УДК 620.1.08

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ

Сясько М.В.[1] *(аспирант),* ***Соломенчук П.В.***[2]
Научный руководитель – к.ф-м.н., доцент Соловьев И.П.[1]

1 – Санкт-Петербургский государственный университет
2 – ООО «КОНСТАНТА»

e-mail: m.syasko@gmail.com

В работе рассматриваются вопросы конечно-элементного моделирования вихретокового преобразователя, предназначенного для измерения толщины диэлектрического покрытия на электропроводящем немагнитном основании. Описана процедура валидации конечно-элементной модели, включающая в себя получение сигналов изготовленного вихретокового преобразователя с помощью установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия с последующей нормализацией по описанному алгоритму.

Ключевые слова
Вихретоковый, толщиномер, конечно-элементная модель, точность, нормализация сигналов.

Для измерения толщины диэлектрических (например, лакокрасочных) покрытий на металлических немагнитных основаниях применяются вихретоковые толщиномеры покрытий, реализующие амплитудный метод измерений [1], которые во многом не удовлетворяет современным требованиям к погрешности измерений.

В частности, существенное влияние оказывает отличие удельной электрической проводимости основания объекта контроля от удельной электрической проводимости основания, на котором производилась калибровка толщиномера. Эта проблема актуальна в тех случаях, когда нет возможности провести калибровку толщиномера перед проведением измерений на непокрытом участке объекта контроля, например:

- при измерении толщины покрытия на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки;
- в случае, если значение удельной электрической проводимости основания имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия;
- когда изделие имеет разную температуру по поверхности, в этом случае также будет наблюдаться девиация удельной электрической проводимости основания.

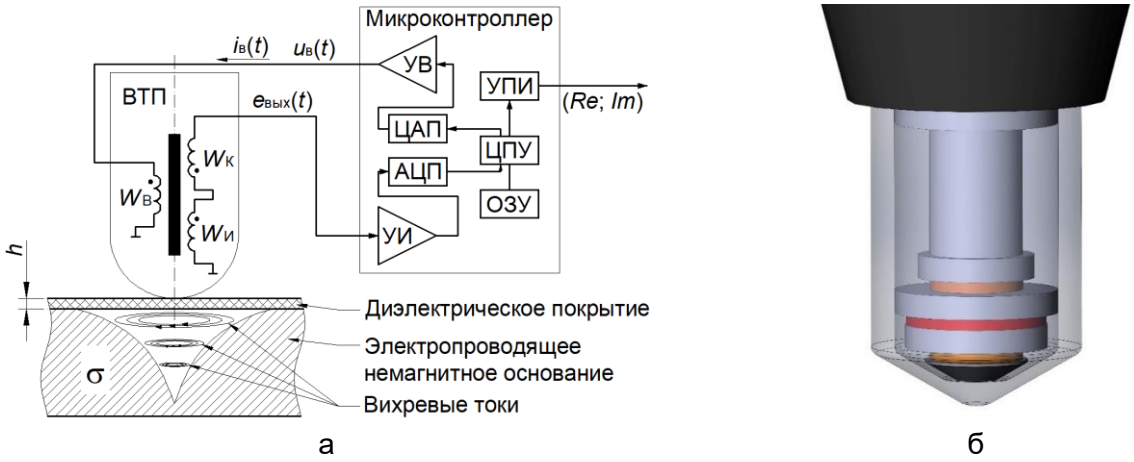
Для решения этой задачи представляет интерес использование вихретокового преобразователя и методики обработки его сигналов, основанной на анализе действительной и мнимой составляющих сигнала ВТП на комплексной плоскости с применением алгоритма двухмерной градуировки [2].

Структурная схема трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного вихретокового преобразователя представлена на рисунке 1, а. Он содержит:

- обмотку возбуждения *Wв*;
- встречно включенные измерительную *Wu* и компенсационную *Wк* обмотки, для которых выходная ЭДС равна 0 при $h = \infty$;
- микроконтроллер, который содержит:

– ЦАП и усилитель возбуждения УВ, формирующие напряжение возбуждения;
– усилитель ЭДС обмоток ВТП и АЦП;
– вспомогательные цифровые модули.

На рисунке 1, б приведена трехмерная геометрическая модель ВТП.



а б

Рис. 1. Трехобмоточный трансформаторный скомпенсированный вихретоковый преобразователь: а) – структурная схема, б) – трехмерная геометрическая модель

Выходным сигналом ВТП является действительная и мнимая составляющие сигнала ВТП в цифровом виде, передаваемые по последовательному цифровому интерфейсу.

Традиционно, при расчете параметров ВТП, применяется конечно-элементное моделирование. В процессе отладки алгоритмов обработки сигналов ВТП, в частности для оценки погрешности метода измерения толщины покрытия, 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 работа.

Как правило, процедура построения КЭ модели включает в себя этапы, приведенные на рисунке 2 [3].

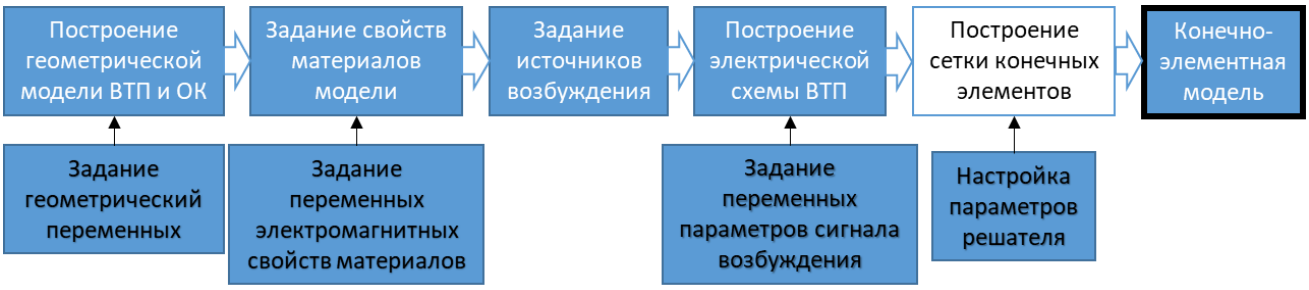


Рис. 2. Процедура построение конечно-элементной модели

Программа КЭ моделирования производит построение сетки конечных элементов, при этом производится настройка параметров решателя. Получается конечно-элементная модель, которая может быть применена в повседневных задачах расчета и оптимизации ВТП. Для создания высокоточной КЭ модели обычная процедура построения КЭ модели дополняется операциями, приведенными на рисунке 3.

Полученная «Оптимальная КЭ модель» может быть использована для решения поставлены задач.

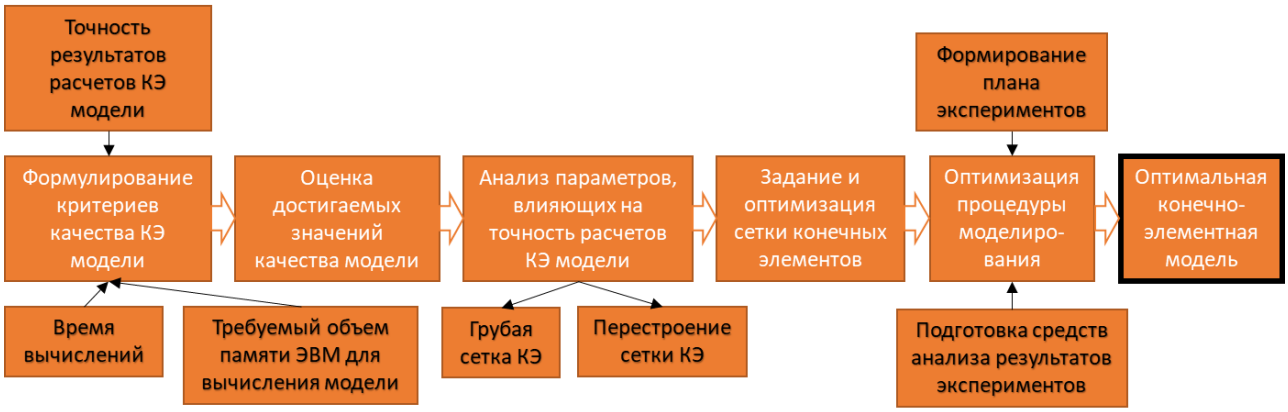


Рис. 3. Дополнение процедуры построения высокоточной конечно-элементной модели

Не рассматривая вопросы производительности ЭВМ, следует выделить три основных критерия точности расчетов КЭ модели:

1) погрешность расчета сигналов КЭ модели ВТП:
   a) основную погрешность измерения толщины покрытия;
   b) дополнительную погрешность, обусловленную отклонением влияющих параметров, в частности удельной электрической проводимости основания объекта контроля;
2) погрешность расчета параметров КЭ модели ВТП:
   a) активное сопротивление и индуктивность обмоток ВТП;
   b) сила тока возбуждения;
   c) амплитуда сигнала КЭ модели ВТП при установке ВТП на основание ОК и в воздухе;
   d) прочие интересующие технологические параметры;
3) прецизионность расчета сигналов КЭ модели ВТП.

В межгосударственных рекомендациях [4] приведены следующие определения:

1. Погрешность результатов измерения – это разность между измеренным значением величины и опорным значением величины (опорное значение величины – это значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода).
2. Прецизионность измерений – это близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при повторных измерениях для одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях.
3. При конечно-элементном моделировании принятые термины следует сформулировать следующим образом:
4. Погрешность расчета сигналов КЭ модели ВТП – это разность между рассчитанным значением толщины покрытия, полученным с помощью КЭ модели ВТП и опорным значением, в качестве которого используются результаты измерения толщины покрытия таким же реальным ВТП в тех же условиях. В данной работе она оценивается при верификации модели с применением реального ВТП, мер и установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

Ввиду того, что термин «прецизионность измерений» при конечно-элементном моделировании теряет смысл, его следует выразить, используя термин: Вариация расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера – это разность показаний КЭ модели ВТП толщиномера в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины. Определение вариации расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера и алгоритма вычисления толщины покрытия производится в процессе моделирования по методике, описанной далее.

На рисунке 4, а приведено графическое представление двухмерной осесимметричной КЭ модели ВТП.

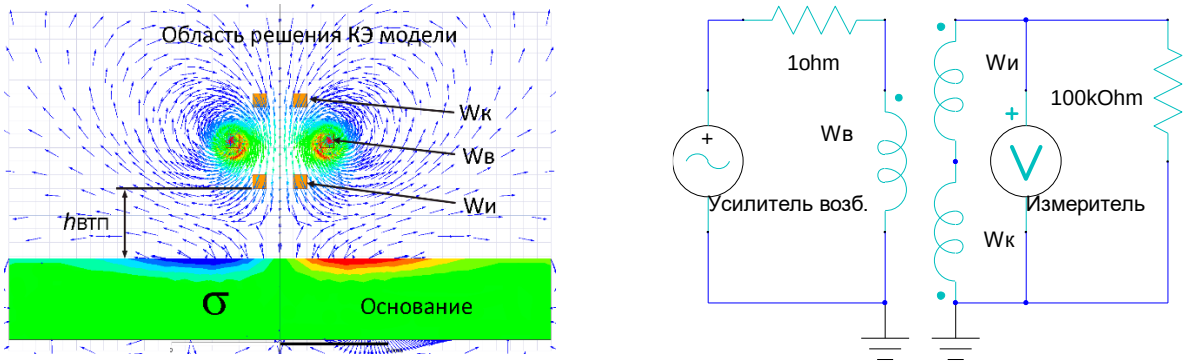


Рис. 4. Конечно-элементная модель: а) – графическое представление, б) – электрическая схема

КЭ модель состоит из обмоток ВТП: возбуждения *Wв*, измерительной *Wи* и компенсационной *Wк*, основания объекта контроля, области решения КЭ модели.

Цветовым полем в основании объекта контроля показано распределение плотности вихревых токов. Цветными стрелками обозначены векторы индукции результирующего магнитного поля, являющегося суперпозицией магнитного поля обмотки возбуждения и вихревых токов.

В качестве материала обмоток ВТП используется медь без учета влияния вихревых токов в плоскости КЭ модели. Материал с такими параметрами качественно отражает электромагнитные свойства многовитковой катушки, намотанной медным проводом с лаковой изоляцией.

Материал основания объекта контроля немагнитный, значение удельной электрической проводимости задано переменной.

Ввиду того, что в КЭ модели рассматривается задача измерения толщины диэлектрического покрытия, с которым магнитное поле не взаимодействует, покрытие задается зазором между ВТП и основанием объекта контроля. Это расстояние, $h_{ВТП}$, является суммой толщины покрытия h и технологического зазора ВТП (то есть толщины защитной щечки). При увеличении толщины покрытия основание ОК отодвигается вниз на соответствующее расстояние.

Область решения КЭ модели представлена моделью вакуума. Единственным источником возбуждения является обмотка возбуждения *Wв*. Электрическая схема КЭ модели ВТП представлена на рисунке 4, б. Генератором сигнала возбуждения является источник напряжения. Измерительная и компенсационная обмотки включены последовательно встречно, тем самым компенсируя начальную ЭДС обмоток, наблюдаемую при отнесении ВТП от объекта контроля.

В процессе КЭ моделирования программой создается начальная, весьма грубая, сетка КЭ. После вычисления уравнений, во всех узлах сетки КЭ определяются участки с наибольшим градиентом магнитного поля. В этих участках сетка учащается, после чего производится 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 (рис. 5).

Выходным сигналом КЭ модели ВТП являются действительная и мнимая составляющие вносимой ЭДС измерительной обмотки. На рисунке 6, а показаны сигналы КЭ модели ВТП на комплексной плоскости, показаны локальные годографы удельной электрической проводимости основания ОК (σ) и толщины диэлектрического покрытия (h).

Для анализа качества КЭ модели следует использовать информативные параметры, соответствующие используемому алгоритму обработки сигналов ВТП. Для анализируемого алгоритма в виде допущения удобно, в качестве информативного параметра использовать амплитуду A сигнала КЭ модели ВТП.

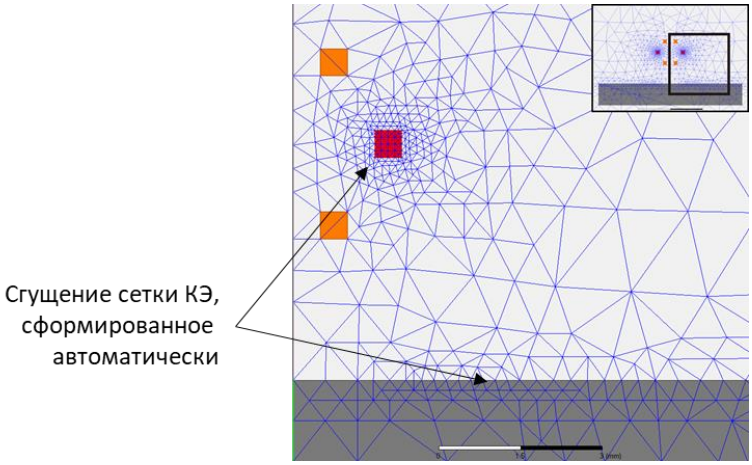
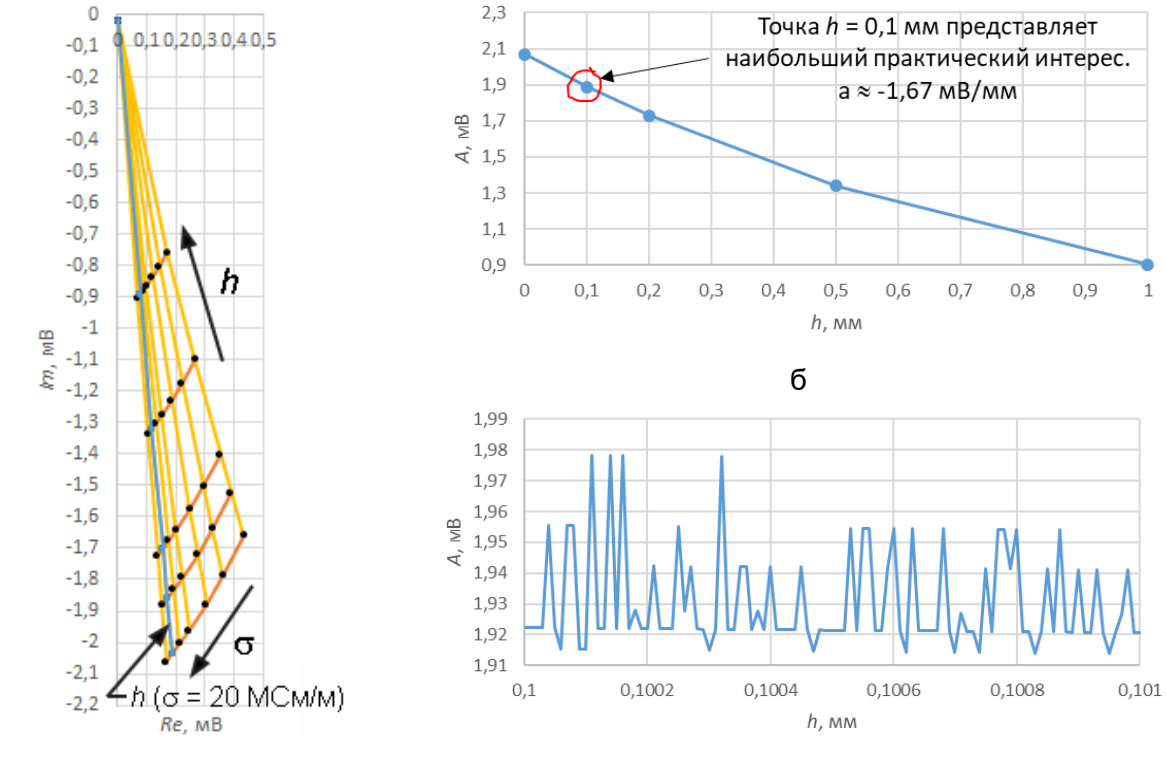


Рис. 5. Сетка конечных элементов



а б в

Рис. 6. Сигналы конечно-элементной модели вихретокового преобразователя: *а*) – локальные годографы *h* и σ на комплексной плоскости, *б*) – зависимость амплитуды сигнала от *h* в диапазоне от 0 до 1 мм, *в*) – зависимость амплитуды сигнала от *h* в диапазоне от 0,1 до 0,101 мм

Рассмотрим локальный годограф h ($\sigma = 20$ МСм/м), показанный на комплексной плоскости голубым цветом. На рисунке 6, (*б*) приведена зависимость амплитуды сигнала КЭ модели ВТП от h в диапазоне от 0 до 1 мм. Точка $h = 0{,}1$ мм представляет наибольший практический интерес. Рассмотрим в более крупном масштабе участок этой линии в окрестности значения $h = 0{,}1$ мм, рисунок 6, (*в*). В таком масштабе становятся видны выбросы, характеризующие прецизионность модели. Для измерения значения этих выбросов целесообразно нормировать график по формуле (1).

$$A' = A - a \cdot h - b, \tag{1}$$

где A' – нормированная амплитуда сигнала КЭ модели ВТП, a и b – коэффициенты нормирования, вычисляемые по формулам (2) и (3):

$$a = \frac{A_к - A_н}{h_к - h_н}, \quad (2)$$

$$b = A_н - a \cdot h_н. \quad (3)$$

На рисунке 7 приведен график *A*’ – амплитуды сигнала КЭ модели ВТП, нормированной для анализа прецизионности расчета сигналов КЭ модели ВТП в окрестности короткого фрагмента характеристики ВТП. Зная средний наклон характеристики ВТП, можно вычислить зависимость отклонения результата измерения толщины покрытия Δh от h в окрестности точки h = 0,1 мм по формуле (4):

$$\Delta h = \frac{A'}{a}. \quad (4)$$

График зависимости Δh от h по форме полностью повторяет график зависимости *A*’ от h, он отображен на том же графике с помощью дополнительной оси ординат, но имеет инвертированное обозначение шкалы ввиду того, что чувствительность имеет отрицательное значение. Этот график является графиком вариации расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера и удобен для оценки прецизионности расчета сигналов КЭ модели ВТП в рамках решаемой задачи.

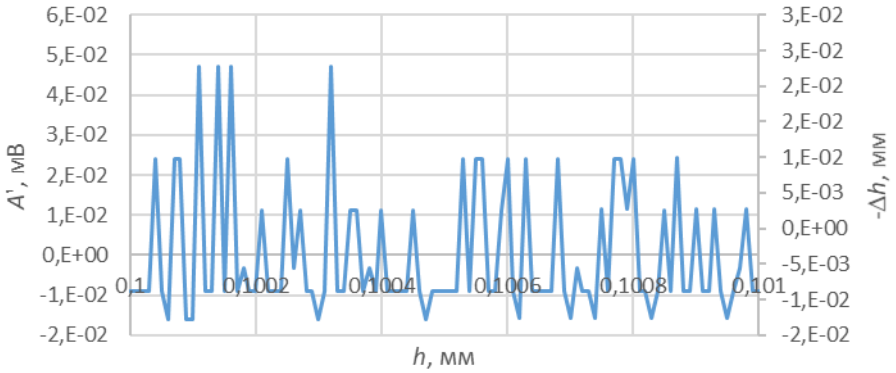


Рис. 7. Зависимость *A*’ и -Δh от h

Из рисунка 7 видно, что вариация показаний имеет значение 40 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели.

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 рисунке 7. Рекомендуемым способом устранения этого недостатка КЭ модели является ручное задание правил построения сетки конечных элементов в критическом месте. Для этого оптимальным является построение четырех-пяти дополнительных слоев сетки конечных элементов в поверхностном слое, толщина которого соответствует глубине проникновения вихревых токов, δ, вычисляемой по формуле (5).

$$\delta = 1 \Big/ \sqrt{2\pi f \sigma \mu_0}, \quad (5)$$

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

На рисунке 8, а приведено изображение сетки конечных элементов с добавлением дополнительных слоев. Из графика на рисунке 8, б видно, что вариация показаний составляет не более 1 мкм, однако, наблюдаются единичные выбросы свыше 1 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели.

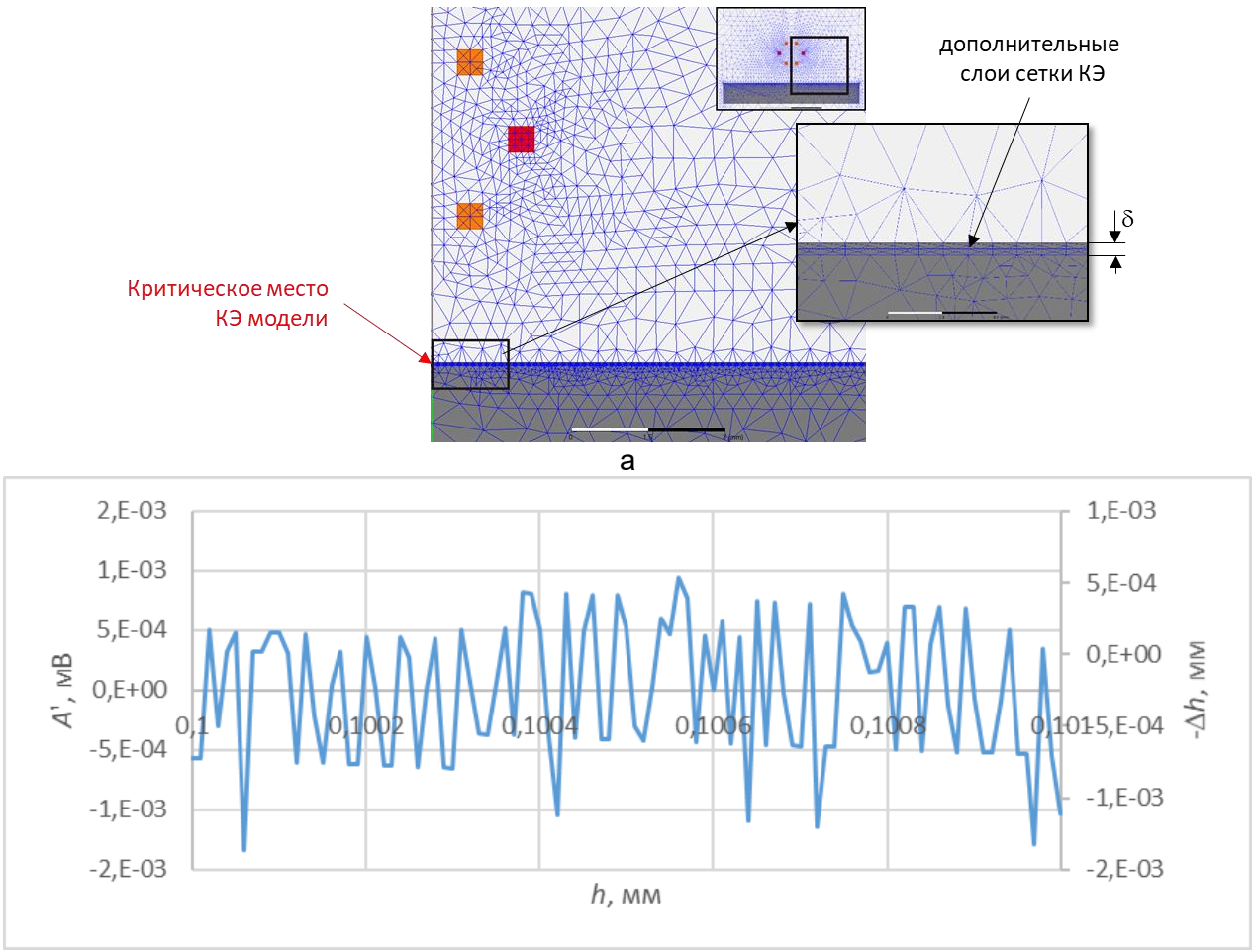


Рис. 8. Добавление дополнительных слоев сетки конечных элементов: а) сетка конечных элементов, б) зависимость A’ и -Δh от h

При анализе изменений в сетке конечных элементов, 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 прецизионность 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.

На рисунке 9, а показана область КЭ модели с заданным вручную учащением сетки конечных элементов, она так же является критическим местом КЭ модели. Видно учащение сетки в этой области, заданное вручную, на краю модели видна неучащенная сетка, а возле границы критического места наблюдается переходная зона с постепенным учащением сетки конечных элементов, сформированным автоматически.

Из графика на рисунке 9, б видно, что вариация расчета показаний представленной КЭ модели ВТП толщиномера не превышает ± 0,07 мкм, что удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели ВТП для поставленной задачи.

Для оценки погрешности измерения КЭ модели ВТП, с целью её 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, изображенная на рисунке 10.

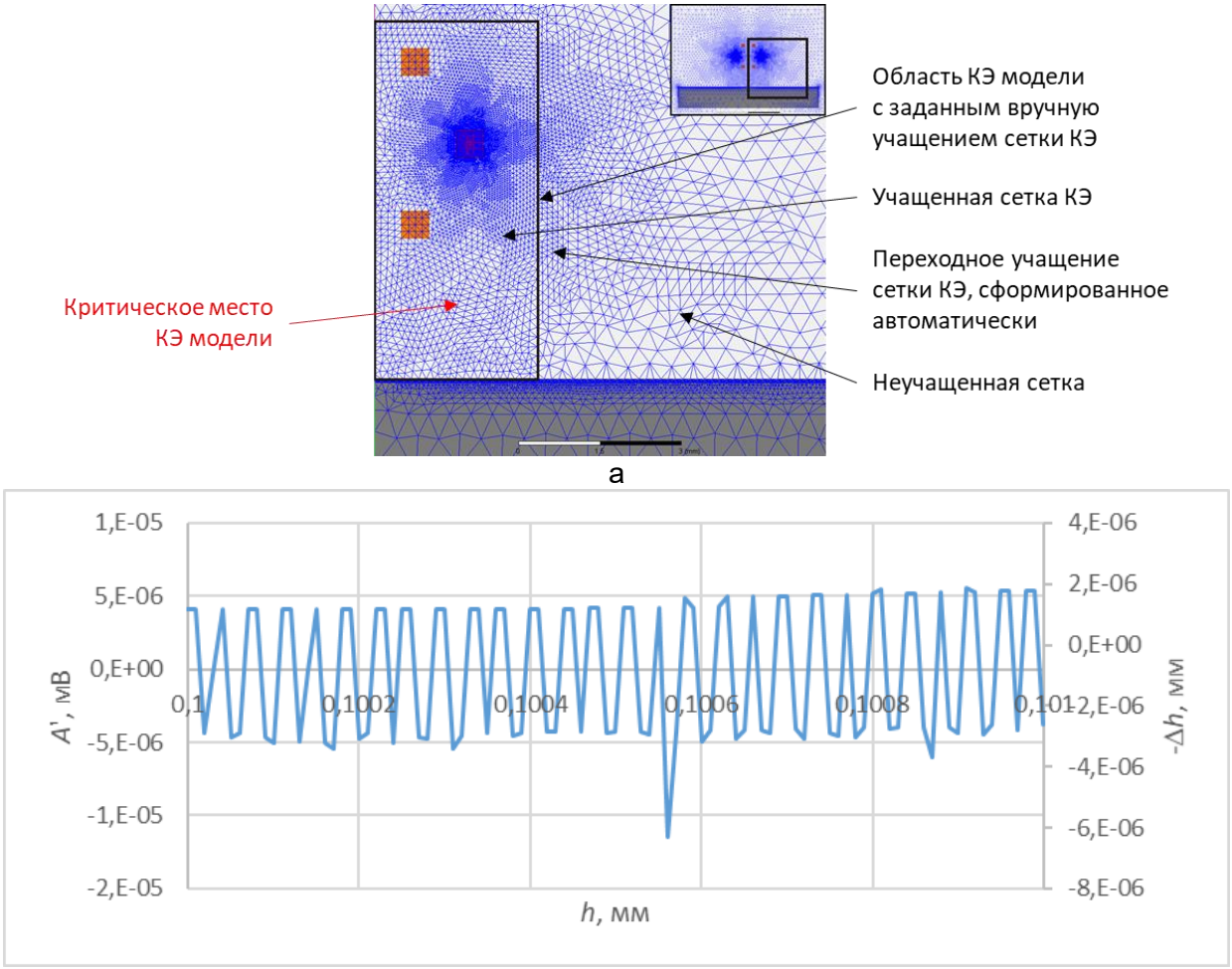


Рис. 9. Учащение сетки в пространстве между ВТП и основанием ОК: а) сетка конечных элементов, б) зависимость A’ и -Δh от h

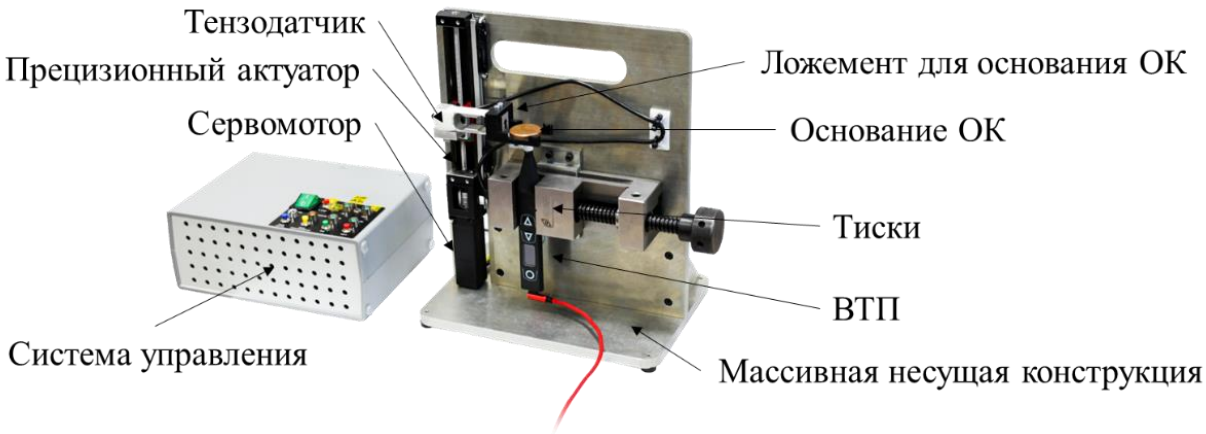


Рис. 10. Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия

Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия состоит из прецизионного актуатора, построенного на ШВП малого шага, с приводом от сервомотора. На подвижной каретке закреплен тензодатчик с ложементом, в который укладывается основание ОК. С помощью тисков закрепляется испытуемый ВТП. Все компоненты конструкции закреплены на массивной несущей конструкции. Система управления расположена в отдельном корпусе.

Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия работает по следующему алгоритму:

- производится перемещение основания ОК вниз до момента касания контактной поверхности ВТП;
- производится определение момента касания с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком;
- вычисляются координат точки касания с использованием макроса движения;
- основание ОК подводится в точку, соответствующую значению $h = 0$;
- производится ступенчатое перемещение основания ОК вверх по заданной управляющей программе;
- считывание сигнала ВТП производится во время остановки по сигналу достижения заданной позиции, сформированного серводрайвером;
- при достижении основанием ОК зазора, соответствующего пределу измерения ВТП производится замена основания ОК вручную на следующее, имеющее другое значение σ;
- производится повторение цикла для каждого основания ОК.

Для проведения испытаний в качестве оснований ОК использованы меры удельной электрической проводимости цветных металлов СО-230 [5]. Выбраны следующие значения h: 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1 мм. Абсолютная погрешность выставления h не превышает ± 4 мкм.

Непосредственное сравнение результатов измерений с результатами расчёта КЭ модели ВТП невозможно, необходимо провести нормализацию сигналов, полученных с ВТП. Эта процедура необходима из-за того, что на сигнал ВТП оказывают 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.

Для нормализации сигналов ВТП необходимо использовать, как минимум, две точки на комплексной плоскости, соответствующие каким-либо характерным сигналам ВТП. В качестве первой точки следует использовать сигнал ВТП на воздухе ($h = \infty$). Этот сигнал традиционно используется для автоматической калибровки ВТП. В качестве второй точки выбран сигнал, 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 выставления нуля, характерной для установки-имитатора толщины покрытия. Операции нормализации сигналов ВТП сводятся к совмещению упомянутых характерных точек.

Алгоритм нормализация включает в себя три этапа:

Этап 1 – масштабирование сигналов ВТП на комплексной плоскости по формуле (6):

$$\begin{cases} Re' = k \cdot Re_{\text{втп}} \\ Im' = k \cdot Im_{\text{втп}} \end{cases}, \tag{6}$$

где k – коэффициент масштабирования, вычисляемый по формуле (7):

$$k = \frac{\sqrt{(Re(Cu)-Re(Air))^2+(Im(Cu)-Im(Air))^2}}{\sqrt{(Re_{\text{втп}}(Cu)-Re_{\text{втп}}(Air))^2+(Im_{\text{втп}}(Cu)-Im_{\text{втп}}(Air))^2}}. \tag{7}$$

Этап 2 – поворот сигналов ВТП на комплексной плоскости относительно начала координат по формуле (8):

$$\begin{cases} Re'' = Re' \cdot cos(\alpha) - Im' \cdot sin(\alpha) \\ Im'' = Re' \cdot sin(\alpha) + Im' \cdot cos(\alpha) \end{cases}, \tag{8}$$

где α – угол поворота, вычисляемый по формуле (9):

$$\alpha = atan\left(\frac{(Im_m(Cu)-Im_m(Air))}{(Re_m(Cu)-Re_m(Air))}\right) - atan\left(\frac{(Im(Cu)-Im(Air))}{(Re(Cu)-Re(Air))}\right). \tag{9}$$

Этап 3 – совмещение начал координат на комплексной плоскости путем смещения сигналов ВТП по формуле (10):

$$\begin{cases} Re''' = Re'' + Re_{\text{см}} \\ Im''' = Im'' + Im_{\text{см}} \end{cases}, \tag{10}$$

где ($Re_{\text{СМ}}$; $Im_{\text{СМ}}$) – вектор смещения, вычисляемый по формуле (11):

$$\begin{cases} Re_{\text{см}} = Re(Air) - Re''(Air) \\ Im_{\text{см}} = Im(Air) - Im''(Air) \end{cases}. \tag{11}$$

На рисунке 11 показан результат преобразований на разных этапах нормализации.

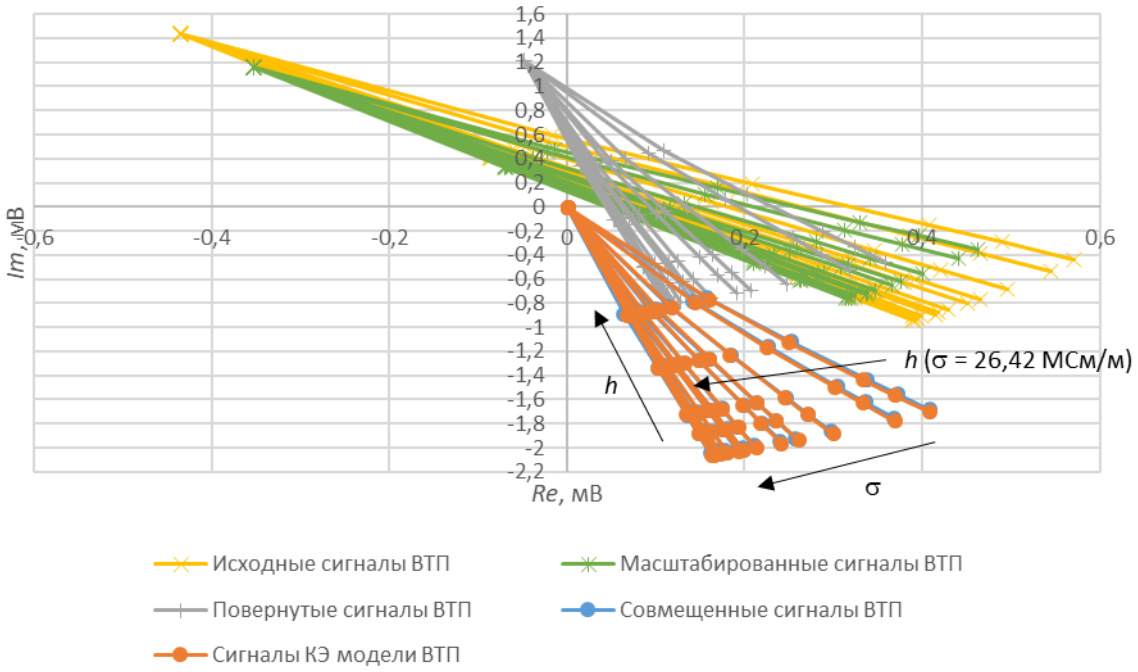


Рис. 11. Нормализация сигнала ВТП

Для детального сравнения сигналов рассмотрим подробно локальный годограф h (σ = 26,42 МСм/м). Для этого необходимо вычислить значение нормализованной амплитуды сигнала ВТП по формуле (12):

$$A''' = \sqrt{Re'''^2 + Im'''^2}. \tag{12}$$

На рисунке 12 приведены зависимости амплитуды сигнала КЭ модели ВТП (A), нормализованной амплитуды сигнала ВТП (A'') и разницы между ними (ΔA) от h; график ΔA приведен в масштабе вспомогательной шкалы ординат.

Из рисунка 12 видно, что величина ΔA не превышает ± 7 мкВ во всем диапазоне h, что примерно соответствует отклонению при измерении амплитуды сигнала ВТП на ± 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 установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия (повторяемость ± 3 мкм и дифференциальная нелинейность ± 4 мкм), подтвержденные при её испытании 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 метода измерения не более ± (0,001 h + 0,1) мкм.

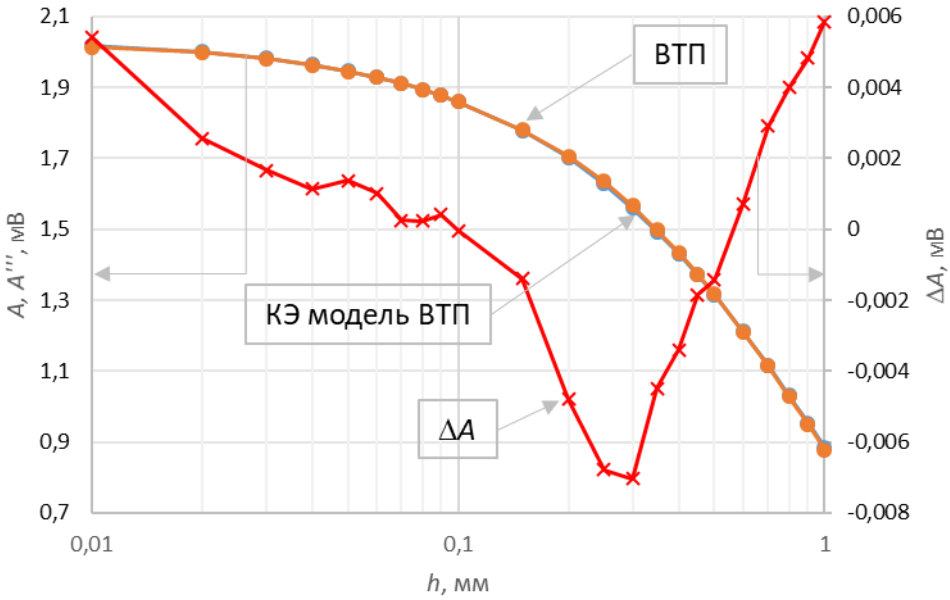


Рис. 12. Зависимости A, A''' и ΔA от h

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;
- разработан способ и методика построения сетки конечных элементов, учитывающие особенности структуры высокочастотного вихретокового преобразователя, объекта и задачи контроля, позволяющий достичь требуемых метрологических характеристик, что позволяет провести оценку погрешности метода, реализуемого с использованием рассматриваемого алгоритма измерения толщины покрытия;
- разработана модель «вихретоковый преобразователь – объект контроля», удовлетворяющая заданным метрологическим характеристикам, разработан способ и оборудование её верификации, подтвердившие сходимость результатов моделирования и результатов испытаний интеллектуального вихретокового преобразователя, являющегося средством измерения.

Список использованных источников:

1. ГОСТ Р ИСО 2360-2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
2. 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, 13, 5144. https://doi.org/10.3390/app13085144.
3. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User’s Guide.— USA Pittsburg PA: Suite 200, Ansoft corporation, 2006. – 675 с.
4. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
5. Описание типа средства измерения. «Меры удельной электрической проводимости СО-230» № 63172-16.