|.$$

действующее значение которого будет:

$$\dot{U}_{из}(h) = U \frac{W_1}{W_2} \frac{\omega\mu\mu_0 S' \gamma h \sqrt{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2 (l_1 + \mu l_0)^2}}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2 (l_1 + \mu l_0)^2}.$$

Анализ функции $U_{из}(h)$ осуществим, пользуясь упрощенной формой записи. Для этого обозначим:

$$U \frac{W_1}{W_2} = K; \quad \omega\mu\mu_0 S' \gamma = a; \quad 64\pi^2 (l_1 + \mu l_0)^2 = b.$$

После небольших преобразований окончательно получим:

$$U_{из}(h) = \frac{ah}{\sqrt{a^2 h^2 + b}} K.$$

Найдем критические значения функции. Для этого определим $\frac{dU_{из}}{dh}$ и приравняв ее к нулю, получим:

$$K(a^2 h^2 + b - a^2 h^2) = 0.$$

Из этого следует, что функция $U_{из}(h)$ не имеет критических значений. Она монотонно возрастающая и $U_{из}(h) = 0$, $D_{из}(h) = U \frac{W_1}{W_2}$.

На рис. 3 показана зависимость выходного сигнала от измеряемой толщины. Фазовый сдвиг между приложенным и измеряемым напряжениями определяется

$$\varphi = \arctg \frac{8\pi(l_1 + \mu l_0)}{\omega\mu\mu_0 S' \gamma h}.$$

Разработанный измеритель установлен на Канакерском алюминиевом заводе для непрерывного измерения толщины прокатки ленты на стане «КВАРТО—250» [3]

ЕрПИ им. К. Маркса

8. X. 1981

Յ. Ս. ԿԱՆԱԿԵԱՆ, Վ. Բ. ՆԵՐՍԵՍՅԱՆ

ՕՒԱՅԻՆ ԲԱՑԱԿՈՎ ԵՐՐԿԱ-ՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓԻՉԻՍԵՍԱԿԱՆ ՀԱՐՑԵՐԸ ԵՎ ԿՈՐԾՆԱԿԱՆ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկվում է արանսֆորմատորային տիպի մրրկա-հոսանքային փոխակերպիչի մի քանի կոնստրուկտիվ ստանձնահատկությունները՝ Իրականացված է տեսական հետազոտություն՝ հենվելով փոխակերպիչում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսները ընթացող հավասարումների վրա: Բերված է հաստատություն շափող սարքի տեխնիկական ընթացիքը, որը մշակվել է՝ Ելնելով այդ հետազոտումից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Катса В. В.* Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий.— М.: Машиностроение, 1976.—326 с.
2. *Поливанов К. М.* Теория электромагнитного поля.— М.: Энергия, 1975.— 207 с.
3. *Нерсисян В. Б., Манукян Е. С.* Отчет по проектно-конструкторской работе «Исследование и разработка устройства, а также его внедрение на прокатном стане «КВАРТО—250» и на травильном агрегате для непрерывного измерения толщины алюминиевой ленты и конденсаторной фольги.—ЕрПИ, ТК 995/80, № 60040545 гос. рег., 1981—42 с.