УДК 681.2.089:620.179.147
DOI: 10.14489/td.2025.06.pp.004-010

ПОДАВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ НАХЛЕСТОЧНЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



А. Е. Горбунов,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: ae.gorbunov.w@gmail.com



П. В. Соломенчук,
канд. техн. наук,
ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: pavel257@mail.ru



А. С. Уманский,
канд. техн. наук,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: umanskiy_as@pers.spmi.ru

Рассмотрены вопросы подавления влияния мешающих параметров при контроле нахлесточных паяных соединений электрических машин с применением тангенциального вихретокового преобразователя. Описываются источники мешающих параметров при выявлении дефектов нахлесточных паяных соединений, методы и технические средства подавления их влияния.

***Ключевые слова*:** вихретоковый контроль, паяные соединения, тангенциальный преобразователь, мешающие параметры.

A. E. Gorbunov[1, 2], P. V. Solomenchuk[2], A. S. Umanskii[1]
[1]Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
[2]Constanta Ltd., St. Petersburg, Russia

SUPPRESSION OF STRAY PARAMETERS INFLUENCE AT TESTING OF SOLDERED LAP JOINTS OF ELECTRICAL MACHINES

The article is devoted to the issues of suppression of stray parameters influence at eddy current testing of soldered lap joints of electrical machines using a tangential eddy current probe. Among the main stray parameters the paper highlights the deviation of specific conductivity and geometrical parameters of both test blocks and reference blocks in the process of instrument calibration and estimating the soldering integrity of soldered lap joints. In order to increase the reliability of testing correction of measurement results is proposed using developed formulas based on measurements of specific conductivity and thickness of the soldered joint.

The probe design implements a clamp and a block stop allowing suppression of the influence of the probe offset relative to the solder joint and reference block in the process of calibration and testing. The technique of determining the soldering integrity of soldered lap joints of current-carrying copper busbars of stator windings of electric machines is suggested.

***Keywords*:** eddy current testing, soldered joints, tangential probe, stray parameters.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025 *Received 26.03.2025*

Введение

В конструкции статоров некоторых типов турбогенераторов соединение токоведущих обмоток обеспечивается посредством промежуточных медных шин, которые образуют нахлесточное паяное соединение (рис. 1), для которого актуальна задача выявления дефектов [1, 2]. *Объектом контроля* (ОК) является нахлесточное паяное соединение двух пластин из меди М1 с применением серебряно-оловянного припоя, наносимого на всю площадь сопряжения двух пластин, доступ к которому возможен с трех сторон [3, 4]. Контролируемая зона ОК – объем части ОК, ограниченный по длине, ширине и толщине ОК – представлена на рис. 2. Контролируемый параметр – степень пропаянности соединения, определяемая как отношение площади



Рис. 1. Нахлесточное паяное соединение шин статорной обмотки

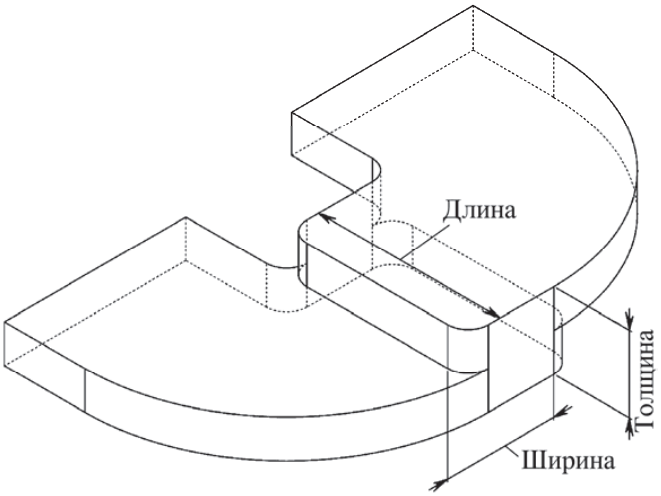


Рис. 2. Геометрические параметры контролируемой зоны ОК

реального электрического контакта пластин к площади сопряжения пластин. Задача контроля состоит в оценке степени пропаянности ОК. *Целью проводимого исследования* является анализ основных мешающих параметров и разработка методических и технических средств отстройки от их влияния при контроле нахлесточных паяных соединений статоров электрических машин.

Описание преобразователя

Контроль пайки описанного ОК проводили визуально с поиском внешних дефектов и путем сравнения сопротивления полуобмоток, при этом оценку степени пропаянности не выполняли. Для решения этой задачи предлагается *вихретоковый преобразователь* (ВТП), состоящий из двух элементов, которые расположены симметрично относительно плоскости паяного соединения по разные стороны ОК и включают четыре обмотки тангенциального типа: возбуждения, измерения, экранирования и компенсационную (рис. 3). Использование тангенциально расположенной обмотки возбуждения создает в ОК вихревые токи, пересекающие плоскость возникновения дефектов нахлесточных паяных соединений под углом, близким к перпендикулярному. При этом две тангенциальные обмотки возбуждения, установленные на противоположных сторонах ОК и включенные последовательно, создают общие контуры вихревых токов, пронизывающих всю контролируемую зону. Детальное описание конструкции и принципа работы ВТП приведено в работах [5 – 7]. Описанный ВТП подключается к вихретоковому дефектоскопу «Константа ВД1» для отображения установленного значения степени пропаянности ОК в процентах.

Настроечные образцы

Традиционно для настройки параметров ВТП, применяемых для контроля паяных соединений токоведущих обмоток, используются *настроечные образцы* (НО) степени пропаянности (рис. 4) [8, 9]:

1) НО 100 % – монолитная медная деталь, повторяющая по форме и размерам ОК для имитации полностью пропаянного соединения;

2) НО 0 % – сборное изделие, состоящее из двух медных пластин, повторяющих по форме и размерам шины ОК и склеенных эпоксидным клеем через диэлектрическую прокладку из стеклотекстолита, имитирующее полностью непропаянное соединение.

Поскольку на показания ВТП при настройке и контроле существенное влияние оказывает удельная электрическая проводимость материала ОК [10, 11], то для повышения достоверности контроля

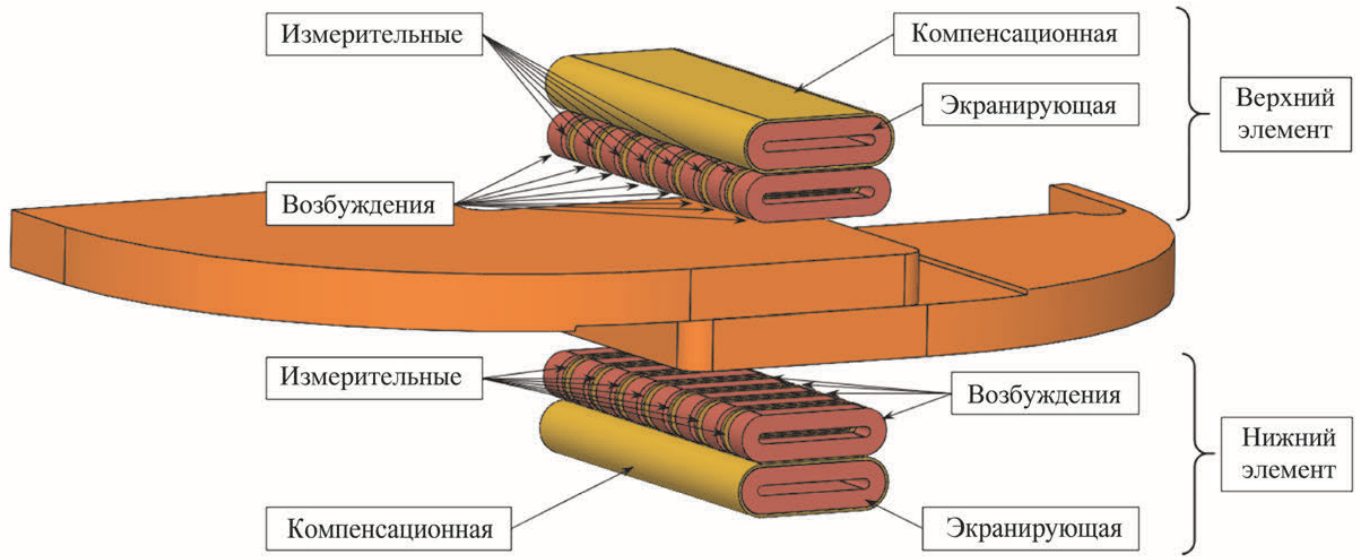


Рис. 3. Трехмерная модель катушек ВТП и ОК

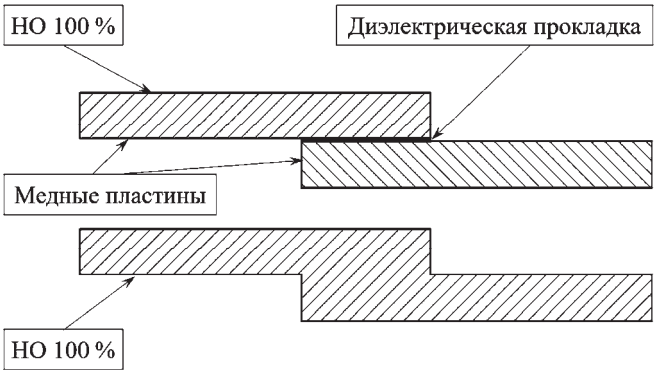


Рис. 4. Эскиз НО 0 % и НО 100 %

предъявляется требование к нормированию значения удельной проводимости материала НО на уровне 58 МСм/м. Комплект НО 0 % и 100 % изготавливают из единого прутка электротехнической меди М1Е или из двух заготовок в пределах одной партии. При этом предполагается, что настройка с применением такого комплекта НО обеспечивает необходимые чувствительность и диапазон измерения ВТП, а также корректную градуировку прибора.

Влияние мешающих параметров на результаты контроля

При вихретоковом контроле на показания воздействует ряд мешающих параметров. Условно их можно разделить на параметры, определяемые свойствами ОК, и параметры, определяемые процессом контроля. С использованием полученной конечно-элементной модели взаимодействия ВТП и ОК [7] было исследовано влияние на показания ВТП ряда значимых мешающих параметров, приведенных на рис. 5:

1) электромагнитные параметры материала ОК: сигналы ВТП чувствительны к изменению удельной электрической проводимости материала ОК (девиация удельной электрической проводимости верхней и нижней пластин в ОК и НО искажает показания ВТП);

2) соседние соединения: в лобовой части статора подлежащие контролю паяные соединения расположены с таким шагом, что при контроле соседние медные шины взаимодействуют с магнитным полем ВТП и могут искажать показания;

3) взаимное расположение и перемещение ВТП и ОК: размеры катушек соизмеримы с размерами ОК, поэтому смещение ВТП относительно ОК по любой из осей *X*, *Y* и *Z* влияет на сигналы ВТП. При этом смещение вдоль оси *X* ввиду конструкции ВТП оказывает большее влияние;

4) геометрические параметры контролируемой зоны ОК (см. рис. 2): технологический допуск

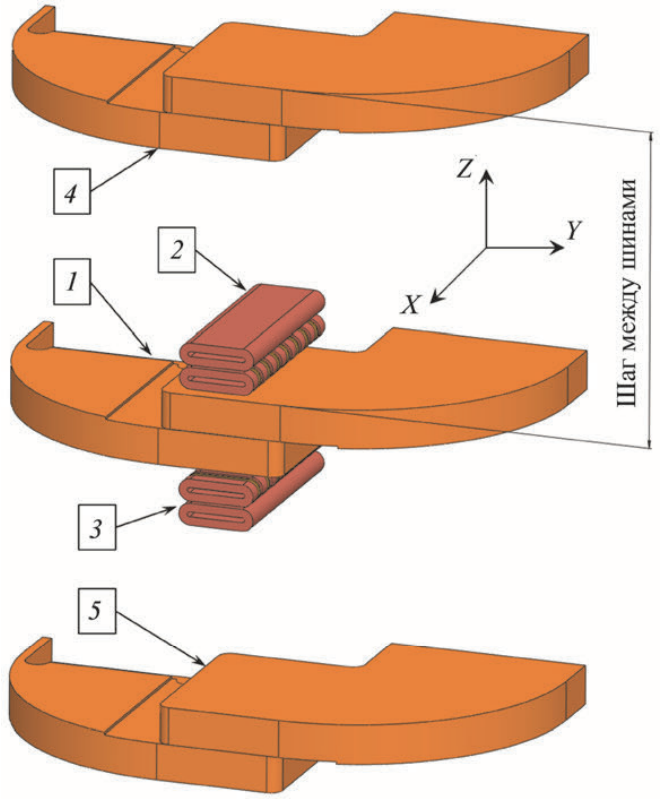


Рис. 5. Модель ВТП, ОК и соседних паяных соединений:
1 – ОК; *2* – верхний элемент ВТП; *3* – нижний элемент ВТП; *4* – верхнее паяное соединение; *5* – нижнее паяное соединение

на толщину контролируемых медных шин составляет 1 мм, при этом толщина слоя припоя варьируется в диапазоне от 0,6 до 1,1 мм, а в среднем составляет 1 мм, что было выявлено экспериментально.

Изготовление и аттестация достаточного количества НО, необходимых для получения достоверных результатов экспериментального исследования влияния девиации таких мешающих параметров, как удельная электрическая проводимость и отклонение размеров ОК, не представляются возможными. По этой причине изучение их влияния на показания прибора проводилось с использованием конечно-элементного моделирования. Результаты исследования влияния вариации мешающих параметров, полученные путем моделирования методом конечных элементов [7], показаны на рис. 6, где дополнительно приведен сигнал от дефекта для наглядного отображения уровня влияния. На рис. 7 приведены результаты двух экспериментов. Для исследования влияния на показания прибора смещения ВТП вдоль оси *X* использовалась оснастка, в которой положение НО 100 % жестко зафиксировано, а ВТП с помощью направляющих свободно перемещается только вдоль оси *X* в диапазоне от –15 до 15 мм с шагом 5 мм.

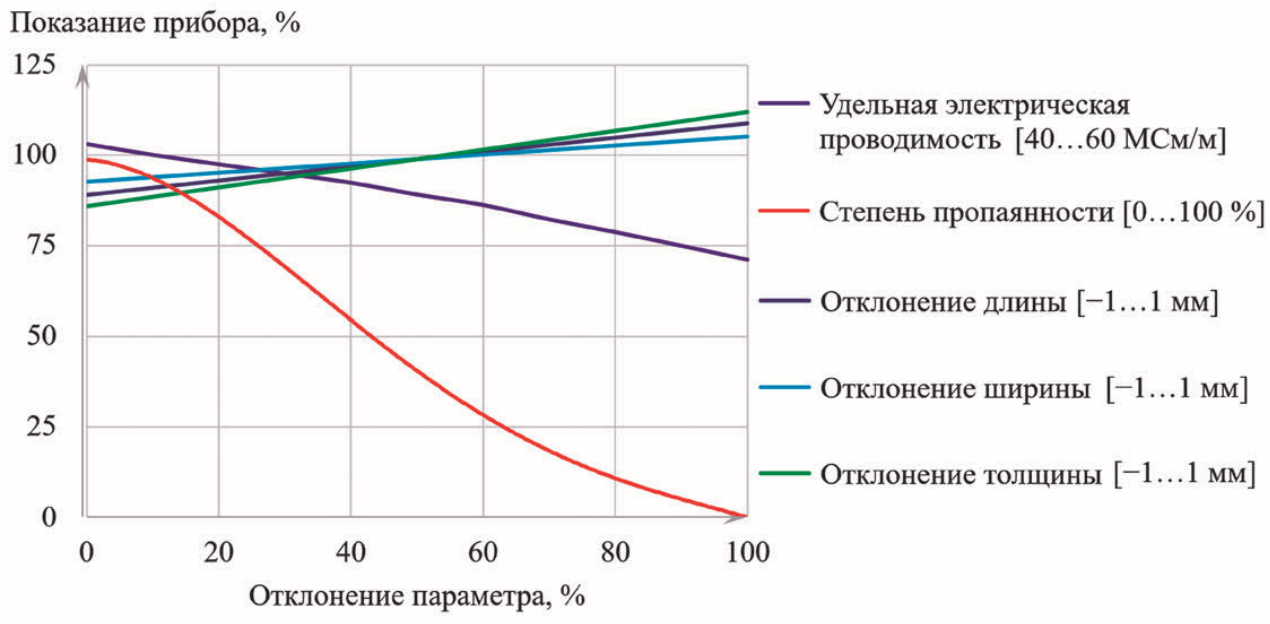


Рис. 6. Зависимости показаний прибора от отклонения параметров в модели ВТП

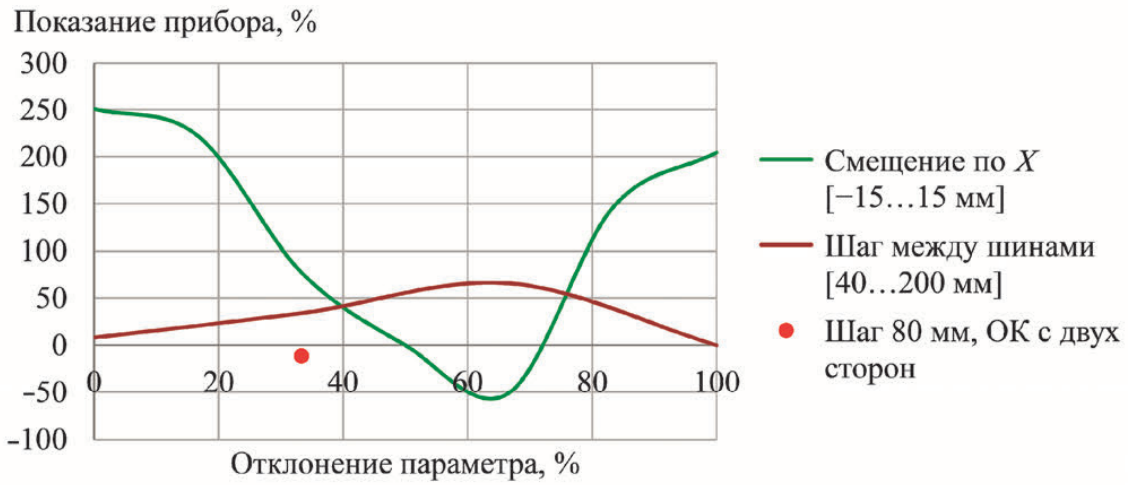


Рис. 7. Зависимости показаний прибора от отклонения параметров на макете ВТП

Для исследования влияния вариации шага между ОК и паяным соединением с внешней стороны в оснастке с жесткой фиксацией положения ВТП и НО 100 % проводили снятие показаний прибора. Затем с внешней стороны ВТП был установлен еще один НО соответствующего типоразмера, имитирующий соседнее паяное соединение, расстояние от которого до НО 100 % регулировалось в диапазоне от 40 до 200 мм с шагом 10 мм со снятием показаний прибора в каждом положении.

Расчеты показывают, что основными мешающими параметрами, влияющими на достоверность контроля, являются: девиация удельной электрической проводимости ОК, вариация шага между шинами, смещение по оси X и отклонение толщины ОК. Подавление их влияния представляет наибольший интерес.

Влияние удельной электрической проводимости ОК. В документации на ОК предусмотрено использование меди марки М1, для которой не нормируется содержание фосфора [12, 13], существенно влияющего на удельную электрическую проводимость изделий. С учетом реального опыта исследования качества ОК ожидается существенный разброс значений удельной электрической проводимости не только ОК одной электрической машины, но и пластин в составе ОК. С помощью конечно-элементного моделирования был рассчитан уровень влияния, оказываемый разницей удельной проводимости пластин ОК, на показания прибора при измерении ОК 0 % и 100 % (рис. 8).

Анализ зависимостей на рис. 8 позволил получить формулу для расчета скорректированного значения степени пропаянности $П_{\sigma}$, учитывающего

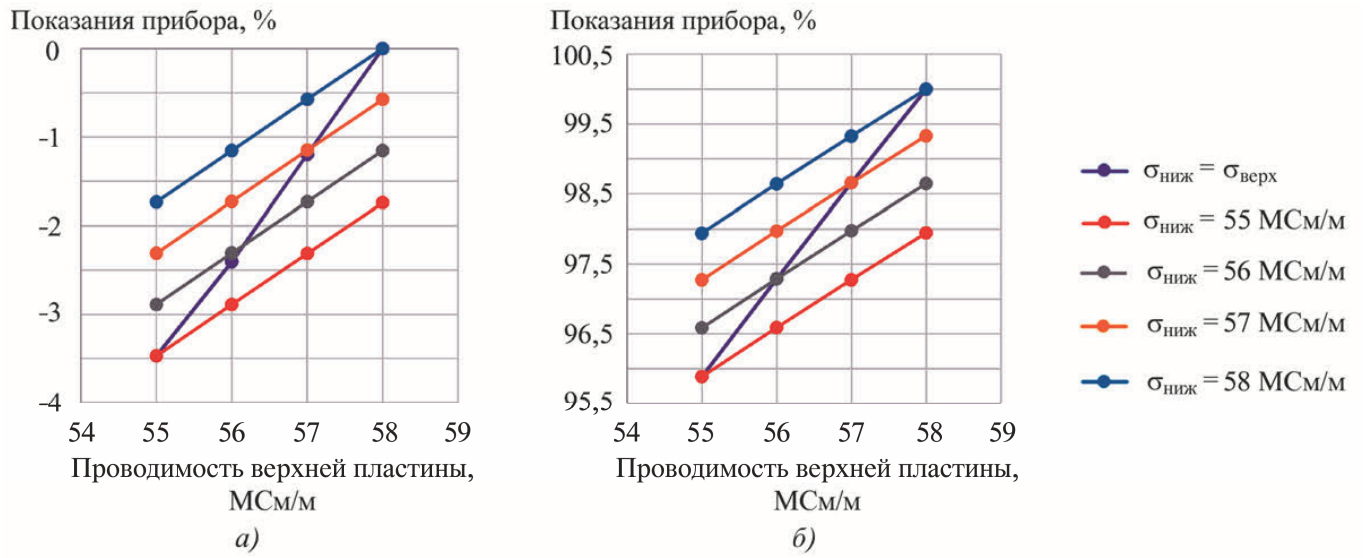


Рис. 8. Зависимость показаний прибора от девиации удельной электрической проводимости ОК с разной степенью пропаянности:
а – 0 %; *б* – 100 %

девиацию значений удельной электрической проводимости ОК и НО:

$$\Pi_\sigma = (k - \sigma_{ОК}) + \sqrt{\sqrt{\frac{\sigma_0 + \sigma_{100}}{\sigma_{ОК}}}\frac{\sigma_{ОК}}{k}} + Rez;$$

$$k = \frac{\sigma_{100} Rez + \sigma_0 (100 - Rez)}{100}, \quad (1)$$

где σ_0 – удельная электрическая проводимость НО 0 %, МСм/м; σ_{100} – удельная электрическая проводимость НО 100 %, МСм/м; $\sigma_{ОК}$ – среднее арифметическое удельной электрической проводимости ОК, МСм/м; *Rez* – результат измерения степени пропаянности прибором, %.

Определение удельной электрической проводимости элементов ОК и НО может проводиться с использованием вихретокового измерителя удельной электрической проводимости, например «Константа К6», и преобразователя ПФ-ИЭ-бэ-Cu с диапазоном измерения от 25 до 59 МСм/м и пределом основной допускаемой погрешности измерения 3 % [14].

Влияние шага между шинами. Для подавления влияния вариации расстояния до соседних паяных соединений на показания прибора в ВТП используются обмотки активного экранирования, установленные поверх ряда обмоток возбуждения и измерения и включенные встречно с обмоткой возбуждения [6]. Благодаря этому создается встречное магнитное поле экранирования с внешней стороны каждого элемента ВТП, вытесняя магнитное поле возбуждения и ограничивая его взаимодействие с соседними паяными соединениями. Результат их работы демонстрируется на рис. 9, где показано незначительное смещение сигнала ВТП от ОК при установке соседних паяных соединений при контроле.

Влияние отклонения геометрических параметров. Для подавления влияния смещения ВТП относительно ОК вдоль осей *X*, *Y*, *Z* предусмотрены специальные конструкционные элементы, обеспечивающие жесткость ВТП и позиционирующие ВТП на ОК относительно зоны контроля во время настройки и измерения (рис. 10).

Подавление влияния толщины ОК в зоне контроля обеспечивается путем корректировки показаний, для чего в процессе контроля измеряется толщина ОК и определяется ее отклонение Δc от толщины НО. Тогда степень пропаянности ОК можно найти по формуле, полученной на основе данных зависимостей сигналов модели:

$$\Pi = \Pi_\sigma + \Delta ct, \quad (2)$$

где П – степень пропаянности ОК, %; Δc – отклонение толщины ОК от толщины НО, мм; t = 0,812 – поправочный коэффициент степени пропаянности по толщине, 1/мм.

Под результатом измерения толщины ОК и НО понимается среднее арифметическое из пяти измерений в точках, равномерно распределенных по соответствующей поверхности, произведенных с применением штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0,01 (диапазон измерения 0…150 мм, предел допускаемой погрешности измерения 0,03 мм) [15].

Основные разделы проекта методики контроля степени пропаянности нахлесточных паяных соединений электрических машин, требующие учета мешающих параметров [16, 17], включают:

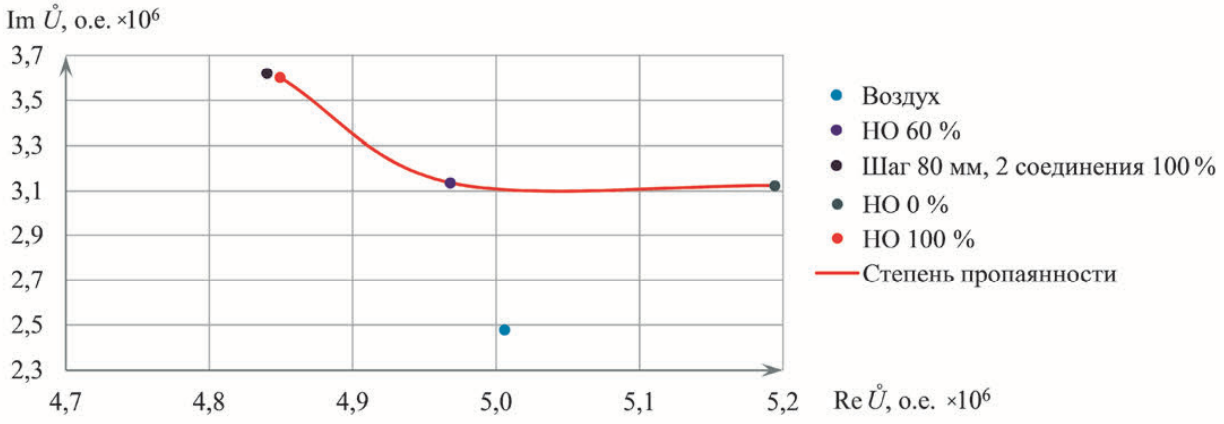


Рис. 9. Сигналы ВТП от ОК до и после установки соседних соединений

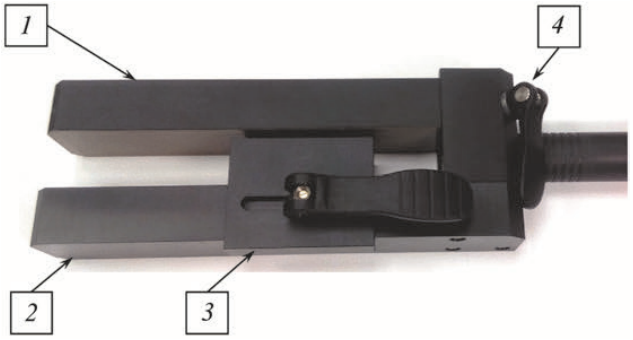


Рис. 10. Внешний вид двухэлементного тангенциального вихретокового преобразователя с активным экранированием:
1 – подвижная планка; *2* – неподвижная планка; *3* – упор; *4* – фиксатор положения между планками

– *условия контроля.* Контроль проводится не ранее чем через 3 ч после пайки медных шин. НО должны быть выдержаны вместе с ОК не менее чем в течение 1 ч;

– *подготовка к процедуре контроля*. Измеритель удельной электрической проводимости проверяется по мерам удельной электрической проводимости. Проводится измерение удельной проводимости НО 0 % и НО 100 %. Выполняется настройка 0 % и 100 % на соответствующих НО;

– *процедура контроля*:

1) измеряется удельная электрическая проводимость верхней и нижней пластин ОК, вычисляется среднее арифметическое значение удельной электрической проводимости ОК;

2) измеряется толщина ОК;

3) выполняется измерение степени пропаянности ОК;

4) пункты 1 – 3 повторяются для каждого ОК электрической машины;

– *обработка результатов контроля и составление протокола*. По формулам (1) и (2) вычисляется степень пропаянности каждого ОК.

Выводы

При измерении степени пропаянности паяных соединений нахлесточного типа с применением вихретокового преобразователя с тангенциально расположенными катушками возбуждения, с целью повышения достоверности результатов измерения, необходимо применять предложенную методику подавления влияния мешающих параметров. Для каждого паяного соединения необходимо измерять удельную электрическую проводимость деталей паяного соединения и толщину паяного соединения, после чего проводить корректировку результатов измерения степени пропаянности паяного соединения по предложенным формулам.

Для подавления влияния смещения ВТП относительно паяного соединения необходимо оснастить ВТП упорами, фиксирующими взаимное расположение ВТП и ОК.

Библиографический список

1. **Klempner G., Kerszenbaum I.** Maintenance // Handbook of Large Turbo Generator Operation and Maintenance. 2nd ed. / eds. G. Klempner, I. Kerszenbaum, Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2008 P. 923 – 974. DOI: 10.1002/9781119390718.ch12

2. **Andreev D. A., Nazarychev A. N., Folvarchuk A. S.** Justification of the Prospects for Selecting the Main Electrical Equipment in the Generator Circuit of High-power Nuclear Power Plant Units // Power Technol. Eng. 2023. V. 57. P. 438 – 444. DOI: 10.1007/s10749-023-01682-x

3. **Muratov K. R., Gashev E. A., Ablyaz T. R., et al.** Determining the Actual Contact Area in Mutual Lapping of Surfaces // Russ. Engin. Res. 2021. V. 41. P. 437 – 438. DOI: 10.3103/S1068798X21050130

4. **Andreev D. A., Nazarychev A. N., Folvarchuk A. S.** Methods for Reducing Short-Circuit Currents in the Generator Circuit when Designing High-Power units in Nuclear Power Plants // Power Technol. Eng. 2023. V. 56. P. 711 – 717. DOI: 10.1007/s10749-023-01579-9

5. **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.

6. **Gorbunov A., Syasko V., Solomenchuk P., Umanskii A.** Methods and Means of Eddy Current Testing of Soldered Lap Joints of Electrical Machines // Appl. Sci. 2025. V. 15, No. 4. P. 2036. DOI: 10.3390/app15042036

7. **Gorbunov A. E., Solomenchuk P. V., Umanskii A. S.** Modeling a Two-Element Tangential Eddy Current Probe with Active Shielding for Soldered Joint Testing // Russ. J. Nondestruct. Test. 2024. V. 60. P. 912 – 920. DOI: 10.1134/S106183092460196X

8. **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: 10.31857/S0130308222120065. EDN BVABLJ.

9. **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.

10. **Olenev L. A., Zakieva R. R., Smirnova N. N., et al.** Accurate Composition Dependent Thermo Mechanical Lifetime Estimation of Hour Glass Type Solder Joint in Electronic Assemblies // Soldering & Surface Mount Technology. 2022. V. 34, No. 1. P. 8 – 15. DOI: 10.1108/SSMT-12-2020-0055

11. **Gromyka D. S., Gogolinskiy K. V.** Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps // Russ. J. Nondestruct. Test. 2022. V. 58, No. 5. P. 381 – 390. DOI: 10.1134/S1061830922050035

12. **ГОСТ 859–2014.** Медь. Марки. М.: Стандартинформ, 2015. 5 с.

13. **ГОСТ 1535–91.** Прутки медные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2002. 16 с.

14. **ГОСТ 27333–87.** Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом. М.: Изд-во стандартов, 2004. 6 с.

15. **ГОСТ 166–89.** Штангенциркули. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. 11 с.

16. **РМГ 29–99.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации: утв. Госстандартом России. М.: Изд-во стандартов, 2001. 62 с.

17. **Артемьев Б. Г., Лукашов Ю. Е.** Поверка и калибровка средств измерений. М.: Стандартинформ, 2006. 408 с.

References

1. Klempner G., Kerszenbaum I. (2008). *Maintenance. Handbook of Large Turbo Generator Operation and Maintenance. 2nd ed*, 923 – 974. Piscataway: Wiley-IEEE Press. DOI: 10.1002/9781119390718.ch12

2. Andreev D. A., Nazarychev A. N., Folvarchuk A. S. (2023). Justification of the Prospects for Selecting the Main Electrical Equipment in the Generator Circuit of High-power Nuclear Power Plant Units. *Power Technology and Engineering, 57,* 438 – 444. DOI: doi.org/10.1007/s10749-023-01682-x

3. Muratov K. R., Gashev E. A., Ablyaz T. R., et al. (2021). Determining the Actual Contact Area in Mutual Lapping of Surfaces. *Russian Engineering Research, 41,* 437 – 438. DOI: doi.org/10.3103/S1068798X21050130

4. Andreev D. A., Nazarychev A. N., Folvarchuk A. S. (2023). Methods for Reducing Short-Circuit Currents in the Generator Circuit when Designing High-Power units in Nuclear Power Plants. *Power Technology and Engineering, 56,* 711 – 717. DOI: doi.org/10.1007/s10749-023-01579-9

5. Gorbunov A. E., Ivkin A. E., Solomenchuk P. V. (2023). Tangential eddy current transducer for monitoring lap soldered joints of busbars of electrical machines. *Defektoskopiya,* (11), 54 – 56. [in Russian language]

6. Gorbunov A., Syasko V., Solomenchuk P., Umanskii A. (2025). Methods and Means of Eddy Current Testing of Soldered Lap Joints of Electrical Machines. *Applied Sciences, 15*(4). DOI: doi.org/10.3390/app15042036

7. Gorbunov A. E., Solomenchuk P. V., Umanskii A. S. (2024). Modeling a Two-Element Tangential Eddy Current Probe with Active Shielding for Soldered Joint Testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing, 60,* 912 – 920. DOI: doi.org/10.1134/S106183092460196X

8. Kogan L. H., Stashkov A. N., Nichipuruk A. P. (2022). Quality control of soldering of side walls of clamps in current-carrying connections of electrical machines taking into account the influence of their dimensions. *Defektoskopiya,* (12), 59 – 69. [in Russian language] DOI: 10.31857/S0130308222120065

9. Potapov A. I., Syas'ko V. A., Koroteev M. Yu., Solomenchuk P. V. (2014). Finite element modeling of eddy current quality control transducer for soldered joints of turbogenerator windings. *Defektoskopiya,* (5), 21 – 30. [in Russian language]

10. Olenev L. A., Zakieva R. R., Smirnova N. N., et al. (2022). Accurate Composition Dependent Thermo Mechanical Lifetime Estimation of Hour Glass Type Solder Joint in Electronic Assemblies. *Soldering & Surface Mount Technology, 34*(1), 8 – 15. DOI: doi.org/10.1108/SSMT-12-2020-0055

11. Gromyka D. S., Gogolinskiy K. V. (2022). Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps. *Russian Journal of Nondestructive Testing, 58*(5), 381 – 390. DOI: doi.org/10.1134/S1061830922050035

12. Copper. Stamps. (2015). *Standard No. GOST 859–2014.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

13. Copper rods. Technical conditions. (2002). *Standard No. GOST 1535–91.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

14. Non-destructive testing. Measurement of specific electrical conductivity of non-ferrous metals using the eddy current method. (2004). *Standard No. GOST 27333–87.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

15. Calipers. Technical conditions. (2003). *Standard No. GOST 166–89.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

16. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. (2001). *Recommendations for interstate standardization No. RMG 29–99.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

17. Artem'ev B. G., Lukashov Yu. E. (2006). *Verification and calibration of measuring instruments.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

Для цитирования статьи:

Горбунов А. Е., Соломенчук П. В., Уманский А. С. Подавление влияния мешающих параметров при контроле нахлесточных паяных соединений электрических машин // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 6. С. 4 – 10. DOI: 10.14489/td.2025.06.pp.004-010

Gorbunov A. E., Solomenchuk P. V., Umanskii A. S. (2025). Suppression of Stray Parameters Influence at Testing of Soldered Lap Joints of Electrical Machines. *Kontrol'. Diagnostika*, *28*(6), 4 – 10. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2025.06.pp.004-010