

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ



М. В. Сясько,
Санкт-Петербургский
государственный
университет, Санкт-
Петербург, Россия.
E-mail: m.syasko@gmail.com



И. П. Соловьев,
канд. физ.-мат. наук,
Санкт-Петербургский
государственный
университет, Санкт-
Петербург, Россия.
E-mail: i.soloviev@spbu.ru



П. В. Соломенчук,
канд. техн. наук,
ООО «Константа», Санкт-
Петербург, Россия.
E-mail: Pavel257@mail.ru

Рассматриваются вопросы конечно-элементного моделирования вихретокового преобразователя, предназначенного для измерения толщины диэлектрического покрытия на электропроводящем немагнитном основании. Сформулированы критерии качества модели и предъявлены требования к ним: прецизионность и погрешность расчета сигналов конечно-элементной модели вихретокового преобразователя при изменении толщины h покрытия не должны превышать $\pm(0,001h + 0,1)$ мкм. Для достижения поставленной задачи проведен анализ параметров, влияющих на прецизионность и погрешность, обоснованы критерии их оценки и сформулирован подход к выполнению учащения сетки конечных элементов в критических местах конечно-элементной модели. Для подтверждения достигнутых характеристик изготовлен реальный вихретоковый преобразователь, оценены его характеристики с применением установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия и мер удельной электрической проводимости. Приведен алгоритм калибровки сигналов реального вихретокового преобразователя, применяемый для валидации конечно-элементной модели.

Ключевые слова: вихретоковый, толщиномер покрытий, двухмерная градуировка, конечно-элементная модель.

M. V. Syasko¹, I. P. Soloviev¹, P. V. Solomenchuk²
¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
²JSC "CONSTANTA", St. Petersburg, Russia

IMPROVING THE ACCURACY OF FINITE ELEMENT MODELING OF A HIGH-FREQUENCY EDDY CURRENT PROBE

The paper considers the issues of finite element modeling of an eddy current probe designed to measure the thickness of a dielectric coating on an electrically conductive non-magnetic base metal. The quality criteria of the model are formulated and the requirements for them are presented: the precision and error of calculating the signals of the finite element model of an eddy current probe should not exceed $\pm(0.001h + 0.1)$ microns when the thickness h of the coating changes. To achieve this task, an analysis of the parameters affecting precision and error was carried out, the criteria for their assessment were justified and an approach to the problem of increasing the frequency of the finite element grid in critical places of the finite element model was formulated. To confirm the achieved characteristics, a real eddy current probe was manufactured, its characteristics were evaluated using a coating thickness simulator machine and measures of specific electrical conductivity. An algorithm for calibrating the signals of a real eddy current probe is presented, which is used to validate a finite element model.

Keywords: eddy-current, thickness gauge, two-dimensional graduation, finite-element model.

Статья поступила в редакцию 16.01.2024

Received 16.01.2024

Для измерения толщины диэлектрических (например, лакокрасочных) покрытий на немагнитных электропроводящих основаниях применяются вихретоковые толщиномеры покрытий, реализующие амплитудный метод измерений [1], который во многом не удовлетворяет современным требова-

ниям к погрешности измерений в условиях реальной номенклатуры изделий [2]. В частности, существенное влияние оказывает отличие удельной электрической проводимости основания σ объекта контроля (ОК) от σ , на котором выполнялась калибровка толщиномера. Эта проблема актуальна,



например, в тех случаях, когда нет возможности провести калибровку толщиномера перед измерениями на непокрытом участке ОК. Для решения этой задачи представляет интерес использование *вихретокового преобразователя* (ВТП) и методики обработки его сигналов, основанной на анализе действительной и мнимой составляющих сигнала ВТП на комплексной плоскости с применением алгоритма двухмерной градуировки [3]. Традиционно при расчете параметров ВТП применяется *конечно-элементное* (КЭ) моделирование. В процессе отладки алгоритмов обработки сигналов ВТП, в частности для оценки погрешности метода измерения толщины покрытия h , необходимо применение высокоточных КЭ-моделей, погрешности расчета сигналов которых должны быть на порядок меньше, чем ожидаемая погрешность метода, обусловленная анализируемым алгоритмом. Для создания КЭ-моделей такого уровня с применением существующих коммерчески доступных программ КЭ-моделирования необходим учет большого числа факторов, анализу которых посвящена эта статья.

На рис. 1 представлена структурная схема интеллектуального датчика [4 (п. 3.11), 5, 6] вихретокового толщиномера покрытий на базе трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного вихретокового преобразователя, содержащего обмотку возбуждения W_B и встречно включенные измерительную $W_{и}$ и компенсационную $W_{к}$ обмотки, для которых ЭДС $e_{\text{вых}}(t) = 0$ при $h = \infty$.

Генератор, состоящий из встроенных *цифроаналогового преобразователя* (ЦАП) и *усилителя возбуждения* (УВ), формирует гармоническое напряжение возбуждения $u_B(t)$ фиксированной частоты, подаваемое на обмотку возбуждения W_B .

Типовая частота f напряжения $u_B(t)$, обусловленная требованиями минимальной толщины основания ОК, составляет 2,5 МГц, что позволяет отнести рассматриваемый ВТП к группе высокочастотных ВТП [7]. В процессе измерения ВТП расположен над ОК, состоящим из диэлектрического покрытия и электропроводящего немагнитного основания. Протекающий по обмотке W_B ток $i_B(t)$ создает осесимметричное магнитное поле, наводящее вихревые токи в основании. Вихревые токи создают свое собственное магнитное поле, взаимодействующее с обмоткой $W_{и}$. При этом $e_{\text{вых}}(t)$ соответствует вносимой ЭДС $e_{\text{вн}}(t)$ на обмотке $W_{и}$ [8, п. 3.1.4]. Наведенная $e_{\text{вых}}(t)$ поступает на усилитель УИ, после чего подается на быстродействующий АЦП. В оцифрованном сигнале с использованием алгоритма дискретного преобразования Фурье выделяются действительная и мнимая составляющие (Re; Im) на частоте возбуждения, которые являются выходным сигналом ВТП, соответствующим ГОСТу [9, п. 2.1.8], и исходными данными для многопараметровой обработки сигнала вихретокового толщиномера покрытий с использованием анализируемого алгоритма.

Среди ряда коммерчески доступных программных пакетов конечно-элементного моделирования для решения данной задачи оптимальным представляется использование программного пакета Ansys Maxwell ввиду его развитых возможностей по конфигурированию задачи КЭ-моделирования, богатого ассортимента средств анализа КЭ-модели и автоматизации большого числа рутинных операций создания КЭ-модели.

Для решения задач КЭ-моделирования электромагнитных полей в пространстве с граничными

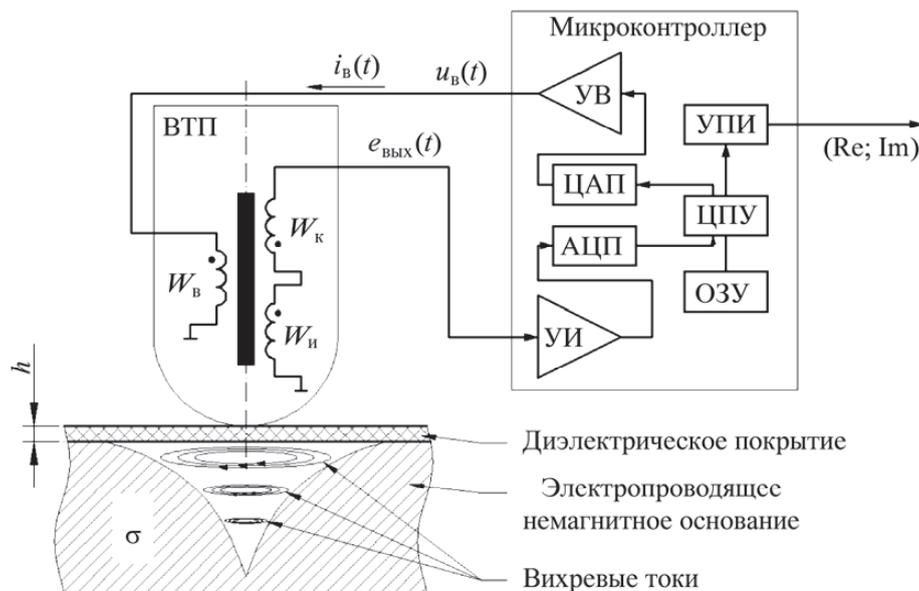


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального датчика вихретокового толщиномера покрытий

условиями и исходными данными Ansys Maxwell применяет уравнения Максвелла в конечной области пространства, представляя целую задачу в форме системы уравнений. Используя эти уравнения, находят значения рассчитываемых полей для заданных точек анализируемых объектов и пространства вокруг них. Точность КЭ-моделирования зависит от количества заданных точек и корректности выбора их расположения. Объекты КЭ-модели представляются в виде множества конечных (базовых) элементов: треугольников на плоскостях и тетраэдров в пространстве. Совокупность всех конечных элементов формирует сетку конечных элементов КЭ-модели, в узлах которых производятся вычисления системы уравнений.

В процессе КЭ-моделирования программой создается начальная, весьма грубая сетка КЭ. После вычисления уравнений во всех точках сетки КЭ определяются участки с наибольшим градиентом магнитного поля. В этих участках сетка учащается, после чего выполняется второе, адаптивное, вычисление уравнений во всех точках учащенной сетки КЭ. Этот процесс должен повторяться до тех пор, пока не будет достигнут заданный уровень точности или до достижения заданного ограничения числа адаптивных вычислений. Рассматриваемый адаптивный процесс построения сетки КЭ позволяет локально уменьшить размер базового элемента сетки КЭ-модели. В результате получается сетка конечных элементов с неравномерным распределением точек в зоне высокого градиента магнитного поля. В рассматриваемой задаче непосредственно под обмотками W_v и W_n сетка учащается для точного решения КЭ-модели, а при удалении от этой зоны, где изменение параметров КЭ-модели происходит более плавно, сетка становится разреженной. Этот механизм, реализованный в программе и работающий автоматически, позволяет оптимально расходовать ресурсы ЭВМ, на которой производятся вычисления, обеспечивая возможность создания КЭ-моделей достаточно высокой точности.

Как правило, процедура построения КЭ-модели включает в себя следующие основные этапы:

- построение геометрической модели ВТП и ОК, задание геометрических переменных;
- задание свойств материалов модели, задание переменных электромагнитных свойств;
- задание источников возбуждения;
- построение электрической схемы, в которую включен ВТП.

Указанным этапам посвящены руководства по применению программного пакета, например [10].

В рассматриваемом случае для решения задач в рамках разрабатываемой КЭ-модели процедура ее

отладки дополнительно включает в себя следующие основные этапы:

- установление критериев качества КЭ-модели ВТП;
- оценка достигаемых значений критериев качества КЭ-модели ВТП, анализ основных параметров, влияющих на качество КЭ-модели ВТП;
- задание и оптимизация сетки конечных элементов;
- оптимизация процедуры КЭ-моделирования;
- формирование плана экспериментов;
- подготовка средств анализа результатов экспериментов;
- проведение и анализ результатов серии экспериментов, корректировка плана экспериментов, получение оптимальной КЭ-модели.

Полученная оптимальная КЭ-модель используется в поставленных целях, в частности для оценки погрешности метода измерения, определяемой анализируемым алгоритмом обработки сигналов и измерения h .

Принципы установления критериев качества КЭ-модели

Для рассматриваемой задачи следует выделить три основных критерия качества КЭ-модели:

- прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП;
- погрешность расчета сигналов КЭ-модели ВТП;
- погрешность расчета параметров КЭ-модели ВТП.

Прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП оценивается при неизменности параметров, влияющих на результаты расчета сигналов КЭ-модели ВТП. Аналогом в реальных измерениях является **прецизионность измерений** – близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при повторных измерениях для одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях [11, п. 5.9]. Прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП может быть оценена по вариации расчета показаний КЭ-модели ВТП толщиномером. Прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП зависит от параметров конструкции моделируемого ВТП и от параметров средства КЭ-моделирования.

Следует выделить следующие характеристики и параметры конструкции моделируемого ВТП, оказывающие наибольшее воздействие и определяющие прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП:

- чувствительность ВТП к контролируемому параметру. КЭ-модели ВТП с высокой чувстви-

тельностью к контролируемому параметру показывают лучший результат, чем КЭ-модели ВТП с низкой чувствительностью, ввиду очевидных математических предпосылок;

- использование в КЭ-модели ферромагнитных объектов. Магнитная проницаемость ферромагнитного материала является комплексным параметром, нелинейно и немонотонно амплитудо- и частотозависимым. Наличие в КЭ-модели ферромагнитных объектов приводит к вводу итерационных решений, снимающих проблему взаимозависимости, например, таких параметров, как глубина проникновения магнитного поля в ферромагнетик и его напряженность. Помимо этого, требуется создание многопараметровых моделей ферромагнитных материалов, не все параметры которых учитываются программным пакетом КЭ-моделирования автоматически. Как правило, создание таких моделей сопряжено с проведением натуральных измерений параметров ферромагнитных материалов [12];

- наличие критических мест – конструктивных элементов ВТП или ОК, незначительные изменения которых существенно влияют на сигналы ВТП, например ферромагнитный сердечник, использующийся для концентрации магнитного поля и обеспечивающий контакт ВТП и ОК, или поверхностный слой ОК, в котором наблюдается сильный градиент магнитного поля, создаваемого вихревыми токами.

К параметрам средства КЭ-моделирования относятся:

- размерность КЭ-модели (двухмерная или трехмерная). Трехмерная КЭ-модель одного и того же ВТП будет иметь существенно меньшую прецизионность, чем двухмерная, ввиду того что для расчета трехмерной КЭ-модели требуется многократно больший расход вычислительных ресурсов (времени вычисления, объема памяти), вследствие чего при расчете трехмерной КЭ-модели ее качество намеренно снижается, а попытки повышения ее качества быстро приводят к исчерпанию вычислительных ресурсов ЭВМ или достижению заложенных в среду КЭ-моделирования пределов на объем вычислений;

- настройки КЭ-модели. Количество адаптивных вычислений, настройки генератора сетки конечных элементов, задание точек измерения сигнала ВТП, вопросы архитектуры построения КЭ-модели непосредственно влияют на прецизионность КЭ-модели ВТП. В большинстве случаев эти параметры являются единственными доступными для управления качеством КЭ-модели. Рассмотрим эти вопросы.

Погрешность расчета сигналов КЭ-модели ВТП в рамках рассматриваемой задачи – это раз-

ность между рассчитанным значением h , полученным с помощью КЭ-модели ВТП, и опорным значением, в качестве которого используются результаты измерения h таким же реальным ВТП, в тех же условиях. Целесообразно учитывать основную погрешность и дополнительную погрешность, обусловленную отклонением исследуемых влияющих параметров. В рассматриваемой задаче исследуемым влияющим параметром является σ .

Погрешность расчета сигналов КЭ-модели ВТП оценивается валидацией КЭ-модели – доказательством удовлетворительности ее параметров путем сравнения результатов измерений реального ВТП на мере h с известным σ и результатов расчета КЭ-модели ВТП на мере σ с теми же параметрами. Ввиду сложности изготовления большого числа мер h к выбору их конструкции, параметров и количества следует подходить с учетом предыдущего опыта и материального обеспечения проводимой работы. При этом параметры КЭ-модели меры могут быть подобраны в соответствии с параметрами реальных мер h и оснований с необходимой точностью.

Принципы расчета параметров качества КЭ-модели

Расчет параметров качества КЭ-модели следует выполнять каждый раз при построении КЭ-модели, исходя из целей КЭ-моделирования и задач, решаемых с ее использованием. В рассматриваемой задаче параметры точности (качества) КЭ-модели определены следующим образом: толщинамер покрытий, в составе которого предполагается использование рассматриваемого ВТП и методики изменения, должен иметь предел основной допускаемой погрешности измерений не более $\pm(0,01h + 1)$ мкм, что соответствует уровню характеристик толщинамеров, производимых мировыми лидерами отрасли. Помимо этого, предел дополнительной допускаемой погрешности измерений, обусловленной влиянием σ , должен быть установлен не превышающим $\pm(0,01h + 1)$ мкм, что превосходит характеристики лучших производимых толщинамеров. Для оценки погрешности метода измерения, определяемой анализируемым алгоритмом измерения h , предъявлены следующие требования к допускаемой погрешности расчета сигналов КЭ-модели ВТП: она должна быть на порядок меньше основной допускаемой погрешности измерений толщинамера, т.е. не хуже $\pm(0,001h + 0,1)$ мкм. Этому значению следует придерживаться как при оценке основной и дополнительной погрешностей расчета сигналов КЭ-модели ВТП, так и при оценке прецизионности расчета сигналов КЭ-модели ВТП. Поскольку выходной величиной КЭ-модели ВТП является не толщина покрытия, а комплексные составляю-

щие сигнала ВТП (Re ; Im), мВ, следует выполнить вычисление значения измеряемой величины h , мкм, в соответствии с анализируемым алгоритмом, описанным ниже.

Погрешность расчета параметров КЭ-модели ВТП

Целесообразно анализировать результаты расчета следующих параметров КЭ-модели ВТП:

- амплитуда сигнала КЭ-модели ВТП при $h = 0$;
- амплитуда сигнала КЭ-модели ВТП при $h = \infty$;
- индуктивность обмоток ВТП при $h = 0$ и $h = \infty$;
- активное сопротивление обмоток ВТП при $h = 0$ и $h = \infty$.

Эти параметры влияют на характеристики электрической схемы обработки сигналов ВТП (которая, как правило, рассчитывается со значительными запасами), на эффективность динамического диапазона используемых электронных компонентов (усилителей, АЦП и т.д.), энергопотребление и т.п. Аналогичные параметры реального ВТП зависят от допусков на изготовление деталей и качества сборки ВТП. Каждый толщиномер проходит процедуру градуировки, при которой значению сигнала ВТП, установленному на эталонную меру толщины покрытия, ставится в соответствие толщина h покрытия меры. Благодаря этому влияние девиации технологических параметров (в заранее определенных пределах) нивелируется. По этой причине (а также исходя из цели поставленной задачи) допустимая погрешность расчета параметров КЭ-модели ВТП весьма значительна и принята в диапазоне $\pm 30\%$.

Геометрические и электромагнитные параметры КЭ-модели ВТП и ОК

На рис. 2, *а* приведено графическое представление двухмерной осесимметричной КЭ-модели ВТП, используемой для оценки погрешности метода измерения h , обусловленной анализируемым алгоритмом, а на рис. 2, *б* изображена трехмерная геометрическая модель ВТП, используемая при проектировании толщиномера.

КЭ-модель состоит из: обмоток измерительной $W_{и}$, возбуждения $W_{в}$ и компенсационной $W_{к}$; основания объекта контроля l ; области решения задачи 2. Ввиду того что в КЭ-модели рассматривается задача измерения толщины h диэлектрического покрытия, с которым магнитное поле не взаимодействует, покрытие задается зазором между ВТП и немагнитным электропроводящим основанием ОК (при увеличении h основание ОК отодвигается вниз на соответствующее расстояние).

При КЭ-моделировании толщина основания составляет 3 мм, что в 3 раза превышает величину максимальной глубины проникновения электромагнит-

ного поля в основание при $\sigma > 0,5$ МСм/м [1, п. 5.3] и $f = 2,5$ МГц.

Электромагнитные параметры модели – это σ и удельная электрическая проводимость обмоток, задаваемая без учета влияния вихревых токов в плоскости XZ , что соответствует модели медной многовитковой обмотки, намотанной эмальпроводом с диэлектрическим изоляционным покрытием. В рассматриваемой задаче σ выступает варьируемым параметром. Единственным источником возбуждения является обмотка $W_{в}$.

Исследование прецизионности измерений (расчетов) КЭ-модели ВТП

На рис. 3 приведено графическое представление КЭ-модели ВТП с отображением плотности вихревых токов в основании ОК и отображением сетки конечных элементов, построенной с использованием штатных алгоритмов программы КЭ-моделирования.

На рис. 4 приведены сигналы КЭ-модели ВТП на комплексной плоскости: локальные годографы σ и h . Эти линии формируют сетку переменной густоты.

Для анализа качества КЭ-модели следует использовать информативные параметры, соответствующие используемому алгоритму обработки сигналов ВТП. Анализируемый алгоритм имеет неудобные для анализа информативные параметры [3, Fig. 1, Formula (2)], однако в случае неизменности σ в качестве информативного параметра в виде допущения можно использовать амплитуду A сигнала КЭ-модели ВТП ввиду родственности анализируемого алгоритма с амплитудным методом измерения, соответствующим ГОСТу [1]. Рассмотрим локальный годограф h ($\sigma = 20$ МСм/м), показанный на рис. 4 голубым цветом. На рис. 5, *а* приведена зависимость A от h в диапазоне от 0 до 1 мм. Точка $h = 0,1$ мм представляет наибольший практический интерес. В окрестности этой точки чувствительность КЭ-модели ВТП к изменению h составляет $\approx -1,67$ мВ/мм. Рассмотрим в более крупном масштабе участок этой линии в окрестности значения $h = 0,1$ мм (рис. 5, *б*).

На рис. 5, *а* получен относительно гладкий график, на рис. 5, *б* видны выбросы.

Для измерения значения этих выбросов целесообразно нормировать (наклонить) график по оси абсцисс по формуле

$$A' = A - ah - b, \quad (1)$$

где A' – амплитуда сигнала КЭ-модели ВТП, нормированная для анализа прецизионности расчета сигналов КЭ-модели ВТП в окрестности короткого фрагмента характеристики ВТП; a и b – коэф-

коэффициенты нормирующей (наклоняющей) функции, вычисляемые по формулам:

$$a = \frac{A_k - A_n}{h_k - h_n}; \quad (2)$$

$$b = A_n - ah_n, \quad (3)$$

где A_n и A_k – осредненные значения амплитуды сигнала КЭ-модели ВТП на начальном и конечном участках анализируемого фрагмента соответственно; h_n и h_k – осредненные значения h на этих участках.

График зависимости A' от h , полученной на КЭ-модели с базовыми настройками точности, приведен на рис. 6, а, графическое отображение КЭ-модели с отображением сетки конечных элементов показано на рис. 6, б. Исходя из допущения

о линейности характеристики ВТП на коротком анализируемом фрагменте характеристики и зная чувствительность КЭ-модели ВТП к изменению h , можно вычислить зависимость отклонения результата измерения толщины покрытия $-\Delta h$ от h в окрестности точки $h = 0,1$ мм. Этот график по форме полностью повторяет график A' , он отображен на том же графике с помощью дополнительной оси ординат, но имеет инвертированное обозначение шкалы, ввиду того что чувствительность имеет отрицательное значение. Он является графиком вариации расчета показаний КЭ-модели ВТП толщиномера и удобен для оценки прецизионности расчета сигналов КЭ-модели ВТП в рамках решаемой задачи. Аналогом в реальных измерениях является вариация показаний толщиномера [11, п. 7.31] –

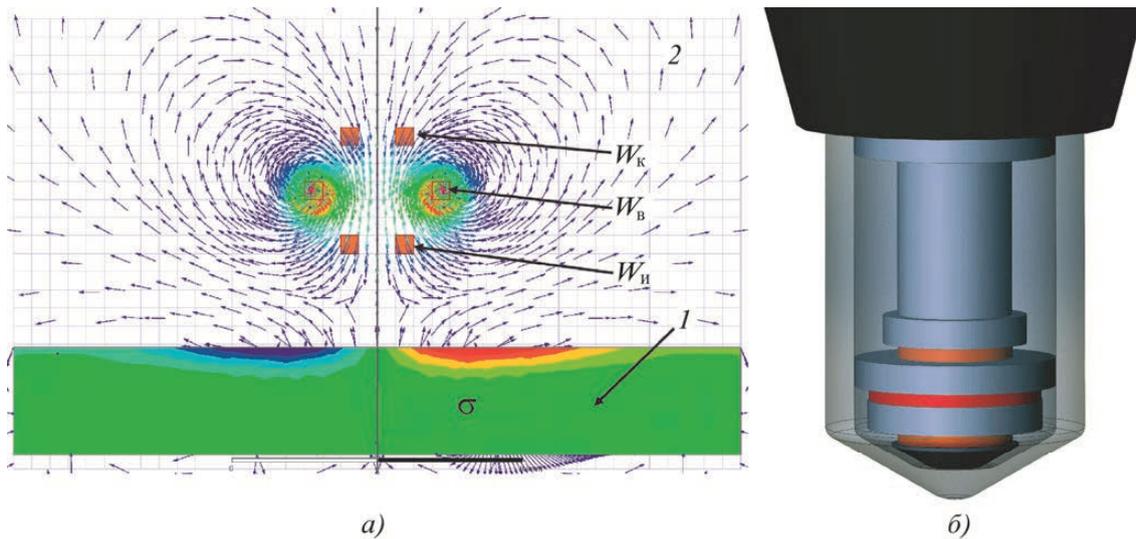


Рис. 2. Графическое представление двухмерной осесимметричной КЭ-модели ВТП (а) и соответствующая трехмерная геометрическая модель ВТП (б)

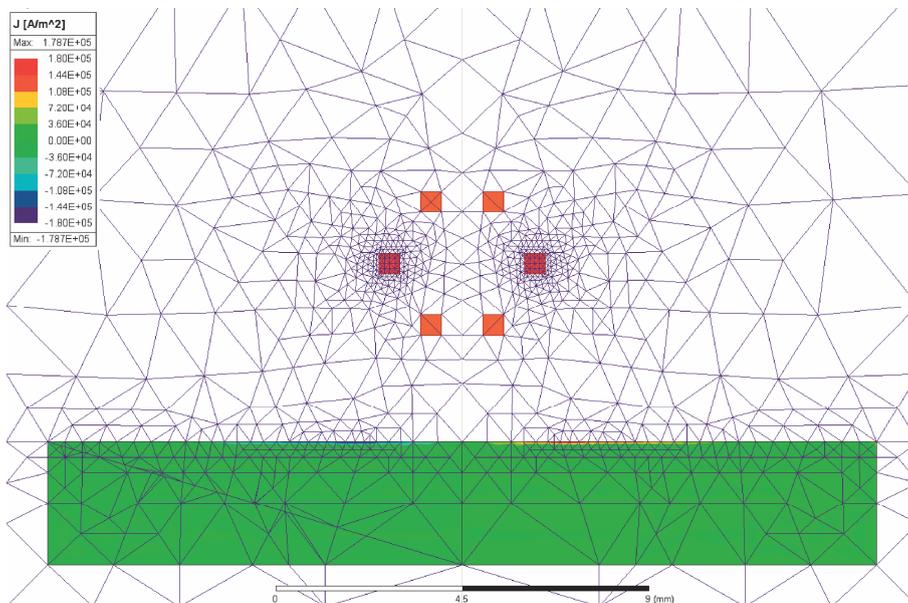


Рис. 3. Графическое представление КЭ-модели ВТП с отображением сетки конечных элементов

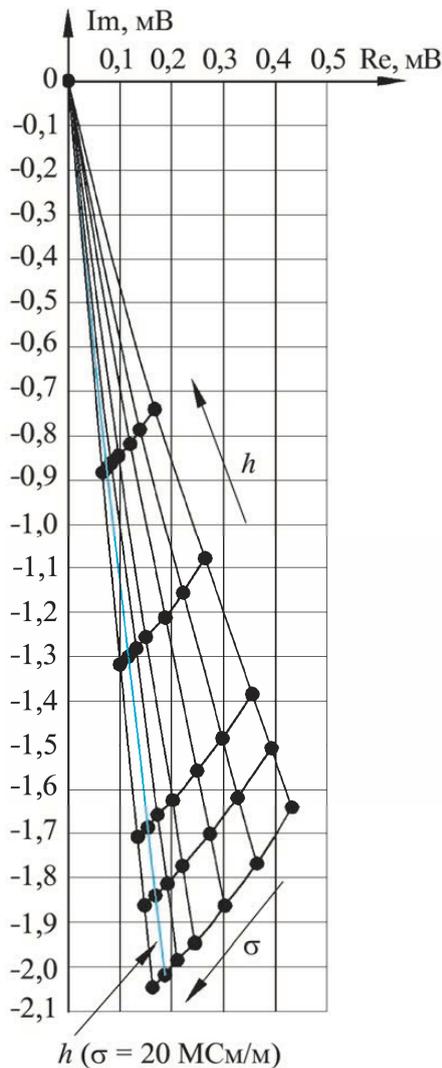


Рис. 4. Сигналы КЭ-модели ВТП на комплексной плоскости, локальные годографы σ и h

разность показаний измерительного прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины. Из рис. 6, а видно, что вариация показаний имеет значение 40 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ-модели.

Анализ факторов, влияющих на прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП

При моделировании ВТП методом КЭ основным фактором, влияющим на прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП, является сетка конечных элементов, а именно перестроение сетки от решения к решению.

Критическим местом в рассматриваемой КЭ-модели ВТП является поверхностный слой основания ОК, в котором наблюдается сильный градиент поля вихревых токов. Изменение сетки в этом слое оказывает наибольшее влияние на прецизионность расчета сигналов КЭ-модели ВТП и вызывает выбросы, наблюдаемые на рис. 6, а. Рекомендуемым способом устранения этого недостатка КЭ-модели является ручное задание правил построения сетки КЭ в критическом месте. Для этого оптимальным является построение четырех–пяти дополнительных слоев сетки КЭ в поверхностном слое, толщина которого соответствует глубине проникновения вихревых токов δ , вычисляемой по формуле

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \sigma \mu_0}}, \quad (4)$$

где f – частота возбуждения ВТП; μ_0 – магнитная постоянная.

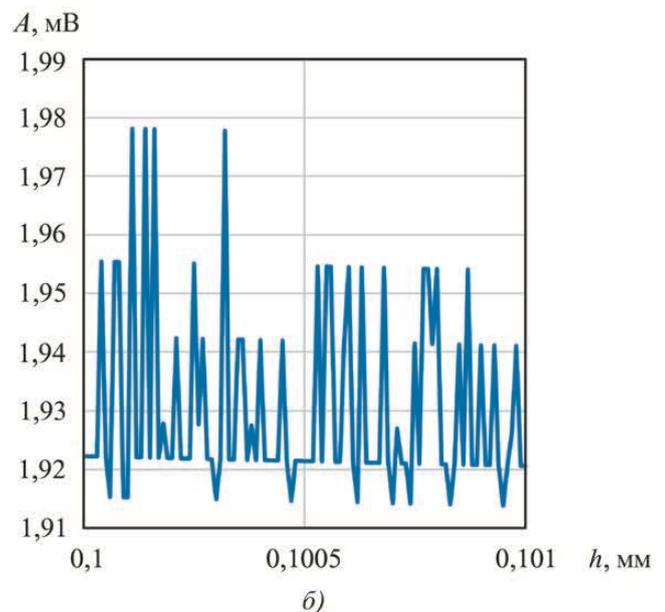
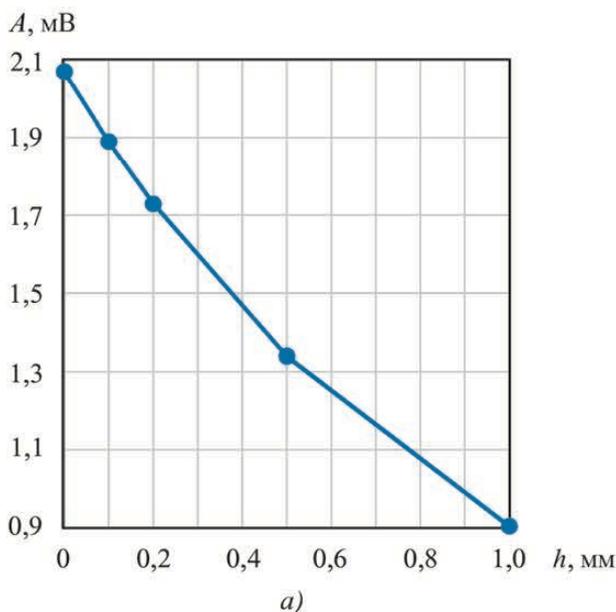


Рис. 5. Зависимость амплитуды A сигнала КЭ-модели ВТП от h в диапазоне от 0 до 1 мм (а) и от 0,1 до 0,101 мм (б)

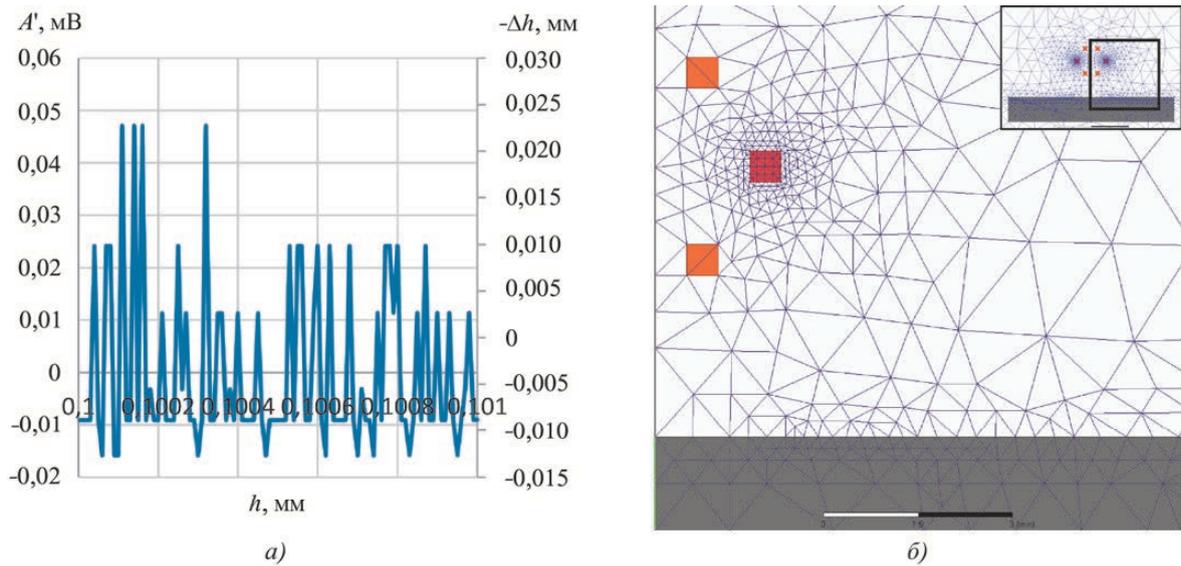


Рис. 6. Зависимость A' и $-\Delta h$ от h при базовых настройках КЭ-модели (а) и сетка конечных элементов модели (б)

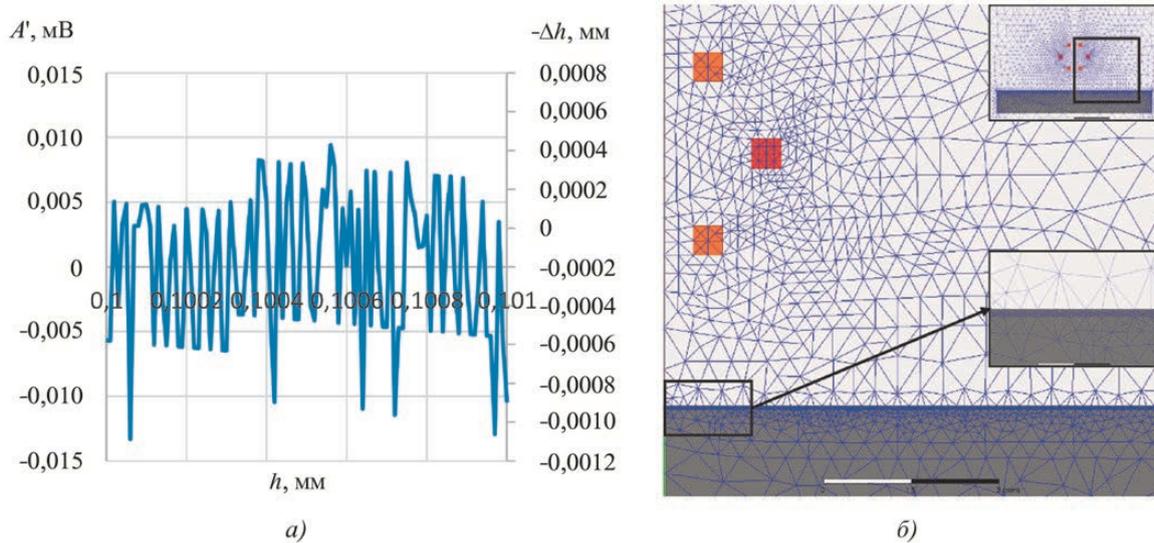


Рис. 7. Зависимость A' и $-\Delta h$ от h при добавлении дополнительных слоев сетки КЭ (а) и сетка конечных элементов модели (б)

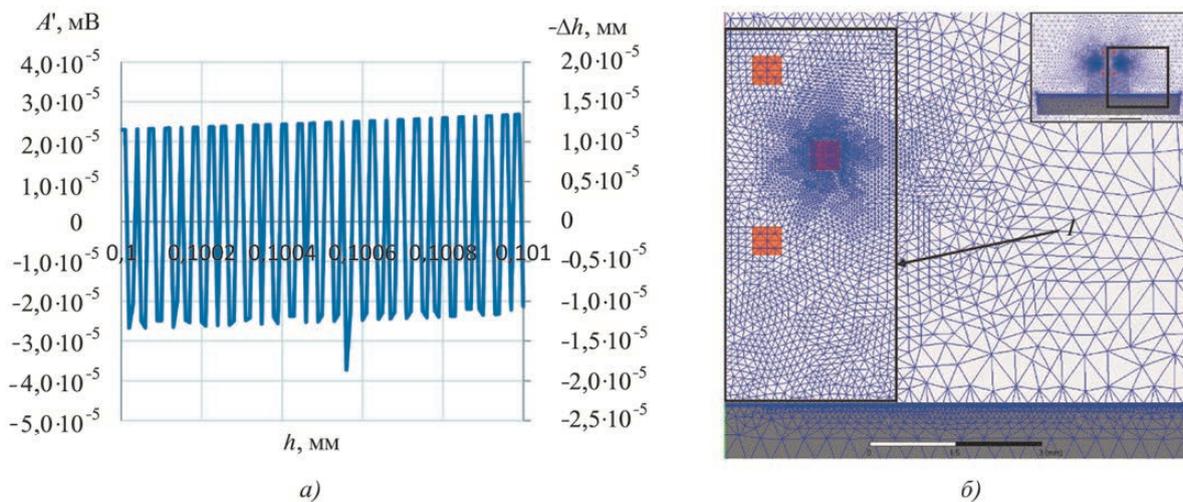


Рис. 8. Зависимость A' и $-\Delta h$ от h при утяжнении сетки в пространстве между ВТП и основанием ОК (а), включая все обмотки ВТП, и сетка конечных элементов модели (б)



Рис. 9. Зависимость вариации показаний КЭ-модели ВТП и времени вычислений от числа адаптивных вычислений

График зависимости A' от h , полученной при добавлении дополнительных слоев сетки КЭ в поверхностном слое, приведен на рис. 7, а, графическое отображение КЭ-модели с отображением сетки конечных элементов – на рис. 7, б. Из рис. 7, а видно, что вариация показаний составляет не более 1 мкм, однако наблюдаются единичные выбросы свыше 1 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ-модели.

При анализе изменений в сетке КЭ, наблюдаемых на анимационной картине, видно, что в точках, соответствующих выбросам, происходит ступенчатое изменение сетки КЭ в области между ВТП и основанием ОК, что говорит о том, что эта область также оказывает существенное влияние на точность расчета сигналов КЭ-модели ВТП. Простое задание учащенной сетки в области между ВТП и основанием ОК приведет к необоснованному учащению сетки во всем пространстве построения КЭ-модели, занятом неэлектропроводящими объектами. По этой причине целесообразно выделить соответствующий участок пространства между ВТП и основанием ОК, в который будут входить все обмотки ВТП, область 1 на рис. 8, б. Результат работы такой КЭ-модели приведен на рис. 8, а.

На графике рис. 8, а видно, что вариация показаний составляет 0,04 мкм.

Представляет интерес изучение влияния числа адаптивных вычислений на вариацию показаний КЭ-модели ВТП. На рис. 9 приведен график зависимости вариации показаний КЭ-модели ВТП и времени вычислений от числа адаптивных вычислений для трех описанных выше моделей. В качестве

времени вычислений приведено время работы ядра процессора, необходимое для вычисления одного показания КЭ-модели ВТП. Оно не учитывает процессы ускорения вычисления, выполняемых с применением современных многоядерных процессоров, и не учитывает процессы замедления вычисления, связанные с перераспределением ресурсов процессора, производимым операционной системой, под управлением которой работает ЭВМ. По этим причинам это значение отличается от астрономического времени, необходимого для проведения вычислений, но дает объективные данные о расходовании ресурсов ЭВМ.

На графике, приведенном на рис. 9, наблюдается почти пропорциональное соотношение времени вычислений и вариации показаний для каждой из КЭ-моделей. При приближении вариации к значению 0,0002 мкм пропорциональность нарушается, что говорит о том, что на точность вычислений начинают оказывать преобладающее влияние факторы, не связанные с построением сетки конечных элементов. Следует отметить характерную точку на графике вариации показаний КЭ-модели 3 ВТП, соответствующую проведению одного адаптивного вычисления, при которой наблюдается наименьшее значение вариации показаний КЭ-модели ВТП. При такой настройке КЭ-модели адаптивное построение сетки КЭ, являющееся основным источником вариации показаний КЭ-модели ВТП, не осуществляется и размер КЭ-сетки достаточно мал для получения точного вычисления. Однако при изменении геометрических параметров КЭ-модели, сопоставимых с размером конечных элементов, будут наблюдаться резкие выбросы показаний КЭ-модели ВТП.

Оптимальным для данной задачи является использование КЭ-модели 3 с 11 адаптивными вычислениями. Результат работы такой КЭ-модели приведен на рис. 10, а.

На графике, представленном на рис. 10, а, видно, что вариация показаний не превышает 0,0003 мкм, что удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ-модели ВТП для поставленной задачи. В представленном масштабе на фоне незначительной вариации показаний КЭ-модели ВТП наблюдается дугообразное искажение графика, влияние которого на анализируемый алгоритм является предметом изучения.

Для оценки погрешности измерения КЭ-модели ВТП в целях ее валидации проведено сравнение результатов КЭ-моделирования и измерений, полученных на изготовленном ВТП. Ввиду сложности изготовления большого числа мер толщины покрытия, толщина которых изменяется с малым шагом, для проведения испытаний использовалась специально изготовленная установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия (УИТП). Фотография УИТП приведена на рис. 11, назначение и подробное описание УИТП приведено в работе [3]. УИТП состоит из: высокоточного сервопривода, тензодатчика с закрепленным на нем ложементом, в который, в свою очередь, укладывается основание ОК, тисков для зажимания испытуемого ВТП и массивной несущей конструкции, где закреплены все неподвижные компоненты. Система управления расположена в отдельном блоке. УИТП, используя тензодатчик, определяет момент касания основания ОК с контактной поверхностью ВТП, закрепленного в тисках. После определения координат точки касания УИТП по заложенной программе производит ступенчатое перемещение основания ОК вверх, имитирующее изменение h . В моменты останковки

перемещения основания ОК выполняется считывание сигнала ВТП. После достижения основанием ОК зазора, соответствующего пределу измерения ВТП, выполняется замена основания ОК вручную на следующее, имеющее другое значение σ , после чего цикл повторяется.

Для сравнения результатов измерений с результатами КЭ-моделирования необходимо провести нормализацию сигналов, полученных с ВТП (Re ; Im). Эта процедура необходима, потому что на сигнал ВТП оказывает воздействие ряд технологических параметров, не учитываемых в КЭ-модели. Эти параметры приводят к возникновению искажений сигналов трех видов: масштабирование, поворот и смещение сигналов на комплексной плоскости. В табл. 1 приведены основные влияющие параметры и искажения, к которым они приводят.

Ряд схемотехнических и программных решений позволяет существенно уменьшить или учесть влияние перечисленных параметров, однако в достаточной мере устранить их влияние на практике невозможно.

Нормализация сигнала ВТП проводится в указанной последовательности:

1) масштабирование сигналов ВТП на комплексной плоскости по формуле

$$\begin{cases} Re' = k Re_{ВТП}; \\ Im' = k Im_{ВТП}, \end{cases} \quad (5)$$

где $Re_{ВТП}$ и $Im_{ВТП}$ – действительная и мнимая составляющие сигнала ВТП; k – коэффициент масштабирования, который определяется как отношение приращения сигнала КЭ-модели ВТП при установке его на меру k приращению сигнала ВТП при установке его на такую же меру, вычисляемый по формуле

$$k = \frac{\sqrt{(Re(Cu) - Re(Air))^2 + (Im(Cu) - Im(Air))^2}}{\sqrt{(Re_{ВТП}(Cu) - Re_{ВТП}(Air))^2 + (Im_{ВТП}(Cu) - Im_{ВТП}(Air))^2}}, \quad (6)$$

где $Re(Air)$, $Im(Air)$ – сигнал ВТП на воздухе, который традиционно используется для автоматической калибровки ВТП; $Re(Cu)$, $Im(Cu)$ – сигнал, полученный при установке ВТП на меру толщиной 0,1 мм на медном основании;

2) поворот сигналов ВТП на комплексной плоскости относительно начала координат по формуле

$$\begin{cases} Re'' = Re' \cos(\alpha) - Im' \sin(\alpha); \\ Im'' = Re' \sin(\alpha) + Im' \cos(\alpha), \end{cases} \quad (7)$$

где α – угол поворота, который определяется как разность между углом вектора приращения сигнала

КЭ-модели ВТП при установке его на меру и углом вектора приращения сигнала ВТП при установке его на такую же меру, вычисляемый по формуле

$$\alpha = \arctg\left(\frac{(Im(Cu) - Im(Air))}{(Re(Cu) - Re(Air))}\right) - \arctg\left(\frac{(Im_{ВТП}(Cu) - Im_{ВТП}(Air))}{(Re_{ВТП}(Cu) - Re_{ВТП}(Air))}\right), \quad (8)$$

где $Re(Air)$, $Im(Air)$, $Re(Cu)$, $Im(Cu)$ – сигнал, полученный с модели ВТП; $Re_{ВТП}(Air)$, $Im_{ВТП}(Air)$, $Re_{ВТП}(Cu)$, $Im_{ВТП}(Cu)$ – сигнал реального ВТП;

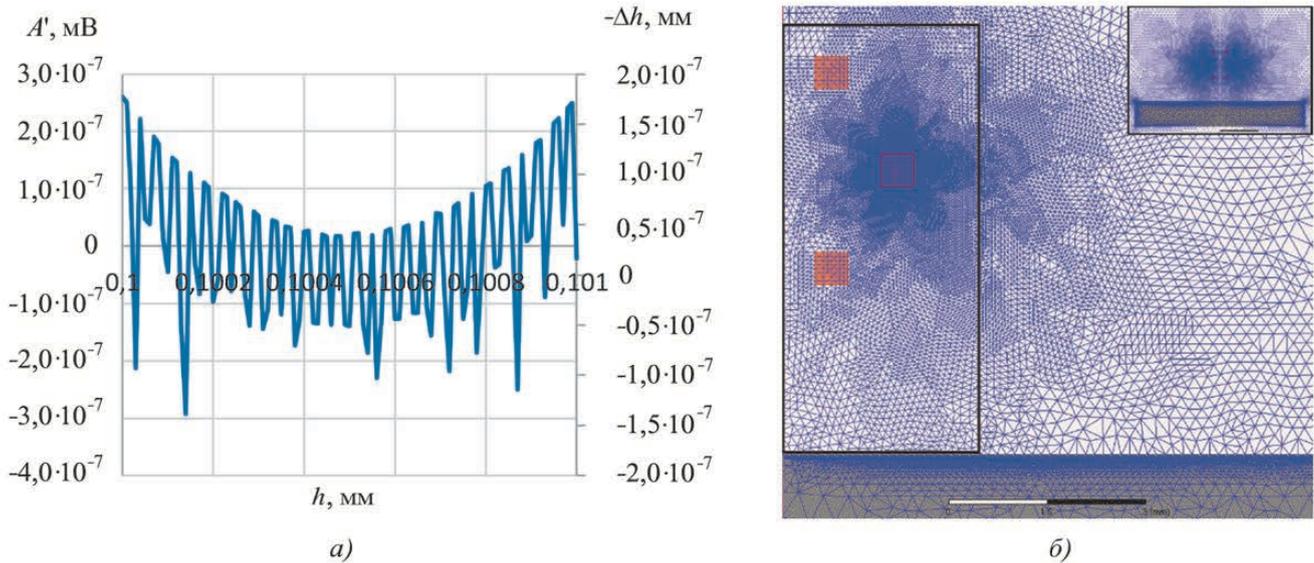


Рис. 10. Зависимость A' и $-\Delta h$ от h при уташении сетки в пространстве между ВТП (а) и основанием ОК, включая все обмотки ВТП, и сетка конечных элементов модели (б)

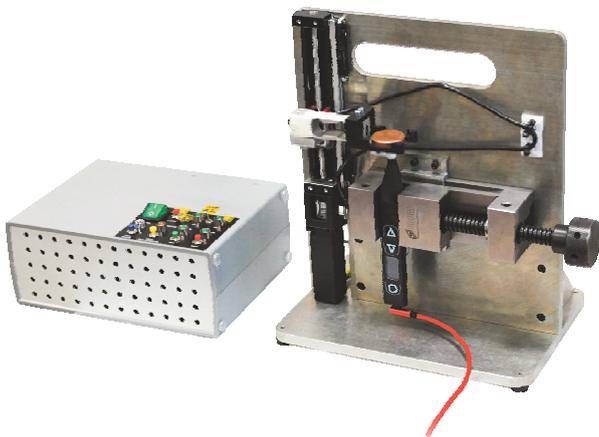


Рис. 11. Внешний вид установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия

1. Параметры, влияющие на искажение сигналов ВТП

Влияющий параметр	М	П	С
Погрешность и задержка преобразования ЦАП	+	+	-
АФЧХ сглаживающего фильтра ЦАП	+	++	-
Погрешность коэффициента усиления усилителя возбуждения	+	-	-
АФЧХ цепи ограничения полосы пропускания усилителя возбуждения	+	++	-
Допуски на диаметр каркаса обмотки возбуждения	+	+	-
Равномерность и плотность намотки провода обмотки возбуждения	-	+	+

Продолжение табл. 1

Влияющий параметр	М	П	С
Допуски на размеры каркасов измерительной и компенсационной обмоток	++	-	+
Равномерность и плотность намотки провода измерительной и компенсаторной обмоток	+	-	++
Погрешность коэффициента усиления усилителя принимаемого сигнала	+	-	-
АФЧХ цепи ограничения полосы пропускания усилителя принимаемого сигнала	+	++	-
АФЧХ антиаллиасингового фильтра АЦП	+	+	-
Погрешность и задержка преобразования АЦП	+	+	-
М – масштабирование; П – поворот; С – смещение; АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика, ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.	-	-	-

+ – влияние оказывается; ++ – оказывается сильное влияние; -- влияние не оказывается.

3) совмещение начал координат на комплексной плоскости путем смещения сигналов ВТП, вычисляемое по формуле

$$\begin{cases} \text{Re}''' = \text{Re}'' + \text{Re}_{\text{см}}; \\ \text{Im}''' = \text{Im}'' + \text{Im}_{\text{см}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\text{Re}_{\text{см}}$, $\text{Im}_{\text{см}}$ – вектор смещения, который определяется как разность координат сигналов КЭ-модели ВТП и ВТП при $h = \infty$.

Как видно из формул, для нормализации сигналов ВТП необходимо использовать как минимум две точки на комплексной плоскости, соответствующие каким-либо характерным сигналам ВТП. В качестве первой точки, очевидно, следует использовать сигнал ВТП на воздухе $Re(Air)$, $Im(Air)$. Этот сигнал традиционно используется для автоматической калибровки ВТП. В качестве второй точки выбран сигнал $Re(Cu)$, $Im(Cu)$, полученный при установке ВТП на меру толщиной 0,1 мм на медном основании с $\sigma = 58,8$ МСм/м. Этот выбор обусловлен тем, что этот сигнал имеет амплитуду, близкую к максимальной, что уменьшает вес инструментальной погрешности, и не подвержен влиянию погрешности нуля, характерной для УИТП.

Для проведения испытаний в качестве оснований ОК использованы меры удельной электрической проводимости цветных металлов СО-230 [13]. Номинальные значения мер СО-230 расположены равномерно в логарифмическом масштабе, действительные значения мер $\sigma = 0,63; 0,94; 2,12; 3,77;$

5,33; 9,82; 14,37; 16,93; 26,42; 35,02; 40,5; 50,63 и 58,8 МСм/м. Выбраны следующие значения $h = 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0$ мм. Абсолютная погрешность задания h не превышает ± 4 мкм. Нормализованные результаты измерений, проведенных с помощью УИТП, в виде годографов нормализованных сигналов ВТП, наложенных на годографы сигналов КЭ-модели ВТП, приведены на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что сигналы КЭ-модели ВТП очень близко повторяют сигналы ВТП. Для детального сравнения сигналов рассмотрим подробно локальный годограф h ($\sigma = 26,42$ МСм/м). Для этого необходимо вычислить значение нормализованной амплитуды сигнала ВТП по формуле

$$A''' = \sqrt{Re'''^2 + Im'''^2} \quad (10)$$

На рис. 13 приведены зависимости A , A''' и разницы между ними ΔA от h ; график ΔA представлен в масштабе вспомогательной шкалы ординат.

Из рис. 13 видно, что величина ΔA не превышает ± 7 мкВ во всем диапазоне h . Это примерно

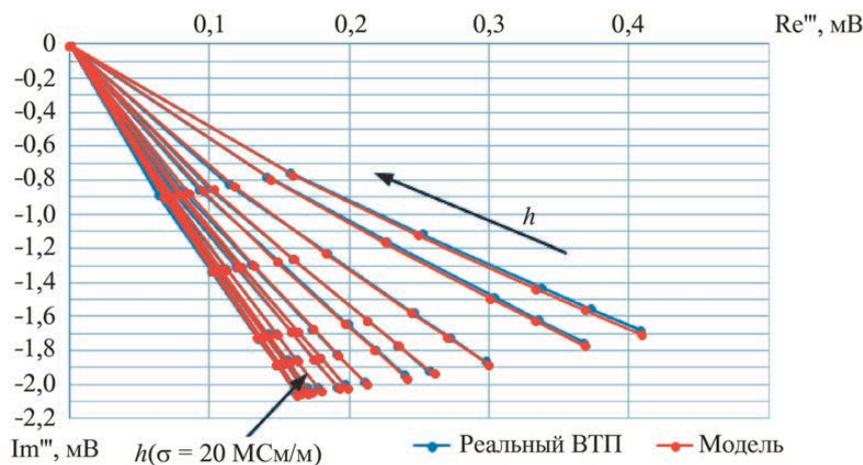


Рис. 12. Локальные годографы нормализованных сигналов ВТП и КЭ-модели ВТП

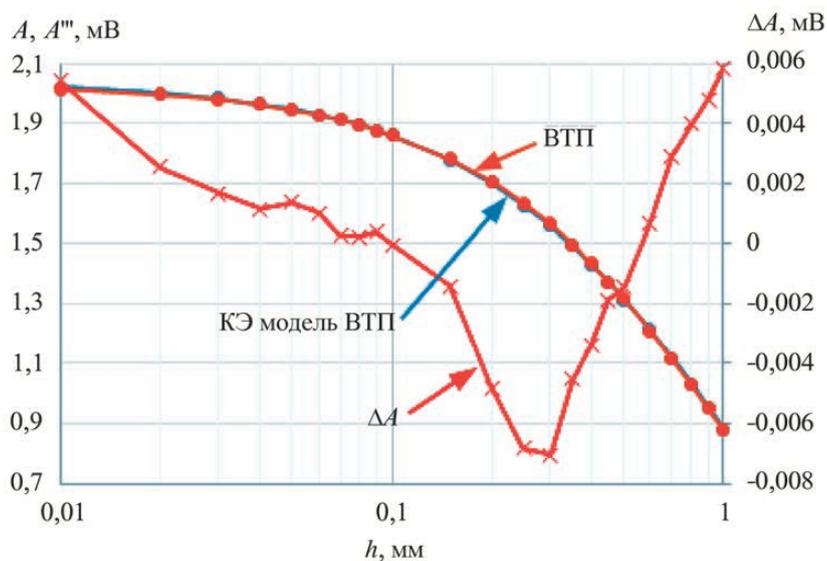


Рис. 13. Зависимости A , A''' и ΔA от h

соответствует отклонению при измерении амплитуды сигнала ВТП на $\pm 0,5\%$ или отклонению при измерении h в окрестности $h = 0,1$ мм, не превышающему ± 4 мкм. Аналогичные результаты наблюдаются при детальном анализе остальных локальных годографов. Учитывая параметры точности УИТП (повторяемость ± 3 мкм и дифференциальная нелинейность ± 4 мкм), подтвержденные при испытании УИТП с применением средств измерения более высокого класса точности, можно сделать предположение о том, что поставленная задача построения высокоточной КЭ-модели ВТП достигнута, прецизионность и погрешность результатов расчета сигналов КЭ-модели ВТП обеспечивают погрешность измерения не более $\pm(0,001h + 0,1)$ мкм.

Выводы

Предложен принцип количественной оценки метрологических характеристик конечно-элементных моделей вихретоковых преобразователей, позволяющий сопоставлять их с метрологическими характеристиками проектируемых вихретоковых средств измерения, в составе которых будут применяться моделируемые вихретоковые преобразователи.

Сформулированы численные критерии оценки качества конечно-элементных моделей вихретоковых преобразователей и принципы их установления, обеспечивающие возможность проведения оценки качества конечно-элементных моделей.

Разработаны способ и методика построения сетки конечных элементов, учитывающие особенности структуры высокочастотного вихретокового преобразователя, объекта и задачи контроля, позволяющие достичь требуемых метрологических характеристик, что дает возможность провести оценку погрешности метода, реализуемого с использованием рассматриваемого алгоритма измерения толщины покрытия.

Разработаны модель «вихретоковый преобразователь – объект контроля», удовлетворяющая заданным метрологическим характеристикам, способ и оборудование ее верификации, подтвердившие сходимость результатов моделирования и результатов испытаний интеллектуального вихретокового преобразователя, являющегося средством измерения.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 2360–2021. Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод. М.: Стандартинформ, 2021. 35 с.
2. Сясько В. А., Голубев С. С., Потапов А. И., Смирнова Н. И. Методы и средства электромагнитной толщинометрии покрытий металлических изделий //

Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 10 – 17. DOI: 10.14489/td.2017.12.pp.010-017. EDN YNIIKU

3. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N. A Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals // Appl. Sci. 2023. V. 13, No. 8. P. 5144. DOI: 10.3390/app13085144

4. ГОСТ Р 8.637–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.

5. Сясько В. А. NDE 4.0. Итог десятилетия // Территория NDT. 2022. № 4. С. 30 – 42.

6. Syasko V., Solomenchuk P. Review of the Current Development Status of Intelligent Electromagnetic Sensors (ies) for Automatically Measuring the Thickness of all Types of Coatings in Production. Analyses of Construction Principles, Standardization and Metrological Support // 17-th International Symposium on Nondestructive Characterization of Material. Zurich, 14 – 17 aug. 2023. Zurich, 2023.

7. Сясько В. А. Измерение толщины неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового частотного метода // Дефектоскопия. 2010. № 12. С. 39 – 48. EDN NQVXWJ.

8. ГОСТ Р 55611–2013. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

9. ГОСТ Р ИСО 12718–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 119 с.

10. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User's Guide. USA, Pittsburg PA: Ansoft corporation, 2006. 675 p.

11. РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. 83 с.

12. Сясько В. А., Голубев С. С., Смородинский Я. Г. и др. Измерение магнитной проницаемости монолитных кольцевых мер в переменном магнитном поле // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 45 – 51. DOI: 10.1134/S0130308219110058. EDN ATMOXR

13. Меры удельной электрической проводимости СО-230: Описание типа средства измерения. № по Госреестру 63172-16.

References

1. Non-electrically conductive coatings on non-magnetic electrically conductive metal substrates. Measuring coating thickness. Amplitude eddy current method. (2021). National standard No. GOST R ISO 2360–2021. Moscow: Standartinform. [in Russian language]
2. Syasko V. A., Golubev S. S., Potapov A. I., Smirnova N. I. (2017). Methods and means of electromagnetic thickness gauging of coatings on metallic products. *Kontrol'. Diagnostika*, (12), 10 – 17. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2017.12.pp.010-017. EDN YNIIKU

3. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N. (2023). A Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals. *Applied Sciences*, 13(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/app13085144>
4. State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions. (2010). *Ru Standard No. GOST R 8.637–2009*. Moscow: Standartinform. [in Russian language]
5. Syasko V. A. (2022). NDE 4.0. Summary of the decade. *Territoriya NDT*, (4), 30 – 42. [in Russian language]
6. Syasko V., Solomenchuk P. (2023). *Review of the Current Development Status of Intelligent Electromagnetic Sensors (ies) for Automatically Measuring the Thickness of all Types of Coatings in Production. Analyses of Construction Principles, Standardization and Metrological Support*. 17-th International Symposium on Nondestructive Characterization of Material. Zurich.
7. Syasko V. A. (2010). Measuring the thickness of non-ferromagnetic metal coatings on non-ferrous metal products using the eddy current frequency method. *Defektoskopiya*, (12), 39 – 48. [in Russian language] EDN NQVXWJ.
8. Non-destructive eddy current testing. Terms and Definitions. (2019). *Ru Standard No. GOST R 55611–2013*. Moscow: Standartinform. [in Russian language]
9. Non-destructive testing. Eddy current testing. Terms and Definitions. (2019). *National standard No. GOST R ISO 12718–2009*. Moscow: Standartinform. [in Russian language]
10. Ansoft Maxwell (2006). *3D Field Simulator v11 User's Guide*. Pittsburg PA: Ansoft corporation.
11. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. (2014). *Interstate standardization No. RMG 29–2013*. Moscow: Standartinform. [in Russian language]
12. Syasko V. A., Golubev S. S., Smorodinskiy Ya. G. et al. (2019). Measuring the magnetic permeability of monolithic ring gauges in an alternating magnetic field. *Defektoskopiya*, (11), 45 – 51. [in Russian language] DOI: 10.1134/S0130308219110058. EDN ATMOXR
13. *Measures of electrical conductivity SO-230: Description of the type of measuring instrument*. State Register No. 63172-16. [in Russian language]

Для цитирования статьи:

Сясько М. В., Соловьев И. П., Соломенчук П. В. Повышение точности конечно-элементного моделирования высокочастотного вихретокового преобразователя // *Контроль. Диагностика*. 2024. Т. 27, № 6. С. 4 – 17. DOI: 10.14489/td.2024.06.pp.004-017

Syasko M. V., Soloviev I. P., Solomenchuk P. V. (2024). Improving the Accuracy of Finite Element Modeling of a High-Frequency Eddy Current Probe. *Kontrol'. Diagnostika*, 27(6), 4 – 17. [in Russian language]. DOI: 10.14489/td.2024.06.pp.004-017