
SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

УДК 621.317.39.531.767

АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ВИХРЕТОКОВОГО СЕНСОРА С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ НЕМАГНИТНОГО ПРОВОДЯЩЕГО ЛИСТА

В. Б. Нерсисян

Государственный инженерный университет Армении (Политехник), ул. Теряна 105
кафедра "Электротехника и электропривод".
Телефон: 010204321, 098146038

АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ВИХРЕТОКОВОГО СЕНСОРА С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ НЕМАГНИТНОГО ПРОВОДЯЩЕГО ЛИСТА

В. Б. Нерсисян

Аннотация. Приведена методика расчета магнитной цепи вихретокового сенсора с учетом скорости прокатки движения проводящего немагнитного листа. Получено аналитическое выражение для выходного напряжения сенсора при условии пренебрежения индуктивностью проводящего листа. Разработанную методику можно использовать при инженерных расчетах.

Ключевые слова: вихревой ток, скорость прокатки, трансформаторная электродвижущая сила, дифференциальная конструкция.

АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА ВИХРОСТРУМОВОГО СЕНСОРА З УРАХУВАННЯМ ШВИДКОСТІ НЕМАГНІТНОГО ПРОВІДНОГО ЛИСТА, ЯКИЙ РУХАЄТЬСЯ В РОБОЧОМУ ЗАЗОРІ

В. Б. Нерсисян

Анотація. Наведено методику розрахунку магнітного ланцюга вихрострумowego сенсора з урахуванням швидкості прокатки руху провідного немагнітного листа. Отримано аналітичний вираз для вихідної напруги сенсора за умови зневаги індуктивністю провідного листа. Розроблену методику можна використати при інженерних розрахунках.

Ключові слова: вихровий струм, швидкість прокатки, трансформаторна електрорушійна сила, диференціальна конструкція

ANALYZING THE MAGNETIC CIRCUIT OF AN EDDY CURRENT SENSOR TAKING INTO ACCOUNT THE SPEED OF A MOVING NON-MAGNETIC SHEET LOCATED IN THE WORKING GAP

V. B. Nersisyan

Abstract. A method for calculating the magnetic circuit of ECP taking into account the movement speed and the thickness of the magnetic conducting sheet in the gap is introduced. An analytical expression for the output voltage of the transformer at neglecting the inductance of the conductive sheet is obtained. The method developed can be used in engineering calculations.

Keywords: eddy current, rolling speed, transformer EMF, armor design

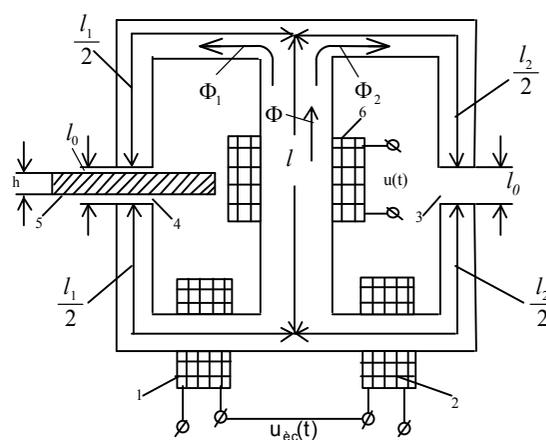
Введение. При контроле параметров технологических процессов часто возникает задача преобразования электрофизических параметров подвижного проводящего изделия (толщина прокатки, скорость прокатки, проводимость изделия, температура изделия, изменение взаимное расположение изделия и сенсора и т. д.) в электрический сигнал. Известен ряд методов расчета вихретоковых сенсоров (ВТС) [1,2], с помощью которых определяются выходные величины в зависимости от параметров сенсора, а также от параметров контролируемого изделия. Очевидно, что определяемые величины являются многопараметровыми. При измерении одного из параметров влияние остальных являются мешающими. В этой работе предлагается вариант исследования вопроса влияния скорости прокатки на выходной сигнал сенсора и как компенсировать ее.

Эту задачу можно решить с помощью вихретокового сенсора как средства первичной обработки информации.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является получение аналитического выражения для выходного напряжения сенсора в зависимости от толщины и скорости прокатки проводящего немагнитного листа. При измерении толщины проводящих изделий в процессе их прокатки одним из основных мешающих факторов в ВТС является скорость прокатки.

Методы исследования. Рассмотрим вопросы расчета ВТС толщины с учетом скорости прокатки листа. Решение поставленной задачи осуществлено на примере сенсора с дифференциальной магнитной цепью [3], показанной на рис.(а).

ВТС состоит из трехстержневого симметричного магнитопровода, боковые стержни которого снабжены дифференциально включенными измерительными обмотками 1 и 2 и имеют зазоры 3 и 4, в одном из которых помещают контролируемое изделие 5. На среднем стержне расположена обмотка возбуждения 6.



(а) ВТС с дифференциальной магнитной цепью.

Наиболее важной задачей для таких измерителей является определение выражения для выходного сигнала в зависимости от измеряемой толщины h . Для этой цели воспользуемся обозначениями приведенными на рисунке и пренебрегая влиянием потоков рассеяния и выпучивания составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = ri + W \frac{d\Phi}{dt}; \\ i_B W - i_n = Hl + H_1 l_1 + H_{01} l_0; \\ iW = Hl + H_2 l_2 + H_{02} l_0; \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \end{cases} \quad (1)$$

Где $u(t), r$ – напряжение и активное сопротивление обмотки возбуждения; – потоки Φ, Φ_1, Φ_2 – соответствующих участков магнитной цепи измерителя; l и l_1, l_2 – средняя длина соответственно неразветвленной и разветвленной частей магнитной цепи; l_0 – длина воздушных зазоров; W – число витков намагничивающей обмотки; $H, H_{01}, H_{02}, H_1, H_2$ – магнитные напряженности поля соответствующих участков; i_n – эквивалентный вихревой ток в проводящем материале, внесенном в воздушный зазор измерителя.

Для напряженностей магнитного поля отдельных участков магнитной цепи получим

$$H = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\Phi}{S}; \quad H_1 = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\Phi_1}{S_1}; \quad H_2 = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\Phi_2}{S_2};$$

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

Ввиду симметрии магнитной цепи можно принять

$$l_1 = l_2, \quad l_{01} = l_{02} \quad \text{и} \quad S_1 = S_2 = S_{01} = S_{02} = \frac{S}{2}$$

Так как магнитопровод сенсора снабжен зазорами и рабочая точка на характеристике $B(H)$ находится на линейном участке, то можно принять, что $\mu = const$. Если через обмотки возбуждения проходит ток, изменяющийся по синусоидальному закону, то процессы, происходящие в магнитопроводе сенсора, будут также синусоидальными. Тогда исходная система уравнений (1) может быть представлена в комплексной форме:

$$\begin{cases} \dot{U} = r \dot{I} + jW\omega \dot{\Phi}; \\ \dot{I}_B W - \dot{I}_n = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \dot{\Phi} + K_1 \dot{\Phi}_1; \\ \dot{I}_B W = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \dot{\Phi} + K_2 \dot{\Phi}_2; \\ \dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{l_1}{S_1} + \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{S_{01}}, \quad K_2 = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{l_2}{S_2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{S_{02}}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения значительно больше активного ($\omega L \gg r$), поэтому последним можно пренебречь. Учитывая это, из системы уравнений (2) получим:

$$\begin{cases} \dot{I}_B W_B = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \dot{\Phi} + K \dot{\Phi}_2, \\ \dot{I}_B W_B - \dot{I}_n = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \dot{\Phi} + K \dot{\Phi}_1, \\ \dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } K = \frac{l}{\mu\mu_0 S} + \frac{2l_2}{\mu\mu_0 S} + \frac{2l_0}{\mu_0 S}.$$

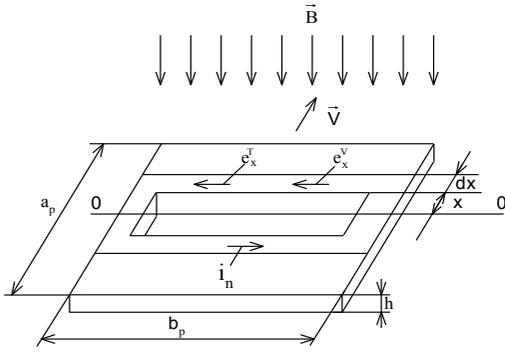
Результаты исследования. Решая систему (3) относительно $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$, после небольших преобразований получим

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_1 = \dot{I}_B W A_1 + \dot{I}_n A_2, \\ \dot{\Phi}_2 = \dot{I}_B W A_3 - \dot{I}_n A_4. \end{cases}$$

Где

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{2} \frac{\mu\mu_0 S}{l + l_2 + l_0 \mu}, \\ A_2 = \frac{1}{4} \frac{l \mu\mu_0 S}{(l + l_2 + l_0 \mu)(l_2 + l_0 \mu)}, \\ A_3 = \frac{1}{2} \frac{\mu\mu_0 S}{l + l_2 + l_0 \mu}, \\ A_4 = \frac{1}{4} \frac{(l + 2l_2 + 2l_0 \mu) \mu\mu_0 S}{(l_2 + l_0 \mu)(l + l_2 + l_0 \mu)}. \end{cases} \quad (4)$$

Определим \dot{I}_n . С этой целью предположим, что отрезок прокатываемого листа, находящегося в измерительной зоне ВТС, пронизывается магнитным потоком $\dot{\Phi}_1$ (рис. (б)). Граничные размеры отрезка a_p и b_p определяются расчетным путем [4].



(б) Отрезок листа, находящегося в измерительной зоне ВТС.

При этом в теле листа образуются вихревые токи, контуры которых располагаются в плоскостях, нормальных к вектору магнитной индукции \vec{B} , т.е. в поперечных сечениях листа. В этом случае можно сказать, что стороны контуров вихревых токов параллельны сторонам a_p и b_p отрезка листа. Выделим из тела листа тонкостенную полу призму с высотой, равной толщине листа h , и основанием, ограниченным двумя контурами вихревых токов, стороны b_p которых отстоят от оси 00 листа соответственно на x и $x+dx$. Тогда для потока Φ_{x1} , пронизывающего полость призмы, и для ЭДС e_x , индуцируемой этим потоком в стенке призмы при перемещении листа со скоростью V , и с опущением величину второго порядка малости, имеем

$$\Phi_{x1} = (b_p - 2dx)2xB, \quad e_x = -(b_p - 2dx)2x \frac{dB}{dt} - 2b_pVB.$$

Трубка вихревого тока имеет сечение hdx и длину, равную $4x+2b_p$. Активная проводимость вдоль этой трубки обратна ее активному сопротивлению, поскольку пренебрегаем магнитным полем вихревых токов и, следовательно, соответствующим индуктивным сопротивлением. Таким образом, имеем

$$dg_x = \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p}.$$

Величина вихревого тока в трубке равна

$$di_n = e_x dg_x = -(b_p - 2dx)2x \frac{dB}{dt} \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p} - 2b_pVB \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p},$$

где γ – удельная проводимость материала листа.

При синусоидальном законе изменения индукции $B = B_m \sin \omega t$ выражение для ЭДС принимает вид

$$e_x = -(b_p - 2dx)2x\omega B_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) - 2b_pVB_m \sin \omega t = e_x^T + e_x^V,$$

где ω – угловая частота источника питания;

$$e_x^T = -(b_p - 2dx)2x\omega B_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad - \text{ЭДС}$$

трансформации; $e_x^V = -2b_pVB_m \sin \omega t$ – ЭДС, обусловленная скоростью перемещения листа.

С учетом вышеизложенного выражение для вихревого тока принимает вид

$$di_n = -(b_p - 2dx)2x\omega B_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p} - 2b_p B_m \sin \omega t \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p} V.$$

Пренебрегаем слагаемыми второго порядка вследствие их малости. Тогда имеем

$$di_n = -b_p 2x\omega B_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p} - 2b_p B_m \sin \omega t \gamma \frac{hdx}{4x + 2b_p} V$$

Результирующий вихревой ток в трубке будет равен

$$i_n = b_p \omega \gamma h B_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) d_1 + b_p \omega \gamma B_m \sin \omega t d_2 V,$$

где

$$d_1 = -\frac{a_p}{2} + \frac{b_p}{2} \ln \frac{b_p}{a_p + b_p}; \quad d_2 = -\frac{1}{2} \ln(1 + \frac{a_p}{b_p}).$$

В комплексной форме вихревой ток будет равен

$$\dot{I}_n = \frac{1}{2} b_p \gamma h \frac{B_m}{\sqrt{2}} (\omega d_1 + j d_2 V).$$

С учетом \dot{I}_n и выражения (4) суммарное напряжение \dot{U}_n на зажимах измерительной обмотки при встречном включении будет равно

$$\dot{U}_n = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 = j\omega W_n (\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_1), \quad (5)$$

где W_n – число витков измерительных обмоток.

После несложных преобразований выражение (5) принимает вид

$$\dot{U}_n = \omega W_n \frac{\mu\mu_0 S}{2(l_2 + l_0\mu)} b_p \lambda \frac{B_m}{\sqrt{2}} (j\omega d_1 + d_2 V). \quad (6)$$

Первое слагаемое правой части (6) характеризует статическую характеристику (при $V = 0$) сенсора. Динамическая погрешность сенсора, выражаемая вторым слагаемым (5), пропорциональна скорости перемещения листа и сдвинута по фазе на 90° .

При измерении толщины компенсируется второе слагаемое [5].

Выводы

1. Рассмотрена конструкция сенсора с дифференциальной магнитной цепью ВТС.

2. Составлены уравнения для магнитной цепи с учетом движущегося со скоростью V проводящего немагнитного листа в зазоре магнитной цепи сенсора.

3. Получено аналитическое выражение для выходного напряжения, оценивающего динамический режим работы ВТС.

Список использованной литературы

- [1] Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. Metodi i pribori elektromagnitnogo kontrolya promishlennix izdelii. Energoatomizdat. 1983, 242 pp.
- [2] Dorofeev A.L., Nikitin A.I., Rubin A.L. Indukcionnaya tolshinomeriya Energiya, 1978, 184 pp.
- [3] Patent 1249313 RF, Indukcionnij tolshchinomer/V.B. Nersisyan, 1986 -№ 30.
- [4] O.B. Bul'. Metodi rascheta magnitikh sistem elevktricheskikh apparatov. Magnitnie tsepi, polya i programma FEMM. – Izd. Centr «Akademiya», 2005, 336pp.
- [5] V.B. Nersisyan. Vikhretokovij sensor tolshchini i skorosti dvijushejsya provodyashchej nemagnitnoj polosi// Odejskij nacionalnij universitet im. I.I. Mechnikova, Sensor Electronics and Microsystem Technologies, -2004, - №2 29-33p

Стаття надійшла до редакції 06.01.2014 р.