

Г.Л. АРЕШЯН, В.Б. НЕРСИСЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Получены аналитические выражения для ЭДС в измерительных катушках скорости, расположенных на набегающем и сбегающем краях полюсного наконечника. Показано, что разность ЭДС E_v этих катушек совместно с ЭДС E_h должна использоваться для измерения в чистом виде скорости прокатки V . При этом исключается влияние на измеряемую величину толщины прокатки h .

Ключевые слова: магнитное поле, электропроводящая полоса, движение в поле.

Введение и принцип измерения скорости. Известные вихретоковые преобразователи (ВТП) применяют для контроля и измерения различных параметров технологических процессов в информационно-измерительных системах. Однако их использование при измерении толщины и скорости прокатки значительно ограничено. Для расширения области применения ВТП осуществим анализ электромагнитного процесса в движущейся со скоростью V проводящей полосе, расположенной в щелевом зазоре магнитной цепи преобразователя.

Поскольку первичный магнитный поток от МДС токов возбуждения является переменным во времени, то в движущейся проводящей полосе индуцируются два вида ЭДС: трансформаторная и ЭДС движения, а также возникают соответствующие токи и магнитные потоки, которые суммируются с первичным магнитным потоком, ослабляя и деформируя его. Так как в работе рассматриваются линейные уравнения электродинамики, то справедлив принцип суперпозиции при определении влияния токов от трансформаторных ЭДС и токов ЭДС движения. В настоящей работе исследуется реакция токов в полосе, возникающих от ЭДС движения [1].

На рис.1 показаны рабочий зазор магнитной цепи ВТП и закономерность распределения МДС токов полосы по оси направления перемещений. Здесь B_0 - магнитная индукция в зазоре; V - линейная скорость движения полосы; h - толщина полосы; δ - величина рабочего воздушного зазора ВТП; $F_z(x)$ - МДС токов в полосе; K_1 , K_2 - измерительные катушки скорости полосы.

Принимается, что магнитное поле в зазоре плоско-параллельное в аксиальном направлении. Поэтому по всей длине зазора индукция одинакова.

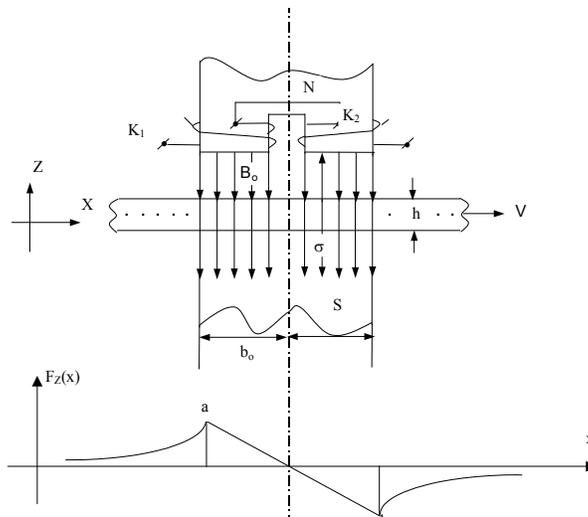


Рис.1

При перемещении полосы в воздушном зазоре со скоростью V картина направления токов в аксиальном направлении в полосе аналогична картине в обмотке якоря генератора постоянного тока (см.рис.64-7 в [2]). Отличие лишь в том, что вдоль направления движения полосы имеется один полюсный наконечник над ней и один под ней. В результате влияния индуцированных токов в полосе магнитное поле под набегающим краем полюсного наконечника будет ослабляться, а под сбегающим - усиливаться. На рис.2 схематично показана картина линий токов в полосе, если на нее смотреть сверху.

Картина токов учитывает наличие края полосы на расстоянии a_0+a_1 вдоль оси Y . В направлении отрицательной оси Y считаем, что размер полосы бесконечно большой (намного больше, чем a_0+a_1).

Примем, что магнитное поле возбуждения B_0 в рабочем воздушном пространстве магнитной цепи вдоль оси z одинаково в пределах всего ее сечения ($2a_0 \times 2b_0$), которое совпадает с геометрией сечения полюсных наконечников. Примем также, что магнитное поле токов $B_z(x)$ полосы существует практически только в том же сечении $2a_0 \times 2b_0$ воздушного зазора, имеет только z -ю составляющую и замыкается через ферромагнитный сердечник полюсных наконечников.

Рассмотрим вначале случай, когда магнитное поле полюсов возбуждения является постоянным $B_0(x,y,t)=const$, где $-b_0 < x < b_0$, $-a_0 < y < a_0$.

ЭДС движения (по аналогии с ЭДС вращения в электрических машинах) на единицу длины в активной зоне полосы на расстоянии x от центральной линии 00 (рис. 2) будет равна

$$e_v(x) = V l [B_0 + B_z(x)], \quad (1)$$

где $B_z(x)$ - индукция от токов в полосе.

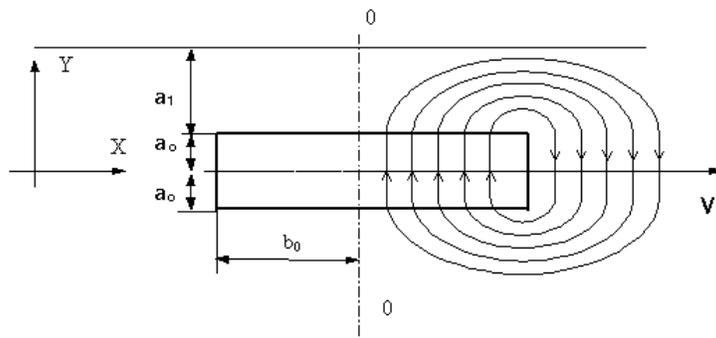


Рис. 2

В первом приближении $B_z(x)$ можно рассчитать, исходя из токов, которые возникают из-за действия ЭДС движения только от индукции B_0 . Во втором приближении используется формула (1) для расчета токов второго приближения и уточнения $B_z(x)$ - для расчета в третьем приближении.

Расчет плотностей токов в полосе, возникающих от ЭДС движения, может производиться методом сеточных моделей с учетом геометрии краев полосы размеров полюсных наконечников (здесь не рассматривается). После каждого приближения по токам определяется величина магнитной индукции под полюсными наконечниками. Далее определяются величины магнитных потоков через измерительные катушки скорости K_1 и K_2 , которые охватывают набегающую (K_1) и сбегаящую (K_2) стороны наконечника.

Величина $\Delta\Phi$ и разница $\Phi_2 - \Phi_1$ прямо пропорциональна скорости прокатки и B_0 :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = V B_0. \quad (2)$$

Задавая с помощью обмотки возбуждения переменное во времени магнитное поле

$$B_0(t) = B_{0m} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

получаем возможность за счет величины ЭДС в измерительных катушках K_1 и K_2 , включенных встречно, измерить скорость V движения полосы прокатки.

Упрощенный аналитический расчет по первому приближению. Рассмотрим трубку с током на расстоянии x от центральной оси полюсного наконечника (рис.2) сечением hdx . Активная длина такой трубки равна $2a_0$, и в ней имеется ЭДС:

$$e_y(x) = V 2a_0 B_0. \quad (4)$$

Полная длина такой трубки будет (рис.3)

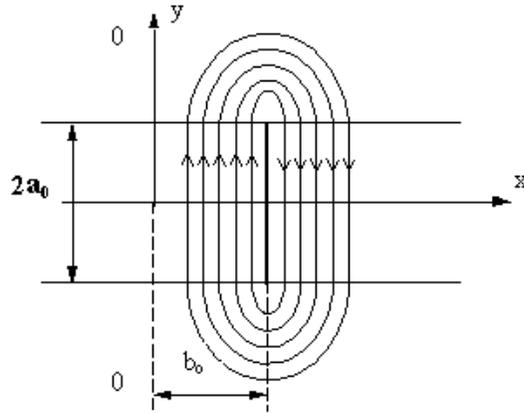


Рис. 3

$$l(x) = 2a_0 + 2\pi r_n + 2a_0, \quad (5)$$

где r_n - радиус закруглений в лобовых частях, $r_n = b_0 - x$. Тогда

$$l(x) = 4a_0 + 2\pi(b_0 - x). \quad (6)$$

Активное сопротивление замкнутой трубки будет

$$R(x) = \rho l(x) / h dx. \quad (7)$$

Элементарный ток в трубке будет равен

$$di(x) = \frac{e_y(x)}{R(x)} = V 2a_0 B_0 \frac{h dx}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (8)$$

На единицу длины вдоль оси x получаем величину линейного тока

$$\tau(x) = \frac{di(x)}{dx} = \frac{V 2a_0 h B_0}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (9)$$

Если не учитывать сопротивление лобовых участков, получим

$$\tau_0 = V h B_0 / \rho 2. \quad (10)$$

График $\tau(x)$ показан на рис.4а.

МДС от тока $\tau(x)$ будет равна (график рис.4 б)

$$F_z(x) = \tau(x) x. \quad (11)$$

Так как величина воздушного зазора между поверхностями наконечников (в рабочем зазоре ВТП) полюсов везде одинакова и равна δ (рис.1), то индукция в зазоре от токов в полосе будет

$$B_z(x) = \mu_0 \frac{F_z(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{2a_0 B_0 h x}{\delta \rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (12)$$

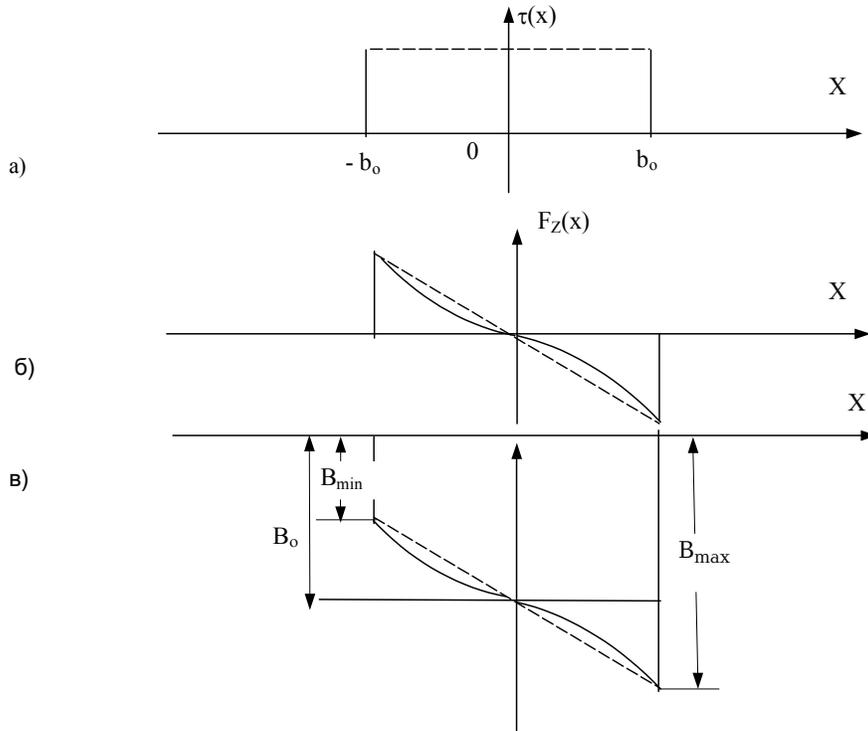


Рис. 4

Полная индукция в зазоре будет (см.рис.4 в)

$$B_{\delta}(x) = B_0 + B_Z(x). \quad (13)$$

Определим магнитный поток через катушку К от токов в полосе:

$$\Delta\Phi = 2a_0 \int_0^{b_0} B_Z(x) dx = \mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{\rho\delta} \int_0^{b_0} \frac{xdx}{4a_0 + 2\pi b_0 - 2\pi x}. \quad (14)$$

Интегрируя, получим

$$\Delta\Phi = -\mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left[b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln\left(\frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0}\right) \right]. \quad (15)$$

При питании обмоток возбуждения полюсов переменным током индукция B_0 будет переменной гармонической функцией

$$B_0(t) = B_{0m} \sin(\omega t + \varphi).$$

С учетом этого комплексное действующее значение магнитного потока $\Delta\dot{\Phi}$ будет

$$\Delta\dot{\Phi} = -\mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left[b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln\left(\frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0}\right) \right]. \quad (16)$$

Суммарная ЭДС в измерительных катушках K_1 и K_2 , включенных встречно от $\Delta \dot{\Phi}$ (ЭДС катушек складываются), будет

$$\dot{E}_v = -j\omega 2W_v \Delta \dot{\Phi}, \quad (17)$$

где W_v - число витков катушек скорости.

Подставляя (16) в (17), получаем окончательно

$$\dot{E}_v = j\omega \mu_0 2W_v V h \dot{B}_0 \frac{(2a_0)^2}{2\pi r \delta} \left[b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \left(\frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) \right]. \quad (18)$$

Если не учитывать сопротивление лобовых участков ($2a_0/b_0 \gg 1$), формула (18) упрощается и имеет вид [2]

$$\dot{E}_v = -j\omega \mu_0 2W_v V h \dot{B}_0 \frac{2a_0 b_0^2}{2r\delta\pi}. \quad (19)$$

Из (18) следует, что разница ЭДС в катушках пропорциональна скорости прокатки полосы V и ее толщине h .

В работе получено выражение разности ЭДС \dot{E}_h в измерительных катушках, расположенных на полюсах магнитопроводов ВТП со свободным воздушным зазором и зазором с движущейся полосой, равное

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_h = j\omega W_1 \mu_0 \frac{\pi R_0^2}{a} h \dot{F}_0 \frac{J_2(\beta R_0)}{J_0(\beta R_0)},$$

где $\dot{F}_0 = W_b \dot{I}_b$ - МДС возбуждения; a - расстояние между наконечниками; R_0 - эквивалентный радиус наконечников; $\beta^2 = -j\omega \mu_0 \gamma$ - параметр функций Бесселя; W_1 - витки измерительной катушки на основном магнитопроводе.

\dot{E}_h не зависит в первом приближении от скорости прокатки полосы при условии, что эти измерительные катушки расположены достаточно далеко от полюсных наконечников и в них не проникают магнитные потоки от токов, обусловленных ЭДС движения.

Ввиду того, что выходная ЭДС \dot{E}_h пропорциональна толщине полосы h , отношение величины этих ЭДС не зависит от толщины полосы и равно

$$E_h/E_v = AV, \quad (20)$$

где A - постоянная величина.

По выражению (20) измеряется величина скорости прокатки полосы без влияния толщины прокатки на эту измерительную величину.

Расчет с учетом второго и других высших приближений. Примем, что из-за МДС токов в полосе индукция в зазоре имеет вид

$$\Sigma_i = B_0 + B_i(t),$$

где $B_i(t)$ - индукция i -го приближения от токов в полосе $-b_0 \leq X \leq b_0$.

Без учета влияния токов ($i=0$) имеем $\Sigma_0 = B_0$.

ЭДС в активной стороне (длиной $2a_0$) токового витка будет равна (первое приближение)

$$e_1(x) = V2a_0 \Sigma_0 = V2a_0 B_0. \quad (21)$$

Проводимость витка (длиной $2a_0 + l + 2a_0$) равна

$$d\sigma(x) = \frac{hdx}{k\rho 2a_0 2}. \quad (22)$$

Для $X > 0$ имеем $k > 1$, где k - коэффициент учета возрастания сопротивления из-за лобовых участков.

Обозначим

$$\rho' = k\rho. \quad (23)$$

Ток в витке будет

$$di_1(x) = e_1(x)d\sigma(x) = V2a_0 B_0 \frac{hdx}{\rho' 4a_0} = V \frac{hdx}{2\rho'} B_0. \quad (24)$$

Линейная плотность тока равна

$$\tau_1(x) = \frac{di_1(x)}{dx} = V \frac{hB_0}{2\rho'}. \quad (25)$$

МДС от токов на расстоянии X от осевой линии равна

$$F_1(x) = \int_0^x di_1(x) = \int_0^x \tau_1(x) dx = \frac{VhB_0}{2\rho'} x. \quad (26)$$

Индукция от этих токов в точке X будет

$$B_1(x) = \mu_0 \frac{F_1(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{hb_0}{2\rho'\delta} x. \quad (27)$$

Индукция в зазоре будет

$$\Sigma_1(x) = B_0 + B_1(x) = B_0 + \mu_0 V \frac{hb_0}{2\rho'\delta} x. \quad (28)$$

Обозначим

$$\alpha = \mu_0 V \frac{b_0 h}{2\rho'\delta}. \quad (29)$$

Тогда

$$\Sigma_1(x) = B_0 + \alpha B_0 \frac{x}{b_0} = B_0 \left(1 + \alpha \frac{x}{b_0} \right). \quad (30)$$

Под правой частью наконечника ($0 \leq X \leq b_0$) индукция возрастает. Под левой частью индукция меньше, чем B_0 .

Второе приближение получим, если используем выражение (30) вместо (21):

$$e_2(x) = V2a_0 \Sigma_1(x) = V2a_0 B_0 \left(1 + \alpha \frac{x}{b_0} \right). \quad (31)$$

Ток в витке будет

$$\begin{aligned}
d_{i_2}(x) &= e_2(x)d\sigma(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)\frac{hdx}{4\rho'a_0} = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)dx.
\end{aligned} \tag{32}$$

МДС от токов второго приближения:

$$F_2(x) = \int_0^x di_2(x) = V\frac{hB_0}{2\rho'}\int_0^x\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)dx = V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right). \tag{33}$$

Индукция от такой МДС:

$$B_2(x) = \mu_0\frac{F_2(x)}{\delta} = \mu_0V\frac{hb_0}{2\rho'\delta}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right). \tag{34}$$

Индукция в зазоре:

$$\begin{aligned}
\Sigma_2(x) &= B_0 + B_2(x) = B_0 + \mu_0V\frac{hb_0}{2\rho'\delta}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right) = \\
&= B_0\left(1 + \mu_0V\frac{b_0h}{2\rho'\delta}\frac{x}{b_0} + \mu_0V\frac{b_0h}{2\rho'\delta}\frac{\alpha x^2}{2b_0}\right).
\end{aligned} \tag{35}$$

С учетом (29) получаем

$$\Sigma_2(x) = B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right). \tag{36}$$

ЭДС третьего приближения будет

$$e_3(x) = V2a_0\Sigma_2(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right). \tag{37}$$

Ток от этой ЭДС будет

$$\begin{aligned}
d_{i_3}(x) &= e_3(x)d\sigma(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)\frac{hdx}{4\rho'a_0} = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)dx.
\end{aligned} \tag{38}$$

МДС третьего приближения будет

$$\begin{aligned}
F_3(x) &= \int_0^x di_3(x) = V\frac{hB_0}{2\rho'}\int_0^x\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)dx = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0} + \frac{\alpha^2 x^3}{3!b_0^2}\right)
\end{aligned} \tag{39}$$

или

$$F_3(x) = V \frac{b_0 h B_0}{2\rho'} \left(\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha x^2}{2 b_0^2} + \frac{\alpha^2 x^3}{3! b_0^3} \right). \quad (40)$$

Индукция

$$B_3(x) = \mu_0 \frac{F_3(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{B_0 h b_0}{2\rho' \delta} \left(\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha x^2}{2 b_0^2} + \frac{\alpha^2 x^3}{3! b_0^3} \right).$$

С учетом (29) имеем

$$B_3(x) = B_0 \left[\alpha \left(\frac{x}{b_0} \right) + \frac{\alpha^2}{2!} \left(\frac{x}{b_0} \right)^2 + \frac{\alpha^3}{3!} \left(\frac{x}{b_0} \right)^3 \right]. \quad (41)$$

Тогда суммарная индукция будет

$$\Sigma_3(x) = B_0 + B_3(x) = B_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{b_0} \right) + \frac{\alpha^2}{2!} \left(\frac{x}{b_0} \right)^2 + \frac{\alpha^3}{3!} \left(\frac{x}{b_0} \right)^3 \right]. \quad (42)$$

Обозначив

$$\eta = \alpha x / b_0, \quad (43)$$

получим

$$\Sigma_3(x) = B_0 \left(1 + \eta + \frac{1}{2!} \eta^2 + \frac{1}{3!} \eta^3 \right). \quad (44)$$

При большом числе приближений получим

$$\Sigma_\infty(x) = B_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\eta^k}{k!} = B_0 e^\eta = B_0 e^{\alpha \frac{x}{b_0}}. \quad (45)$$

Ряд сходится для любого значения η .

Если $\alpha=0,1$, то $\Sigma_\infty(X=1)=1,1051708B_0$, $\Delta=0,105$;

$$\Sigma_\infty(X=-1)=0,9048374B_0, \Delta=-0,095.$$

Поток под правой половиной полюсного наконечника будет

$$\Delta\Phi_\Pi = 2a_0 \int_0^{b_0} \Sigma_\infty(x) dx = 2a_0 B_0 \int_0^{b_0} e^{\alpha \frac{x}{b_0}} dx = 2a_0 B_0 \frac{b_0}{\alpha} (e^\alpha - 1). \quad (46)$$

Поток под левой половиной полюса будет

$$\Delta\Phi_\wedge = 2a_0 \int_{-b_0}^0 \Sigma_\infty(x) dx = 2a_0 B_0 \int_{-b_0}^0 e^{\alpha \frac{x}{b_0}} dx = B_0 \frac{2a_0 b_0}{\alpha} B_0 (1 - e^{-\alpha}). \quad (47)$$

Итак, суммарный магнитный поток под правой половиной полюсного наконечника (где поток увеличивается из-за токов в полосе) определяется выражением (46), а под левой половиной (где поток ослабляется из-за токов в полосе) - выражением (47).

ЭДС в измерительной катушке скорости K_1 (слева) будет

$$\dot{E}(K_1) = -j\omega W_V \Delta \dot{\Phi}_\lambda = -j\omega W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha}. \quad (48)$$

ЭДС в измерительной катушке скорости K_2 (справа) будет

$$\dot{E}(K_2) = -j\omega W_V \Delta \dot{\Phi}_\Pi = -j\omega W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{e^\alpha - 1}{\alpha}. \quad (49)$$

При согласованном включении катушек ЭДС будет

$$\dot{E}_{\text{согл}} = \dot{E}(K_1) + \dot{E}(K_2) = -j\omega 2W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{\text{sh}\alpha}{\alpha}. \quad (50)$$

При встречном включении катушек скорости получим

$$\dot{E}_{\text{встр}} = \dot{E}(K_1) - \dot{E}(K_2) = -j\omega 2W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{1 - \text{ch}\alpha}{\alpha}. \quad (51)$$

Заключение. На основании исследования электромагнитных процессов в зазоре ВТП при прокатке проводящей полосы получены аналитические выражения для ЭДС в измерительных катушках скорости, расположенных на набегающем и сбегающем краях полюсного наконечника.

Показано, что разность ЭДС E_v этих катушек совместно с ЭДС E_h должна использоваться для измерения в чистом виде скорости прокатки V . При этом исключается влияние на измеряемую величину толщины прокатки h . Разработка микропроцессорного блока к ВТП позволяет производить раздельное измерение двух взаимно-связанных электромагнитных параметров скорости V и толщины h прокатываемой полосы. В результате резко повышается эффективность использования ВТП для контроля технологических параметров процесса прокатки листов, полосы, фольги или других токопроводящих прокатываемых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение толщины проводящей пластины в зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя // Изв НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2001. - Т 54, ¹ 1.- С. 67-75.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 30.11.2000.

Գ.Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ, Վ.Բ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

**ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԺԱՊԱՎԵՆԻ ԳԼԱՆՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՄՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ
ԵՂԱՆԱԿՈՎ**

Ուսումնասիրվում են էլեկտրամագնիսական գործընթացները մրկահոսանքային ձևափոխիչի օդային բացակում, որում առկա է գլանվող հաղորդիչ ժապավեն: Ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ բևեռային վերջնամասին մոտեցման և նրանից հեռացման եզրերում տեղակայված արագության չափիչ փաթույթների սեղմակների էլշու-ի համար: Ցույց է տրված, որ ժապավենի շարժման արագությունը չափելիս անհրաժեշտ է նշված փաթույթների E_v էլշու-ի հետ համատեղ օգտագործել նաև E_h էլշու-ն: Այս դեպքում բացառվում է գլանվածքի հաստության ազդեցությունը չափվող արագության վրա:

G.L. ARESHYAN, V.B. NERISSYAN

**DEFINITION OF A ROLLING SPEED OF A CONDUCTIVE BELT USING EDDY-CURRENT
METHOD**

Electromagnetic processes are investigated in the air gap of eddy-current transducer, in which a rolling conductive belt is available. Analytic relations are obtained for the e.m.f. of speed measuring winding terminals installed in approaching to and removing from pole edge. It is proved that the difference of these winding e.m.f. E_v should be used simultaneously with e.m.f. E_h for measuring the speed of rolling, excluding the influence on measurable quantity of the rolling thickness h .