



# АНАЛИЗ СИГНАЛОВ АНАКСИАЛЬНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМ НЕМАГНИТНЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

**В.Н. УЧАНИН**

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Наукова, 5.  
E-mail: uchandin@ipm.lviv.ua

Исследуются вихретоковые преобразователи анаксиального типа с разнесенными обмотками при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством. Вносимый немагнитным полупространством импеданс вихретокового преобразователя анаксиального типа рассчитан методом объемных интегральных уравнений с помощью специализированной программы VIC-3D. Построены годографы внесенного импеданса вследствие изменений удельной электрической проводимости в диапазоне от 1,0 до 56,0 МСм/м на рабочих частотах 10, 100 кГц и 1 МГц для классического коаксиального вихретокового преобразователя и анаксиальных преобразователей с различными расстояниями между обмотками. Для отдельных значений удельной электропроводности построены годографы вносимого импеданса при изменении зазора между вихретоковым преобразователем и поверхностью электропроводящего полупространства. Проведено сравнение вихретоковых преобразователей анаксиального типа с классическими коаксиальными преобразователями. Показаны характерные особенности годографов анаксиальных вихретоковых преобразователей при изменении удельной электрической проводимости и зазора. Библиогр. 18, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* анаксиальный вихретоковый преобразователь, немагнитное электропроводное полупространство, метод интегральных уравнений, годограф, удельная электропроводность

Предложенная ранее классификация вихретоковых преобразователей (ВТП) трансформаторного типа позволяет в зависимости от взаимного размещения обмоток разделить их на коаксиальные и анаксиальные [1]. Продолжительное время в вихретоковом контроле применяли преимущественно ВТП с коаксиальным размещением обмоток [2–6]. В то же время все большее внимание исследователей и разработчиков средств вихретокового контроля вызывают ВТП анаксиального типа, в которых измерительные обмотки размещены за пределами обмотки возбуждения [7–14].

Такие ВТП имеют самостоятельное значение при решении задач толщинометрии и дефектоскопии, а также, во многих случаях, применяются в многоэлементных вихретоковых преобразователях (array eddy current probe). Анаксиальный ВТП с двумя разнесенными обмотками является образующим элементом в построении мультидифференциальных ВТП (или ВТП двойного дифференцирования), которые нашли широкое применение в решении многих актуальных задач неразрушающего контроля [13–15].

В настоящей работе исследуются характерные особенности сигналов анаксиальных ВТП при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством.

**Методика проведения исследований.** Рассмотрим анаксиальный ВТП в виде двух разнесенных на расстояние  $l_p$  одинаковых обмоток 1 и 2 (рис. 1, а), который взаимодействует с электропроводным немагнитным полупространством ( $z < 0$ ) без дефекта. Обмотка 1 является обмоткой возбуждения, а ось второй измерительной обмотки 2 отнесена от оси обмотки 1 на расстояние  $l_p$ . Расчет сигналов ВТП проведено методом объемных интегральных уравнений при помощи программы VIC-3D [16, 17]. Рассчитано внесенные немагнитным полупространством изменения модуля  $Z$  и составляющих  $R$ ,  $X$  передаточного импеданса ВТП. Расчет проведено для тонкостенных обмоток высотой  $l_0 = 0,5$  мм с внешним и внутренним диаметрами 1,0 и 0,8 мм соответственно. Обмотки состоят из 20 витков провода диаметром 0,5 мм, намотанных в два слоя. Исследовали анаксиальные ВТП с обмотками, разнесенными на расстояние 1,0, 1,5 и 2,0 мм.

Для обобщения полученные результаты пронормировано относительно модуля импеданса ВТП  $Z_0$  при размещении его в свободном пространстве (в «воздухе»):  $Z' = Z/Z_0$ ,  $R' = R/Z_0$ ,  $X = X/X_0$ . Геометрические параметры (высота  $l_0$  и толщина обмотки  $\Delta r$ , расстояние между осями обмоток  $l_p$ , зазор  $t_3$ ) пронормировано к внешнему диаметру обмотки ВТП:  $l'_0 = l_0 / D_3$ ;  $\Delta r' = \Delta r / D_3$ ;  $l'_p = l_p / D_3$  и

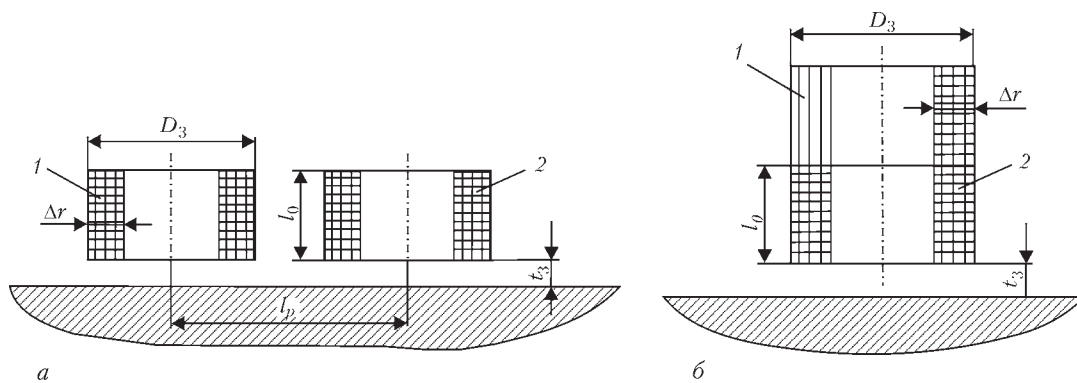


Рис. 1. Параметры и размещение обмоток исследуемых анаксиального (а) и коаксиального (б) ВТП (обозначения см. в тексте)

$t'_3 = t_3 / D_3$ . Пронормированные значения приведенной толщины и высоты обмоток ВТП равняются  $\Delta r' = 0,1$  и  $l'_0 = 0,5$  соответственно. Расчет проведено на трёх рабочих частотах: 10 кГц, 100 кГц и 1,0 МГц. Удельная электропроводность (УЭП) полупространства  $\sigma$  при расчетах изменялась от 1,0 до 56,0 МСм/м, что соответствует диапазону УЭП основных конструкционных немагнитных материалов. Расчет точек годографов влияния УЭП  $\sigma$  проведено при нулевом зазоре между ВТП и поверхностью полупространства. Кроме того, для отдельных значений УЭП  $\sigma$  рассчитаны изменения составляющих передаточного импеданса ВТП при увеличении зазора  $t_3$ .

Для сравнения рассчитывали сигналы коаксиального ВТП с такими же обмотками. При этом обмотки возбуждения ВТП размещались соосно непосредственно над измерительной обмоткой (рис. 1, б).

**Результаты и их обсуждение.** Как отмечалось, рассчитанные сигналы пронормировано относительно модуля импеданса ВТП  $Z_0$  при размещении его в свободном пространстве, который для каждого из исследуемых ВТП разный. Для безразмерной оценки используем коэффициент разнесения  $K_p$ , который определим как отношение модуля передаточного импеданса исследуемых анаксиальных ВТП к модулю передаточного импеданса коаксиального ВТП, который имеет максимальное значение. Параметры исследуемых ВТП при размещении в свободном пространстве и значение коэффициента  $K_p$  представлено в таблице. Зависимость коэффициента разнесения  $K_p$  от расстояния  $l'_0$  между обмотками показано на рис. 2. Учтем, что в теории вихретокового контроля активная составляющая импеданса ВТП при размещении в свободном пространстве условно считается равной нулю ( $R_0 = 0$ ).

Необходимо отметить одну очень важную особенность анаксиальных ВТП: реактивная составляющая  $X_0$  передаточного импеданса анаксиальных ВТП является отрицательной в отличие от коаксиального ВТП, составляющая  $X_0$  которого является положительной (см. таблицу). Последнее объясняет анализ схемы взаимодействия первичного электромагнитного поля обмотки возбуждения с измерительной обмоткой для коаксиального и анаксиального ВТП (рис. 3), из которого видно, что направления первичного электромагнитного поля в измерительных обмотках этих ВТП являются противоположными.

Результаты расчетов изменений сигналов коак-

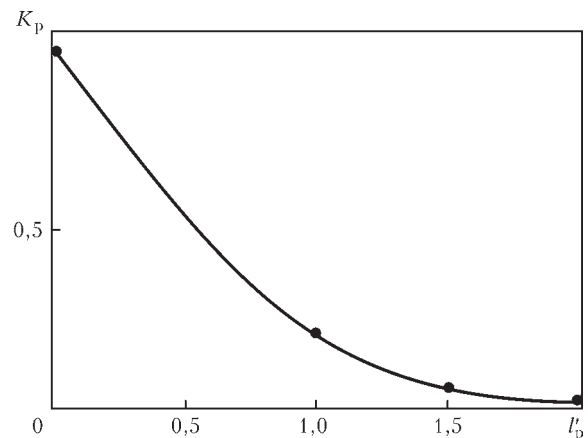


Рис. 2. Зависимость коэффициента разнесения  $K_p$  от расстояния  $l'_p$  между обмотками

**Параметры исследуемых ВТП**

Параметр, Ом	Рабочая частота	Коаксиальный ВТП	Анаксиальные ВТП		
			$l'_p = 1$	$l'_p = 1,5$	$l'_p = 2$
$Z_0$	10,0 кГц	0,0063	0,00133	0,000343	0,000137
$X_0$	10,0 кГц	0,0063	-0,00133	-0,000343	-0,000137
$Z_0$	100,0 кГц	0,063	0,0133	0,00343	0,00137
$X_0$	100,0 кГц	0,063	-0,0133	-0,00343	-0,00137
$Z_0$	1,0 МГц	0,63	0,133	0,0343	0,0137
$X_0$	1,0 МГц	0,63	-0,133	-0,0343	-0,0137
$K_p$					
-	-	1	0,21	0,054	0,022

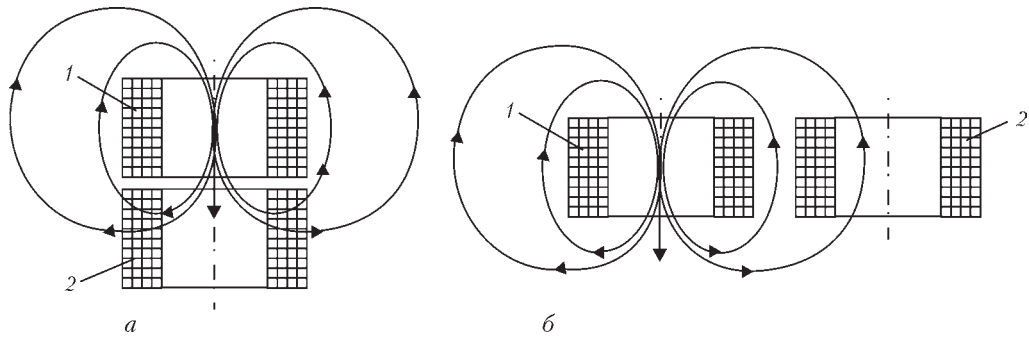


Рис. 3. Взаимодействие измерительных обмоток с электромагнитным полем обмотки возбуждения для коаксиального (а) и анаксиального (б) ВТП

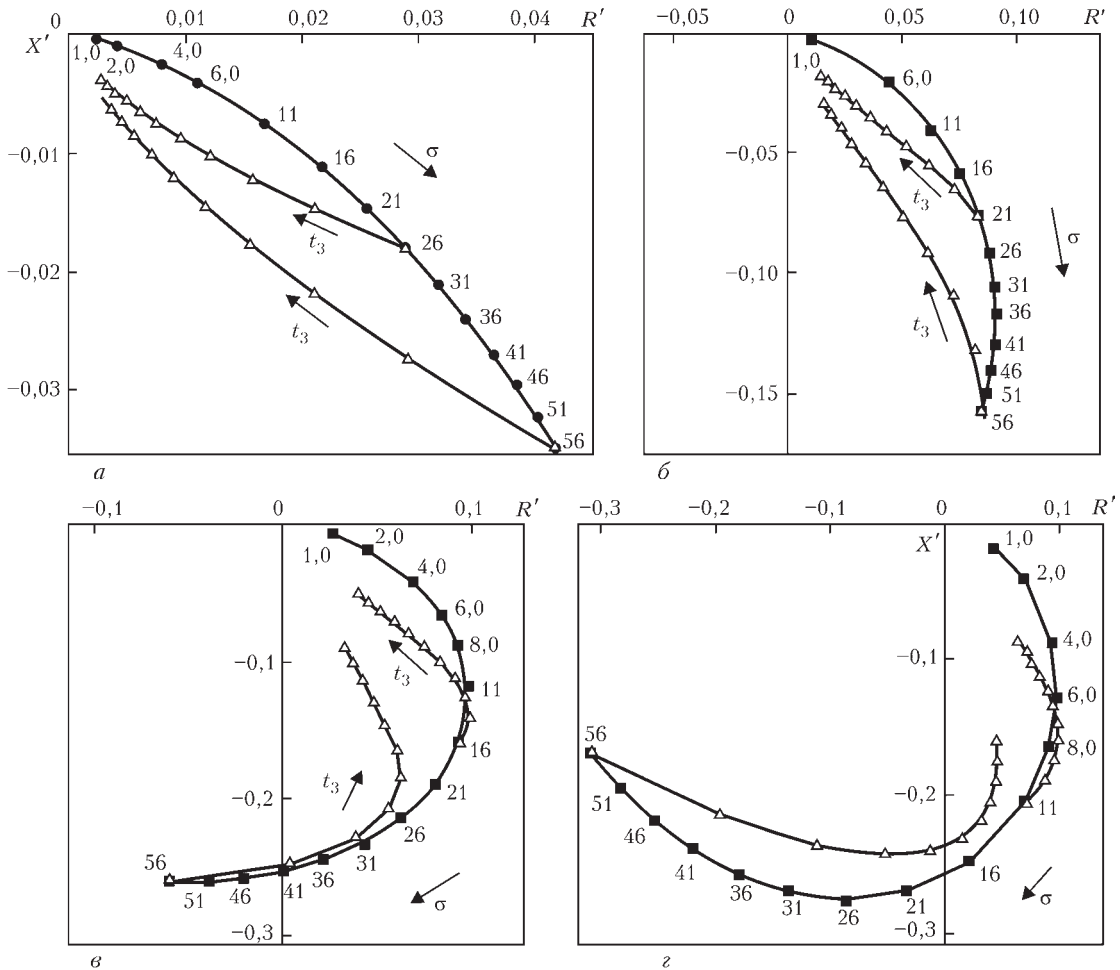


Рис. 4. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 10 кГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

сиальных и анаксиальных ВТП с разным расстоянием между обмотками при установке их на электропроводное немагнитное полупространство с разной УЭП на разных рабочих частотах представлено в виде годографов на рис. 4–6. Кроме того, для отдельных значений УЭП представлено годографы изменений сигналов исследуемых ВТП при увеличении зазора  $t_3$ .

Приведенные результаты показывают, что годографы анаксиальных ВТП от изменения УЭП существенно отличаются от соответствующих годографов коаксиальных ВТП. Годографы классических коаксиальных ВТП всегда лежат в четвер-

том квадранте комплексной плоскости (рис. 4, а, 5, а и 6, а). С повышением рабочей частоты годограф перемещается по часовой стрелке, но не выходит за пределы четвертого квадранта. Несколько похоже выглядит годограф анаксиального ВТП с наименьшим расстоянием ( $l' = 1$ ) между обмотками на низкой рабочей частоте 10 кГц (рис. 4, б). С повышением рабочей частоты и расстояния между обмотками годографы перемещаются по часовой стрелке и переходят в третий, а затем и в четвертый квадрант. Так, на рабочей частоте 10 кГц годографы переходят в третий квадрант уже для  $l' = 1,5$  (рис. 4, в) и  $l' = 2$  (рис. 4, г).

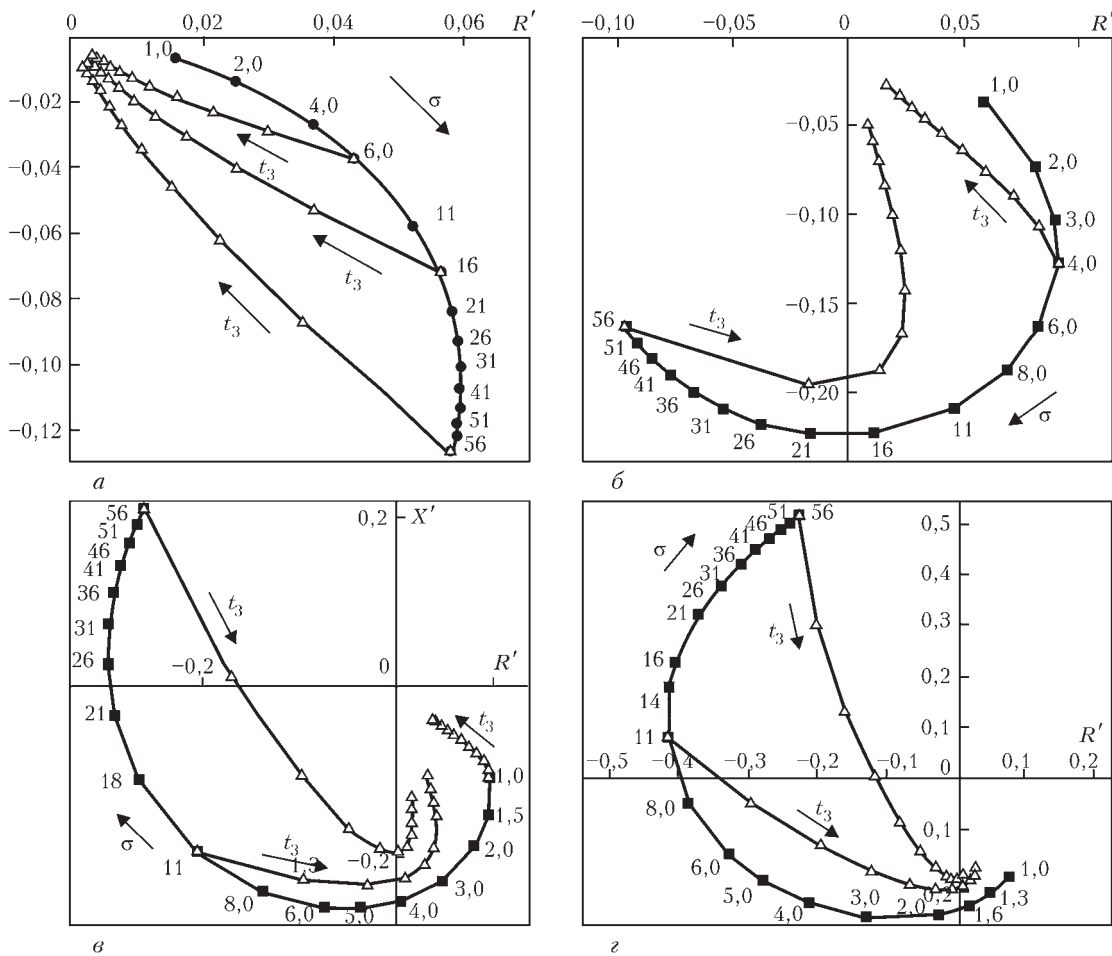


Рис. 5. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 100 кГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

На рабочей частоте 100 кГц годографы переходят в третий квадрант уже для  $l' = 1$  (рис. 5, б), а для  $l' = 1,5$  (рис. 5, в) и  $l' = 2$  (рис. 5, г) переходят во второй квадрант. На рабочей частоте 1 МГц годографы переходят во второй квадрант уже для ВТП с меньшим расстоянием между обмотками  $l' = 1$  (рис. 6, б) и  $l' = 1,5$  (рис. 6, в), а для  $l' = 2$  (рис. 6, г) годограф полностью расположен во втором квадранте. При этом значение УЭП, при котором годограф сначала пересекает ось реактивной составляющей импеданса, а затем и ось активной составляющей импеданса, является тем меньше, чем меньше расстояние между обмотками и рабочая частота. С повышением рабочей частоты и УЭП точки годографа анаксиального ВТП сближаются, так как это имеет место для известных годографов классических коаксиальных ВТП [2–6]. Отметим также, что изменения фазового угла сигнала при изменениях УЭП для анаксиальных ВТП больше, чем в коаксиальных.

Переход годографов анаксиальных ВТП в третий и четвертый квадранты комплексной плоскости отмечался в работе [12], где аналитически исследовались сигналы ВТП в виде разнесенных на разное расстояние витков. Известно, что годографы переходят в третий и четвертый квадранты

в векторно-разностных коаксиальных ВТП, которые исследовались в работе [3]. Можно говорить об определенной родственности векторно-разностных ВТП с анаксиальными. Напомним, что векторно-разностным называют ВТП, который состоит из одной обмотки возбуждения и двух измерительных обмоток, включенных встречно. При этом радиусы обеих измерительных обмоток являются большими радиуса обмотки возбуждения. Фактически сигнал векторно-разностного ВТП определяется потоком результирующего электромагнитного поля, проходящего через внешнюю относительно обмотки возбуждения кольцевую зону между витками измерительных обмоток. Сигнал анаксиального ВТП также определяется потоком результирующего электромагнитного поля, взаимодействующего с внешней относительно обмотки возбуждения измерительной обмоткой, который можно рассматривать как часть электромагнитного поля, проходящего между измерительными обмотками в векторно-разностном ВТП.

Специфические особенности имеют и годографы изменения сигналов анаксиальных ВТП при увеличении зазора. Только для наименьшего расстояния между обмотками ( $l' = 1$ ) и рабочей частоты 10 кГц линии зазора несколько подобны

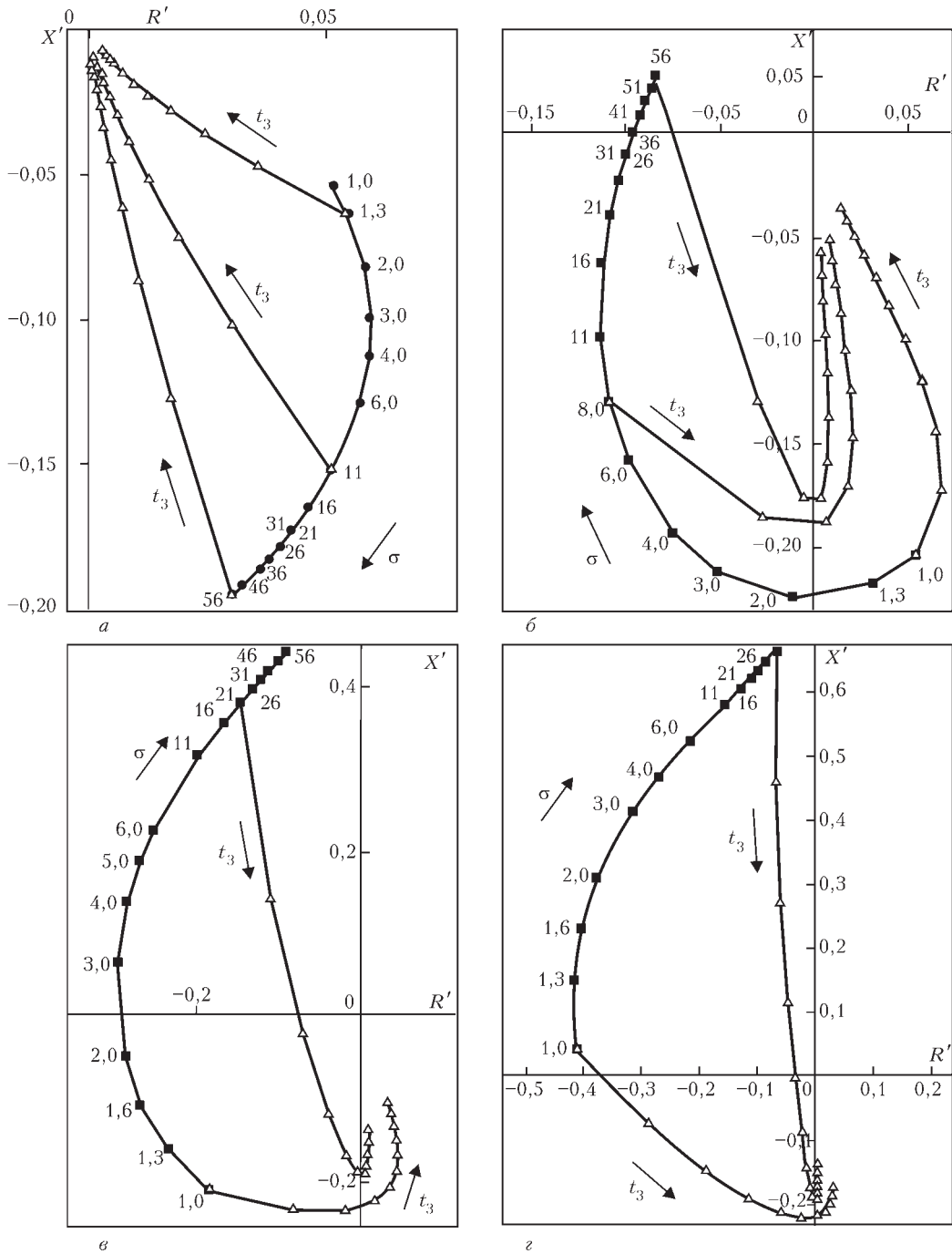


Рис. 6. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 1,0 МГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

линиям зазора коаксиальных ВТП. Единственное отличие заключается в разной кривизне линий зазора: у классического ВТП линии зазора выпуклые в сторону оси реактивной составляющей  $X'$ , а у анаксиального ВТП линии зазора выпуклые в сторону оси активной составляющей  $R'$ . На низких рабочих частотах для больших значений УЭП линии зазора сначала проходят параллельно или близко к линиям изменения УЭП, а затем поворачиваются в направлении начала координат, что соответствует размещению ВТП в свободном пространстве. Характерными в этом отношении являются годографы на рис. 4, в и 4, г. Это означает,

что раздельное измерение УЭП и зазора на основе фазового метода, который обычно применяется при использовании коаксиальных ВТП [18], в таких случаях практически невозможно. Кроме того, линии зазора для УЭП, которые при нулевом зазоре соответствуют точкам в третьем квадранте, сначала переходят в четвертый квадрант и только потом направляются в начало координат. Для точек, лежащих во втором квадранте линии зазора сначала переходят в третий квадрант, а затем через четвертый квадрант направляются в начало координат, т. е., при увеличении зазора годографы изменения сигнала при изменениях УЭП для анак-



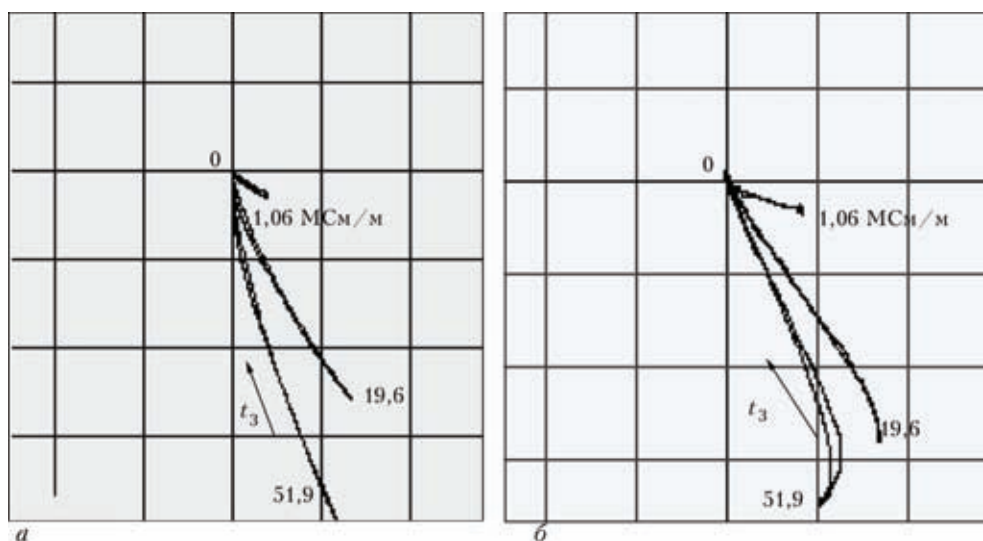


Рис. 7. Экспериментальные годографы изменения сигнала коаксиального (а) и анаксиального (б) ВТП при изменении зазора  $t_3$  на образцах с разной УЭП

сиальных ВТП испытывают более значительные изменения, чем годографы коаксиальных ВТП. В частности, они могут уже не выходить за пределы четвертого квадранта и сближаются, что также может усложнить раздельное измерение параметров объекта контроля. Это необходимо иметь в виду при изготовлении обмоток анаксиальных ВТП на диэлектрических каркасах со щечками.

Экспериментальную проверку отдельных результатов проводили на анаксиальном ВТП в виде двух расположенных рядом обмоток, состоящих из 20 витков провода диаметром 0,06 мм, установленных на ферритовых сердечниках диаметром 1,0 мм. Для сравнения использован коаксиальный ВТП, в котором обе обмотки расположены на общем ферритовом сердечнике один над другим. Необходимо отметить, что экспериментальные ВТП не совсем соответствуют ВТП, которые использованы в расчетной модели. Для обеспечения более высокой чувствительности обмотки экспериментальные ВТП размещены на ферритовых сердечниках. Кроме того, есть конструктивный зазор между обмотками и поверхностью объекта контроля, что, как указано выше, может влиять на вид годографов анаксиальных ВТП.

Экспериментальные исследования сигналов ВТП проводили на рабочей частоте 10 кГц при помощи компьютерной системы на основе вихревой платы EDDYMAX. Регистрировали годографы сигнала ВТП при изменении зазора между ВТП и образцами из неферромагнитных сплавов с удельной электропроводностью 1,06, 19,6 и 51,9 МСм/м (рис. 7). Методика предусматривала предварительное размещение ВТП в свободном пространстве и проведение стандартной операции компенсации сигнала небаланса ВТП (операция балансировки). Подвижная точка, соответствующая сигналу ВТП в комплексной плоскости, пе-

ремещается в центр экрана дефектоскопа (точка 0 на рис. 7). После этого ВТП перемещались на поверхность образцов с различной УЭП поочередно с соблюдением их вертикальной ориентации. При этом подвижная точка перемещалась по кривым, соответствующим линиям зазора в точку, координата которой зависит от УЭП образца (рис. 7). После этого ВТП снова удалялся от поверхности образца и подвижная точка возвращалась в начало координат (точка 0). Следы подвижной точки регистрировались в памяти дефектоскопа по стандартной процедуре.

Представленные на рис. 7 результаты подтверждают особенность годографов сигналов анаксиальных ВТП при изменении зазора, в частности, разное направление выпуклости. Это видно из сравнения экспериментальных годографов на рис. 7 с расчетными годографами на рис. 4, а и 4, б. Кроме того, на рис. 7 виден характерный «прижим» линии зазора к условной линии влияния УЭП на начальных участках изменения зазора при подъеме ВТП.

### Выводы

Методом объемных интегральных уравнений проведен расчет сигналов анаксиального ВТП при размещении его с различным зазором над немагнитным полупространством с различной удельной электрической проводимостью для различных рабочих частот.

Построены годографы сигналов анаксиальных ВТП при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством различной удельной электрической проводимости на различных рабочих частотах и показаны их особенности.

Проведено сравнение годографов сигналов анаксиальных ВТП с годографами сигналов традиционных ВТП коаксиального типа.



Автор благодарит проф. Герхарда Мока из Мадгдебургского университета за предоставленную возможность проведения расчетов во время визита.

1. *Учанин В. Н.* Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 4. – С. 24–29.
2. *Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г.* Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
3. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука. – 1967. – 144 с.
4. *Дякин В. В., Сандовский В. А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 136 с.
5. *Libby H. L.* Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. – New-York etc: Wiley – Interscience, 1971. – 365 p.
6. *Dood C. V., Deeds W. E.* Analytical Solution to Eddy Current Probe Coil problems // J. Appl. Phys. 1968. – 39, № 6. – P. 2829–2838.
7. *Контроль структуры и толщины металлических изделий с использованием анаксиальных преобразователей / Б.И.Блажкевич, Г.Н. Макаров, Л.Л. Либаский, Ю.М. Шумков // Физ.-хим. механика материалов. – 1974. – № 3. – С. 89–94.*
8. *Mayos M., Muller J. L.* Geometrically Anisotropic Probes: an Improved Eddy Current Technique // J. of Nondestructive Evaluation. – 1987. – 6, № 2. – P. 109–116.
9. *Marinov S. G.* Analysis of flat system with displaced sensors for eddy current NDE of ferromagnetic metals // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 4A. – New York: Plenum Press. – 1984. – P. 443–451.
10. *Cecco V. S., Carter J. R., Sullivan S. P.* An Eddy Current Techneque for Detection and Sizing Surface Cracks in Carbon Steel // Materials Evaluation. – 1993. – № 5. – P. 572–577.
11. *Уменьшение чувствительности к влиянию зазора при контроле импульсным вихретоковым методом и использованием двухступенчатых дифференциальных датчиков / Ли Шу, Хуанг Сон-линь, Жао Вей, Ю Пенг // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 84–93.*
12. *Рибачук В. Г.* Накладный вихрострумовый перетворювач анаксиального типу над провідним півпростором // Мат. 7 Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і технічна діагностика». – Київ: УТНКТД, 2012. – С. 155–161.
13. *Учанин В. Н.* Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – №3. – С. 34–41.
14. *Учанин В. Н.* Вихретоковый контроль сварных соединений // Там же. – 2008. – № 4. – С. 71–80.
15. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing // Proc. 8-th Europ.Conf. for NDT. – Barcelona. – 2002. – P. 312. (www.ndt.net. - Feb. 2003. – Vol. 8. – № 2).
16. *Dunbar W. S.* The Volume Integral Method of Eddy Current Modeling // J. of Nondestructive Evaluation. – 1985. – 5, № 1. – P. 9–14.
17. *User's Guide for VIC-3D: An Eddy current NDE Code. Version 2.4. – USA, Bloomington: Sabbagh Associates, Inc. – 1996. – 90 p.*
18. *Учанин В. Н., Макаров Г. Н.* Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1996. – № 4. – С. 41–45.

The paper studies the eddy-current transducers of anaxial type with spaced winding at interaction with nonmagnetic conductive half-space. Impedance of the eddy-current transducer of anaxial type induced by nonmagnetic half-space was calculated by method of volume integral equations using special program VIC-3D. Hodographs of the impedance induced due to change of specific conductivity in the range from 1.0 to 56.0 MСm/m at 10.0, 100 kHz and 1.0 Hz operating frequencies for classic co-axial eddy-current transducer and anaxial transducers with different distance between the windings were built. The hodographs of induced impedance were built for separate values of specific conductivity during change of a gap between the eddy-current transducer and surface of the conductive half-space. Comparison of the eddy-current transducers of anaxial type with classic co-axial transducers was made. Typical peculiarities of the hodographs of anaxial eddy-current transducers during change of specific conductivity and gap were shown. Ref. 18, Table 1, Figures 7.

*Key words* : anaxial eddy-current transducer; nonmagnetic conductive half-space, method of integral equations, hodograph, specific conductivity

Поступила в редакцию  
12.06.2013

**НОВАЯ КНИГА**

**Сидоренко В. Н., Пентегов И. В.**

**Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой.** – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

*Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»*