

Ю.С.Быковский

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТВП

Одним из замечательных свойств токовихревого преобразователя /ТВП/ является его высокое быстродействие. Время преобразования зависит от частоты питания  $\omega$ , величины радиуса катушки  $a$  и электрофизических свойств объема измерения: электропроводности  $\sigma$  и магнитной проницаемости  $\mu$ .

В работах [1], [2] рассматриваются переходные процессы, обусловленные конечной скоростью распространения электромагнитного поля в проводящей среде, при скачкообразном изменении тока. Питание ТВП скачкообразным током осуществляется редко. Обобщение результатов, полученных в указанных работах для случая питания током произвольной формы, сложно. В данной статье рассматривается вопрос о переходном процессе в системе ТВП - не ферромагнитный объект при питании ТВП током любой формы.

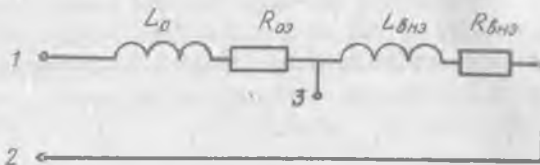


Рис. 1. Эквивалентная схема ТВП

Переходный процесс, а следовательно, и динамические погрешности полностью определяются постоянной времени  $\tau$  системы, которая для эквивалентной схемы ТВП /рис. 1/ определяется выражением

$$\tau = \frac{L_0}{R_0} = \frac{L_0 - L_{\delta n z}}{R_{0z} + R_{\delta n z}}, \quad /1/$$

- где  $L_0$  и  $R_0$  - эквивалентные индуктивность и сопротивление;  
 $L_0$  и  $R_{0z}$  - параметры без влияния проводящего объекта контроля;  
 $L_{\delta n z}$  и  $R_{\delta n z}$  - вносимые параметры, обусловленные влиянием проводящего объекта при воздействии негармонического тока.

В процессе измерения контролируемые величины преобразуются во вносимые параметры  $L_{вн.э}$  и  $R_{вн.э}$ . Постоянная времени  $\tau$  зависит как от собственных параметров ТВП, так и от электрофизических свойств объекта. Вносимые параметры определены в большом диапазоне частот при решении различных задач контроля квазистатических параметров и при питании гармоническим током [4] - [6]. Для определения  $\tau$  необходимо найти зависимость  $L_э$  и  $R_э$  при питании ТВП током сложной формы.

Эквивалентные параметры можно выразить через энергию системы ТВП - объект. Активные потери в системе  $P$  при питании ТВП током сложной формы определяют эквивалентное активное сопротивление  $R_э$ . Реактивная энергия системы  $Q$  определяет эквивалентную индуктивность  $L_э$ , т.е.

$$P = J_{эф}^2 R_э ; \quad /2/$$

$$Q = J_{эф}^2 X_э , \quad /3/$$

где  $J_{эф}$  - эффективное значение тока;

$X_э$  - эквивалентное реактивное сопротивление, зависящее от  $L_э$ .

Таким образом, для нахождения эквивалентных параметров необходимо определить входящие в уравнения /2/ и /3/ значения активной и реактивной мощностей и значения  $J_{эф}$  при питании током сложной формы.

В рассматриваемом случае, когда известны функции параметров  $R_э(\omega)$ ,  $R_{вн.э}(\omega)$  и  $L_{вн.э}(\omega)$  удобно воспользоваться спектральными представлениями.

Спектральная плотность тока, питающего ТВП, определяется прямым преобразованием Фурье

$$J(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{J}(t) e^{-j\omega t} dt . \quad /4/$$

Эффективное значение тока определяется по теореме Парсеваля

$$J_{эф}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T J^2(t) dt = \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) d\omega , \quad /5/$$

где  $T$  - интервал действия тока;

$f = 2\pi\omega$  - текущая частота.

В соответствии с выражениями /2/ и /5/ активная мощность

$$P = J_{зф}^2 R_z = \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) R(\omega) d\omega, \quad /6/$$

откуда

$$R_z = \frac{P}{J_{зф}^2} = \frac{1}{2\pi T J_{зф}^2} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) R(\omega) d\omega. \quad /7/$$

Подставив  $R(\omega) = R_0 + R_{\delta H}(\omega)$ , получим

$$R_z = \frac{1}{2\pi T J_{зф}^2} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) R_0(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) R_{\delta H}(\omega) d\omega \right]. \quad /8/$$

Первое слагаемое определяет часть эквивалентного сопротивления, обусловленного собственным сопротивлением катушки, а второе - вносимым сопротивлением, т.е. электромагнитным процессом внутри проводящего объекта.

Аналогично реактивную мощность можно представить в виде

$$Q = J_{зф}^2 X_z = \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) \omega L_z(\omega) d\omega, \quad /9/$$

где  $L_z(\omega) = L_0 - L_{\delta H}(\omega)$ .

Для выражения эквивалентной индуктивности запишем реактивную мощность в бесконечно узкой полосе частот

$$Q(\omega_1) = \frac{1}{2\pi T} J^2(\omega_1) X(\omega_1) d\omega, \quad /10/$$

где  $\omega_1$  - средняя частота в полосе  $d\omega$

Подставив  $X(\omega_1) = \omega_1 L_z(\omega_1)$ , получим

$$\frac{Q(\omega_1)}{\omega_1} = \frac{1}{2\pi T} J^2(\omega_1) L_z(\omega) d\omega. \quad /11/$$

Проинтегрировав это выражение по всем частотам, получим

$$L_z = L_0 - \frac{1}{2\pi T J_{зф}^2} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) L_{\delta H}(\omega) d\omega = L_0 - L_{\delta H з}. \quad /12/$$

Таким образом, выражения /8/ и /12/ позволяют вычислить эквивалентные параметры для произвольной формы тока, если для него существует преобразование Фурье и если известны частотные зависимости параметров

В связи с использованием преобразования Фурье, где интегрирование ведется в пределах  $R_o(\omega)$ ,  $R_{вн}(\omega)$ ,  $L_{вн}(\omega)$ , необходимо принять параметры, входящие в выражение /1/, четными функциями частоты, т.е.  $-\infty < \omega < \infty$  и т.д. Это положение не противоречит общефизическим представлениям об используемых частотно-зависимых параметрах.

Для ТВП, представляющего собой круглую катушку, в работе [6] приведены подробные расчеты частотнозависимых параметров  $R_{вн}(\omega)$  и  $L_{вн}(\omega)$ . Если основная энергия спектра расположена в диапазоне частот выше  $\omega_H$ , для которой выполняется условие

$$\frac{a}{\sigma} = \frac{a\sqrt{\omega_H \mu \sigma}}{\sqrt{2}} > 10 \quad /13/$$

/  $\sigma$  - эквивалентная глубина проникновения вихревых токов в проводящую среду объекта/, то для расчета  $R_{вн}(\omega)$  и  $L_{вн}(\omega)$  можно использовать более простые выражения [4], [5]:

$$R_{вн}(\omega) = \frac{W^2}{80\pi} C\left(\frac{z}{a}\right) \sqrt{\frac{\mu}{2\sigma}} \sqrt{\omega}; \quad /14/$$

$$L_{вн}(\omega) = \frac{W^2 \mu a}{20} D\left(\frac{z}{a}\right) - \frac{W^2 C\left(\frac{z}{a}\right)}{80\pi} \sqrt{\frac{\mu}{2\sigma}} \frac{1}{\sqrt{\omega}} = L_{вннг} \frac{K_1}{\sqrt{\omega}}; \quad /15/$$

где  $W$  - число витков катушки ТВП;

$z$  - расстояние от катушки до проводящего полупространства;

$C\left(\frac{z}{a}\right)$  и  $D\left(\frac{z}{a}\right)$  - коэффициенты, зависящие только от расстояния до проводящего объекта и радиуса катушки;

$L_{вннг}$  - вносимая индуктивность при взаимодействии ТВП с идеально проводящим объектом.

Собственное активное сопротивление катушки можно аппроксимировать [7] выражениями

$$R_o(\omega) = R_o(0) \text{ для } 0 < \omega < \omega_r; \quad /16/$$

$$R_o(\omega) = R_o(0) z \sqrt{\frac{\mu_r \sigma_r}{8}} \sqrt{\omega} = K_2 \sqrt{\omega}, \quad \omega > \omega_r, \quad /17/$$

где  $\omega_r = \frac{8}{z^2 \mu_r \sigma_r};$

$R_o(0)$  - сопротивление катушки постоянному току;

$z$  - радиус привода катушки;

$\mu_r, \sigma_r$  - магнитная проницаемость и электропроводность провода катушки.

На рис. 2 приведены зависимости  $R_o(\omega)$ -1,  $R_{вн}(\omega)$ -2,  $L_{вн}(\omega)$ -3;  
На рис. 3 - суммарной индуктивности /1/ и суммарного сопротивления /2/ ТВП.

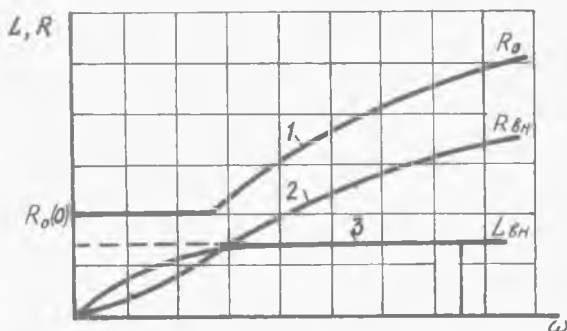


Рис. 2. Зависимости активного сопротивления катушки, вносимого сопротивления и вносимой индуктивности от частоты

Используя выражения /12/ и /15/ для эквивалентной индуктивности, получаем

$$L_s = L_o - L_{вннг} + \frac{K_1}{2\pi T J_{эф}} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) \frac{1}{\sqrt{\omega}} d\omega. \quad /18/$$

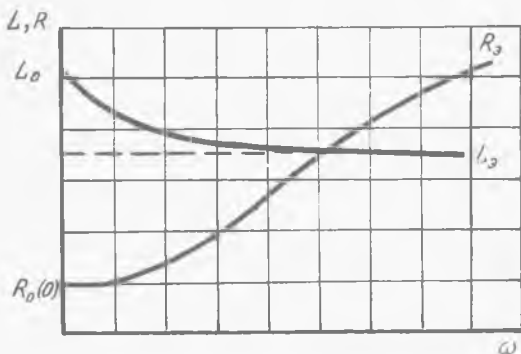


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления и индуктивности ТВП от частоты

Подставляя выражения /14/ и /16/ в /8/, получим эквивалентное сопротивление

$$R_3 = \frac{K_1 + K_2}{2\pi T J_{3\phi}^2} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) \sqrt{\omega} d\omega. \quad /19/$$

Постоянную времени системы ТВП /объекта измерения/ получим подстановкой выражений /18/ и /19/ в /1/

$$\tau = \frac{L_0 + L_{вннг} + \frac{K_1}{2\pi T J_{3\phi}^2} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) \frac{1}{\sqrt{\omega}} d\omega}{\frac{K_1 + K_2}{2\pi T J_{3\phi}^2} \int_{-\infty}^{\infty} J^2(\omega) \sqrt{\omega} d\omega}. \quad /20/$$

Из графиков, приведенных на рис. 2,3, и выражения /20/ следует, что с повышением средней частоты спектра постоянная времени уменьшается. Эквивалентная индуктивность при этом стремится к конечному значению  $L_0 - L_{вннг}$ , а активное сопротивление беспределно возрастает. При снижении средней частоты спектра постоянная времени системы увеличивается. Однако максимальное значение доли вносимой индуктивности, зависящей от час-

тоты  $L_{\text{вн}}(\omega)$ , не может превысить значения вносимой индуктивности от идеально проводящего объекта  $L_{\text{вннг}}$ . Поэтому с понижением средней частоты эквивалентная индуктивность стремится к индуктивности катушки без влияния проводящего объекта  $L_0$ , эквивалентное сопротивление - к собственному сопротивлению катушки  $R_0$ . Постоянная времени, таким образом, максимальна при минимальных частотах, т.е.

$$\tau_{\text{к}} = \frac{L_0}{R_0(0)} \quad /21/$$

Таким образом, переходный процесс в проводящем объекте является следствием электромагнитных процессов в возбуждающей катушке и в контролируемом объекте. Реактивная энергия внутри металла всегда меньше подводимой, максимальное значение которой определяется величиной  $L_{\text{вннг}}$ , зависящей только от относительного расстояния  $z/a$

Иначе говоря, происходит переходный процесс в случае, если причиной является не ток питания ТВП, а изменения взаимного расположения катушки и проводящего объекта. При этом напряженность поля на поверхности проводящего объекта изменяется в зависимости от перемещения его и причиной переходного процесса являются электромагнитные явления внутри объекта. Эквивалентная схема системы ТВП - объект в этом случае соответствует подаче питающего тока к точке 3 и замыканию точек 1 и 2 схемы /рис. 1/. Переходные процессы происходят параллельно в катушке и проводящем объекте. Особенность такого процесса в том, что при уменьшении средней частоты питания эквивалентное сопротивление беспрельдно уменьшается, а постоянная времени беспрельдно растет

$$\tau_{\text{об}} = \frac{L_{\text{внз}}}{R_{\text{внз}}} \quad /22/$$

На рис. 4 приведены ориентировочные зависимости, так как спектр питающего тока принимался узкополосным и равномерным.

Таким образом, в настоящей работе предложено использование понятия постоянной времени для исследования переходных процессов в системе ТВП - объект. Дано определение эквивалентных значений параметров, входящих в выражение для постоянной времени, с помощью энергетических понятий, учитывающее частотную зави -

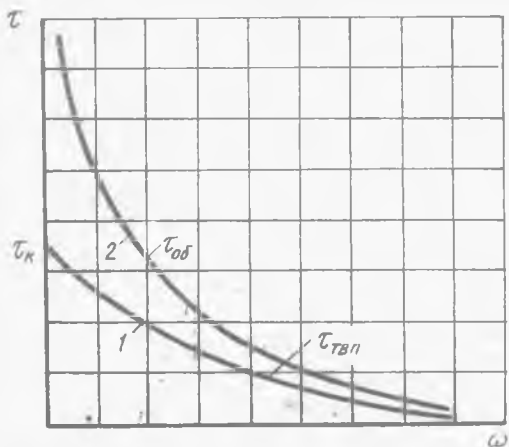


Рис. 4. Зависимости постоянной времени ТВП и переходного процесса внутри объекта от средней частоты спектра тока: 1 - постоянной времени переходного процесса в системе ТВП-объект от средней частоты спектра  $\omega$ , при питании узко-полосным током; 2 - постоянной времени  $\tau_{об}$

симость параметров ТВП. Показано различие постоянной времени ТВП и постоянной времени проводящего объекта, которые значи-тельно отличаются при питании ТВП узкополосным током с малым значением.

Предложенная методика анализа переходных процессов базиру-ется на спектральных представлениях питающего тока и частотных зависимостях параметров ТВП, т.е. использование ее возможно, если известны спектр тока и частотные зависимости  $R_o(\omega)$

$$R_{вн}(\omega) \cdot L_{вн}(\omega)$$

### Л и т е р а т у р а

1. Ключев В.В. Исследование электромагнитных методов и разра-ботка приборов для неразрушающего контроля дефектов, толщины и смещений изделий в процессе производства и технологических ис-пытаний. Автореферат. М., 1970.



2. Рускевич Ю.Н. К вопросу о нестационарном электромагнитном поле витка над проводящей средой. В сб.: "Приборы для неразрушающего контроля изделий", вып. 2, Рижский политехнический институт, 1968.

3. Рускевич Ю.Н. Становление электромагнитного поля витка над проводящим неферромагнитным слоем. "Дефектоскопия", Свердловск, 1971, № 3, с. 29.

4. Быховский К.С. Метод расчета сопротивления витка, расположенного вблизи проводящей поверхности. В сб.: "Радиоэлектроника в народном хозяйстве СССР", вып. 2, Кушбшевский электротехнический институт связи, 1963.

5. Быховский К.С., Старобинский Н.М. Метод расчета параметров, вносимых в круговой контур проводящей поверхностью. В сб.: "Автоматические измерительные и регулирующие устройства", вып. 2, КуАИ, 1965.

6. Соболев В.С., Шкарлет К.М. Накладные и экранные датчики. "Наука", Новосибирск, 1967.

7. Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А. Теория электромагнитного поля. ГЭИ, М., 1962.

Ю.С.Быховский

#### ГРАДУИРОВКА ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении с помощью вихретоковых преобразователей /ВТП/ выходной сигнал можно считать линейно-зависимым от контролируемого параметра, т.е.

$$u = Kz + u_1,$$

/1/

где  $u$  - выходной сигнал;  
 $z$  - контролируемый параметр;  
 $K$  - коэффициент, характеризующий чувствительность ВТП к контролируемому параметру;  
 $u_1$  - напряжение при начальном значении контролируемого параметра.