

УДК 531.714.2.084.2

*А. Г. Дмитриенко, Д. И. Нефедьев, А. А. Трофимов*

## **ВИХРЕТОКОВЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

**А н н о т а ц и я.** Рассматриваются варианты построения датчиков перемещений на основе вихретоковых чувствительных элементов с различными вариантами конструктивного исполнения.

**A b s t r a c t.** Variants of construction of sensors of moving on a basis of vortex-current sensitive elements with various variants of a design are considered.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** датчико-преобразующая аппаратура, чувствительный элемент, датчики перемещений, катушка, обмотка индуктивности.

**К e y w o r d s:** the sensor-reformative equipment, sensitive element, displacement transducers, the coil, an inductance winding.

Современное развитие специальной техники: ракетно-космической, военной техники, вооружения, авиации, двигателестроения, изделий для атомной энергетики и т.п. – во многом зависит от технического уровня информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), качество и технико-экономические показатели которых определяются использованной в них датчико-преобразующей аппаратурой (ДПА). В специальной технике ДПА эксплуатируется при воздействии большого количества дестабилизирующих факторов: ударов, вибраций, линейных ускорений, акустического шума, широкого диапазона воздействующих температур. При создании сложных комплексов в настоящее время широко используются бесконтактные вихретоковые датчики перемещений. Они применяются во многих ИИУС специальной техники.

Исследования показали, что применение вихретоковых чувствительных элементов (ВТЧЭ) для построения бесконтактных датчиков дает следующие преимущества:

- повышение надежности;
- уменьшение массы и габаритных размеров;
- многофункциональность;
- появление возможности тестирования исправности датчиков в процессе эксплуатации.

Наличие этих преимуществ вызвало необходимость перейти к экспериментальным и опытно-конструкторским работам по совершенствованию бесконтактных вихретоковых датчиков перемещений [1].

Существует несколько типов вихретоковых чувствительных элементов. Они различаются по способу формирования сигнала, несущего информацию, и по взаимному расположению катушки и проводящего тела.

По способу формирования сигнала различают параметрические и трансформаторные ВТЧЭ, по взаимному расположению – проходные и накладные ВТЧЭ.

Параметрический ВТЧЭ прост по конструкции: это катушка индуктивности, включенная в одно из плеч мостовой измерительной цепи, как показано на рис. 1. При дифференциальном включении двух катушек ВТЧЭ выходное напряжение мостовой цепи определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} / U_{\Gamma} = (z_{\text{ВН}} + z_0) / 2z_0 - z_0 / 2z_0 = z_{\text{ВН}} / 2z_0, \quad (1)$$

где  $U_{\Gamma}$  – напряжение на питающем генераторе;  $z_{\text{ВН}}$  – внутреннее сопротивление катушки;  $z_0$  – собственное сопротивление катушки.

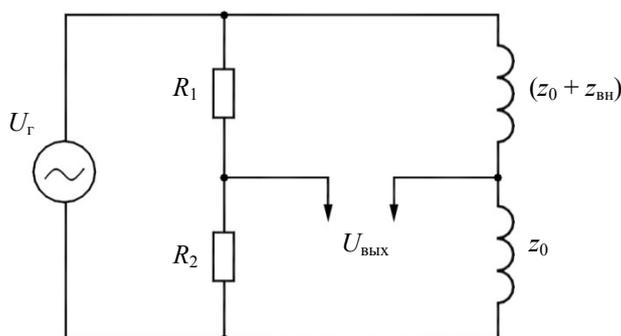


Рис. 1. Схема датчика с параметрическим ВТЧЭ

Таким образом, глубина модуляции выходного напряжения для параметрических ВТЧЭ в лучшем случае не превышает 50 % (типичные значения глубины модуляции лежат в пределах от 1 до 40 %).

Трансформаторный ВТЧЭ имеет более сложную конструкцию, чем параметрический. Он содержит две пары катушек, расположенные таким образом, что в каждой паре имеется достаточно сильная взаимоиנדуктивная связь, а между парами связь пренебрежительно мала. Измерительная обмотка включена в выходную цепь, а питающая – в генераторную в соответствии с рис. 2. Одна катушка из каждой пары подключена к генератору переменного тока, а вторые катушки включены встречно для компенсации начальной ЭДС (рис. 2).

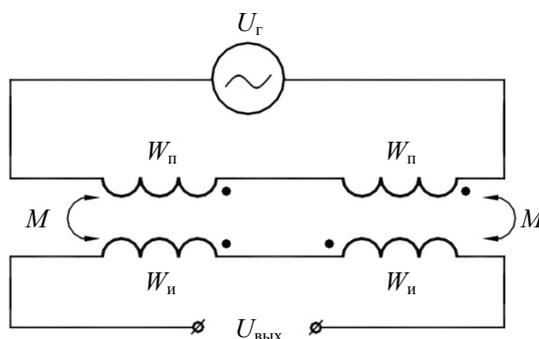


Рис. 2. Схема трансформаторного ВТЧЭ

При приближении катушек к проводящему телу выходное напряжение описывается следующей формулой [2]:

$$U_{\text{ВЫХ}} / U_{\Gamma} = -z_{\text{ВН}}(W_{\text{И}} / W_{\text{П}})I_1 / z_0I_0 = -z_{\text{ВН}} / z_0(W_{\text{И}} / W_{\text{П}}), \quad (2)$$

где  $W_{\text{И}}$ ,  $W_{\text{П}}$  – соответственно число витков измерительной и питающей обмоток в одной паре;  $I_0$  и  $I_1$  – токи в питающей и измерительной обмотках.

Сравнивая формулы для выходных напряжений параметрического и трансформаторного ВТЧЭ, можно увидеть, что чувствительность выходного напряжения к изменениям параметров проводящего тела у трансформаторного ВТЧЭ больше, чем у параметрического. Кроме того, эта чувствительность может быть еще повышена за счет увеличения коэффициента трансформации  $W_{\text{И}} / W_{\text{П}}$ .

В остальном характер зависимости выходного напряжения ВТЧЭ от параметров проводящего тела идентичен у параметрического и трансформаторного ВТЧЭ.

Накладной ВТЧЭ располагается с одной стороны от проводящего тела (рис. 3). У такого преобразователя вносимые параметры значительно зависят от зазора между ВТЧЭ и поверхностью проводящего тела. Характер этой зависимости с достаточной для практики точностью описывается экспоненциальной формулой [3]:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{г}} e^{-6H/D_3}, \quad (3)$$

где  $H$  – расстояние между средним витком катушки и поверхностью проводящего тела;  
 $D_3$  – эквивалентный диаметр намотки катушки ВТЧЭ.

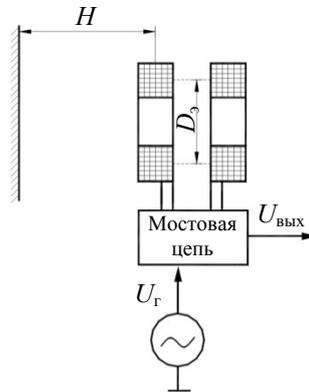


Рис. 3. Схема накладного ВТЧЭ

Из выражения (3) видно, что при увеличении зазора на один эквивалентный радиус намотки катушки выходное напряжение уменьшится в 20 раз.

Существенная нелинейность зависимости выходного напряжения от перемещения (рис. 4) приводит к появлению значительной погрешности от нелинейности. Зависимость на рис. 4 показывает, что для аналоговых датчиков желательно иметь зазор между ВТЧЭ и проводящим телом не более (0,6...0,7) эквивалентного радиуса намотки катушки или (0,3...0,35) эквивалентного диаметра. Дальнейшее увеличение зазора ослабляет сигнал более чем в 10 раз. В поперечном (относительно оси катушки) направлении считается, что можно пренебрегать чувствительностью ВТЧЭ при удалении проводящего тела более чем на 1,5 эквивалентных радиуса от центра катушки.

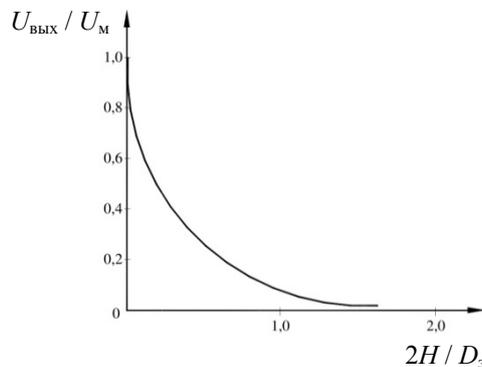


Рис. 4. График зависимости выходного напряжения от перемещения

Приведенные диапазоны допусков для расстояния между катушкой и проводящим телом определяют технические характеристики вихретоковых датчиков. При рассмотрении ВТЧЭ следует учитывать расширение зоны вихревых токов при увеличении зазора. Для круглой катушки можно считать, что диаметр наибольшей плотности вихревых токов ( $D_{\text{вт}}$ ) определяется соотношением

$$D_{\text{вт}} = D_3 + 1,5H. \quad (4)$$

Эта формула позволяет выбирать размеры проводящего тела, минимальный размер которого можно считать равным  $1,3D_{\text{вт}}$ . Проходные ВТЧЭ отличаются тем, что проводящее тело, перемещаясь относительно катушки, либо охватывает ее, либо проходит внутри. Схематично конструкция проходных ВТЧЭ показана на рис. 5,а,б.

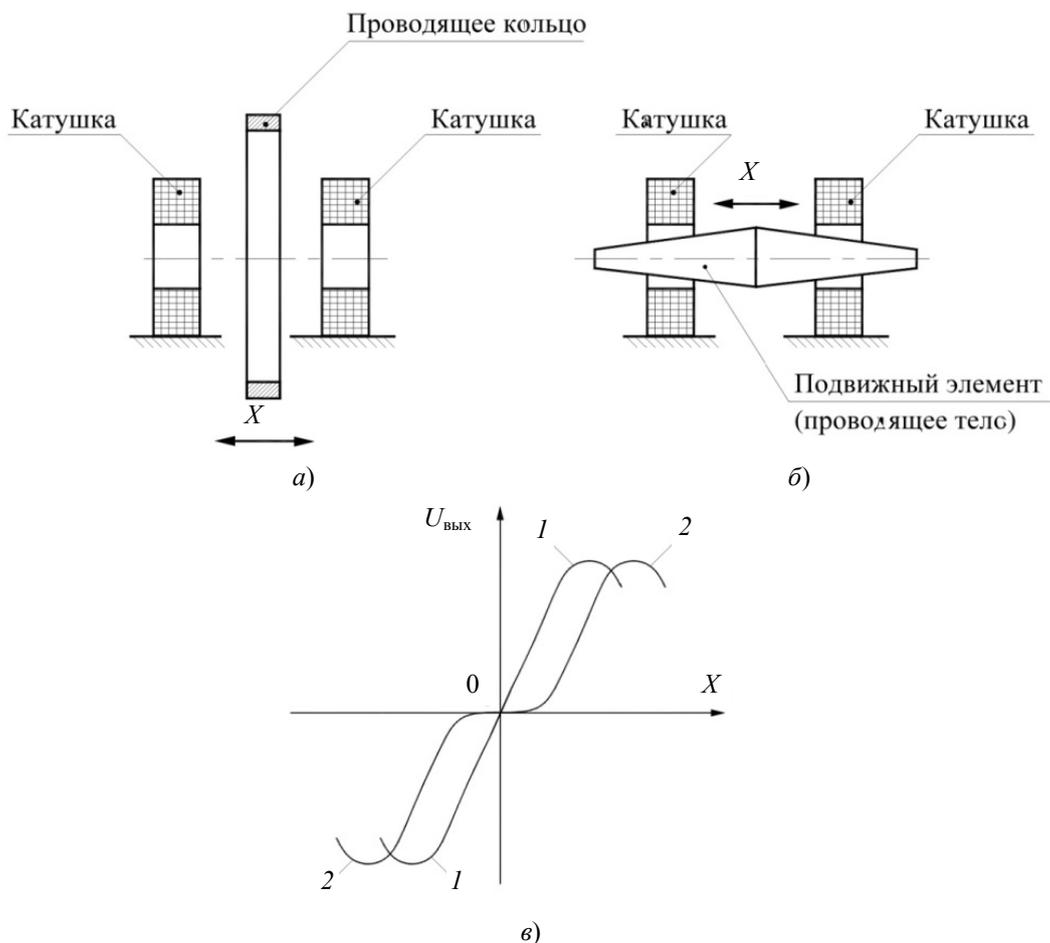


Рис. 5. Конструкция проходных ВТЧЭ (а, б); общий вид характеристики ВТЧЭ от перемещения проводящего кольца (в)

У проходных ВТЧЭ зависимость выходного сигнала от перемещения может иметь как линейный, так и нелинейный характер для различных расстояний между катушками.

Если расстояние между катушками (рис. 5,а) не превышает эквивалентного радиуса намотки, то характеристика от перемещения кольца имеет вид 1 (рис. 5,в). Если расстояние между катушками увеличить, то интенсивность электромагнитного поля посередине между катушками уменьшается и в характеристике появляется зона нечувствительности – линия 2 на рис. 5,в.

На рис. 5,б показан ВТЧЭ с подвижным проводящим телом в виде двойного конуса. Здесь при осевом перемещении проводящего тела изменяются зазоры между поверхностью проводящего тела и обмоткой катушки. Выбирая профиль конических поверхностей, можно получить требуемую зависимость выходного сигнала от перемещения. Например, если на конических участках расположить цилиндрические фрагменты, то можно получить зону нечувствительности.

При построении совмещенных датчиков можно на подвижной части расположить несколько проводящих тел различной конфигурации таким образом, чтобы одно из проводящих тел образовывало с катушками накладной, а другое – проходной ВТЧЭ в том или ином варианте. Это позволяет совмещать в одном датчике несколько функций.

В существующей литературе не описаны свойства вихретоковых чувствительных элементов с треугольным сечением пазы. Однако применительно к вихретоковым преобразователям можно утверждать, что обмотки с треугольным и квадратным сечениями пазов обладают различными свойствами.

Пусть на некотором расстоянии  $H$  от проводящего тела расположена катушка с квадратным сечением пазы, как показано на рис. 6. Параметры катушки можно разделить на собственные и вносимые (последние обусловлены влиянием проводящего тела). Вносимые параметры можно определить по формуле [3]

$$L_{\text{вн}} = L_0 e^{-6H/D_3}, \quad (5)$$

где  $L_{\text{вн}}$ ,  $L_0$  – соответственно вносимая и собственная индуктивность катушки.

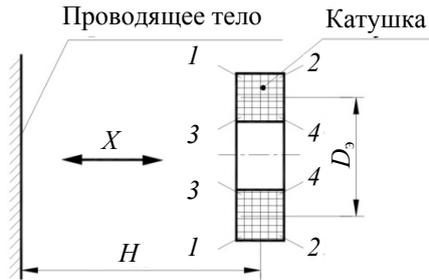


Рис. 6. Катушка с квадратным сечением паза

Эта же формула может быть применена для любого витка или для части катушки. Применяя формулу (5) для различных частей катушки, можем сделать следующие выводы.

Наибольшие вносимые параметры будут в зоне 1, ибо здесь минимальное расстояние от проводящего тела и максимальный диаметр витков. В зоне 2 диаметр максимален, но расстояние до проводящего тела наибольшее – в результате здесь вносимые параметры меньше, чем в зоне 1. В зоне 3 расстояние до проводящего тела так же минимально, как и в зоне 1, но диаметр имеет меньшее значение, поэтому здесь вносимые параметры меньше, чем в зоне 1. В зоне 4 вносимые параметры меньше, чем в зонах 2 и 3, так как здесь наибольшая удаленность от проводящего тела и минимальный диаметр витков.

Таким образом, видим, что разные участки обмотки обладают разной чувствительностью к наличию проводящего тела. В то же время все участки катушки участвуют в формировании индуктивности обмотки. Поэтому малоэффективная зона 4 уменьшает отношение вносимой индуктивности к общей индуктивности катушки.

Пусть отношение  $L_{вн} / L_0$  характеризует глубину модуляции параметров катушки за счет влияния проводящего тела. Тогда это отношение покажет степень эффективности различных типов сечения паза катушки.

Индуктивность катушек с прямоугольным сечением паза можно определить по формуле [2]

$$L_{пр} = \mu_0 / 8\pi N^2 D_{ср} \Phi_p, \quad (6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $N$  – число витков обмотки;  $D_{ср}$  – средний диаметр обмотки;  $\Phi_p$  – функция от соотношения размеров прямоугольного сечения обмотки.

Функцию  $\Phi_p$  можно определить по формуле [2]

$$\Phi_p = 2\pi[(1 + \psi^2/6)\ln 8/\psi^2 - 1,6967 + 0,4082\psi^2], \quad (7)$$

где  $\psi = a / D_3$ ;  $a$  – ширина обмотки.

На основании рекомендаций, содержащихся в [2], можно заменить треугольное сечение паза на ступенчатое, как показано на рис. 7. В этом случае индуктивность катушки с треугольным сечением паза можно определить по формуле

$$L_{\Delta} = 0,5L_{1234} + L_3 + 0,5L_{12} - 0,5L_{34}, \quad (8)$$

где  $L_{1234}$ ,  $L_3$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{34}$  – индуктивности частей обмотки:  $L_{1234}$  – индуктивность обмотки с прямоугольным сечением паза, включающей 1, 2, 3, 4 части обмотки;  $L_3$  – индуктивность части обмотки № 3;  $L_{12}$  – индуктивность обмотки, состоящей из частей № 1 и 2;  $L_{34}$  – индуктивность обмотки, состоящей из частей № 3 и 4.

С учетом соотношений размеров, приведенных на рис. 7, можно рассчитать параметры частей обмотки. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров частей обмотки

Номер участка катушки	$a / D$	$D_{ср} / D$	$H / D$	$\psi = a / D_3$	$\Phi_p$	$\frac{L_{пр}}{N^2 D} \cdot 10^{-7}$	K
1, 2, 3, 4	0,2	0,8	0,2	0,25	20,28	7,21	0,1
3	0,1	0,7	0,1	0,14	27,14	1,05	0,05
1, 2	0,2	0,9	0,1	0,22	21,69	2,17	0,1
3, 4	0,2	0,7	0,1	0,28	18,69	1,45	0,1

