

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. Б. НЕРСЕСЯН

РАСЧЕТ ТОКОВИХРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Контроль многих параметров проводящих изделий в процессе прокатки (толщина, электрическая проводимость, магнитная проницаемость, скорость прокатки, коэффициент изменения поверхности травленной фольги) осуществляется с помощью токовихревых преобразователей трансформаторного типа (ВТПТТ).

Известен ряд методов расчета ВТПТТ [1, 2], с помощью которых определяются расчетные величины для конкретных конструкций. Однако известные методы основываются на теории электромагнитного поля, что обуславливает сложность расчетов и их малое применение в инженерной практике. Ниже предлагается простой метод расчета ВТПТТ, основанный на теории расчета магнитных цепей с распределенными параметрами. Конструкция предложенного ВТПТТ показана на рис. 1.

Преобразователь 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, при подключении которой 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.

Учитывая осевую симметрию конструкции магнитопровода преобразователя, можно считать, что магнитный поток распределен симметрично относительно оси OO' . Это позволяет при расчете рассматривать лишь половину магнитной цепи, в которой действует полная м.д.с. \vec{F} обмотки возбуждения. На рис. 2 показана одна половина симметричной магнитной цепи, где отдельные участки магнитной цепи рис. 1 представлены в следующем виде: участки a и b с сосредоточенными параметрами, а участок l с распределенными параметрами. Здесь введены следующие обозначения \vec{F}_a , \vec{F}_b — м. д. с. обмотки возбуждения и

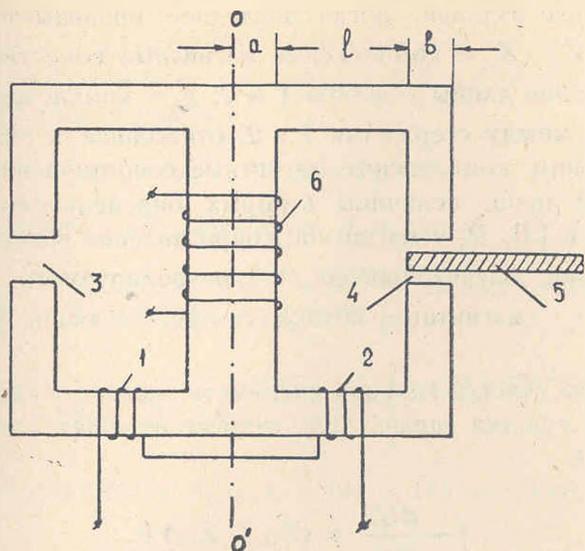


Рис. 1. Конструкция токовихревого преобразователя трансформаторного типа.

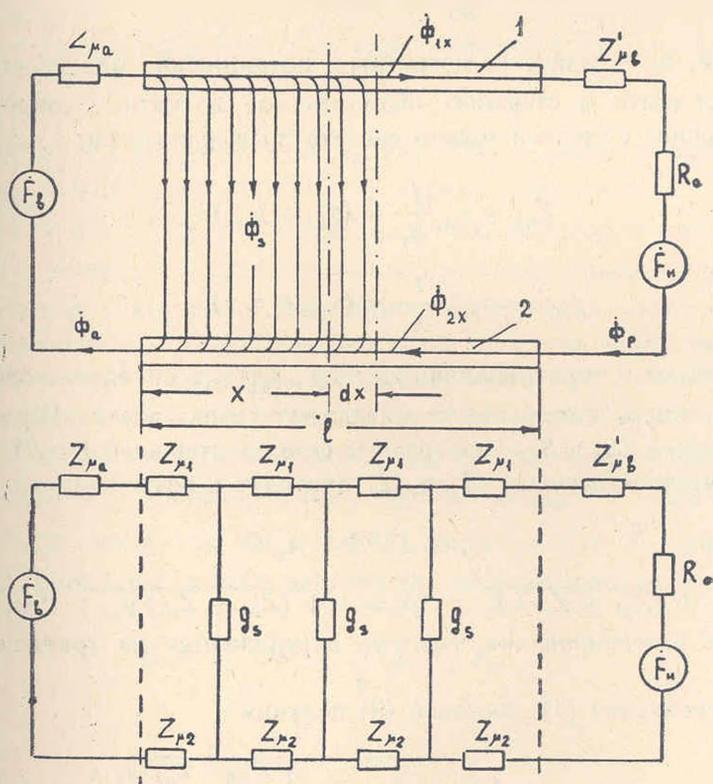


Рис. 2. Эквивалентная магнитная цепь преобразователя и ее схема замещения.

контролируемого изделия, когда последнее пронизывается рабочим потоком $\dot{\Phi}_p$; $Z_{\mu 1}$, $Z_{\mu 2}$ — комплексные магнитные сопротивления, отнесенные к единице длины участков 1 и 2; g_s — комплексная магнитная проводимость между стержнями 1 и 2, отнесенная к единице длины; $Z_{\mu a}$, $Z_{\mu b}$ — полные комплексные магнитные сопротивления участков a и b магнитной цепи, величины которых определяются по кривым, приведенным в [3]; R_0 — магнитное сопротивление воздушного зазора между торцами магнитопровода и контролируемого изделия; $\dot{\Phi}_0$, $\dot{\Phi}_{1x} = \dot{\Phi}_{2x} = \dot{\Phi}_x$ — магнитные потоки соответствующих участков магнитной цепи.

Параметры участка l можно принимать постоянными. Следовательно, для этого участка справедлива система линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} -\frac{dU_x}{dx} = (Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) \dot{\Phi}_x; \\ -\frac{d\dot{\Phi}_x}{dx} = g_s U_x, \end{cases} \quad (1)$$

где U_x и $\dot{\Phi}_x$ — разность магнитных потенциалов между стержнями участка и поток в стержнях. Комплексные магнитные сопротивления единиц длины стержней можно считать по выражениям:

$$Z_{\mu 1} = \rho_{z1} \frac{l}{S_1} = (\rho_{R1} + j\rho_{x1}) \frac{l}{S_1};$$

$$Z_{\mu 2} = \rho_{z2} \frac{l}{S_2} = (\rho_{R2} + j\rho_{x2}) \frac{l}{S_2},$$

где удельные сопротивления ρ_{R1} , ρ_{R2} , ρ_{x1} , ρ_{x2} определяются для соответствующего материала из магнитных характеристик [3] по заданной индукции (S_1 и S_2 — поперечные сечения стержней 1 и 2).

Совместное решение (1) и (2) приводит к результату

$$U_x = A_1 e^{p_1 x} + A_2 e^{p_2 x}, \quad (3)$$

где $p_1 = \sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_s}$; $p_2 = -\sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_s}$; A_1 , A_2 — постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

Из уравнения (1) согласно (3) получим:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_x = & -A_1 \sqrt{\frac{g_s}{Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}}} e^{\sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_s} x} + \\ & + A_2 \sqrt{\frac{g_s}{Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}}} e^{-\sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_s} x}. \end{aligned} \quad (4)$$

На основании (3) и (4) и граничных условий при $x = l$ разность магнитных потенциалов между стержнями 1 и 2 магнитной цепи и поток в них, соответственно, равны:

$$\dot{U}_{x=l} = \dot{U}_x, \quad \Phi_{x=l} = \Phi_p - \Phi_n.$$

Определим постоянные интегрирования A_1 и A_2 :

$$A_1 = \frac{1}{2} \left[\dot{U}_l - (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \sqrt{\frac{Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}}{g_x}} \right] e^{-\sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_x} l};$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[\dot{U}_l + (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \sqrt{\frac{Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}}{g_s}} \right] e^{\sqrt{(Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2}) g_s} l}.$$

Постановкой выражений A_1 и A_2 в (3) и (4) получим:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_l \operatorname{ch} \sqrt{Z_\mu g} \left(1 - \frac{x}{l}\right) + (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \sqrt{\frac{Z_\mu}{g}} \operatorname{sh} \sqrt{Z_\mu g} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (5)$$

$$\dot{\Phi}_x = \dot{U}_l \sqrt{\frac{g}{Z_\mu}} \operatorname{sh} \sqrt{Z_\mu g} \left(1 - \frac{x}{l}\right) + (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \operatorname{ch} \sqrt{Z_\mu g} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (6)$$

где $U_l = (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) (Z'_{\mu n} + R_0 + Z_{\mu n})$, $(\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n)$ — разность магнитных потенциалов между стержнями 1 и 2 и результирующий магнитный поток в них при $x = l$; $\dot{\Phi}_n$ — магнитный поток, обусловленной *м. д. с.* \dot{F}_n ; Z_μ, g — полное комплексное магнитное сопротивление стержней 1 и 2 и полная магнитная проводимость рассеяния между ними; $Z_{\mu n}$ — эквивалентное комплексное магнитное сопротивление, величина которого зависит от параметров контролируемого изделия. Все величины, входящие в (5) и (6), известны за исключением $Z_{\mu n}$ и $\dot{\Phi}_n$. Для этого заменим часть контролируемого изделия пронизывающимся рабочим потоком $\dot{\Phi}_p$, эквивалентным короткозамкнутым витком. По витку проходит такой ток \dot{I}_n , который создаст *м. д. с.* \dot{F}_n , равной по величине падению магнитного напряжения на этом участке магнитной цепи

$$-\dot{F}_n = -\dot{F}_n = \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{\mu n} \dot{\Phi}_{pm}, \quad (7)$$

где

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{E}_n}{r_n + jx_n}. \quad (8)$$

Здесь r_n, x_n — активное и индуктивное электрические сопротивления эквивалентного витка, заменяющего контролируемое проводящее изделие.

Так как э. д. с., действующая в эквивалентном витке, равна

$$\dot{E}_n = -j \frac{\omega}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{pm}, \quad (9)$$

где ω — угловая частота, то совместно решая (9), (8) и (7), получим:

$$Z_{\mu n} = \left(\omega \frac{x_n}{r_n^2 + x_n^2} + j\omega \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2} \right)$$

или

$$Z_{\mu n} = \frac{\omega}{r_n^2 + x_n^2} (x_n + jr_n). \quad (10)$$

Магнитный поток $\dot{\Phi}_n$ можно определить отношением

$$\dot{\Phi}_n = \frac{\dot{F}_n}{Z_{\mu z}}, \quad (11)$$

где $Z_{\mu z} = Z_{\mu n} + R_0 + Z_{\mu v} + Z_p + Z_{\mu a}$ — комплексное магнитное сопротивление, по которому замыкается поток $\dot{\Phi}_n$.

С учетом (7)–(9) выражение (11) перепишем в виде

$$\dot{\Phi}_n = -j\omega \dot{\Phi}_p \frac{1}{Z_{\mu z} (r_n + jx_n)}. \quad (12)$$

Знак минус в выражениях (7), (9) и (12) показывает, что м. д. с. \dot{F}_n , э. д. с. \dot{E}_n и поток $\dot{\Phi}_n$ имеют противоположное к \dot{F}_p и $\dot{\Phi}_p$ направление.

Если гиперболические синус и косинус разложить в ряд и ограничиться первыми двумя членами, то (5) и (6) примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x = \dot{U}_l \left[1 + Z_\mu g \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right] + \\ + (\dot{\Phi}_p + \dot{\Phi}_n) Z_\mu \left(1 - \frac{x}{l} \right) \left[1 + \frac{Z_\mu g}{6} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_x = \dot{U}_l g \left(1 - \frac{x}{l} \right) \left[1 + \frac{1}{6} g Z_\mu \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right] + \\ + (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \left[1 + \frac{Z_\mu g}{2} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Для выражений (13) и (14) при $x = 0$ получим:

$$\dot{U}_0 = (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \left[(Z_{\mu v} + Z_\mu) + Z_\mu g \left(Z_{\mu v} + \frac{1}{6} Z_\mu \right) \right]; \quad (15)$$

$$\dot{\Phi}_0 = (\dot{\Phi}_p - \dot{\Phi}_n) \left[\left(1 + \frac{Z_\mu g}{2} \right) + Z_{\mu n} g \left(1 + \frac{1}{6} Z_\mu g \right) \right]. \quad (16)$$

Здесь $Z_{\mu n} = Z'_{\mu n} + R_0 + Z_{\mu n}$ — эквивалентное комплексное магнитное сопротивление магнитной цепи участка ν .

Намагничивающая сила обмотки возбуждения будет:

$$\vec{F}_n = \dot{U}_0 + \dot{\Phi}_0 Z_{\mu a}.$$

С учетом полученных результатов определим выражение для выходной э.д.с. Измерительные обмотки преобразователя имеют две идентичные секции по W витков на единицу длины по всей длине l на правом и левом стержнях симметричного магнитопровода. Эти обмотки соединены последовательно — встречно, поэтому выходная электродвижущая сила на зажимах измерительных обмоток будет:

$$\dot{E}_{\text{вых}} = -j\omega w \int_0^l \dot{\Phi}_{\text{пх}} dx + j\omega w \int_0^l \dot{\Phi}_{\text{лх}} dx, \quad (17)$$

где $\dot{\Phi}_{\text{пх}}$, $\dot{\Phi}_{\text{лх}}$ — магнитные потоки, соответственно, в правом и левом боковых стержнях при наличии в одном из зазоров контролируемого изделия магнитопровода ВТПТТ. Потоки $\dot{\Phi}_{\text{пх}} = \dot{\Phi}_x$, а $\dot{\Phi}_{\text{лх}}$ определяется из условия, что суммарный магнитный поток в среднем стержне постоянный [4] и не зависит от параметров контролируемого изделия. Поэтому поток в левом боковом стержне будет:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{\text{лх}} = (\dot{\Phi}_p + \dot{\Phi}_n) \left\{ Z_{\mu n} g \left(1 - \frac{x}{l} \right) \left[1 + \frac{1}{6} Z_{\mu r} g \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + 1 + \frac{1}{2} Z_{\mu r} g \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение для выходной э.д.с. с учетом (7), (14) и (18) примет вид:

$$\dot{E}_{\text{вых}} = -j\omega w \frac{Z_{\mu n}}{Z_{\mu a}} K \dot{\Phi}_p,$$

где

$$K = 2 + Z_{\mu n} g + \frac{1}{3} Z_{\mu r} g + 0,1 Z_{\mu n} Z_{\mu r} g^2.$$

По величине $\dot{E}_{\text{вых}}$ оцениваются параметры контролируемого изделия и метрологические характеристики ВТПТТ.

С использованием изложенной теории разработан ВТПТТ, который успешно работает на производстве при контроле параметров проводящих ленточных материалов.

ԲԱՇԽՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐՈՎ ՇՂԹԱՆԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ
ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԻ ՏԻՊԻ ԽՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՓՈՆԱԿԵՐՊԻՉԻ ՀԱՇՎԱՐԿՈՒ

Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկվում է տրանսֆորմատորային տիպի մրրկահոսանքային փոխակերպիչի մի քանի կառուցվածքային առանձնահատկությունները: Իրականացված է տեսական հետազոտություն՝ հենվելով բաշխված պարամետրերով շղթաների տեսության վրա: Բերված է չափիչ համակարգի տեխնիկական բնութագիրը, որը նախատեսված է կոնդենսատորի նրբաթիթեղի մակերեսի մեծացման գործակիցը չափելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ключев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий.—М.: Машиностроение, 1976.— 326 с.
2. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. Индукционная толщинометрия.—М.: Энергия, 1978.— 184 с.
3. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей.— М.: Энергия, 1964.—464 с.
4. Турчин А. М. и др. Электрические измерения неэлектрических величин.—Л.: Энергия, 1975.— 421 с.