УДК 620.179.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА С АКТИВНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2024 г. А.Е. Горбунов[1,2,*], П.В. Соломенчук[2,], А.С. Уманский[1,***]**

[1]Санкт-Петербургский горный университет,
Россия 199106 Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2
[2]ООО «Константа», Россия 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: [*]ae.gorbunov.w@gmail.com; [**]pavel257@mail.ru;
[***]umanskiy_as@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 21.05.2024; после доработки 18.07.2024
Принята к публикации 19.07.2024

Работа посвящена вопросам построения конечно-элементной модели вихретокового преобразователя, предназначенного для контроля степени пропаянности нахлесточных паяных соединений токопроводящих шин. Разработана методика построения конечно-элементной модели, включающая в себя геометрически параметр, изменение которого приводит к перестроению сетки конечных элементов, но не влияющего на контролируемые параметры неразрушающего контроля, что позволяет провести серию измерений значения сигнала конечно-элементной модели вихретокового преобразователя с последующим усреднением, благодаря чему обеспечивается приемлемая точность. Результаты испытаний подтверждают работоспособность вихретокового преобразователя, диапазон измерения размера дефекта паяного соединения от 0 до 100 % и обеспечение заявленной основной абсолютной погрешности измерения степени пропаянности 5 %.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, паяные соединения, тангенциальный преобразователь, конечно-элементное моделирование.

MODELING OF TWO-ELEMENT TANGENTIAL EDDY CURRENT PROBE WITH ACTIVE SHIELDING FOR SOLDERED JOINTS INSPECTION

© 2024 A.E. Gorbunov[1,2,*], P.V. Solomenchuk[2,], A.S. Umanskii[1,***]**

[1]Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St. Petersburg, 21st Line, 2
[2]Constanta Ltd., Russia 198095 St. Petersburg, Ogorodnii per., 21
E-mail: [*]ae.gorbunov.w@gmail.com; [**]pavel257@mail.ru;
[***]umanskiy_as@pers.spmi.ru

The paper is devoted to designing a finite-element model of the eddy current probe for testing the degree of soldering of lap soldered joints of conductive busbars. The method for finite-element model designing is developed, which parameters provide calculations error of signals of finite-element model of eddy current probe below 1.5%. The test results confirm the performance of the eddy current probe, the measurement range for soldered joints defect size from 0 to 100 % and provision of the declared basic absolute error of the degree of soldering measurement of 5 %.

Keywords: eddy current testing, soldered joints, tangential probe, finite-element modeling.

DOI:

ВВЕДЕНИЕ

При создании специализированного вихретокового преобразователя (ВТП) для решения узких задач в условиях влияния множества мешающих параметров много ресурсов уходит на создание макетов ВТП, что усложняется отсутствием возможности провести необходимые испытания в лабораторных условиях. Оптимальное решение — разработка и верификация виртуальный модели ВТП и с применением опытного образца ВТП для подтверждения характеристик модели. Статья посвящена вопросам построения виртуальной модели и обеспечению точности расчета сигналов модели ВТП. В статье рассматривается процесс создания двухэлементного ВТП тангенциального типа с активным экранированием, предназначенного для контроля нахлесточных паяных соединений обмоток статора электрических машин (рис. 1).

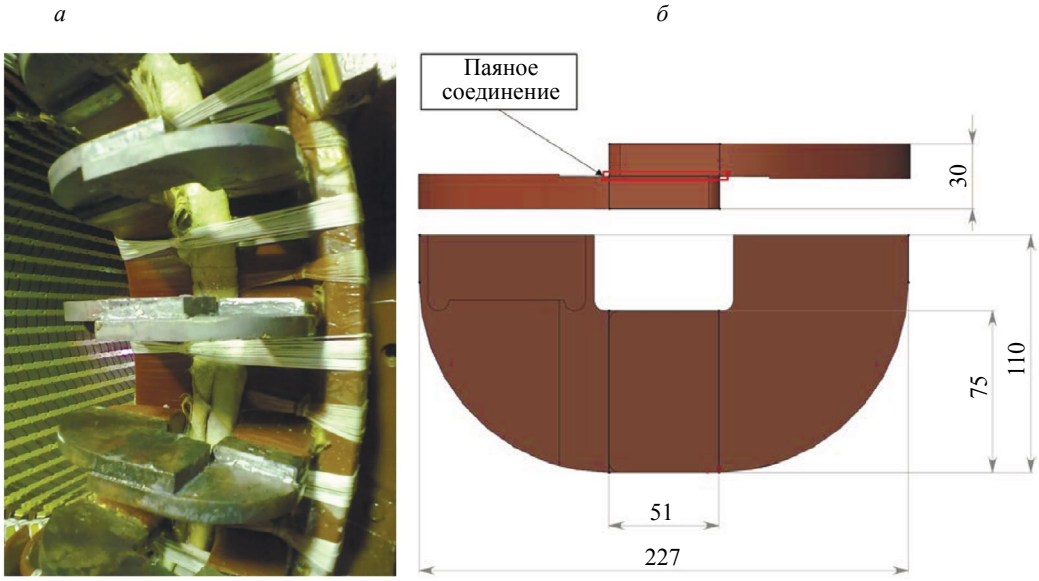


Рис. 1. Паяное соединения медных шин: фотография (*а*); эскиз (*б*).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для расчета параметров ВТП применяются несколько основных методов: аналитический расчет по формулам на основе справочной литературы, моделирование методом конечных разностей (МКР) и методом конечных элементов (МКЭ). Аналитический расчет взаимодействия ВТП с объектом контроля (ОК) дает достаточно точные результаты [1, 2], однако не позволяет учитывать экранирование, анизотропию материалов и прочие особенности [3]. Более точные результаты расчета достигаются с применением МКР и МКЭ, которые представляют элементы модели в виде множества точек («узлов»), объединенных в сетку. В МКР результаты расчета определяются только в узлах такой сетки, в то время как при использовании МКЭ значения вычисляются в каждой точке расчетной области [4]. Следовательно, МКР требует меньше временных и вычислительных ресурсов, но обеспечивает высокую точность значений только в узлах сетки с грубой аппроксимацией в промежуточных точках, а в МКЭ благодаря интегрированию по объему конечного элемента (КЭ) обеспечивается высокая точность ценой высоких затрат вычислительных мощностей.

Существует множество программных комплексов для решения задач моделирования электромагнитных полей при помощи МКЭ. Среди них наиболее популярны программы ANSYS Maxwell, Altair Flux, COMSOL Multiphysics, JMAG, SIMULIA Abaqus. В данной работе использовалась программа Ansys Maxwell, предоставляющая широкий спектр возможностей для работы и оптимизации сетки КЭ.

КЭ-модель ВТП для контроля паяного соединения

На первых этапах создания модели взаимодействия ВТП и ОК с применением МКЭ при построении трехмерной модели элементов (рис. 2) и принципиальной электрической схемы (рис. 3) изучаемые параметры модели задаются как переменные для дальнейшего поиска оптимального значения или исследования его влияния на сигнал ВТП.

Анализируемый ВТП состоит из двух элементов, расположенных по разные стороны от ОК симметрично относительно плоскости паяного соединения. Каждый из элементов включает в себя четыре основных обмотки: возбуждения, измерительную, экранирующую и компенсационную. Подробное описание конструкции ВТП, принципа его работы, особенностей ОК приведено в [5—7].

ОК — пластины из электротехнической меди, соединенные внахлестку серебряно-оловянным припоем, обеспечивающим электрический контакт. Контролируемая зона — площадь сопряжения пластин, контролируемый параметр — степень пропаянности соединения, выраженная как отношение текущей площади электрического контакта пластин к площади сопряжения пластин. Имитатор дефекта — непропай в контролируемой зоне. Непропай одинаковой площади в разных участках контролируемой зоны по-разному влияет на сигналы ВТП. Для

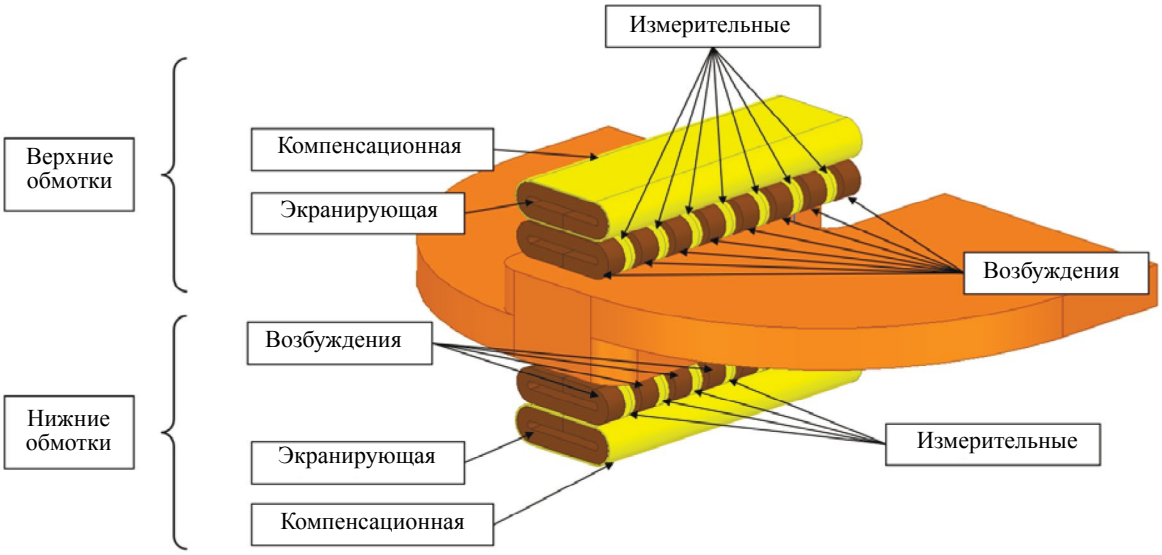


Рис. 2. Катушки ВТП и ОК крупным планом.

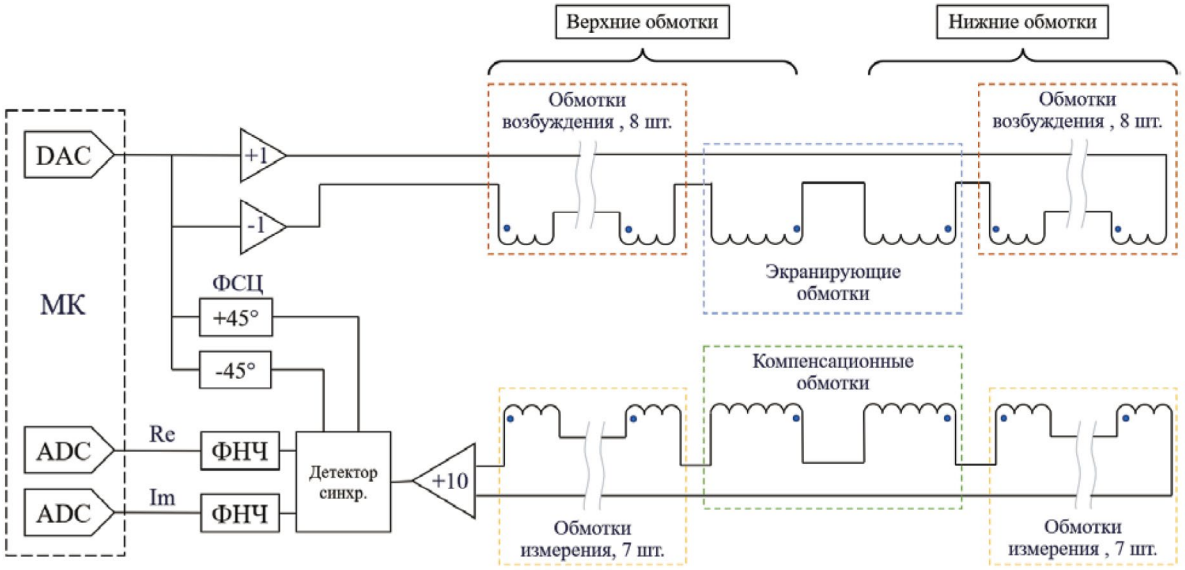


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная КЭ-модели ВТП.

моделирования непропая его модель задана в виде двух областей: вдоль боковой стенки (вдоль оси *X*) и вдоль торца соединения (вдоль оси *Y*) (рис. 4), а их размеры выражены в процентах от площади паяного соединения.

При вихретоковом контроле на результаты измерения оказывает влияние ряд мешающих параметров:

1. Параметры взаимного расположения ВТП и ОК [8, 9].
2. Геометрические параметры ОК (форма и размеры) [10, 11].
3. Электрические параметры ОК (удельная электрическая проводимость) [12, 13].
4. Условия контроля, (сильные магнитные поля или близкорасположенные электропроводящие объекты).

В КЭ модели «ВТП—ОК» исследуются следующие мешающие параметры, заданные переменными:

1. Взаимное расположение и перемещение ВТП и ОК по осям *X*, *Y*, *Z*.
2. Расстояние до соседних паяных соединений.
3. Разброс значений удельной электрической проводимости материала ОК.

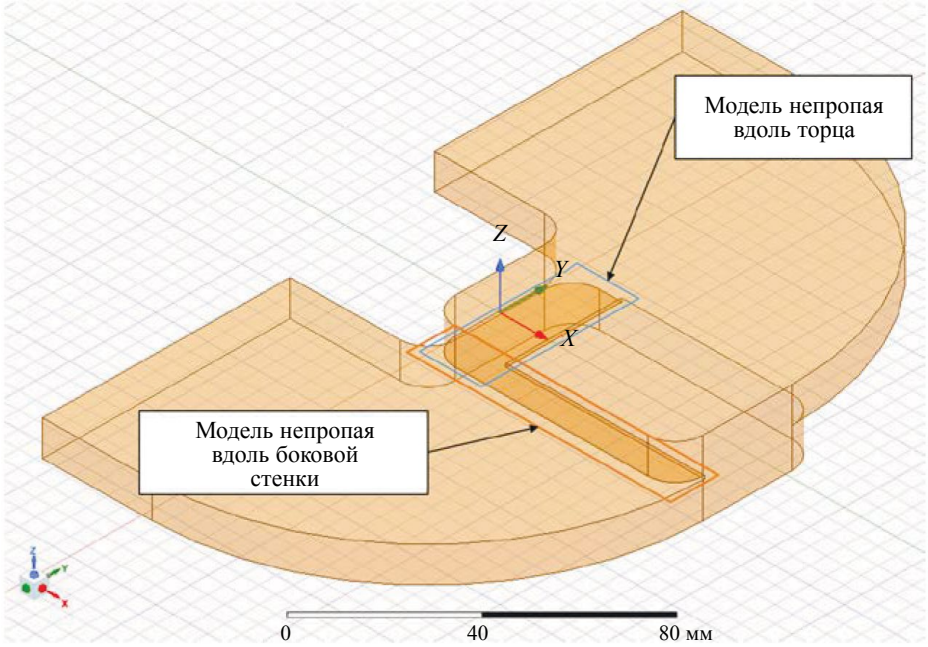


Рис. 4. Модели имитаторов дефектов.

Сигналом ВТП является напряжение U на катушках измерительной обмотки ВТП, информативным параметром является его амплитуда. Измеряемой величиной является степень пропаянности ОК, выраженная в %.

Точность моделирования

Ansys Maxwell задействует технологию адаптивного построения сетки конечных элементов, локально меняя плотность сетки модели на основе данных о градиенте анализируемых полей до достижения задаваемого уровня погрешности энергии или числа адаптивных вычислений модели [15].

Разброс результатов моделирования при изменении сетки КЭ при неизменных входных параметрах анализируется путем создания в удаленном участке ОК выреза (рис. 5), влияние которого на процесс измерения пренебрежимо мало [16]. Изменение положения выреза приводит к перестроению сетки КЭ при сохранении прочих параметров. В результате получен график зависимости сигнала ВТП от положения выреза в модели (рис. 6), физический смысл которого заключается в разбросе значений результатов измерений КЭ-модели ВТП, определяемом перестроением сетки КЭ, и который характеризует прецизионность КЭ-модели. В идеальной КЭ-модели ВТП график должен практически совпадать с прямой линией.

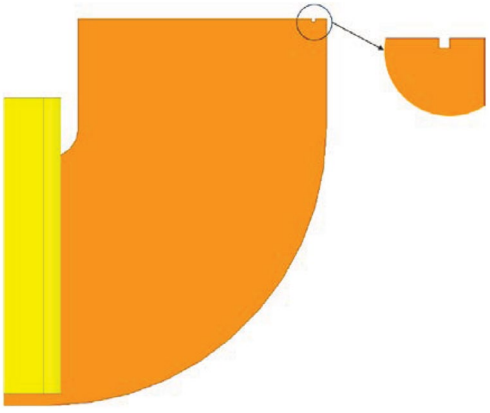


Рис. 5. Вырез в модели.

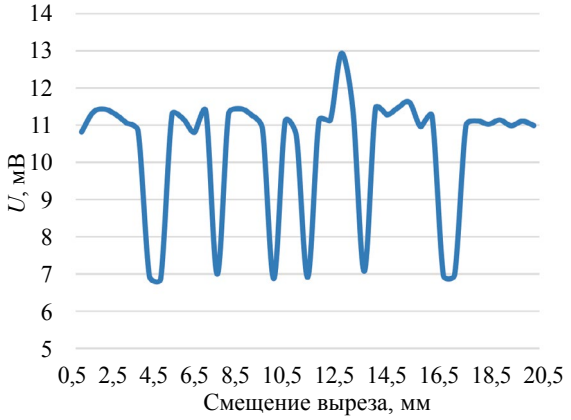


Рис. 6. Зависимость сигнала ВТП от положения выреза в модели.

На прецизионность КЭ-модели ВТП оказывают влияние следующие параметры сетки КЭ:

1. Выбор генератора сетки: классическая или тау. Отличия генераторов в том, что классический генератор начинает с создания грубой сетки с последующим ее уточнением, а тау-генератор, наоборот, от очень точной сетки переходит к более грубой с большими базовыми элементами. Классический генератор лучше справляется с построением сетки больших, но тонких объектов, в то время как тау-генератор больше всего подходит для построения сетки на объектах со значительными искривлениями геометрии [17].

2. Выбор количества адаптивных вычислений модели, нацеленного на повышение точности результатов измерения модели. Однако увеличение проходов алгоритма не всегда повышает прецизионность сигналов модели [18].

3. Ограничение длины КЭ, при котором можно задать предельный размер базового элемента, принудительно увеличивая плотность сетки КЭ.

4. Разделение ОК на составные части. В рассматриваемой модели ОК делится на три участка — контролируемая зона и два «хвоста», в каждой из которых параметры сетки могут быть настроены по-разному.

5. Построение сетки вручную путем создания плоских или объемных фигур, вершины которых являются узлами сетки.

6. Усреднение по 10 значениям, когда один сигнал модели считается как среднее арифметическое из 10 решений модели.

Применив вышеописанные операции на модели, были получены сигналы и статистика решений, анализ которых позволяет выбрать оптимальные настройки и параметры для дальнейшей работы с моделью ВТП. Основываясь на полученных сигналах и эмпирических данных, примем, что диапазон амплитуды сигнала ВТП при измерении степени пропаянности ОК составляет порядка 3 мВ, поэтому размах сигнала модели ВТП, должен быть не более 0,5 % от этого значения. Тип распределения значений каждого моделирования определяется на основе метода графиков QQ и метода омега-квадрат [19].

Таким образом, поставленным критериям точности соответствует только одна модель с применением следующих параметров:

1. Генератор КЭ-сетки типа «тау».

2. Три прохода адаптивного вычисления КЭ-сетки.

3. Усреднение результатов измерения модели ВТП по 10 значениям.

Увеличение требуемого числа решений в 10 раз приводит к увеличению временных затрат, однако каждое из решений требует относительно небольшое количество вычислительных ресурсов, конкретно в нашем случае КЭ-модель состояла из почти 132 тысяч тетраэдров, а одно ее решение производилось за 5 мин 14 с и использовало 2,3 ГБ оперативной памяти, что позволило моделировать несколько решений параллельно и достичь уровня шумности в 5 %. Показателем качества проведенной отладки КЭ модели служит сравнение сигналов ВТП от дефектов до и после отладки, представленное на рис. 7, на котором видно существенное повышение прецизионности.

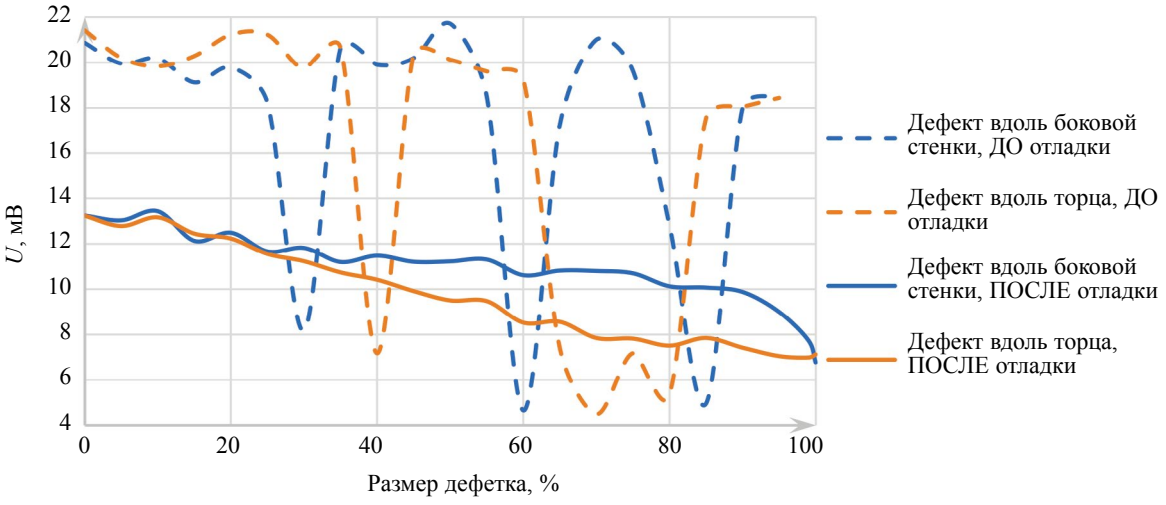


Рис. 7. Сравнение сигналов модели от двух типов непропая до и после отладки.

Качественная КЭ-модель позволяет изучить влияние контролируемого и мешающих параметров на сигналы ВТП для дальнейшей оптимизации конструкции. Для этого были получены сигналы при изменении следующих параметров:

1. Контролируемых параметров:
1.1. Размер дефекта, расположенного вдоль боковой стенки ОК.
1.2. Размера дефекта, расположенного вдоль торца ОК.
2. Мешающих параметров:
2.1. Смещения ВТП относительно ОК по осям X, Y, Z.
2.2. Изменение удельной электропроводности материала ОК.
2.3. Изменение расстояния между соседними ОК.

В результате получены годографы сигналов ВТП, описывающие влияние этих параметров (рис. 8).

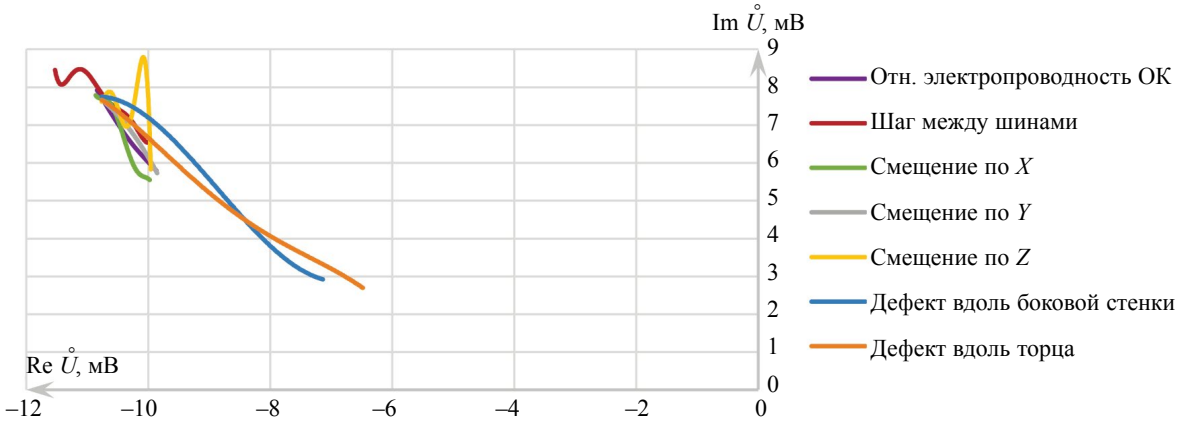


Рис. 8. Годографы дефектов и мешающих параметров.

На данном этапе важно оценить влияние мешающих параметров, связанных с расположением ВТП относительно ОК в пространстве. Поскольку информативным параметром рассматриваемого ВТП является амплитуда его сигнала, то комплексный сигнал мешающих параметров положения ВТП дополнительно пересчитан в значение амплитуды сигнала модели ВТП, график зависимостей которых представлен на рис. 9. По полученным графикам можно судить о значительном и нелинейном влиянии этих параметров на сигнал ВТП, в отличии от влияния удельной электропроводности ОК на сигнал. При этом влияние технологического разброса толщины деталей паяного соединения соизмеримо с оценкой погрешности КЭ-модели, в связи с чем объективная оценка его влияния затруднена. Благодаря полученным данным было выявлено,

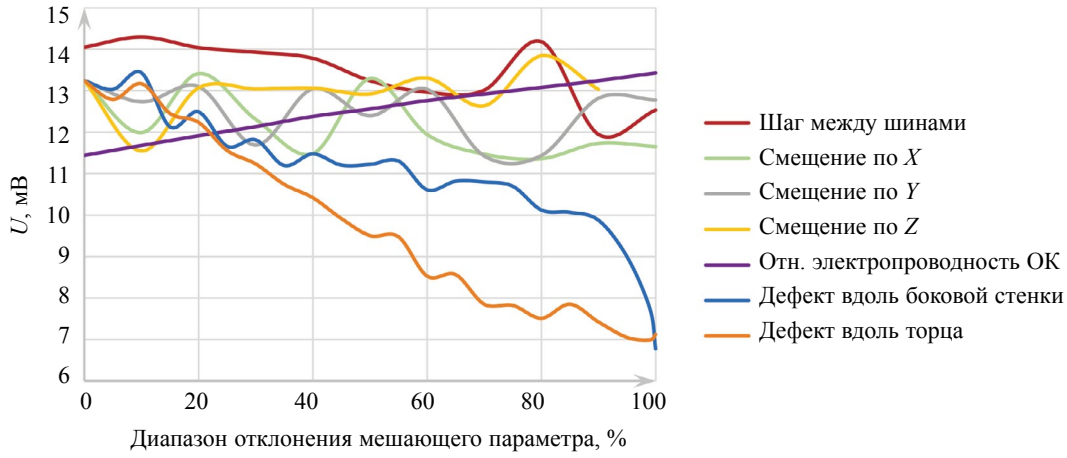


Рис. 9. Влияние контролируемых и мешающих параметров на амплитуду сигнала ВТП, где диапазоны отклонения мешающих параметров: шаг между шинами — от 70 до 90 мм; смещение по X — от 0 до 10 мм; смещение по Y — от 0 до 10 мм; смещение по Z — от 0 до 3 мм; относительная электропроводность ОК — от 40 до 60 МСм/м.

что для эффективного подавления мешающих параметров взаимного расположения ВТП и ОК требуются средства фиксации положения катушек ВТП относительно контролируемого соединения, что было достигнуто при доработке и оптимизации конструкции.

В свою очередь на основе данных модели о влиянии удельной электропроводности ОК на сигналы ВТП была разработана методика подавления влияния изменения удельной электропроводности компонентов ОК и контрольных образцов на результаты измерения степени пропаянности паяных соединений.

ИСПЫТАНИЕ МАКЕТА ВТП

По результатам проведенного моделирования ВТП была изготовлена оснастка для отработки технологии намотки провода, балансировки обмоток ВТП, а также оценки влияния некоторых мешающих параметров. Для проведения испытаний, настройки и проверки работоспособности ВТП при его дальнейшей эксплуатации были изготовлены настроечные образцы (НО) пропаянности 100 и 0 %. Образец 100 % представляет собой монолитную медную деталь, повторяющую по форме и размерам контролируемое соединение, образец 0 % представляет собой две монолитные детали, повторяющие по форме и размерам половинки контролируемого соединения, склеенные между собой через стеклотекстолитовую прокладку эпоксидным клеем. Дополнительно изготовлен промежуточный образец 60 % из заготовки образца 100 % с прорезью толщиной 1 мм на глубину 28,8 мм по всей ширине зоны контроля, имитирующей дефект вдоль боковой стенки площадью 40 %. В результате испытаний с применением оснастки получены годографы (рис. 10).

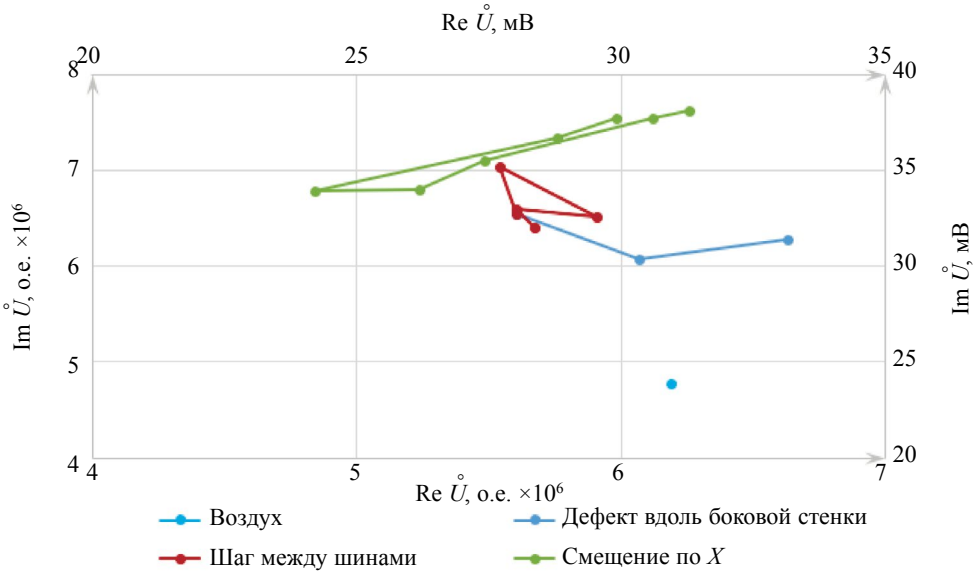


Рис. 10. Результаты испытаний с применением оснастки для балансировки.

Из рис. 10 видно, что характер сигналов ВТП в целом соответствует сигналам модели ВТП, подтверждена чувствительность ВТП к искомым дефектам, а также уточнено влияние мешающих параметров. На основании этих данных был проведен расчет геометрии и требуемой жесткости элементов конструкции ВТП для фиксации относительно ОК, общий вид конструкции готового ВТП представлен на рис. 11.

ВТП состоит из основания, к которому прикреплена рукоятка, содержащая плату с электронными компонентами. На основании неподвижно закреплена неподвижная и подвижная планка, в каждой из которых установлены катушки. Подвижная планка фиксируется с помощью зажима и безлюфтового соединения. Перемещение планки достаточно для того, чтобы компенсировать с требуемым запасом отклонение толщины паяного соединения во всем допускаемом диапазоне. На неподвижной планке расположен упор, фиксируемый на планке зажимом, предназначенный для позиционирования ВТП относительно паяного соединения. Этот упор позволяет обеспечить постоянство относительного расположения ВТП относительно контрольного образца во время настройки и относительно паяного соединения во время проведения контроля.

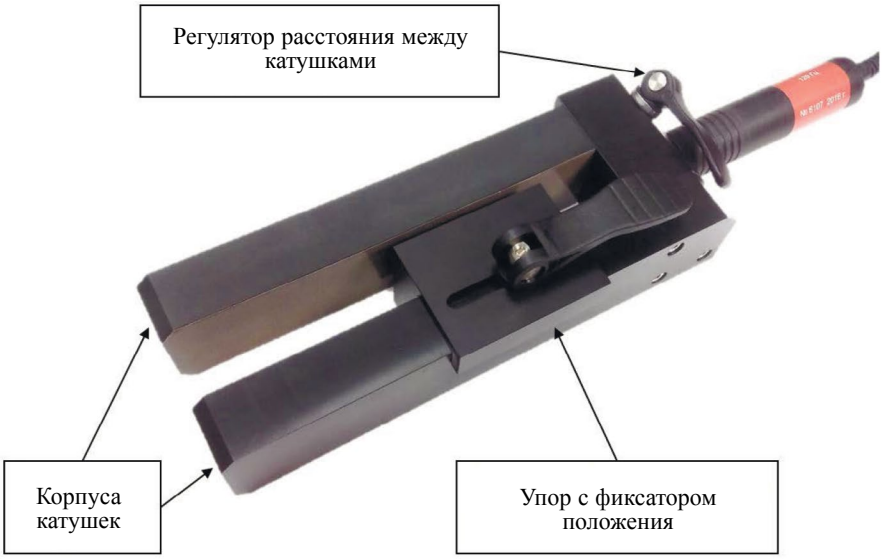


Рис. 11. Внешний вид ВТП.

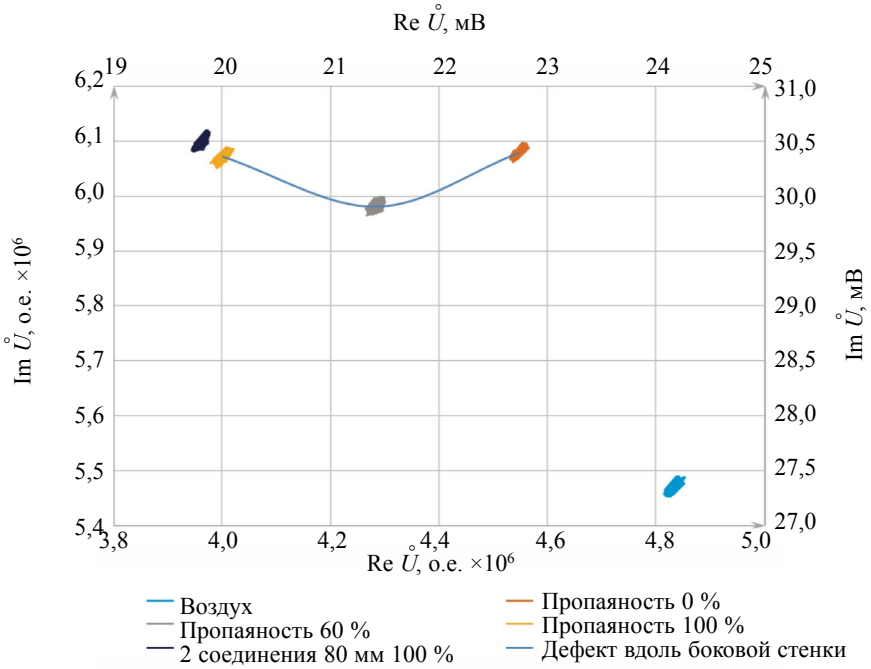


Рис. 12. Результаты испытаний ВТП.

На каждом НО проведены многократные измерения, результаты которых (рис. 12) демонстрируют соотношение сигнал/шум на уровне 14,7 и позволяют оценить прецизионность измерений.

Результаты испытаний подтверждают работоспособность ВТП, диапазон измерения размера дефекта паяного соединения от 0 до 100 % и обеспечение заявленной основной абсолютной погрешности измерения степени пропаянности 5 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конечно-элементная модель «ВТП—ОК», точностные параметры которой позволяют провести изучение влияния контролируемого и мешающих параметров на сигналы ВТП для контроля нахлесточных паяных соединений токоведущих шин обмотки генераторов.

2. Предложена методика построения конечно-элементной модели и оптимизации параметров, которая может быть использована при разработке низкочастотных вихретоковых преобразователей различных конструкций. Также она может быть применена при изучении влияния мешающих параметров, встречающиеся на практике, которые невозможно достоверно воспроизвести в реальном объекте контроля или контрольных образцах.

3. На основе разработанной модели создан ВТП для контроля нахлесточных паянных соединений, с его помощью подтверждена сходимость результатов измерений конечно-элементной модели ВТП и реального ВТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сясько В.А., Чертов Д.Н.* Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2012. № 2. С. 19—21. EDN: RUOHOR.

2. *Сучков Г.М., Хомяк Ю.В.* Повышение возможностей вихретокового контроля поверхности непрерывно-литых слябов из ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 78—83. EDN: OSSUAC.

3. *Syasko V.A., Chertov D.N., Ivkin A.E.* Measuring the thicknesses of the walls of carbon composite materials using the eddy-current phase method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. P. 561—567. doi.org/10.1134/S1061830911080109

4. *Потапов А.И., Сясько В.А., Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В.* Конечно-элементное моделирование преобразователя вихретокового контроля качества паяных соединений обмоток турбогенераторов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 21—30. EDN: QNJJJU.

5. *Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Сясько В.А.* Вихретоковый преобразователь тангенциального типа с активным экранированием / Патент № 2808437. 28.11.2023. Бюл. № 34.

6. *Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Соломенчук П.В.* Тангенциальный вихретоковый преобразователь для контроля нахлесточных паяных соединений токоведущих шин электрических машин // Дефектоскопия. 2023. № 11. С. 54—56. DOI: 10.31857/S0130308223110052. EDN: XBBNOM.

7. *Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Соломенчук П.В.* Измерение степени пропаянности соединения токоведущих шин турбогенераторов с использованием тангенциального вихретокового преобразователя с активным экранированием / Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения). Тезисы докл. XXXIV Уральской конф. (Пермь, 20—21 апреля 2023 г.). Екатеринбург. 2023. С. 36—37. EDN: SDFMTA.

8. *Kogan L., Nichipuruk A., Savary F., Principe R., Datskov V., Rozenfel'd E., Khudjakov B.* Eddy Current Quality of Soldered Current-Carrying Bas-Bar Splices of Superconducting Magnets // Insight. 2015. No. 12. P. 697—702. doi.org/10.1784/insi.2015.57.12.697

9. *Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V.* Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 5. P. 381—390. doi.org/10.1134/S1061830922050035

10. *Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П.* Вихретоковый контроль качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений с учетом влияния вариации их сечения на результаты контроля // Дефектоскопия. 2019. № 9. С. 20—28. doi.org/10.1134/S0130308219090033

11. *Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П.* Контроль качества пайки боковых стенок хомутов в токоведущих соединениях электрических машин с учетом влияния их размеров // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 59—69. doi.org/10.31857/S0130308222120065

12. *Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P.* Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 784—791. doi.org/10.1134/S1061830918110049

13. *Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S.* Ultrasonic and eddycurrent fatigue monitoring of austenitic steel welded joints // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. doi.org/10.1134/S1061830921090126

14. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

15. *Delphine D., Pedreira D., Verbeke D., Leconte V., Wendling P., Loic R., Mazauric V.* Adaptive Meshing for Eddy Current Calculations // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. V. 51. No. 11. P. 1—4. doi.org/10.1109/TMAG.2015.2445830

16. *Teterko A.Y., Uchanin V.M., Hutnyk V.I.* Improvement of the Accuracy of Eddy-Current Testing of the Electric Conductivity of Materials and the Thickness of Dielectric Coatings of the Shells // Mater Sci. 2014. V. 49. P. 857—865. doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9

17. *Markov A.A., Mosyagin V.V., Antipov A.G., Ivanov G.A.* The Possibility of Detecting Defects in Rail Foot by the MFL Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. No. 1. P. 63—74. doi.org/10.1134/S1061830923601459

18. *Antti Lehikoinen, Antero Arkkio, Anouar Belahcen*. Reduced Basis Finite Element Modeling of Electrical Machines with Multiconductor Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 5. P. 4252—4259. doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732918

19. *Гоголинский К.В., Ивкин А.Е., Алехнович В.В., Васильев А.Ю., Тюрнина А.Е., Васильев А.С.* Оценка показателей точности определения толщины покрытий методом шарового истирания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 39—44. doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44

REFERENCES

1. *Syasko V.A., Chertov D.N.* lamination detection in carbon fiber reinforced plastics with the use of tangential eddy current transducers // V mire nerazrushayushchego kontrolya [In the world of nondestructive testing]. 2012. No. 2. P. 19—21. (in Russian).

2. *Suchkov G.M., Khomyak Yu.V.* Improvement of possibilities of eddy current surface inspection of continuously cast slabs from ferromagnetic steels // Defectoscopya. 2013. No. 1. P. 78—83. (in Russian).

3. *Syasko V.A., Chertov D.N., Ivkin A.E.* Measuring the thicknesses of the walls of carbon composite materials using the eddy-current phase method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. P. 561—567. doi.org/10.1134/S1061830911080109

4. *Potapov A.I., Koroteev M.Yu., Syasko V.A., Solomenchuk P.V.* A finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 5. P. 264—273. doi.org/ 10.1134/S1061830914050064

5. *Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Syasko V.A.* Tangential type eddy current converter with active shielding. Patent RF. No. 2808437. 28.11.2023. (in Russian).

6. *Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Solomenchuk P.V.* Tangential eddy current probe for testing of soldered joints of busbars in electrical machines // Defectoscopya. 2023. No. 11. P. 54—56. doi.org/10.31857/S0130308223110052 (in Russian).

7. *Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Solomenchuk P.V.* Measurement of the degree of soldering of turbine generator busbar connections using a tangential eddy current transducer with active shielding / Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya (Yanusovskie chteniya) tezisy dokl. XXXIV Ural'skoi konf, Perm', 20—21 aprelya 2023 g. [Physical methods of nondestructive testing (Janusov readings) Abstracts of Papers of the XXXIV Ural Conf., Perm, April 20—21, 2023]. Ekaterinburg, 2023. P. 36—37. EDN: SDFMTA. (in Russian).

8. *Kogan L., Nichipuruk A., Savary F., Principe R., Datskov V., Rozenfel'd E., Khudjakov B.* Eddy Current Quality of Soldered Current-Carrying Bas-Bar Splices of Superconducting Magnets // Insight. 2015. No. 12. P. 697—702. doi.org/10.1784/insi.2015.57.12.697

9. *Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V.* Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 5. P. 381—390. doi.org/10.1134/S1061830922050035

10. *Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P.* Eddy current quality control of soldering in superconducting current-carrying joints with allowance for the effect of cross section variations on testing results // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 9. P. 654—662. doi.org/10.1134/S0130308219090033

11. *Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P.* Eddy current NDT of the soldering of the side walls of clamps in the current-carrying joints of electrical machines, taking into account the influence of their sizes // Defectoscopya. 2022. No. 12. P. 59—69. doi.org/10.31857/S0130308222120065

12. *Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P.* Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 784—791. doi.org/10.1134/S1061830918110049

13. *Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S.* Ultrasonic and eddycurrent fatigue monitoring of austenitic steel welded joints // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. doi.org/10.1134/S1061830921090126

14. RMG 29-2013 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. (in Russian)

15. *Delphine D., Pedreira D., Verbeke D., Leconte V., Wendling P., Loic R., Mazauric V.* Adaptive Meshing for Eddy Current Calculations // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. V. 51. No. 11. P. 1—4. doi.org/10.1109/TMAG.2015.2445830

16. *Teterko A.Y., Uchanin V.M., Hutnyk V.I.* Improvement of the Accuracy of Eddy-Current Testing of the Electric Conductivity of Materials and the Thickness of Dielectric Coatings of the Shells // Mater. Sci. 2014. V. 49. P. 857—865. doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9

17. *Markov A.A., Mosyagin V.V., Antipov A.G., Ivanov G.A.* The Possibility of Detecting Defects in Rail Foot by the MFL Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. No. 1. P. 63—74. doi.org/10.1134/S1061830923601459

18. *Antti Lehikoinen, Antero Arkkio, Anouar Belahcen*. Reduced Basis Finite Element Modeling of Electrical Machines with Multiconductor Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 5. P. 4252—4259. doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732918

19. *Gogolinsky K.V., Ivkin A.E., Alekhnovich V.V., Vasiliev A.Y., Tyurnina A.E., Vasiliev A.S.* Evaluation of the Accuracy Indicators in Determination of the Coating Thickness by Crater Grinding Method // Ind. Lab. Diagn. Mater. 2020. V. 86. No. 7. P. 39—44. doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44 (in Russian).