

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»



Институт неразрушающего контроля

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИНК

_____ В.Н. Бориков

“ _____ ” _____ 2017 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВНОСИМОГО
НАПРЯЖЕНИЯ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ОТ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ОБЪЕКТА**

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине “Электромагнитный контроль и диагностика”

Лабораторная работа № 3

Исследование функциональных зависимостей вносимого напряжения накладного вихретокового преобразователя от свойств электропроводящего объекта

1. Краткие сведения из теории.

Методы вихретокового контроля основаны на возбуждении в электропроводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов от свойств объекта.

Параметры вихревых токов – амплитуда, фаза, пространственное распределение зависят от геометрических размеров, формы и структурных особенностей электропроводящего объекта, электромагнитных характеристик материала, взаиморасположения объекта и источника возбуждающего магнитного поля, частоты и амплитуды тока возбуждения.

В качестве источника переменного магнитного поля в большинстве случаев используется обмотка с переменным электрическим током (*обмотка возбуждения, ток возбуждения*).

Измерительная информация о параметрах вихревых токов может быть получена путем измерения характеристик их магнитного поля с помощью дополнительной измерительной обмотки (*трансформаторное измерительное преобразование*), либо с помощью той же обмотки, что используется для возбуждения магнитного поля (*параметрическое измерительное преобразование*).

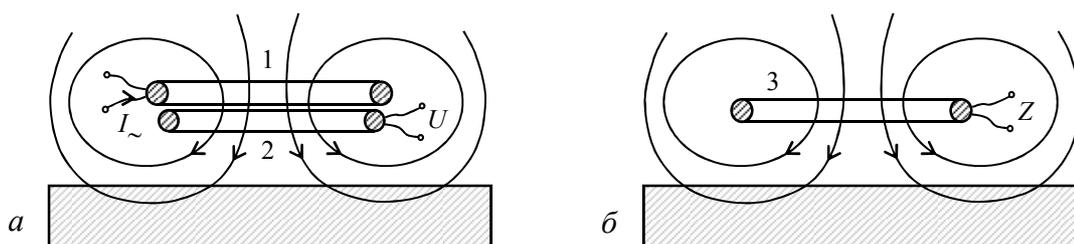


Рис. 1. Трансформаторный (а) и параметрический (б) варианты вихретокового измерительного преобразования: 1 – обмотка возбуждения; 2 – измерительная обмотка; 3 – обмотка индуктивности

В случае трансформаторного преобразования (рис. 1а) выходным электрическим сигналом, отражающим свойства электропроводящего объекта, является комплексное электрическое напряжение \dot{U} измерительной обмотки. В случае параметрического преобразования (рис. 1б) электрическим сигналом, отражающим свойства электропроводящего объекта, является комплексное электрическое сопротивление \dot{Z} обмотки индуктивности. В дальнейшем будем рассматривать только трансформаторный вариант вихретокового измерительного преобразования, используемый в данной работе.

Очевидно, что напряжение измерительной обмотки при трансформаторном преобразовании \dot{U} обусловлено не только магнитным полем вихревых токов, но и непосредственно возбуждающим магнитным полем обмотки возбуждения. Составляющая напряжения измерительной обмотки, обусловленная непосредственным действием возбуждающего магнитного поля, называется *начальным* напряжением вихретокового преобразователя \dot{U}_0 . Составляющая напряжения измерительной обмотки, обусловленная действием магнитного поля вихревых токов, называется *вносимым напряжением* вихретокового преобразователя $\dot{U}_{\text{вн}}$. Таким образом:

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}. \quad (1)$$

Отсчет сдвига фаз комплексных напряжений осуществляется от фазы тока возбуждения. Таким образом, вектор тока возбуждения на комплексной плоскости совпадает по направлению с действительной осью. Направление вектора начального напряжения \dot{U}_0 на комплексной плоскости для идеального трансформаторного вихретокового преобразователя и большинства реальных преобразователей совпадает с направлением мнимой оси.

Для исключения влияния на результат трансформаторного преобразования амплитуды тока возбуждения $\dot{U}_{\text{вн}}$ нормируют по начальному напряжению:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} = \text{Re} \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} + j \text{Im} \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} = \text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}^* + j \text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}^* \quad (2)$$

где $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ – относительное вносимое напряжение.

Реакцию трансформаторного вихретокового преобразователя на возбуждаемые в электропроводящем объекте вихревые токи изображают на комплексной плоскости $\text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}^* - \text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}^*$ точкой, координаты которой соответствуют координатам конца вектора $\dot{U}_{\text{вн}}^*$, а проекции на оси координат – действительной $\text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}^*$ и мнимой $\text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}^*$ составляющим относительного вносимого напряжения.

В случае необходимости комплексные составляющие относительного вносимого напряжения могут быть преобразованы в его амплитуду U_m^* и фазу φ :

$$U_m^* = \sqrt{(\text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}^*)^2 + (\text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}^*)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im} \dot{U}_{\text{вн}}^*}{\text{Re} \dot{U}_{\text{вн}}^*}. \quad (3)$$

Зависимость комплексных составляющих относительного вносимого напряжения от геометрических и электромагнитных параметров проводящего объекта наиболее удобно представить с помощью годографов.

Годограф относительного вносимого напряжения – линия на комплексной плоскости, вычерчиваемая концом вектора относительного вносимого напряжения при изменении какого-либо геометрического или электромагнитного параметра проводящего объекта, либо частоты тока возбуждения.

На рис. 2 показаны годографы относительного вносимого напряжения вихретокового преобразователя, расположенного над электропроводящим немагнитным полупространством (листом либо пластиной, толщина которой значительно превосходит глубину проникновения электромагнитного поля) от изменения удельной электрической проводимости материала σ , частоты тока возбуждения ω , зазора h между обмотками и поверхностью объекта. При этом принималось, что обмотка возбуждения и измерительная обмотка имеют одинаковый радиус R , малое поперечное сечение и расположены настолько близко друг к другу, что можно считать расстояние от них до поверхности объекта одинаковым.

Поскольку ряд влияющих параметров оказывает одинаковое влияние на величину $\dot{U}_{\text{вн}}^*$, то это дает возможность объединить их в один обобщенный параметр $\beta = R \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$.

Все годографы рис. 2 находятся только в четвертом квадранте комплексной плоскости, что характерно для всех случаев взаимодействия возбуждающего магнитного поля с немагнитными электропроводящими объектами.

Годографы от изменения β для разных значений зазора h показаны на рисунке сплошными линиями. С увеличением β (эквивалентно увеличению R , ω , σ) и фиксированном значении h вектор вносимого напряжения описывает своим концом

некоторую гладкую кривую, начинающуюся в начале координат и заканчивающуюся на мнимой оси. Таким образом, при возрастании β происходит монотонное увеличение как амплитуды, так и фазы (сдвига фаз между напряжением и током) относительного вносимого напряжения. С увеличением зазора наблюдается монотонное уменьшение амплитуды относительного вносимого напряжения по закону близкому экспоненциальному. При этом фаза относительного вносимого напряжения практически не изменяется. Соответственно годографы от изменения зазора представляют собой линии, близкие прямым (показаны на рисунке штрихпунктирными линиями).

Таким образом, анализ приведенных на рис. 2 зависимостей показывают, что вихретоковое измерительное преобразование может быть использовано для бесконтактного измерения удельной электрической проводимости материала и непроводящего зазора между электропроводящим листом и вихретоковым преобразователем (например, для измерения толщины непроводящих покрытий на электропроводящих основаниях).

На рис. 3 показаны годографы относительного вносимого напряжения вихретокового преобразователя, имеющего такие же, как и в предыдущем случае обмотки и расположенного над электропроводящей немагнитной пластиной (листом) от изменения толщины пластины T . Зазор h между обмотками и поверхностью объекта в данном случае принимался равным нулю. Сплошной линией показан годограф от изменения обобщенного параметра β для предельного случая $T \rightarrow \infty$, а штрихпунктирной – для случая $T \rightarrow 0$.

Годографы от изменения T в интервале $0 \dots \infty$, показанные на рисунке пунктирными линиями, лежат в области комплексной плоскости, ограниченной вышеназванными линиями. Анализ этих годографов показывает, что при увеличении толщины пластины наблюдается возрастание амплитуды и сдвига фаз относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$. Зависимости от толщины пластины амплитуды и фазы относительного вносимого напряжения $U_m^*(T)$ и $\varphi(T)$ имеют монотонный характер до значений толщины пластины, соизмеримых с глубиной проникновения электромагнитного поля. Это говорит о принципиальной возможности использования вихретокового преобразования для измерения толщины немагнитных пластин и листов. При этом частота тока возбуждения должна выбираться из условия превышения глубины проникновения электромагнитного поля максимального значения измеряемой толщины.

На рис. 4 показаны годографы относительного вносимого напряжения вихретокового преобразователя, расположенного над электропроводящим ферромагнитным полупространством, от изменения удельной электрической проводимости материала σ , частоты тока возбуждения ω , магнитной проницаемости материала μ_r .

Сплошными линиями показаны годографы для предельных случаев $\mu_r=1$ (немагнитный материал) и $\mu_r \rightarrow \infty$ (материал с сильно выраженными магнитными свойствами). Годографы от изменения μ_r в интервале $1 \dots \infty$, показанные на рисунке штрихпунктирными линиями, лежат в области комплексной плоскости, ограниченной вышеназванными линиями. Характерное отличие годографов рис. 4 для ферромагнитного объекта от годографов для немагнитных объектов заключается в том, что их большая часть лежит в первом квадранте комплексной плоскости. При увеличении удельной электрической проводимости материала наблюдается монотонное изменение фазы $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от 90° до -90° , а при увеличении относительной магнитной проницаемости μ_r – монотонное увеличение амплитуды $\dot{U}_{\text{вн}}^*$. Такой характер функциональных зависимостей $\varphi(\sigma)$ и $U_m^*(\mu_r)$ говорит о возможности использования вихретокового измерительного преобразования для измерения как электрических, так и магнитных характеристик ферромагнитных объектов.

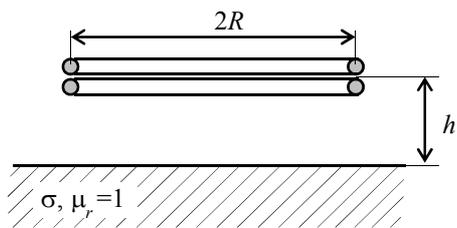
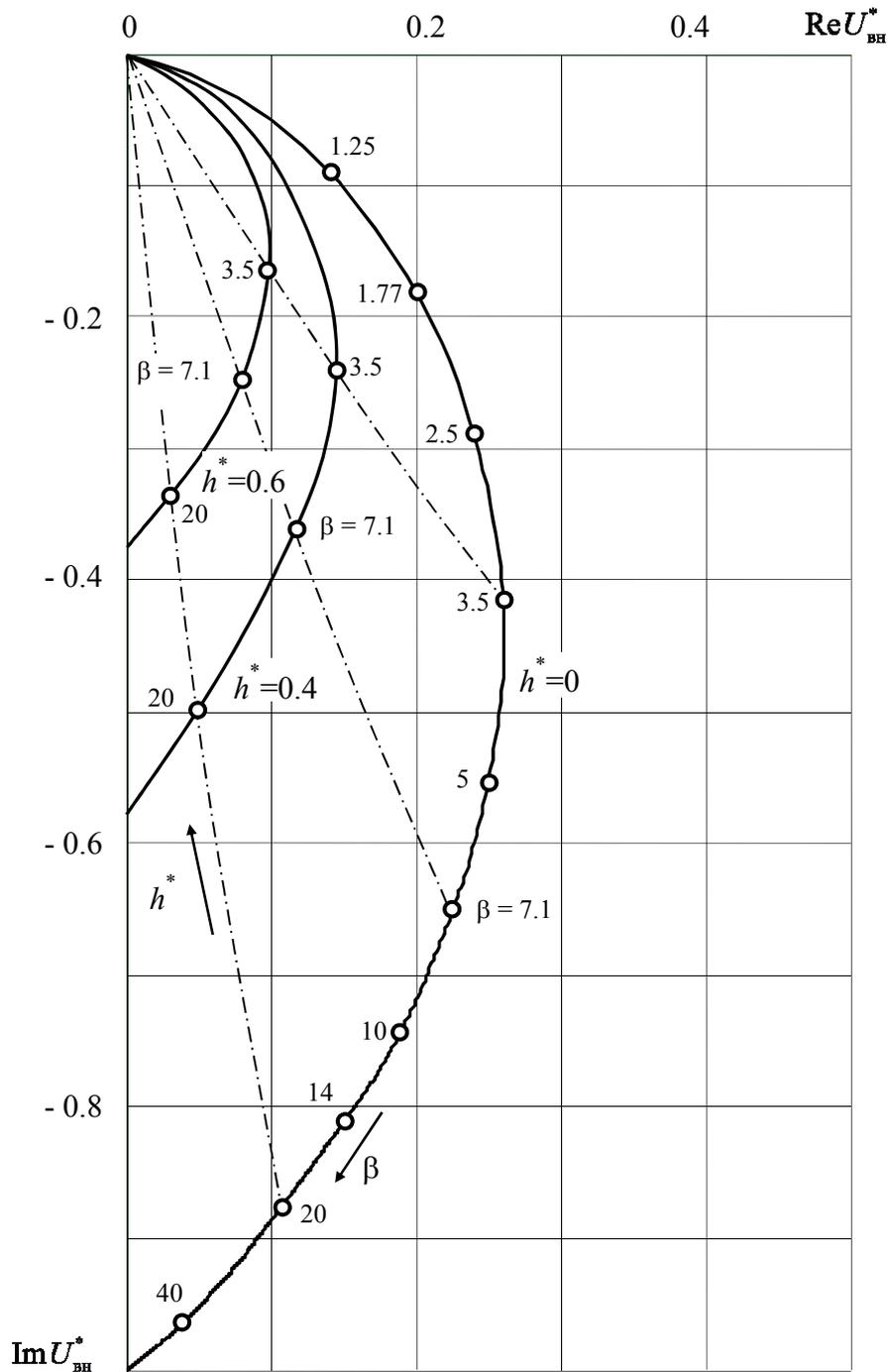


Рис. 2. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП над немагнитным электропроводящим полупространством от изменения обобщенного параметра $\beta = R \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$ и зазора $h^* = h/R$

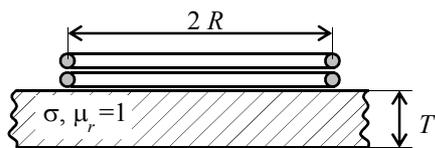
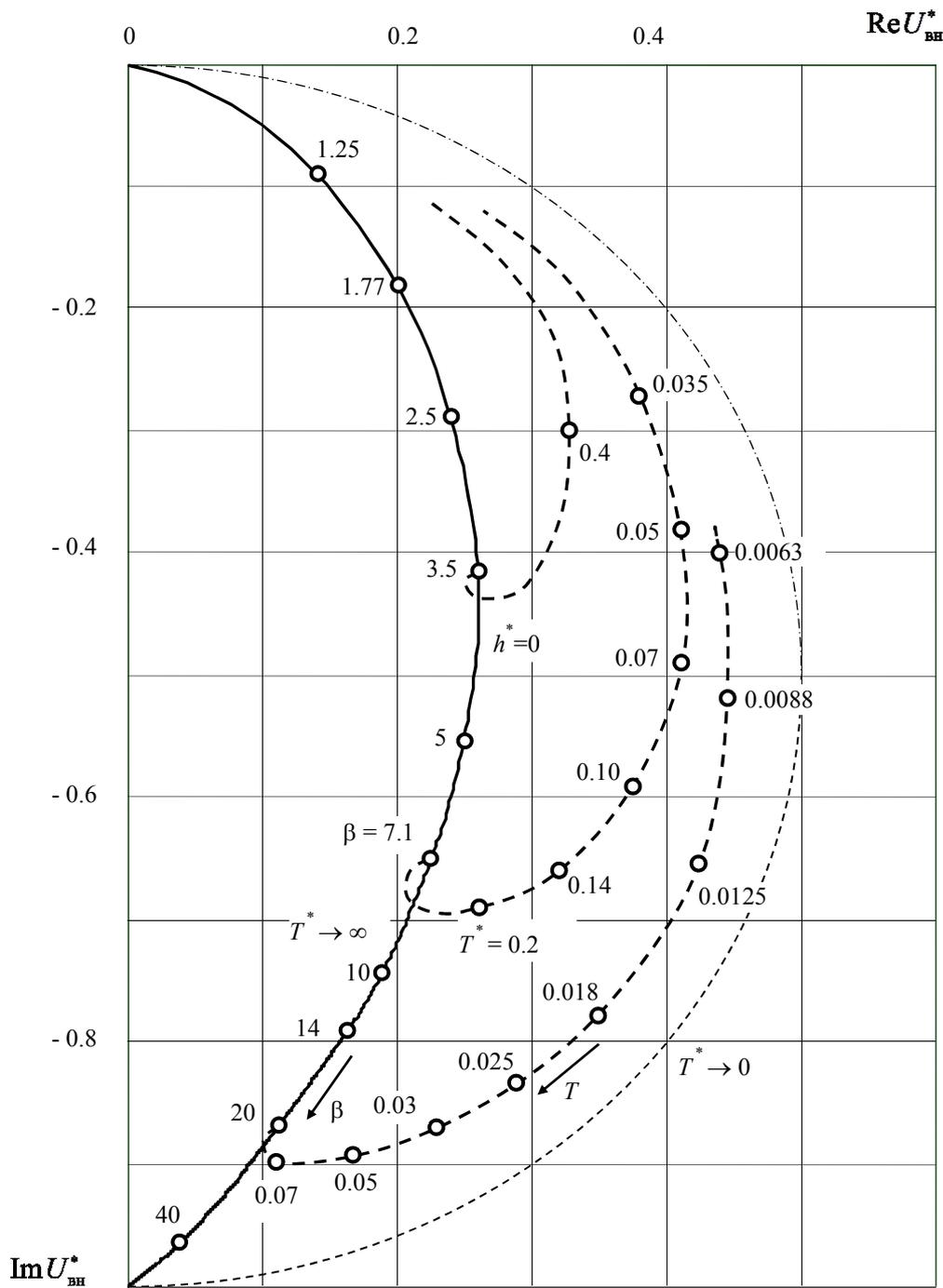


Рис. 3. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП над немагнитной электропроводящей пластиной от изменения обобщенного параметра $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ и толщины $T^* = T/R$

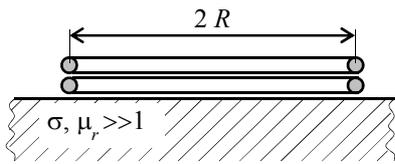
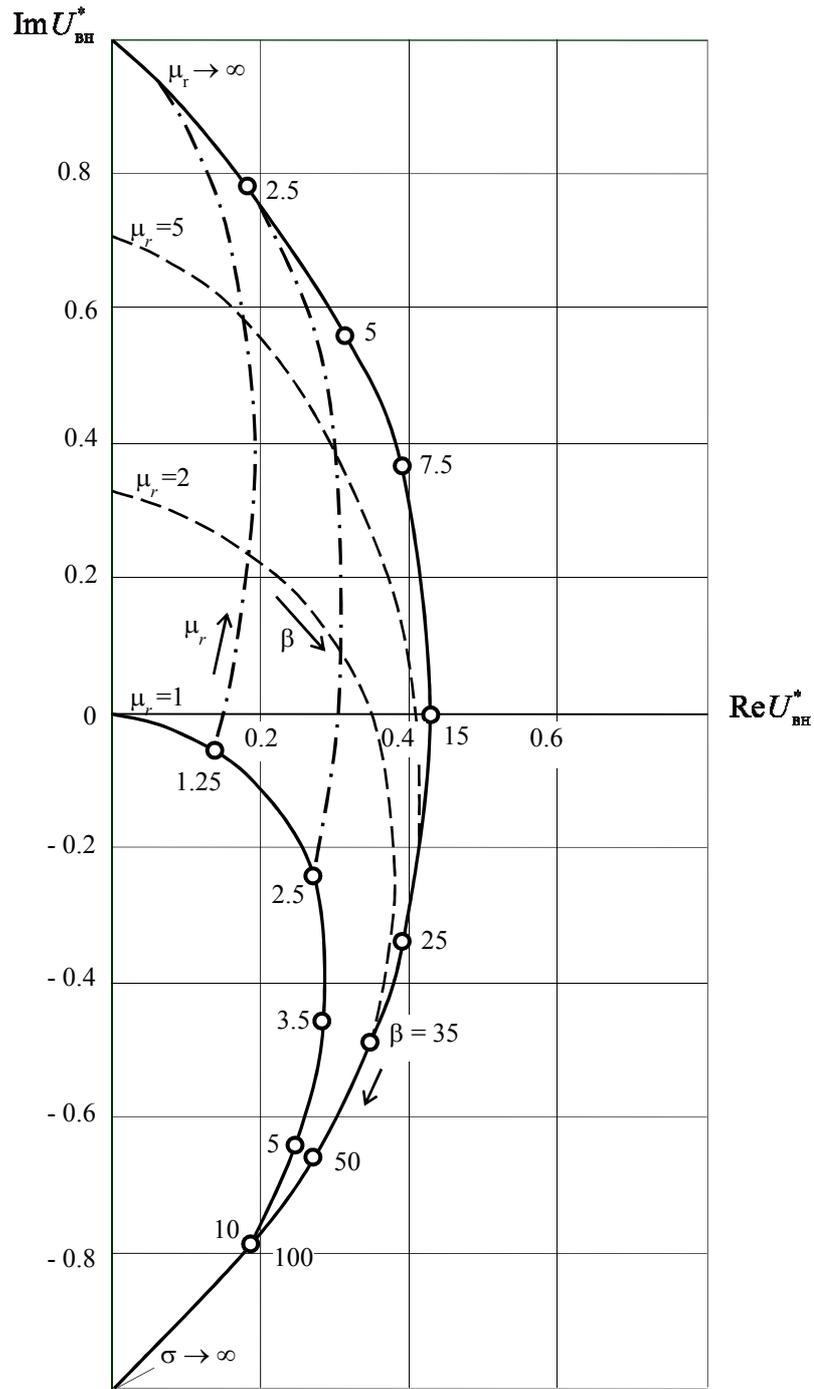


Рис. 4. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП над ферромагнитным электропроводящим полупространством: $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$

Контрольные вопросы.

- 1.1. В чем заключается причина возникновения и каков характер пространственного распределения вихревых токов в электропроводящем объекте, находящемся в переменном магнитном поле?
- 1.2. Каков характер зависимости амплитуды, фазы и пространственного распределения вихревых токов от частоты тока возбуждения, взаимного расположения обмотки и электропроводящего объекта, электромагнитных параметров материала объекта и особенностей его структуры?
- 1.3. Что такое начальное и вносимое напряжения трансформаторного вихретокового измерительного преобразователя? Что такое годографы вносимого напряжения?
- 1.4. Какими физическими параметрами определяется электрический сигнал вихретокового преобразователя при взаимодействии его магнитного поля с плоским электропроводящим объектом?
- 1.5. Какова зависимость электрического сигнала вихретокового преобразователя при взаимодействии его магнитного поля с электропроводящим объектом от дефектов поверхностного слоя объекта?
- 1.6. Для решения каких измерительных задач может быть использовано вихретоковое измерительное преобразование?
- 1.7. Какой информативный параметр сигнала ВТП целесообразно использовать для контроля толщины электропроводящего объекта?
- 1.8. Какой информативный параметр сигнала ВТП целесообразно использовать для контроля толщины диэлектрического покрытия электропроводящего объекта?
- 1.9. Какие соображения должны учитываться при выборе частоты тока возбуждения для контроля толщин стенки электропроводящего объекта и диэлектрического покрытия на его поверхности?

2. Цель работы.

Исследование информативных возможностей вихретоковых методов контроля для получения измерительной информации об электромагнитных и геометрических параметрах электропроводящих объектов.

3. Приборы и оборудование.

- 3.1. Система вихретокового контроля с накладным вихретоковым преобразователем СВК 2.02.
- 3.2. Набор плоских электропроводящих и диэлектрических образцов различной толщины.

4. Программа работы

- 4.1. Определить зависимости относительного вносимого напряжения ВТП $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от зазора ВТП h (толщины диэлектрического покрытия электропроводящего объекта) для двух частот тока возбуждения: годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от изменения h , зависимости $|\dot{U}_{\text{вн}}^*|(h)$ и $\varphi(h)$.
- 4.2. Определить зависимость относительного вносимого напряжения ВТП $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от толщины электропроводящей пластины t : годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от изменения t , зависимости $|\dot{U}_{\text{вн}}^*|(t)$ и $\varphi(t)$.
- 4.3. Исследовать краевой эффект при вихретоковом контроле толщин электропроводящей пластины и ее диэлектрического покрытия.
- 4.4. Для полученной в п. 4.1 зависимости $|\dot{U}_{\text{вн}}^*|(h)$ для частоты тока возбуждения 2500 Гц найти полиномиальную и экспоненциальную аппроксимирующие функции.

Определить абсолютную и относительную погрешности аппроксимации, а также среднюю ошибку аппроксимации.

4.5. Для полученной в п. 4.2 зависимости $|\dot{U}_{\text{вн}}^*|(t)$ для частоты тока возбуждения 125 Гц найти полиномиальную и экспоненциальную аппроксимирующие функции. Определить абсолютную и относительную погрешности аппроксимации, а также среднюю ошибку аппроксимации.

5. Руководство по эксплуатации системы вихретокового контроля СКС 2.02.

5.1. Назначение системы вихретокового контроля.

Система вихретокового контроля СКС 2.02 предназначена для нахождения функциональных зависимостей вносимого напряжения ВТП от основных влияющих параметров электропроводящего объекта контроля с использованием двух частот тока возбуждения 125 Гц и 2500 Гц.

5.2. Устройство и принцип действия системы вихретокового контроля.

Система вихретокового контроля СКС 2.02 имеет в своем составе последовательно соединенные накладной трансформаторный ВТП, блок аналогового преобразования, устройство сбора данных NI USB-6002 и блок вычислительного преобразования (персональный компьютер).

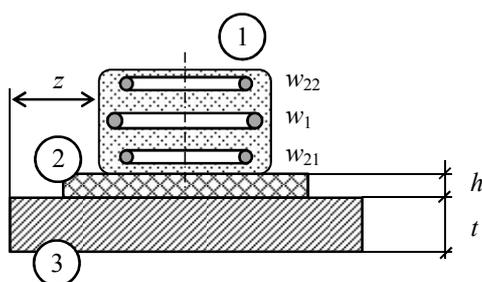


Рис. 5. Накладной ВТП над объектом контроля:

1 – ВТП; 2 – диэлектрическая пластина;
3 – электропроводящая пластина.

На рис. 5 схематично показана конструкция накладного трансформаторного ВТП, содержащего обмотку возбуждения w_1 , измерительную обмотку w_{21} и компенсационную обмотку w_{22} .

Синусоидальные токи двух частот 125 Гц и 2500 Гц, протекающие по обмотке возбуждения, создают двухчастотное электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля (ОК). Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на обмотки ВТП, наводя в них ЭДС.

Напряжение измерительной обмотки на каждой из частот состоит из двух частей $\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}$. Начальное напряжение U_0 наводится в измерительной обмотке в отсутствие объекта контроля за счет индуктивной связи между возбуждающей и измерительной обмотками ВТП. Вносимое напряжение $U_{\text{вн}}$ наводится вихревыми токами, протекающими в объекте контроля. Оба напряжения являются комплексными. Начальное напряжение U_0 зависит от частоты тока возбуждения и параметров ВТП, а вносимое напряжение $U_{\text{вн}}$ определяется параметрами объекта контроля и взаимным расположением ВТП и ОК.

Начальное напряжение компенсационной обмотки благодаря ее конструкции и расположению равно по амплитуде начальному напряжению измерительной обмотки U_0 , а вносимое напряжение практически отсутствует. Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии вблизи ВТП электропроводящего объекта выходной сигнал вихретокового преобразователя близок нулю. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта магнитное поле вихревых токов обуславливает возникновение выходного сигнала (вносимого напряжения) ВТП. Блоком аналогового преобразования осуществляется выделение комплексных

составляющих сигнала ВТП, обусловленных каждой из двух частотных составляющих магнитного поля вихревых токов. Выходные сигналы блока аналогового преобразования пропорциональны амплитудам действительной и мнимой комплексных составляющих вносимых напряжений высокой HF и низкой LF частот f_H и f_L соответственно: $\text{Re } \bar{U}_{внH}$, $\text{Im } \bar{U}_{внH}$, $\text{Re } \bar{U}_{внL}$, $\text{Im } \bar{U}_{внL}$.

Устройством сбора данных осуществляется преобразование выходных сигналов блока аналогового преобразования в цифровую форму, пригодную для дальнейшего преобразования вычислительным блоком.

Вычислительным блоком осуществляется дополнительная компенсация начального напряжения ВТП, определение значений действительной и мнимой комплексных составляющих, амплитуд и фаз относительных вносимых напряжений двух частот, индикация и сохранение результатов измерений, запись этих результатов в файл.

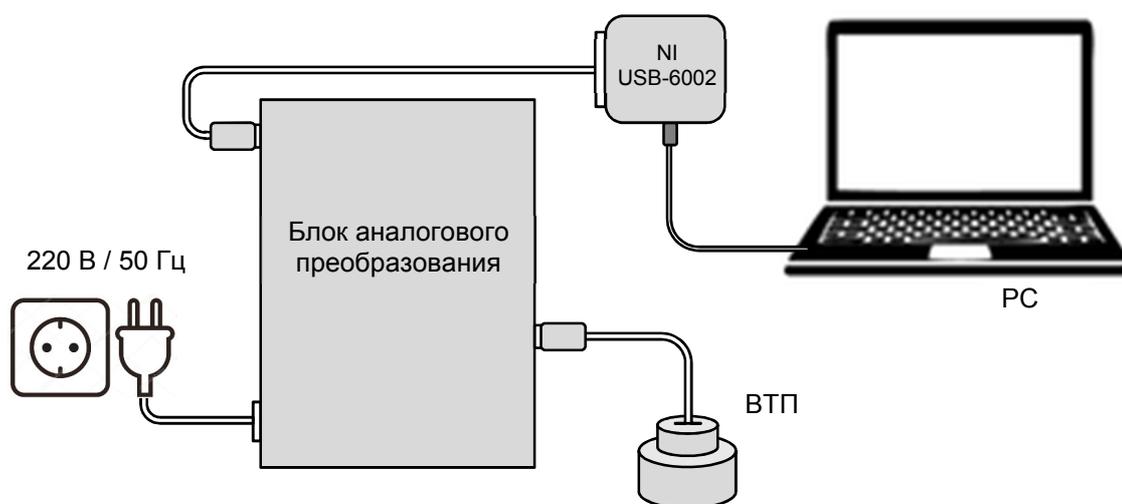


Рис. 6. Схема электрических соединений СКС 2.02

5.3. Порядок работы.

Для подготовки к работе системы вихретокового контроля СКС 2.02 необходимо выполнить соединение составных частей системы штатными соединительными кабелями (рис. 6). Для начала работы системы необходимо включить питания блока аналогового преобразования и осуществить пуск персонального компьютера.

5.4. Запуск программы вычислительного преобразования.

Для входа в программу необходимо открыть папку «Th-meter» на рабочем столе компьютера и запустить файл «T_v3n_hodograph.vi». После запуска файла на экране появится внешний вид панели измерений системы вихретокового контроля СВК 2.02 (рис. 7).

Программное обеспечение системы вихретокового контроля написано с использованием пакета программ LabView. Интерфейс программы содержит стандартные инструменты управления LabView, кнопку «БАЛАНС» для дополнительной компенсации начального напряжения, комплексную плоскость для графического отображения результатов измерения, панели цифрового отображения текущих значений действительной и мнимой комплексных составляющих, амплитуд и фаз относительных вносимых напряжений для каждой из частот, кнопку переключения между частотами «125 Гц / 2500 Гц», кнопку «HOLD» для остановки измерения, кнопку «SAVE», для записи текущих значений $\text{Re } \bar{U}_{вн}$ и $\text{Im } \bar{U}_{вн}$ на выбранной частоте, поле «Параметр» для



Рис. 7. Интерфейс программы измерений СВК 2.02

задания параметра с целью дальнейшей идентификации записанных данных, а также кнопку «STOP», для остановки программы и сохранения в файл результатов измерений.

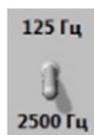
5.5. Работа системы СВК 2.02 в режиме измерений.

Запуск программы и вход в режим измерений осуществляется нажатием кнопки «RUN»:



Дополнительная компенсация выходного напряжения ВТП осуществляется нажатием кнопки «БАЛАНС». При этом ВТП устанавливается либо на диэлектрическую поверхность в удалении от электропроводящих объектов (компенсация начального напряжения ВТП), либо на объект контроля (компенсация вносимого напряжения ВТП при фиксированных влияющих параметрах контроля). В результате балансировки точка на комплексной плоскости ВТП должна иметь координаты [0; 0].

Система работает на двух частотах одновременно. Для отображения на комплексной плоскости значения $\dot{U}_{вн}^*$ на одной из частот используется переключатель



После выбора частоты на панели измерений параметров $\dot{U}_{вн}^*$ соответствующей частоты загорается зеленый индикатор.

Для остановки измерений и отображения текущего значения $\dot{U}_{вн}^*$ осуществляется нажатие кнопки «HOLD». При отпускании кнопки осуществляется продолжение измерений.

Для записи текущих значений $Re\bar{U}_{вн}$ и $Im\bar{U}_{вн}$ на выбранной частоте используется кнопка «SAVE», при каждом нажатии которой происходит сохранение результатов



Рис. 8. Пример отображения результатов измерений СВК 2.02

измерений и вывод результата на комплексную плоскость (желтым цветом). На рис. 8 показан пример отображения семи значений $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ для частоты 2500 Гц.

Для дальнейшей идентификации результатов измерений следует перед нажатием кнопки «SAVE» задать «Параметр» контроля, например значения зазора или толщины объекта контроля.

После проведения всех необходимых измерений производится нажатие кнопки «STOP». Система предложит сохранить файл с записанными данными в формате Excel в выбранной папке.

Выход из системы СВК 2.02 осуществляется закрытием окна программы LabView.

6. Методические рекомендации для выполнения программы лабораторной работы.

6.1. Для выполнения п. 4.1 программы используется набор плоских диэлектрических образцов различной толщины из диапазона $t = (0 \dots 15)$ мм. Значение толщины электропроводящего образца выбирается из диапазона $t = (5 \dots 15)$ мм.

6.2. Для выполнения п. 4.2 программы используется набор плоских электропроводящих образцов различной толщины из диапазона $t = (5 \dots 15)$ мм. Значение зазора ВТП выбирается из диапазона $h = (0 \dots 15)$ мм.

6.3. Для исследования краевого эффекта осуществляется приближение ВТП к краю плоского электропроводящего образца. Строится годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от изменения расстояния до края z (рис. 5), зависимости $|\dot{U}_{\text{вн}}^*|(z)$ и $\varphi(z)$. Значения толщины электропроводящего образца и зазора выбираются из диапазонов $t = (5 \dots 15)$ мм и $h = (0 \dots 15)$ мм.

6.4. Нахождение аппроксимирующих функций (п. 4.1 и п. 4.2 программы) может быть осуществлено с использованием среды MathCad.

6.4.1. Для нахождения полиномиальной аппроксимации $p(x)$ для массивов значений аргумента X и функции Y используется стандартная функция

$$w = \text{regress}(X, Y, n), \quad (4)$$

где n – степень полинома (рекомендуется $n = 3$).

Коэффициенты полинома третьей степени

$$p(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (5)$$

являются элементами матрицы

$$a = \text{submatrix}(w, n, \text{length}(w) - 1, 0, 0). \quad (6)$$

6.4.2. Для нахождения экспоненциальной аппроксимирующей функции

$$e(x) = b \exp(cx) + d \quad (7)$$

для массивов значений аргумента X и функции Y используется стандартная функция

$$v = \text{expfit}(X, Y). \quad (8)$$

Коэффициенты b, c, d являются элементами матрицы v .

6.5. Полученные по результатам выполнения п. 4.4 и п. 4.5 графики функций $p(x)$ и $e(x)$ строятся в одних координатных осях с соответствующими функциями $Y(X)$.

Далее определяются погрешности аппроксимации:

$$\Delta p_i = p(X_i) - Y_i; \quad \gamma p_i = \frac{p(X_i) - Y_i}{Y_i}; \quad \Delta e_i = e(X_i) - Y_i; \quad \gamma e_i = \frac{e(X_i) - Y_i}{Y_i} \quad (9)$$

и средние ошибки аппроксимации:

$$\bar{\gamma} p = \frac{1}{k+1} \sum_0^k |\gamma p_i|; \quad \bar{\gamma} e = \frac{1}{k+1} \sum_0^k |\gamma e_i|. \quad (10)$$

6. Содержание отчета

- 5.1. Название работы.
- 5.2. Цель работы.
- 5.3. Программа работы.
- 5.4. Схема экспериментальной установки.
- 5.5. Основные соотношения, примеры расчетов.
- 5.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.
- 5.7. Графики зависимостей.
- 5.8. Выводы.

Литература

1. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.
2. Гольдштейн А.Е., Абрашкина И.А. Физические основы измерительных преобразований. Моделирование измерительных преобразований и решение практических задач: Учебное пособие / А.Е. Гольдштейн, И.А. Абрашкина – Томск: Издательство томского политехнического университета, 2012. – 143 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 8 томах. Т 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
4. Руководство пользователя Mathcad. 2017 – http://old.exponenta.ru/soft/Mathcad/usersguide/chapter12/12_4.asp

Кафедра физических методов и приборов контроля качества.

Составитель: профессор кафедры ФМПК, д.т.н. А.Е. Гольдштейн.