

Ю.С.Быковский

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТВП

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

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.

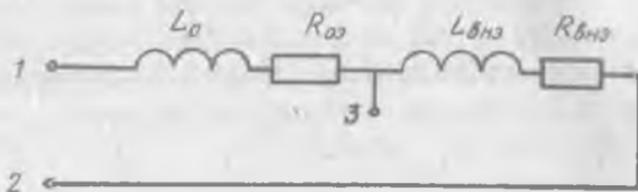


Рис. 1. Эквивалентная схема ТВП

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

$$\tau = \frac{L_0}{R_0} = \frac{L_0 - L_{6Hz}}{R_{0z} + R_{6Hz}}, \quad /1/$$

где L_0 и R_0 - эквивалентные индуктивность и сопротивление;
 L_0 и R_{0z} - параметры без влияния проводящего объекта контроля;
 L_{6Hz} и R_{6Hz} - вносимые параметры, обусловленные влиянием проводящего объекта при воздействии негармонического тока.

В процессе измерения контролируемые величины преобразуются во вносимые параметры $L_{\delta H.э}$ и $R_{\delta H.э}$. Постоянная времени τ 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 τ 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 $R_э(\omega)$, $R_{\delta H}(\omega)$ и $L_{\delta H}(\omega)$ 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

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

откуда

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

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

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

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

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

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

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 ω_1 - средняя частота в полосе $d\omega$

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

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

Проинтегрировав это выражение по всем частотам, получим

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

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 общезначимым 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 ω_H , для которой выполняется условие

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

/ σ - 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;

μ_r, σ_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.

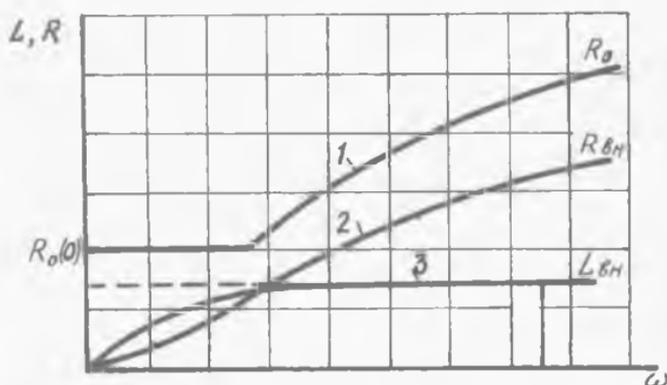


Рис. 2. Зависимости активного сопротивления катушки, вносимого сопротивления и вносимой индуктивности от частоты

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

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

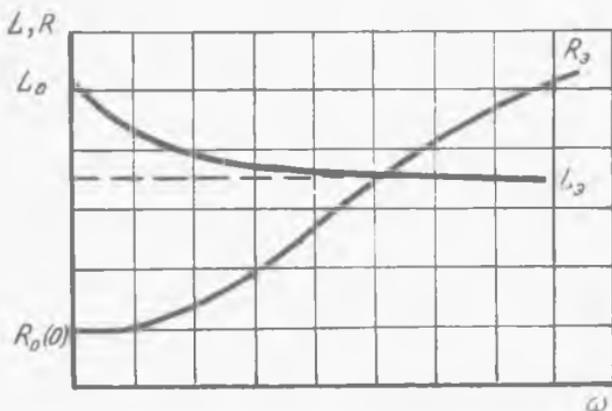


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления и индуктивности ТВП от частоты

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 -

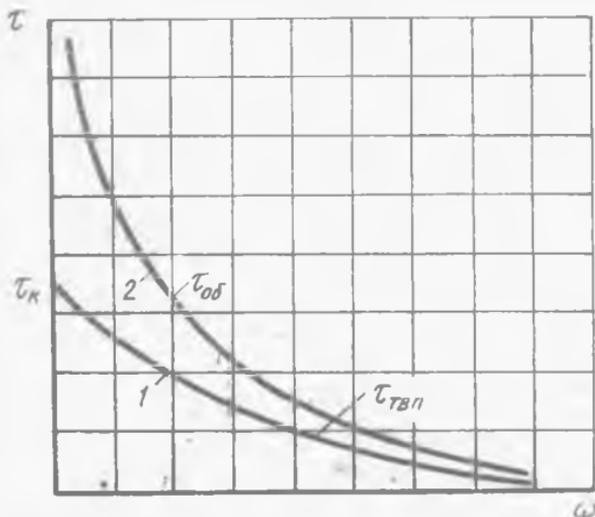


Рис. 4. Зависимости постоянной времени ТВП и переходного процесса внутри объекта от средней частоты спектра тока: 1 - постоянной времени переходного процесса в системе ТВП-объект от средней частоты спектра ω , при питании узко-полосным током; 2 - постоянной времени $\tau_{об}$

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.

$$u = k z + u_1,$$

/1/

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