

В.Б. НЕРСИСЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ И СКОРОСТИ ПРОКАТКИ НЕФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ

Проведено исследование электромагнитных процессов в динамическом режиме вихретокового преобразователя. 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.

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 преобразователя (ВТП), 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].

Отдельно эти процессы были проанализированы в [3, 4].

Однако представляет интерес также обобщение этих явлений, что и является целью настоящей работы.

На рис.1 а показаны рабочий зазор магнитной цепи ВТП 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 - толщина полосы; δ - величина рабочего воздушного зазора ВТП; Φ_p - рабочий магнитный поток, обусловленный токами возбуждения; Φ_t - магнитный поток от токов трансформации i_t в полосе; Φ_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.

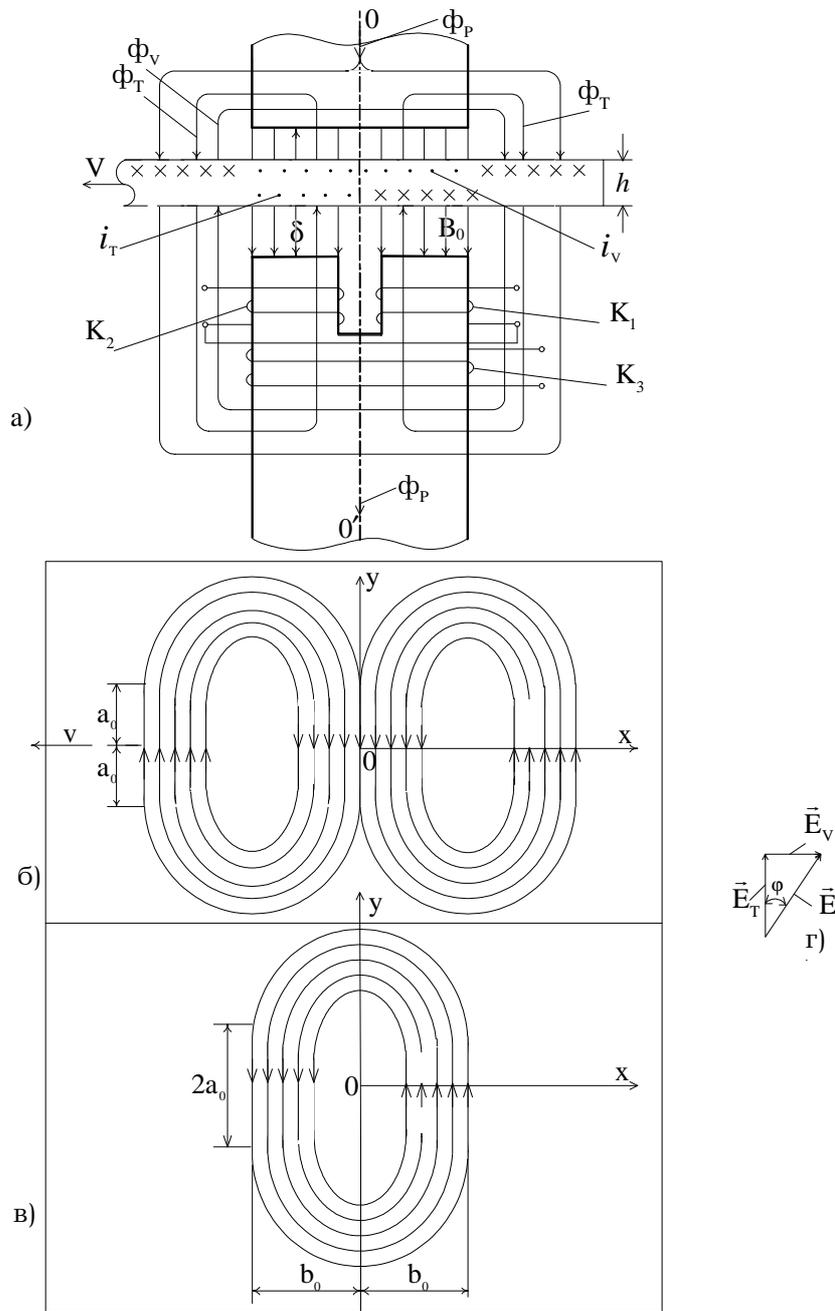


Рис.1

Считается, что магнитное поле в зазоре ВТП плоскопараллельное в аксиальном направлении, и поэтому по всей длине зазора индукция одинакова, а во времени изменяется по синусоидальному закону:

$$B_0(t) = B_0(x, y, t) = B_0 \sin \omega t, \text{ где } -b_0 < x < b_0, -a_0 < y < a_0.$$

Трубки токов i_v и i_T , показанные на рис.1 б и в, если на полосу смотреть сверху, учитывают наличие края полосы на расстоянии $a_0 + a_1$ вдоль оси y . В направлении отрицательной оси y принимаем, что размер полосы большой по сравнению с измерительной зоной преобразователя.

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 б, в длина трубки тока i_v будет $l_v(x) = 2a_0 + 2\pi r_L + 2a_0$, где $r_L = b_0 - x$ - радиус лобовой части трубки. Тогда $l_v(x) = 4a_0 + 2\pi(b_0 - x)$, что совпадает с исходными данными [4], где для магнитного потока Φ_v скорости от i_v было получено выражение

$$\Phi_v = -\mu_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) V B_{0m} \sin \omega t. \quad (2)$$

Теперь определим магнитный поток Φ_T от вихревых токов i_T в полосе.

Как следует из рис.1 в, трубка тока i_T имеет длину $l_T(x) = 2a_0 + 2\pi x + 2a_0 = 4a_0 + 2\pi x$. Активная проводимость вдоль этой трубки обратна ее активному сопротивлению, поскольку можно пренебречь магнитным полем вихревых токов, а следовательно, и соответствующим индуктивным сопротивлением.

В результате имеем

$$dg_T(x) = \gamma \frac{hdx}{l_T(x)}, \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ - проводимость материала полосы; hdx - сечение трубки тока i_T .

Индуцируемая ЭДС в площади, ограниченной $l_T(x)$, будет

$$e_{y^T}(t) = -(2a_0 2x + \pi x^2) \frac{dB}{dt} = -(4a_0 x + \pi x^2) B_{0m} \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Элементарный ток в трубке:

$$di_T(x) = e^T_y(x) dg_T(x) = -(4a_0x + \pi x^2) \omega \gamma \frac{h}{l_T(x)} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) dx. \quad (5)$$

На единицу длины вдоль оси x получаем величину линейной плотности тока:

$$\tau(x) = \frac{di(x)}{dx} = -(4a_0x + \pi x^2) \omega \gamma \frac{h}{l_T(x)} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (6)$$

Перепишем (6) с учетом $l_T(x)$:

$$\tau(x) = -(4a_0x + \pi x^2) \frac{\omega \gamma h}{4a_0 + 2\pi x} B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (7)$$

МДС от тока $\tau(x)$ будет

$$F_z(x) = \tau(x)x = -\omega \gamma h B_{0m} \frac{(4a_0x + \pi x^2)}{4a_0 + 2\pi x} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (8)$$

Индукция в зазоре:

$$B_z(x) = \mu_0 \frac{F_z(x)}{\delta} = -\omega \gamma h B_{0m} \frac{(4a_0x + \pi x^2)x}{(4a_0 + 2\pi x)\delta} \mu_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (9)$$

Магнитный поток от вихревых токов полосы равен

$$\begin{aligned} \Phi_T &= 2a_0 \int_0^{b_0} B_z(x) dx = -2a_0 \omega \gamma \mu_0 h \frac{B_{0m}}{\delta} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \times \\ &\times \int_0^{b_0} \frac{(4a_0x + \pi x^2)x}{4a_0 + 2\pi x} dx = \frac{-2a_0 b_0 \omega \gamma \mu_0}{\delta} h \times \\ &\times \left[C_0 + \frac{16}{\pi^2} \frac{a_0^3}{b_0} \ln(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}) \right] B_{0m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Здесь } C_0 = \frac{b_0^2}{3} - \frac{2a_0^2}{\pi^3} + \frac{a_0 b_0}{2\pi^2} - \frac{1}{2\pi} \frac{b_0^2}{3}.$$

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

$$\Phi_{д} = \frac{1}{2} \Phi_{р} - \frac{1}{2} \Phi_{v} + \Phi_T, \quad (11)$$

а правее оси OO' через катушку K_1 :

$$\Phi_{п} = \frac{1}{2} \Phi_{р} + \frac{1}{2} \Phi_{v} + \Phi_T. \quad (12)$$

Из выражения потоков $\Phi_{д}$ и $\Phi_{п}$ следует, что для измерения толщины прокатываемой полосы необходимо дифференциально включенные измерительные обмотки K_1 и K_2 установить так, чтобы площади обмоток одной половины

пронизывались потоком $\Phi = \Phi_{л} + \Phi_{п} = \Phi_{р} + 2\Phi_{т}$ (катушка Кз), а площади второй половины (расположенные на стержне обмотки возбуждения - на рисунке не показаны) - потоком $\Phi_{р}$. В результате будем иметь

$$\begin{aligned} e_{т} &= -w_{т} \frac{d(\Phi_{р} + 2\Phi_{т} - \Phi_{р})}{dt} = -2w_{т} \frac{d\Phi_{т}}{dt} = \\ &= 2w_{т} \frac{2a_0 b_0 \omega^2 \gamma \mu_0 h}{\delta} \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (13)$$

При измерении скорости полосы необходимо секции дифференциально включенных обмоток К1 и К2 установить так, как это показано на рис.1 а. При этом ЭДС движения будет равна

$$\begin{aligned} e_{v} &= -w_{v} \frac{d(\Phi_{л} - \Phi_{п})}{dt} = -w_{v} \frac{d\Phi_{т}}{dt} = \\ &= \omega w_{v} \mu_0 \frac{2a_0^2 \gamma h}{\pi \delta} \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) V B_{0m} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, выходные ЭДС катушек трансформации Кз пропорциональны толщине полосы и не зависят от скорости полосы, а выходные ЭДС катушек скорости К1 и К2 пропорциональны толщине и скорости полосы.

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

$$E_t = C_t h \omega^2; \quad E_v = C_v h \omega V,$$

где

$$\begin{aligned} C_t &= 4w_{т} a_0 b_0 \gamma \mu_0 \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] B_{0m}, \\ C_v &= w_{v} \mu_0 a_0^2 \gamma \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) B_{0m} - \end{aligned} \quad (15)$$

коэффициенты, зависящие от параметров полосы и конструкции ВТП; ω - угловая частота возбуждения; h - толщина полосы; v - скорость движения полосы, то отношение величин этих ЭДС не зависит от параметров полосы:

$$\frac{E_v}{E_t} = \operatorname{tg} \varphi = A \frac{V}{\omega}, \quad (16)$$

где

$$A = \frac{w_{v} a_0 \left(b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right)}{w_{т} 2b_0 \left[C_0 + \frac{16 a_0^3}{\pi^2 b_0} \ln\left(1 + \frac{\pi b_0}{2a_0}\right) \right] \pi}.$$

Поскольку угол φ 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 обмотки возбуждения в качестве выходной измеряемой величины выбрать этот угол.

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

$$E_{\tau} = E_v. \quad (17)$$

Таким образом, разработка, исследование и конструирование ВТП с одновременным измерением толщины и скорости прокатки полосы резко повышает эффективность использования этого класса преобразователей 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. ТН.- 2000. - Т.53, № 3. - С. 377- 381.
3. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение толщины проводящей пластины в зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя// Изв.НАН РА. Сер. ТН. - 2001. - № 1. - С. 67-75.
4. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение скорости прокатки проводящей полосы вихретоковым методом // Изв.НАН РА. Сер. ТН.-2001.- № 3. - С. 384-394.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.12.2001.

Վ.Բ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

ՈՉ ՖԵՌՈՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՂՈՂԻՉ ԹԻԹԵՂԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՀԱՐԺՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄՐԴԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՉԱՓԻՉԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԴԻՆԱՄԻԿ ՌԵՃԻՄՈՒՄ

Հետազոտված են էլեկտրամագնիսական պրոցեսները մրրկահոսանքային ձևափոխիչի դինամիկ ռեժիմում: Բերված է մագնիսական հոսքերի բաշխման օրինաչափությունը ձևափոխիչի օդային բացակում: Որոշվել են տրանսֆորմատորային և թիթեղի շարժումով պայմանավորված էլեկտրաշարժ ուժերը, ինչպես նաև նրանցով պայմանավորված հոսանքները: Այդ հոսանքների գծային խտությունից էլնելով՝ որոշվել են նրանց մագնիսաշարժ ուժը և մագնիսական ինդուկցիան: Մշակված է շարժվող թիթեղի արագության և հաստության միաժամանակյա չափման մեթոդ:

V.B. NERISSYAN

DYNAMIC WORKING CONDITIONS FOR EDDY-CURRENT THICKNESS AND ROLLING SPEED METER OF NONFERROMAGNETIC CONDUCTING BAND

Electromagnetic processes are investigated in dynamic conditions on the eddy-current transformer. 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 m.m.f. of these currents are determined in terms of linear current density. The technique of simultaneous speed and band rolling thickness measurement is developed.