

В. Б. НЕРСИСЯН

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

Рассмотрена эквивалентная схема замещения вихрекового преобразователя трансформаторного типа, где проводящий лист заменен эквивалентным контуром с комплексным сопротивлением. Обоснован переход этой схемы в схему замещения четырехполюсника. На основании условий передачи максимальной мощности, связывающих коэффициенты четырехполюсника и комплексного сопротивления листа, получены зависимости конструктивных параметров преобразователя от толщины контролируемого листа. Получена упрощенная расчетная формула, которую удобно применять в инженерных расчетах.

**Ключевые слова:** эквивалентная схема, вихревой ток, проводящий лист, мощность.

Вихрековые преобразователи широко применяются как в измерительной технике, так и в электромагнитной дефектоскопии. Известен ряд методов расчета вихрекового преобразователя [1], с помощью которых определяют расчетные величины для конкретных конструкций. Однако все они основываются на теории электромагнитного поля, что обуславливает сложность расчетов и их ограниченное применение в инженерной практике. В некоторых случаях применяют известные методы расчета магнитных цепей [2].

В настоящей работе предлагается метод расчета магнитной цепи вихрекового преобразователя с учетом условий передачи максимальной мощности от контролируемого листа к преобразователю, определяются конструктивные параметры преобразователя, удовлетворяющие этому условию.

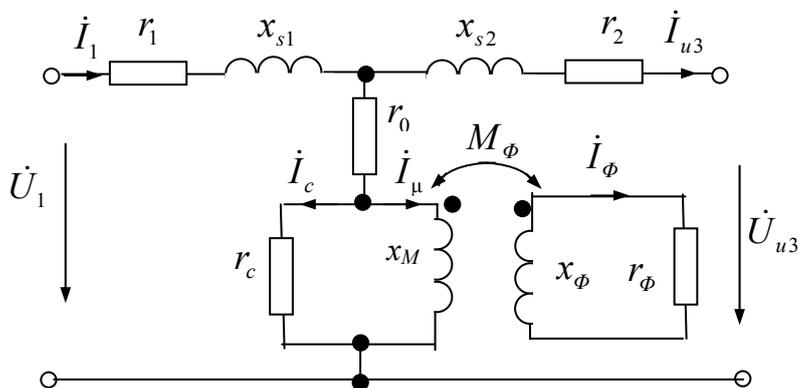


Рис. 1

Рассмотрим вихретоковый преобразователь, описанный в [3]. Эквивалентная схема замещения преобразователя [4] приведена на рис.1.

Здесь  $r_1, r_2$  - активные, а  $x_{s1}, x_{s2}$  - реактивные сопротивления обмоток;  $x_M$  - индуктивное сопротивление связи между обмотками;  $r_c$  - сопротивление потерь в сердечнике;  $r_0$  - сопротивление (обратная величина проводимости (воздушного зазора);  $r_\phi, x_\phi$  - эквивалентное активное и индуктивное сопротивления контура контролируемого листа;  $x_{M\phi} = \omega M_\phi$  - индуктивное сопротивление взаимной индукции, имеющее место между контролируемым листом и обмотками.

Уравнения, составленные для участка цепи с магнитосвязанными контурами, имеют вид

$$\begin{cases} jx_M \dot{I}_\mu - r_c \dot{I}_c - jx_{M\phi} \dot{I}_\phi = 0, \\ jx_\phi \dot{I}_\phi + r_\phi \dot{I}_\phi - jx_{M\phi} \dot{I}_\mu = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Из второго уравнения системы (1) следует

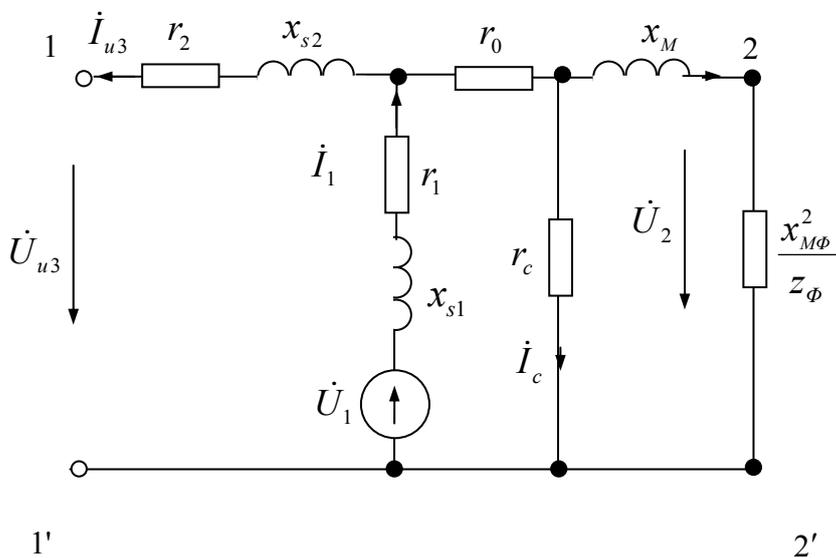
$$\dot{I}_\phi = jx_{M\phi} \dot{I}_\mu / z_\phi, \quad (2)$$

где  $z_\phi = (r_\phi + jx_\phi)$  - эквивалентное комплексное сопротивление контролируемого листа.

С учетом (2) уравнение системы (1) запишется в виде

$$jx_M \dot{I}_\mu - r_c \dot{I}_c + \frac{x_{M\phi}^2}{z_\phi} \dot{I}_\mu = 0. \quad (3)$$

На основании (3) схема замещения преобразователя (рис. 1) преобразуется в схему замещения четырехполюсника (рис. 2).



Уравнение для этого четырехполюсника, записанное через коэффициенты  $\|A\|$ , имеет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_{u3} + \frac{z_2}{z_1} \dot{U}_1 = \frac{z_2(z_1 + r_0 + r_c) + r_0 z_1 + r_c z_1}{r_c z_1} \dot{U}_2 + \\ + \frac{z_2(r_0 jX_M + r_c jX_M + r_0 r_c) + r_0 z_1 jX_M + (r_0 + jX_M)r_c z_1}{r_c z_1} \dot{I}_\mu, \\ \dot{I}_{u3} - \frac{\dot{U}_1}{z_1} = -\frac{z_1 + r_0 + r_c}{r_c z_1} \dot{U}_2 - \frac{r_0 jX_M + r_c jX_M + r_0 r_c}{r_c z_1} \dot{I}_\mu, \end{cases} \quad (4)$$

где  $z_1 = r_1 + jX_{s1}$ ,  $z_2 = r_2 + jX_{s2}$  - комплексные сопротивления первичной и измерительной обмоток.

Из системы уравнений (4) следуют выражения коэффициентов четырехполюсника

$$\begin{cases} A = \frac{z_2(z_1 + r_0 + r_c) + r_0 r_1 + r_c z_1}{r_c z_1}, \\ B = \frac{z_2(r_0 jX_M + r_c jX_M + r_0 r_c) + r_0 z_1 jX_M + (r_0 + jX_M)r_c z_1}{r_c z_1}, \\ C = -\frac{z_1 + r_0 + r_c}{r_c z_1}, \\ D = -\frac{r_0 jX_M + r_0 r_c + r_c jX_M}{r_c z_1}. \end{cases} \quad (5)$$

Вносимое сопротивление  $X_{M\Phi}^2 / Z_\Phi$  в ветви намагничивания схемы замещения представляет собой нагрузку четырехполюсника.

На основании условий передачи максимальной мощности от контролируемого листа к преобразователю имеем

$$\sqrt{AB/CD} = X_{M\Phi}^2 / Z_\Phi. \quad (6)$$

С учетом (5) условие (6) после несложных преобразований принимает вид

$$\begin{aligned} & z_2 z_{12} \cos(\varphi_2 + \varphi_{12}) + \frac{z_1(r_0 + r_c)z_{12}}{Z_{oc}} \cos(\varphi_1 + \varphi_{12} - \varphi_{oc}) + \\ & + j \left[ z_2 z_{12} \sin(\varphi_2 + \varphi_{12}) + \frac{z_1(r_0 + r_c)z_{12}}{Z_{oc}} \sin(\varphi_1 + \varphi_{12} - \varphi_{oc}) \right] = \\ & = \frac{X_{M\Phi}^4}{Z_\Phi^2} \cos 2\varphi_\Phi + j \frac{X_{M\Phi}^4}{Z_\Phi^2} \sin 2\varphi_\Phi, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{s1}^2}, \quad \varphi_1 = \arctg \frac{x_{s1}}{r_1};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{s2}^2}, \quad \varphi_2 = \arctg \frac{x_{s2}}{r_2};$$

$$z_{12} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{s1} + x_{s2})^2}, \quad \varphi_{12} = \arctg \frac{x_{s1} + x_{s2}}{r_1 + r_2};$$

$$z_{oc} = \sqrt{(r_1 + r_0 + r_c)^2 + x_{s1}^2}, \quad \varphi_{oc} = \arctg \frac{x_{s1}}{r_1 + r_0 + r_c};$$

модули и фазы комплексных сопротивлений :

$$z_1, \quad z_2, \quad z_{12} = (r_1 + r_2) + j(x_{s1} + x_{s2}),$$

$$z_{oc} = (r_1 + r_0 + r_c) + jx_{s1}.$$

Из (7) следует

$$z_2 z_{12} \cos(\varphi_2 + \varphi_{12}) + \frac{z_1 (r_0 + r_c) z_{12}}{z_{oc}} \cos(\varphi_1 + \varphi_{12} - \varphi_{oc}) =$$

$$= \left( \frac{x_{M\Phi}^2}{z_{\Phi}} \right)^2 r_{\Phi} \cos 2\varphi_{\Phi}, \quad (8)$$

$$z_2 z_{12} \sin(\varphi_2 + \varphi_{12}) + \frac{z_1 (r_0 + r_c) z_{12}}{z_{oc}} \sin(\varphi_1 + \varphi_{12} - \varphi_{oc}) =$$

$$= \left( \frac{x_{M\Phi}^2}{z_{\Phi}} \right)^2 x_{\Phi} \sin 2\varphi_{\Phi}.$$

Система уравнений (8) определяет зависимость конструктивных параметров магнитной цепи толщиномера от величины сопротивления листа.

Зная, что при точном измерении энергия, передаваемая от измеряемого объекта к измерителю, равна нулю, т.е.  $\dot{I}_{u3} = 0$ , и пренебрегая потерями в стали, можно получить более упрощенную формулу.

С учетом вышеизложенного условие (6) можно записать в виде

$$r_1 + r_0 + j(x_{s1} + x_M) = x_{M\Phi}^2 / z_{\Phi}. \quad (9)$$

Условие (9) можно представить с помощью двух уравнений

$$\begin{cases} r_1 + r_0 = \frac{x_{M\Phi}^2}{z_{\Phi}^2} r_{\Phi}, \\ x_{s1} + x_M = \frac{x_{M\Phi}^2}{z_{\Phi}^2} x_{\Phi}. \end{cases} \quad (10)$$

Последнее уравнение удобно использовать при практических расчетах для определения геометрических размеров магнитной цепи преобразователя, числа витков обмоток, которые соответствуют условию максимальной передачи мощности. Обычно эквивалентное комплексное сопротивление листа определяют экспериментальным путем. Зная толщину листа, можно найти величину  $z_{\phi}(h)$ , а из уравнения (10) определить все необходимые параметры магнитной цепи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дорофеев А. Л., Никитин А.И., Рубин А.Л.** Индукционная толщинометрия. - М.: Энергия, 1978. – 185 с.
2. **Нерсисян В.Г.** Расчет токовихревого преобразователя трансформаторного типа на основе теории цепей с распределенными параметрами // Изв.АН АрмССР. – 1985. - Т.38, <sup>1</sup> 1, - С. 30-36.
3. **Нерсисян В.Б.** Расчет вихретокового преобразователя с учетом скорости движущейся токопроводящей неферромагнитной полосы // Электрические и магнитные поля в неоднородных средах и цепи: Межвуз. темат. сб. науч. тр. по электротехнике. - Ереван, 1989. – С. 83-88.
4. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы электротехники. - М.: Энергия, 1978. – 592 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.10.1999.

**Վ.Բ. ՆԵՐՏԻՍՅԱՆ**

**ՄԻՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՀԱՍՏԱԶՍՓԻ ՀԱՄԱՐԺԵՔ ՓՈԽԱՐԻՆՄԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Դիտարկված է տրանսֆորմատորային տիպի մրրկահոսանքային ձևափոխիչի համարժեք փոխարինման սխեման: Այն պատկերված է քառաբևեռի տեսքով, որտեղ հաղորդիչ թիթեղը փոխարինված է կոմպլեքս դիմադրությամբ: Ըստ առավելագույն հզորության հաղորդման պայմանի, կապ է հաստատվում քառաբևեռի գործակիցների և թիթեղի կոմպլեքս դիմադրության միջև, այլ կերպ ասած, թիթեղի հաստության և ձևափոխիչի կոնստրուկտիվ պարամետրերի միջև:

**V. B. NERISSYAN**

#### **EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETER DETERMINATION FOR EDDY CURRENT CONVERTER REPLACEMENT**

An equivalent circuit for replacing the transformer-type eddy current converter is considered, and the conductive plate is replaced by an equivalent contour with a complex resistance. The transition of this circuit into four-terminal network replacement circuit is grounded. Based on the maximum power transmission conditions, linking the four-terminal coefficients with complex plate resistance, the dependences of the constructive converter parameters on the controllable plate thickness are obtained. A simplified design formula, which is applicable in engineering calculations, is obtained.