

УДК 621.317.39:531.767.

## **ВИХРЕТОКОВЫЙ СЕНСОР ТОЛЩИНЫ И СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПРОВОДЯЩЕЙ НЕМАГНИТНОЙ ПОЛОСЫ**

***В. Б. Нерсисян***

Государственный инженерный университет Армении.  
Кафедра “Теоретические основы электротехники”.  
375009, г. Ереван, ул. Терана 105 тел: (3741) 521792  
e-mail nvardges@freenet.am

### **Аннотация**

#### **ВИХРЕТОКОВЫЙ СЕНСОР ТОЛЩИНЫ И СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПРОВОДЯЩЕЙ НЕМАГНИТНОЙ ПОЛОСЫ**

***В. Б. Нерсисян***

Проведено исследование электромагнитных процессов в динамическом режиме в вихретоковом сенсоре. Приведена картина магнитных потоков. Определены трансформаторная ЭДС и ЭДС движения, а также токи, обусловленные этими ЭДС. Магнитная индукция и МДС этих токов определены с учетом линейной плотности токов. Разработана методика одновременного измерения скорости и толщины прокатки полосы.

**Ключевые слова:** динамический режим, магнитный поток, вихретоковый, трансформаторный.

### **Анотація**

#### **ВИХОРОСТРУМОВИЙ СЕНСОР ТОВЩИНИ І ШВИДКОСТІ ПРОВІДНОЇ НЕМАГНІТНОЇ СМУГИ, ЩО РУХАЄТЬСЯ**

***В. Б. Нерсисян***

Проведено дослідження електромагнітних процесів у динамічному режимі у вихорострумовому сенсорі. Наводиться картина магнітних потоків. Визначено трансформаторна ЕРС і ЕРС руху, а також струми, обумовлені цими ЕРС. Магнітна індукція і МРС цих струмів визначені з урахуванням лінійної густини струмів. Розроблено методику одночасного виміру швидкості і товщини прокатки смуги.

**Ключові слова:** динамічний режим, магнітний потік, вихорострумовий, трансформаторний.

## Summary

EDDY CURRENT SENSOR OF THICKNESS AND SPEED  
OF MOVED CONDUCTING UNMAGNETIZED BAND

V. B. Nersisyan

Electromagnetic processes are investigated in dynamic conditions on the eddy current sensor. The magnetic flux picture is given. E.m.f. and e.m.f motion transformation as well as current conditions by these e.m.f. are determined. Magnetic induction and e.m.f of these currents are determined in terms of linear current density. The technique of simultaneous of speed and band rolling thickness measurement is developed.

**Key words:** the dynamic mode, magnetic flux, eddy current, transformer.

Измерение параметров проводящей неферромагнитной полосы в процессе прокатки, в частности, толщины и скорости, является важной технико-экономической задачей, для решения которой применяют различные физические принципы и соответствующие методы. Среди них наиболее целесообразным с точки зрения практического использования является вихретоковый метод, сущность которого заключается в следующем: прокатываемая проводящая полоса, расположенная в щелевом зазоре вихретокового сенсора (ВТС), пронизывается рабочим магнитным потоком. При этом в полосе индуцируются два вида ЭДС: трансформаторная и ЭДС движения, вызывающие в свою очередь соответствующие токи, магнитные потоки которых могут быть представлены как результат наложения потоков, создаваемых каждым током в отдельности [1,2].

Частично эти процессы были проанализированы в [3,4]. Однако представляет интерес обобщение описания этих явлений, что является целью настоящей работы.

На рис.1 а показаны рабочий зазор магнитной цепи ВТС с движущейся со скоростью  $V$  неферромагнитной проводящей полосой толщиной  $h$ , а также закономерность распределения токов трансформации (вихревые) и движения. В полосе условно на первой строке показаны зависимости токов от скорости движения  $i_v$  (рис.1 б) а на второй — от трансформации  $i_T$  (рис.1 в), причем стрелками и крестиками обозначены направления этих токов. Здесь же приведена картина магнитного поля, где  $B_0$  — магнитная индукция в зазоре, обусловленная токами обмотки возбуждения,  $V$  — линейная скорость движения полосы,  $h$  — тол-

щина полосы,  $\delta$  — величина рабочего воздушного зазора ВТС,  $\Phi_p$  — рабочий магнитный поток, обусловленный токами возбуждения  $\Phi_T$  — магнитный поток от токов трансформации  $i_T$  в полосе,  $\Phi_v$  — магнитный поток от токов скорости  $i_v$  в полосе;  $K_1$  и  $K_2$  измерительные катушки скорости движения полосы,  $K_3$  — измерительная катушка толщины полосы.

Считается, что магнитное поле в зазоре ВТС плоскопараллельное в аксиальном направлении, и поэтому по всей длине зазора индукция одинакова, а во времени изменяется по синусоидальному закону:  $B_0(t) = B_0(x, y, t) = B_0 \sin \omega t$ , где  $-b_0 < x < b_0$ ,  $-a_0 < y < a_0$ .

Трубки токов  $i_v$  и  $i_T$ , показанные на рис.1 б и в, если на полосу смотреть сверху.

Примем также, что магнитное поле возбуждения  $B_0$  в рабочем зазоре магнитной цепи вдоль оси  $z$  одинаково в пределах всего ее сечения  $2a_0 \times 2b_0$  и совпадает с геометрией сечения полюсных наконечников. Магнитные поля токов  $i_v$  и  $i_T$  полосы, существующие практически намного больше, чем в сечении воздушного зазора  $2a_0 \times 2b_0$ , имеют только  $z$ -ю составляющую и замыкаются через ферромагнитный сердечник полюсного наконечника.

Определим магнитный поток, обусловленный токами скорости  $i_v$  в полосе (рис.1 б). На расстоянии  $x$  от центральной оси  $OO'$  полюсного наконечника сечением  $hdx$  показана трубка тока  $i_v$ . Активная длина такой трубки равна  $2a_0$ , и в ней индуцируется ЭДС

$$e_v^y(x) = V 2a_0 B_{0m} \sin \omega t. \quad (1)$$

Как следует из рис.1 в, длина трубки тока  $i_v$  будет  $l_v(x) = 2a_0 + 2\pi r_n + 2a_0$ , где  $r_n = b_0 - x$  — радиус лобовой части трубки. Тогда  $l_v(x) = 4a_0 + 2\pi(b_0 - x)$ .

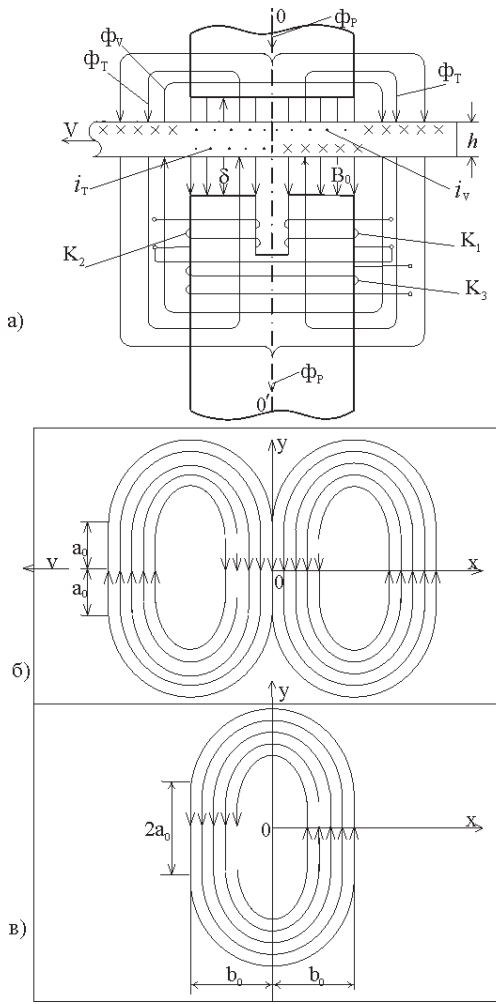


Рис. 1. Воздушный зазор ВТС с проводящей полосой. Картина магнитного поля, распределение токов в полосе

Активное сопротивление замкнутой трубки будет  $R(x) = \rho l(x)/h dx$ .

Элементарный ток в трубке будет равен

$$di(x) = \frac{e_y(x)}{R(x)} = V 2a_0 B_0 \frac{h dx}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (2)$$

Получаем величину линейного тока на единицу длины вдоль оси  $x$

$$\tau(x) = \frac{di(x)}{dx} = \frac{V 2a_0 h B_0}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (3)$$

Если не учитывать сопротивление лобовых участков, получим  $\tau_0 = V h B_0 / \rho 2$ .

График  $\tau(x)$  показан на рис.2а.

МДС от тока  $\tau(x)$  будет равна  $F_Z(x) = \tau(x) x$  (график рис.2,б).

Так как величина воздушного зазора между поверхностями наконечников полюсов (в ра-

бочем зазоре ВТС) везде одинакова и равна  $\delta$ , то индукция в зазоре от токов в полосе будет равна

$$B_Z(x) = \mu_0 \frac{F_Z(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{2a_0 B_0 h x}{\delta \rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (4)$$

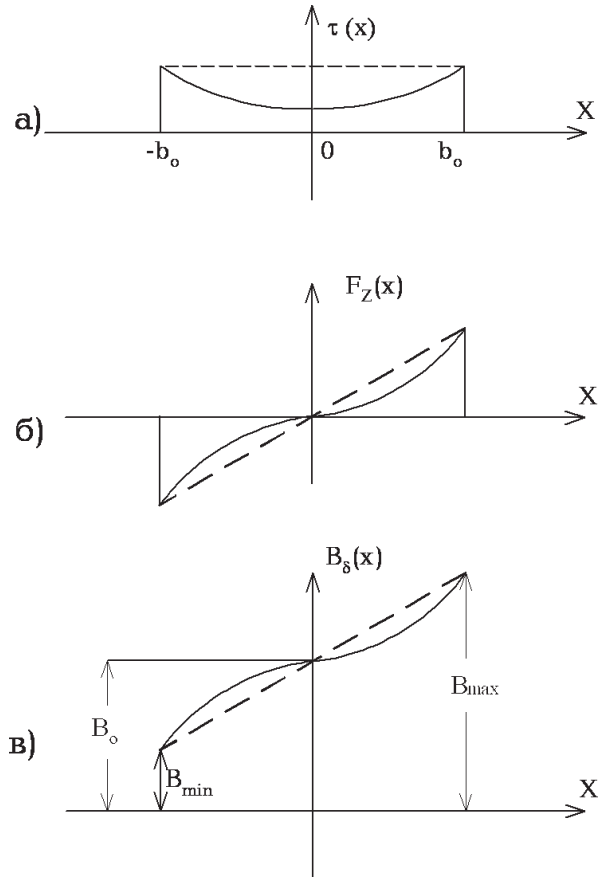


Рис. 2. Распределение линейного тока, МДС и индукции в полосе под полюсным наконечником

Полная индукция в зазоре будет (см.рис.2. в)  $B_0(x) = B_0 + B_Z(x)$ .

Определим магнитный поток через катушку  $K$  от токов в полосе:

$$\begin{aligned} \Phi &= 2a_0 \int_0^{b_0} B_Z(x) dx = \\ &= \mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{\rho \delta} \int_0^{b_0} \frac{x dx}{4a_0 + 2\pi b_0 - 2\pi x}. \end{aligned} \quad (5)$$

Интегрируя, получим

$$\begin{aligned} \Phi &= -\mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi \rho \delta} \times \\ &\times \left[ b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \left( \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

При питании обмоток возбуждения полюсов переменным током индукция  $B_o$  будет переменной гармонической функцией  $B_o(t) = B_{om} \sin(\omega t + \varphi)$ .

С учетом этого комплексное действующее значение магнитного потока  $\Phi_v$  скорости от  $i_v$  будет

$$\Phi_v = -\mu_0 \frac{(2a_o)^2 h}{2\pi r \delta} (b_o + \frac{2a_o + \pi b_o}{\pi} \ln \frac{2a_o}{2a_o + \pi b_o}) V B_{om} \sin \omega t. \quad (7)$$

Теперь определим магнитный поток  $\Phi_T$  от вихревых токов  $i_T$  в полосе.

Как следует из рис.1в, трубка тока  $i_T$  имеет длину  $l_T(x) = 2a_o + 2\pi x + 2a_o = 4a_o + 2\pi x$ . Активная проводимость вдоль этой трубки обратна ее активному сопротивлению, поскольку можно пренебречь магнитным полем вихревых токов (т.е. пренебречь индуктивностью трубки), а следовательно, и соответствующим индуктивным сопротивлением.

В результате имеем

$$dg_T(x) = \gamma \frac{h dx}{l_T(x)}, \quad (8)$$

где  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  — проводимость материала полосы;  $h dx$  — сечение трубки тока  $i_T$ . Индуцируемая ЭДС в площади, ограниченной  $l_T(x)$ , будет

$$e_y^T(t) = -(2a_o + 2\pi x) \frac{dB}{dt} = -(4a_o + 2\pi x) B_{om} \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (9)$$

Элементарный ток в трубке:

$$di_T = e_y^T dg_T = -(4a_o + 2\pi x) \omega \gamma \frac{h}{l_T(x)} B_{om} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) dx. \quad (10)$$

Получаем величину линейной плотности тока на единицу длины вдоль оси  $x$ :

$$\tau(x) = \frac{di_T(x)}{dx} = -(4a_o + 2\pi x) \omega B_{om} \gamma \frac{h}{l_T(x)} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (11)$$

Перепишем (6) с учетом:

$$\tau(x) = -(4a_o + 2\pi x) \omega B_{om} \gamma \frac{h}{l_T(x)} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (12)$$

МДС от тока  $\tau(x)$  будет

$$F_z(x) = \tau(x) x = -\omega \gamma h B_{om} \frac{(4a_o + 2\pi x)}{4a_o + 2\pi x} \times \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (13)$$

Индукция в зазоре:

$$B_z(x) = \mu_o \frac{F_z(x)}{\delta} = -\omega \gamma h B_{om} \times \frac{(4a_o + 2\pi x)}{(4a_o + 2\pi x) \delta} \mu_o \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (14)$$

Магнитный поток от вихревых токов полосы равен

$$\Phi_T = 2a_o \int_0^{b_o} B_z(x) dx = -2a_o \omega \gamma \mu_o h \frac{B_{om}}{\delta} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \times \int_0^{b_o} \frac{(4a_o + 2\pi x)}{4a_o + 2\pi x} dx = -\frac{2a_o b_o \omega \gamma \mu_o h}{\delta} \times \left[ C_o + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_o^3}{b_o} \ln(1 + \frac{\pi b_o}{2a_o}) \right] B_{om} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

$$\text{Здесь } C_o = \frac{b_o^2}{3} - \frac{2a_o^2}{\pi^3} + \frac{a_o b_o}{2\pi^2} - \frac{1}{2\pi} \frac{b_o^2}{3}.$$

Как следует из рис.1а магнитный поток в пределах половины полюсного наконечника левее от оси  $OO'$  через катушку  $K_2$  будет

$$\Phi_d = \frac{1}{2} \Phi_p - \frac{1}{2} \Phi_v + \Phi_T, \quad (16)$$

а правее от оси  $OO'$  через катушку  $K_1$ :

$$\Phi_n = \frac{1}{2} \Phi_p + \frac{1}{2} \Phi_v + \Phi_T. \quad (17)$$

Из выражения потоков  $\Phi_l$  и  $\Phi_n$  следует, что для измерения толщины прокатываемой полосы необходимо так установить дифференциально включенные измерительные обмотки  $K_1$  и  $K_2$ , чтобы площади обмоток одной половины пронизывались потоком  $\Phi = \Phi_d + \Phi_n = \Phi_p + 2\Phi_T$  (катушка  $K_3$ ), а площади второй половины — потоком  $\Phi_p$  (расположенные на стержне обмотки возбуждения, на рисунке не показаны). В результате будем иметь

$$\begin{aligned}
e_T &= -w_T \frac{d(\Phi_p + 2\Phi_T - \Phi_p)}{dt} = \\
&= -2w_T \frac{d\Phi_T}{dt} = 2w_T \frac{2a_0 b_0 \omega^2 \mu_0 h}{\delta} \times \\
&\times \left[ C_0 + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_0^3}{b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m} \sin \omega t.
\end{aligned} \quad (18)$$

При измерении скорости полосы необходимо секции дифференциально включенных обмоток  $K_1$  и  $K_2$  установить так, как это показано на рис. 1а. При этом ЭДС движения будет равна

$$\begin{aligned}
e_v &= -w_v \frac{d(\Phi_d - \Phi_n)}{dt} = \\
&= -w_v \frac{d\Phi_T}{dt} = \omega w_v \mu_0 \frac{2a_0^2 \gamma h}{\pi \delta} \times \\
&\times \left( b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) V B_{0m} \cos \omega t.
\end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, выходные ЭДС катушек трансформации  $K_3$  пропорциональны толщине полосы и не зависят от скорости полосы, а выходные ЭДС катушек скорости  $K_1$  и  $K_2$  пропорциональны толщине и скорости полосы.

ЭДС  $e_v$  и  $e_T$  находятся в квадратуре (рис. 1г). Так как

$$E_T = C_T h \omega^2; E_v = C_v h \omega V,$$

где

$$\begin{aligned}
C_T &= 4w_T a_0 b_0 \mu_0 \left[ C_0 + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_0^3}{b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m} \\
C_v &= w_v \mu_0 a_0^2 \gamma \left( b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) B_{0m}
\end{aligned} \quad (20)$$

коэффициенты, зависящие от параметров полосы и конструкции ВТС,  $\omega$  — угловая частота возбуждения,  $h$  — толщина полосы,  $V$  — скорость движения полосы, отношение величин этих ЭДС не зависит от параметров полосы:

$$\frac{E_v}{E_T} = \operatorname{tg} \varphi = A \frac{V}{\omega} \quad (21)$$

$$\text{где } A = \frac{w_v a_0 (b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0})}{w_T 2b_0 [C_0 + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_0^3}{b_0} \ln(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0})] \pi}.$$

Поскольку угол  $\varphi$  не зависит от параметров полосы и является функцией ее скорости, то задача компенсации влияния параметров полосы на результат измерения скорости будет решена, если при постоянной частоте возбуждения в качестве выходной измеряемой величины выбрать этот угол.

Максимальная чувствительность измерителя толщины и скорости полосы достигается при равенстве величин ЭДС трансформации и движения:

$$E_T = E_v. \quad (22)$$

Таким образом, разработка, исследование и конструирование ВТС с одновременным измерением толщины и скорости прокатки полосы резко повышает эффективность использования этого класса сенсоров и расширяет область применения.

### Список литературы

1. Нерсисян В.Б. Патент N1223026 (Российская Федерация). Вихретоковый преобразователь 30.06.93.
2. Нерсисян В.Б. Определение параметров эквивалентной схемы замещения вихретокового толщиномера // Изв.НАН РА и ГИУА. Сер. Тех.науки. –2000.–Т.53, N 3.– С. 377–381.
3. Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б. Определение толщины проводящей пластины в зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя// Изв.НАН РА и ГИУА. Сер. Тех.науки. –2001.– N 1. — С. 67–75.
4. Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б. Определение скорости прокатки проводящей полосы вихретоковым методом.// Изв.НАН РА. Сер. Тех.науки. – 2001.– N 3.– С. 384–394.