



Received: 24.06.2024
Revised: 16.10.2024
Accepted: 25.10.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.181-194

THE EFFECT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONDUCTIVE COPPER CONNECTIONS ON THE RELIABILITY OF TESTING THE SOLDERING QUALITY OF CLAMP SIDE WALLS BY THE AMPLITUDE EDDY CURRENT METHOD

L. K. Kogan^{a,*} and A. N. Stashkov^b

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@imp.uran.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

Corresponding author. Email: lhkogan@imp.uran.ru
Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
Tel.: +7 (343) 378-3827

A transformer eddy-current transducer with rectangular notches in the poles of its U-shaped core is used to study the effect of a change in electrical resistivity of M1 copper within the range between 0.01724 and 0.01748 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ according to GOST 193-79 and GOST 1173-2006 on the error in determining the soldering quality of the side walls of clamps with lead ends of current-carrying rods, which are used to connect stator windings in state-of-the-art designs of hydro- and turbogenerators. Specimens made at different times and received from different power engineering enterprises are studied. It is found that, when the relative difference of electrical resistivity varies within 1.36%, the error in evaluating the level of soldering of the side walls of clamps does not exceed 15.5%. This must be taken into account when performing eddy current testing.

Keywords: eddy current inspection, power equipment, conductive connections, electrical resistivity, soldering, eddy current transducer with rectangular notches in the poles of a U-shaped core, double-frequency testing of soldering, reliability of testing

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education (theme Diagnostics, No 122021000030-1). We are grateful to V. A. Syasko and P. V. Solomenchuk, staff members of Konstanta Ltd, for the providing us with a set of SO-220 certified resistivity specimens.

References

1. Chelly A., Glass, S., Belhassen, J., Karsenty, A. Broad review of four-point probe correction factors: enhanced analytical model using advanced numerical and experimental cross-examination. *Results in Physics*, 2023, 48, 106445–106454. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.106445.
2. Gutiérrez-Vargas, G., Ruiz, A., López-Morelos, V.H., Kim, J.-Y., González-Sánchez, J., and Medina-Flores, A. Evaluation of 475°C embrittlement in UNS S32750 super duplex stainless steel using four-point electric conductivity measurements. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, 53 (9), 2982–2989. DOI: 10.1016/j.net.2021.03.018.
3. Huang, P., Ding, Y., Li, J., Xu, L., and Xie, Y. Conductivity estimation of non-magnetic materials using eddy current method *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 38 (1), 130–146. DOI: 10.1080/10589759.2022.2077939.



4. Ye, C., Su, Z., Rosell, A., Udpa, L., Udpa, S., Capobianco, T., and Tamburrino, A. A decay time approach for linear measurement of electrical conductivity. *NDT & E International*, 2019, 102, 169–174. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.001.
5. Mirzaei, M, Ripka, P, and Grim, V. Conductivity measurement of nonferrous plates using a novel sensor with triangular arrangements of triple coils. In: *2022 Joint MMM InterMag Conference (INTERMAG)*, New Orleans, LA, USA, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827796.
6. Gao, P., Wang, C., Li, Y., and Cong, Z. Electromagnetic and eddy current NDT in weld inspection: a review. *Insight*, 2015, 57 (6), 337–345. DOI: 10.1784/insi.2015.57.6.337.
7. Tesfalem, H., Peyton, A., Fletcher, A., Brown, M., and Chapman, B. Eddy current sensor and inversion technique for estimation of the electrical conductivity profile of the graphite bricks in an advanced gas-cooled reactor core. In: *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XX), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Series*, 2017, 42, 253–264. DOI: 10.3233/978-1-61499-767-2-253. Available at: <https://ebooks.iospress.nl/publication/46626>
8. Ma, X., Peyton, A.J., and Zhao, Y.Y. Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals. *NDT & E International*, 2006, 39, 562–568. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.03.008.
9. Ma, X. and Peyton, A.J. Eddy current measurement of the electrical conductivity and porosity of metal foams. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55 (2), 570–576. DOI: 10.1109/TIM.2006.873549.
10. Huang, Z., Zhu, J., Wu, X., Qiu, R., Xu, Z., and Ruan, J. Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312, 127755–127762. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127755.
11. Kriezis, E.E., Tsiboukis, T.D., Panas, S.M., and Tegopoulos, J.A. Eddy currents: theory and applications. In: *Proceedings of the IEEE*, 1992, 80 (10), pp. 1559–1589. DOI: 10.1109/5.168666.
12. Ramos, H.G., Ribeiro, A.L., Jezdik, P., and Neskudla, J. Eddy current testing of conductive materials. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 964–968. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547176.
13. De Halleux, B., De Limburg Stirum, B., and Ptchelintsev, A. Eddy current measurement of the wall thickness and conductivity of circular non-magnetic conductive tubes. *NDT & E International*, 1996, 29, 103–109. DOI: 10.1016/0963-8695(96)00001-1.
14. *Nerazrushayuschiy control: spravochnik* [Nondestructive Testing: A Handbook in 7 vols., ed., V.V. Klyuev, Vol. 2, Book 2: Eddy Current Testing]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2003, 688 p. (In Russian).
15. Terekhin, I.V. and Slavinskaya, E.A. Evaluating specific electrical conductivity of two-layered nonmagnetic objects by pulsed eddy-current method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, 55, 286–292. DOI: 10.1134/S1061830919040120.
16. Sophian, A., Tian, G., and Fan, M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30, 500–514. DOI: 10.1007/s10033-017-0122-4.
17. Maierhofer, C., Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler, M., Kreutzbruck, M., Scheuerlein, C., and Heck, S. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography. *NDT & E International*, 2012, 52, 103–111. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
18. Principe, R., Vallejo, L.M., Bailey, J., Berthet, R., Favier, L., Grand-Clement, L., and Savary, F. Phased Array Ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (4), 1–8. DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.
19. Malyy, V.V., Kostyukhin, A.S., and Kinzhagulov, I.Yu. Development of technology for non-destructive quality control of heat exchanger brazed joints and determination of the principles of its automation. *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa*, 2022, 3 (61), 11–17. (In Russian).



20. Dorofeev, A.L. *Elektro-induktivnaya defektoskopiya* [Electro-Inductive Flaw Detection]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1967, 231 p. (In Russian).
21. Kogan, L., Nichipuruk, A., Savary, F., Pricipe, R., Datskov, V., Rozenfeld, E., and Khudjakov, B. Eddy current of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets. *Insight*, 2015, 57 (12), 697–702. DOI: 10.1784/insi.2015.57.12.697.
22. Rozenfeld, E.V., Nichipuruk, A.P., Kogan, L.K., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46, 281–291. DOI: 10.1134/S1061830910040066.
23. Kogan, L.K., Nichipuruk, A.P., Rozenfeld, E.V., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46, 292–301. DOI: 10.1134/S1061830910040078.
24. Kogan, L.K., Stashkov, A.N., and 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, 54, 784–791. DOI: 10.1134/S1061830918110049.
25. Syasko, V.A., Roytgarc, M.B., Koroteev, M.Yu., and Solomenchuk, P.V. Quality control of soldered joints of stator windings of turbogenerators at the Electrosila plant. *V Mire NK*, 2010, 2 (48), 1–9. (In Russian).
26. Potapov, A.I., Syasko, V.A., Koroteev, M.Y., 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, 50, 264–273. DOI: 10.1134/S1061830914050064.
27. Kogan, L.K., Stashkov, A.N., and Nichipuruk, A.P. Quality control of soldering of side walls of clamps in current-carrying connections of electric machines taking into account the influence of their sizes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58, 1142–1152. DOI: 10.1134/S1061830922700140.



Подана в журнал: 24.06.2024

УДК 620.179.14

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.181-194

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ МЕДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЙКИ БОКОВЫХ СТЕНОК ХОМУТОВ АМПЛИТУДНЫМ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Л. Х. Коган^{а, *}, А. Н. Сташков^б

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@imp.uran.ru;
^{б)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: lhkogan@imp.uran.ru
Адрес для переписки: ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия
Тел.: +7 (343) 778-38-27

С использованием трансформаторного вихретокового преобразователя с прямоугольными вырезами в полюсах его П-образного сердечника исследовано влияние изменения удельного электросопротивления меди марки М1 в пределах от 0,01724 до 0,01748 мкОм·м согласно ГОСТ 193-79 и ГОСТ 1173-2006 на погрешность определения пропаянности боковых стенок хомутов с выводными концами токоведущих стержней, которые применяются для соединения обмоток статоров в современных конструкциях гидро- и турбогенераторов. Исследования проведены на образцах, изготовленных в разное время и полученных с различных предприятий энергомашиностроения. Установлено, что при изменении относительной разности удельного электросопротивления в пределах 1,36 % погрешность определения уровня пропаянности боковых стенок хомутов не превышает 15,5 %, что необходимо учитывать при проведении вихретокового контроля.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, энергетическое оборудование, токоведущие соединения, удельное электросопротивление, пайка, вихретоковый преобразователь с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника, двухчастотный контроль пайки, достоверность контроля

1. Введение

Электропроводность металлических материалов является важным параметром, используемым для их сортировки, идентификации сплавов, оценки твердости и контроля термообработки. В настоящее время для измерения электропроводности широко используются метод четырехточечного зонда [1, 2] и метод вихревых токов [3, 4]. Вихретоковые методы измерения электропроводности являются неразрушающими и широко применяются благодаря высокой скорости сканирования, простоте и надежности [5–13]. Они применяются при гармоническом или импульсном возбуждении вихревых токов [14].

В работе [15] отмечается, что при импульсном возбуждении получают более полную информацию об объекте контроля, чем при гармоническом возбуждении, и что отсутствует трансформаторная ЭДС, являющаяся причиной дрейфа измеряемого сигнала в случае гармонического возбуждения. Приведены результаты контроля удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов с применением импульсного вихретокового метода [15].

Подробные сведения о применимости импульсного вихретокового контроля приведены в обзорной работе [16].



В конструкциях гидро- и турбогенераторов большой мощности токоведущие соединения обмоток статоров, представляющие собой набор медных шин, соединяются между собой посредством пайки. Место пайки усиливается медными хомутами. Пространство, заполняемое припоем, скрыто хомутом, поэтому визуальный контроль невозможен. Требуется применять методы неразрушающего контроля.

Контролю качества паяных соединений энергетического оборудования с помощью термографических и ультразвуковых неразрушающих методов посвящены статьи [17–19].

Для выявления дефектов в виде пор, трещин, непропаев в неферромагнитных материалах широко используются вихретоковые методы контроля [20]. Возможность выявления дефектов непропая соединений шин сверхпроводящих магнитов в ЦЕРН показана в статье [21].

Контроль качества пайки токоведущих соединений статоров гидро- и турбогенераторов с помощью вихретоковых методов описан в работах [22–27].

В Институте физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН были разработаны методика и устройство для контроля таких изделий [22–24]. В качестве первичного преобразователя применялся трансформаторный вихретоковый преобразователь (ВТП) с П-образным сердечником в виде пластин из трансформаторного железа.

В современных конструкциях гидро- и турбогенераторов применяется соединение стержней с использованием общего для двух стержней хомута, а также соединительных планок [27]. В таких соединениях необходимо контролировать качество пайки боковых стенок хомутов с выводными концами токоведущих стержней. Эта задача была решена в работе [27] путем создания специализированного ВТП с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника [24] и разработки двухчастотной методики контроля. Методика позволила выявлять дефекты пайки боковых стенок хомутов в таких соединениях при вызванных технологией изготовления вариациях их геометрических размеров.

Главным требованием к материалу, используемому для изготовления обмоток статоров, является его низкое удельное электросопротивление (или высокая электропроводность), позволяющее минимизировать потери при выработке и передаче электроэнергии. Поэтому их изготавливают из различных полуфабрикатов меди марки М1 (ГОСТ 193-79 и ГОСТ 1173-2006), которые имеют удельное электросопротивление $0,01724 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ($\sigma = 58,0 \text{ МСм/м}$) и $0,01748 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ($\sigma = 57,21 \text{ МСм/м}$) соответственно. Относительная разница электросопротивления (электропроводности) этих полуфабрикатов составляет 1,36 %.

Несмотря на то что технологии изготовления токоведущих стержней и хомутов, используемых для их соединения в обмотках статоров гидро- и турбогенераторов, их электросопротивление должно быть строго определенной величины, регламентированной нормативной документацией, на практике не исключены случаи, когда одна часть обмоток статора имеет одно сопротивление, а вторая часть – другое, хотя марка меди одна и та же, а именно М1. Токоведущие стержни, состоящие из пакета медных шин, согласно ГОСТ 434-78 должны иметь $\rho = 0,01724 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а соединительные планки, изготавливаемые из холоднокатаных листов (ГОСТ 1173-2006), соответственно, $\rho = 0,01748 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Таким образом, удельное электросопротивление таких токоведущих соединений должно иметь величину в указанных выше пределах, которая будет зависеть от соотношения толщины стержней и соединительных планок.

Вопрос о том, как влияет удельное электросопротивление меди на результаты вихретокового контроля качества пайки описанных выше соединений статоров гидро- и турбогенераторов, остается нерешенным.

Целью данной работы является исследование влияния вариации удельного электросопротивления (электропроводности) меди марки М1 в указанных выше пределах на погрешность определения пропаянности боковых стенок хомутов вихретоковым методом.

2. Образцы и методика измерений

Исследование влияния вариации электросопротивления соединений обмоток статоров на погрешность определения пропаянности боковых стенок хомутов в данной работе проводилось на сплошных образцах из полуфабрикатов меди марки М1:

- а) на образцах, использовавшихся в разное время на различных предприятиях энергетического комплекса страны в 2008 г. (образец 1), в 2010 г. (образец 2) и в 2014 г. (образец 3);
- б) на образце 4, изготовленном из доступной в свободной продаже меди марки М1;
- в) на образцах 5, 6 и 7, которые исследовались в работе [27];
- г) в качестве образца сравнения использовался образец 8, изготовленный из меди марки М2, у которой удельное электросопротивление заведомо больше, чем у меди марки М1.

Изначально образцы 3 и 4 имели меньший размер, чем образцы 5, 6 и 7 ($23,093 \times 50,072 \times 40,0$ мм). Поэтому все эти образцы шлифованием были доведены до одного размера: $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм.

Образцы 1, 2 и 8 имели, соответственно, следующие размеры: $20,9 \times 25,2 \times 38,4$ мм; $11,5 \times 37,5 \times 36,0$ мм; $14,6 \times 44,0 \times 40,0$ мм.

Исследования проводили с использованием трансформаторного ВТП с П-образным сердечником и прямоугольными вырезами в нем (рис. 1).

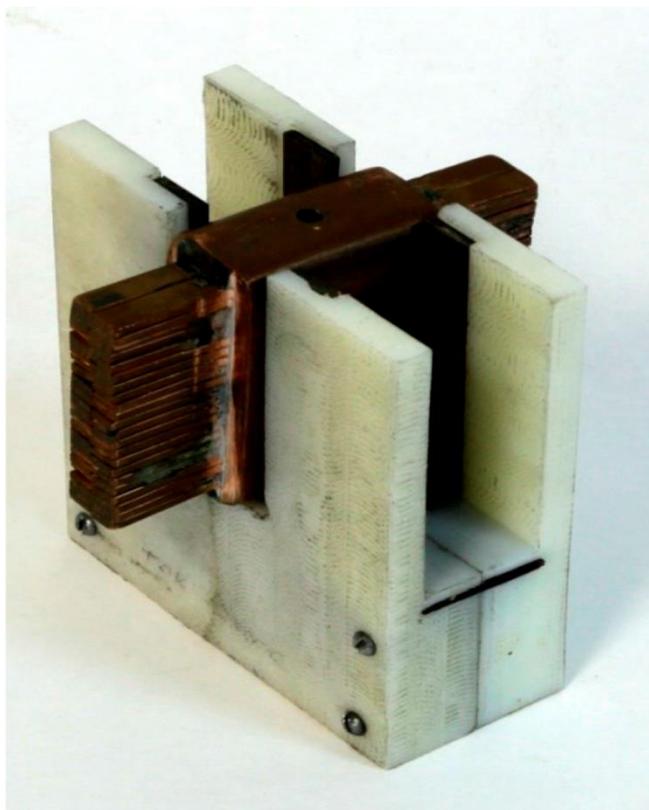


Рис. 1. Внешний вид трансформаторного ВТП с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника

На рис. 2 приведена структурная схема лабораторной установки, использованной в работе для определения возможности контроля качества пайки боковых стенок хомутов.

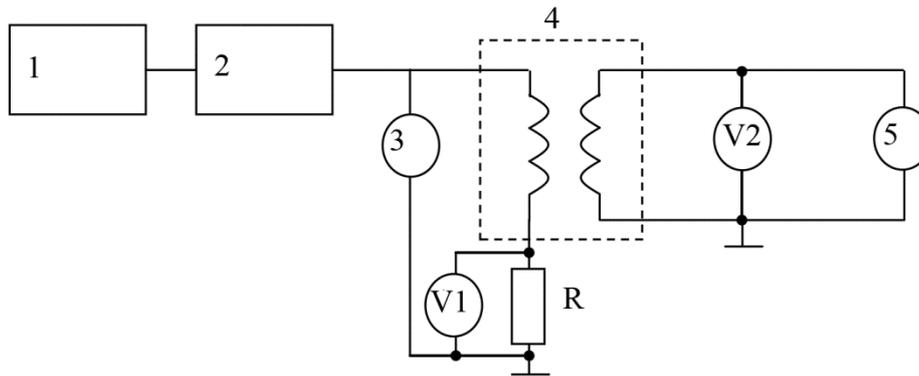


Рис. 2. Структурная схема лабораторной установки: 1 – генератор АК ИП-3409/3; 2 – усилитель тока; 3 – частотомер; 4 – трансформаторный ВТП с П-образным сердечником; 5 – осциллограф; V1 – вольтметр В7-34А, предназначенный для определения величин тока в обмотке возбуждения ВТП; V2 – вольтметр DMM 4040

Образцы помещали в ВТП перпендикулярно полюсам сердечника, что позволяло возбуждать замкнутые вихревые токи в поперечном сечении этих образцов и при контроле реальных паяных соединений определять уровень пропаянности их боковых стенок.

Измерения проводили на двух частотах:

а) на основной частоте 60 Гц при средневыпрямленном значении переменного тока в возбуждающей обмотке ВТП I, равном 200 мА ($\tilde{H} = 30,2$ А/см);

б) на высокой частоте 1460 Гц при средневыпрямленном значении переменного тока в возбуждающей обмотке ВТП I, равном 19,5 мА ($\tilde{H} = 2,9$ А/см), позволяющей проводить измерения независимо от степени пропаянности боковых стенок хомутов.

В работе [27] образец 9, представляющий собой хомут с помещенной в него сплошной медной вставкой, являлся аналогом соединения выводных концов стержней с хомутом, имеющим пропаянность боковых стенок 0 %. Сплошной образец 7 с такой же геометрией имитировал соединение с пропаянностью боковых стенок 100 %.

На основной частоте 60 Гц разность сигналов ВТП при измерении на этих образцах и наличии зазора между поверхностями хомута и вставкой, равной 0,3 мм, составила $\Delta U_{\text{изм}} = 106$ мВ [27].

Вихретоковые измерители электропроводности работают, как правило, на частотах 3 кГц и выше, при этом реальная глубина проникновения электромагнитного поля в соединениях из меди марки М1 не превышает 2,4 мм.

Поскольку исследуемые в работе токоведущие медные соединения имеют существенно бóльшую толщину, необходимо было иметь данные по их электропроводности при бóльшей глубине проникновения в них электромагнитного поля. Поэтому в данной работе для измерения электропроводности образцов использовался накладной трансформаторный ВТП с внешним диаметром обмотки возбуждения 20 мм, позволяющий проводить измерения на более низких частотах.

Для определения электропроводности исследуемых образцов использовалась лабораторная установка, структурная схема которой приведена на рис. 2. В ней вместо ВТП с П-образным сердечником использовался указанный выше накладной ВТП.

Для градуировки показаний измерительной катушки ВТП был использован комплект аттестованных образцов удельной электрической проводимости СО-220 с заводским номером 348 (медная группа СО-220.11, СО-220.12, СО-220.13), изготовленный ООО «Константа» (группа 2). Образцы имели следующие габаритные размеры: диаметр – 25 мм; толщина – 6 мм. Поэтому для определения электропроводности исследуемых образцов из их материала



были дополнительно изготовлены образцы с геометрическими размерами как у аттестованных образцов СО-220 диаметром 25 мм и толщиной 6 мм.

Значения удельной электрической проводимости аттестованных образцов удельной электрической проводимости СО-220 (при температуре $20 \pm 0,5$ °С) составляли:

- а) образец СО-220.11 – 40,5 МСм/м;
- б) образец СО-220.12 – 48,5 МСм/м;
- в) образец СО-220.13 – 58,5 МСм/м.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В таблице 1 приведены результаты измерений на образцах 3, 4, 5, 6, и 7 размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм с использованием ВТП с П-образным сердечником на частотах 60 и 1460 Гц.

Таблица 1

Результаты измерений на образцах размером $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм с использованием ВТП с П-образным сердечником на частотах 60 и 1460 Гц

| № образца | Сигнал ВТП $U_{изм}$ на частоте 60 Гц, В | Сигнал ВТП $U_{изм}$ на частоте 1460 Гц, В |
|-----------|--|--|
| 3 | 51,978 | 89,168 |
| 4 | 51,938 | 89,156 |
| 5 | 51,956 | 89,156 |
| 6 | 51,957 | 89,157 |
| 7 | 51,958 | 89,158 |

Из данных таблицы 1 следует, что при измерении на образцах 5, 6 и 7, которые исследовались в работе [27], на частотах 60 и 1460 Гц величина $U_{изм}$ практически одинакова. При измерении на образце 3 (изготовлен в 2014 г.) на частоте $f = 60$ Гц величина $U_{изм}$ на $20 \div 22$ мВ больше, чем на образцах 5, 6 и 7, а при измерении на образце 4 – меньше на $18 \div 20$ мВ. При измерении на частоте $f = 1460$ Гц эта разница для образца 3 составляет $10 \div 12$ мВ, а для образца 4 сигнал практически такой же, как у образцов 5, 6 и 7. Поскольку образцы имеют одинаковые геометрические размеры, получившиеся результаты указывают на то, что образцы 3 и 4 имеют электропроводность, отличную от электропроводности образцов 5, 6 и 7.

Таким образом, изменение $U_{изм}$ при измерении на частоте 60 Гц на образцах с разной электропроводностью составляет существенную величину (около 40 %) по отношению к разности сигналов ВТП (106 мВ) при измерении на образцах с пропаянностью боковой стенки хомута 0 и 100 %.

Частота 1460 Гц в работе [27] использовалась для учета влияния вариации геометрических размеров соединений, обусловленной технологией их изготовления, на результаты контроля. При изменении их толщины на $\Delta t = 0,50$ мм изменение сигналов ВТП ($\Delta U_{изм}$) составляет 215 мВ [27]. Поскольку при измерении на этой частоте $U_{изм}$ образца 3 отличается от $U_{изм}$ образцов 5, 6 и 7 только на 12 мВ (5,6 %), а $U_{изм}$ образца 4 совсем не отличается, то и их разное электросопротивление несущественно влияет на учет вариации геометрических размеров соединений и, соответственно, на результаты контроля.

На электропроводность меди марки М1, помимо разного количества примесей (влияние ≈ 1 %), существенное влияние оказывает способ получения полуфабриката (влияние до 3 %). Полученные выше результаты, возможно, связаны с тем, что структура образцов 3 и 4 более неоднородна по глубине, чем у образцов 5, 6 и 7.

Помимо этого, поскольку в нашем распоряжении имелись образцы 1, 2 и 3 диаметром 25 мм, изготовленные из полуфабрикатов меди марки М1, которые ранее использовались на



разных предприятиях энергомашиностроения в разное время, можно было определить, насколько их электропроводности отличаются друг от друга.

Результаты измерения сигналов накладного ВТП на частоте $f = 400$ Гц ($I = 10$ мА) и определения электропроводности исследуемых цилиндрических образцов диаметром 25 мм и образцов с размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм, изготовленных из того же материала, приведены в табл. 2.

Значения электропроводности исследуемых образцов диаметром 25 мм, приведенные в табл. 2, были получены после измерения на аттестованных образцах СО-220 сигналов $U_{изм}$ накладного ВТП и определения линейного уравнения, связывающего эту величину с их электропроводностью:

$$\sigma \text{ (МСм/м)} = -3,258 \cdot U_{изм} \text{ (мВ)} + 258,5. \quad (1)$$

Из данных табл. 2 также следует, что при измерениях на образцах размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм значения $U_{изм}$ примерно на 1,1 мВ меньше и, соответственно, электропроводность на $2,8 \div 2,9$ МСм/м больше, чем при измерении на образцах с $\varnothing = 25$ мм. Этот факт, по всей вероятности, связан с краевым эффектом, несмотря на то что диаметр ВТП на 5 мм меньше, чем диаметр аттестованных и исследуемых образцов.

В табл. 3 приведены результаты измерений с помощью ВТП с прямоугольными вырезами в его П-образном сердечнике на образцах 3, 4 и 7 с размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм на частоте 60 Гц при помещении их в эти вырезы перпендикулярно полюсам сердечника и $\Delta U_{изм}$ между ними (см. табл. 1), а также значения их электропроводности (см. табл. 2), рассчитанные по результатам измерений накладным ВТП на частоте $f = 400$ Гц ($I = 10$ мА), и разность этих величин в процентах.

Таблица 2

Результаты измерения сигналов накладного ВТП на частоте $f = 400$ Гц ($I = 10$ мА) и определения электропроводности исследуемых образцов

| Характеристика образца | № образца | СО-220.1 1 | СО-220.1 2 | СО-220.1 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-------------------------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Образец $\varnothing = 25$ мм | $U_{изм}$, мВ | 84,39 | 80,75 | 76,87 | 76,82 | 77,27 | 76,95 | 76,18 | 76,48 | 76,56 | 76,5 | 81,38 |
| | σ , МСм/м | 40,5 | 48,4 | 58,5 | 58,6 | 57,5 | 58,3 | 60,3 | 59,5 | 59,3 | 59,5 | 46,8 |
| Образец $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм | $U_{изм}$, мВ | – | – | – | – | – | 75,85 | 75,09 | 75,38 | 75,46 | 75,4 | – |
| | σ , МСм/м | – | – | – | – | – | 61,2 | 63,1 | 62,4 | 62,2 | 62,3 | – |
| Разности $U_{изм}$ и σ образцов | $\Delta U_{изм}$, мВ | – | – | – | – | – | –1,1 | –1,09 | –1,1 | –1,1 | –1,1 | – |
| | $\Delta \sigma$, МСм/м | – | – | – | – | – | 2,9 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 2,8 | – |



Таблица 3

Результаты измерений на образцах 3, 4 и 7 с помощью ВТП с П-образным сердечником и значения их электропроводности

| № образца | $U_{изм}, В$ | $\Delta U_{изм}, мВ$ | $\sigma, МСм/м$ | $\Delta\sigma/\sigma_{макс} \cdot 100, \%$ |
|-----------|--------------|----------------------|-----------------|--|
| 3 | 51,978 | 20,0 | 58,3 | 2,02 |
| 7 | 51,958 | | 59,5 | |
| 3 | 51,978 | 40,0 | 58,3 | 3,32 |
| 4 | 51,938 | | 60,3 | |

Из данных табл. 3 следует, что при измерении на образцах 3 и 7 относительное изменение электропроводности на 1 % приводит к изменению $\Delta U_{изм} = 20 мВ / 2,02 = 9,9 мВ$. Тогда, если относительная разность электропроводности полуфабрикатов меди марки М1, из которых изготавливаются обмотки статоров гидро- и турбогенераторов, не будет превышать 1,36 %, то изменение сигнала ВТП не должно превышать $\Delta U_{изм} = 9,9 мВ \cdot 1,36 = 13,46 мВ$.

Поскольку разность сигналов ВТП при измерении на образцах с пропаянностью боковой стенки 0 и 100 % составляет $\Delta U_{изм} = 106 мВ$, то максимальная погрешность определения качества пайки из-за вариации электропроводности меди в указанных выше пределах составит 12,7 %.

Также из данных табл. 3 следует, что при измерении на образцах 3 и 4 при изменении относительной электропроводности на 1 % $\Delta U_{изм} = 40 мВ / 3,22 = 12,05 мВ$. Соответственно, погрешность определения качества пайки боковой стенки соединения составляет 15,5 %.

В табл. 4 приведены значения электропроводности образцов с $\varnothing = 25 мм$ (см. табл. 2), изготовленных из полуфабрикатов меди марки М1, которые ранее использовались на разных предприятиях энергомашиностроения в разное время, и разность их значений в процентах.

Таблица 4

Значения электропроводности и ее разность у образцов диаметром 25 мм, изготовленных в разное время

| № образца | Год изготовления | $\sigma, МСм/м$ | $\Delta\sigma/\sigma_{макс} \cdot 100, \%$ |
|-----------|------------------|-----------------|--|
| 1 | 2008 | 58,6 | 1,88 |
| 2 | 2010 | 57,5 | |
| 3 | 2014 | 58,3 | |

Следует отметить, что материал, из которого изготавливались образцы 1–3, не использовался для создания таких токоведущих соединений, которые исследовались в работе [27] и состояли из токоведущих стержней и соединяющих их хомутов.

Результаты исследований (см. табл. 2) показывают, что при использовании накладного ВТП преобразователя с диаметром обмотки возбуждения $\varnothing = 20 мм$ возможно неразрушающим методом определять удельную электропроводность медных заготовок из меди марки М1, имеющих прямоугольную форму, при большой глубине проникновения в них электромагнитного поля. Для этого необходимо иметь следующие образцы:

а) комплект аттестованных образцов удельной электрической проводимости СО-220, медная группа с диаметром $\varnothing = 25 мм$ и толщиной 6 мм;

б) медную заготовку прямоугольной формы и изготовленный из нее же образец диаметром 25 мм и толщиной 6 мм.



Методика определения электропроводности медных заготовок из меди марки М1 заключается в следующем:

- а) производится измерение величины $U_{изм}$ на аттестованных образцах СО-220 и определяется линейное уравнение связи этой величины с электропроводностью образцов СО-220;
- б) производится измерение величины $U_{изм}$ на медной заготовке прямоугольной формы и изготовленном из нее же образце диаметром 25 мм и толщиной 6 мм, и по линейному уравнению рассчитывается их электропроводность;
- в) определяется величина $\Delta\sigma$ (МСм/м) при измерении на них;
- г) определяется электропроводность медной заготовки с учетом величины $\Delta\sigma$ (МСм/м), полученной при измерении на этих образцах.

Результаты измерения сигналов накладного ВТП на частоте $f = 2,0$ кГц ($I = 10$ мА) и определения электропроводности исследуемых цилиндрических образцов диаметром 25 мм и образцов с размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм, изготовленных из того же материала, приведены в табл. 5.

Значения электропроводности исследуемых образцов с $\varnothing = 25$ мм, приведенные в табл. 5, также как и при измерении на частоте $f = 400$ Гц, были получены после измерения на аттестованных образцах СО-220 сигналов накладного ВТП с $\varnothing = 20$ мм ($U_{изм}$) и определения линейного уравнения, связывающего эту величину с их электропроводностью:

$$\sigma \text{ (МСм/м)} = -0,815 \cdot U_{изм} \text{ (мВ)} + 260,2. \quad (2)$$

Таблица 5

Результаты измерения сигналов накладного ВТП при измерении на частоте $f = 2$ кГц ($I = 10$ мА) и определения электропроводности исследуемых образцов

| Характеристика образца | № образца | СО-220.11 | СО-220.12 | СО-220.13 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Образец $\varnothing = 25$ мм | $U_{изм}$, мВ | 271,3 | 260,0 | 247,6 | 248,2 | 249,8 | 249,6 | 247,5 | 248,2 | 248,5 | 248,5 | 264,3 |
| | σ , МСм/м | 40,5 | 48,4 | 58,5 | 57,9 | 56,6 | 56,8 | 58,5 | 57,9 | 57,7 | 57,7 | 44,8 |
| Образец $23,093 \times 40,306 \times 40,0$ мм | $U_{изм}$, мВ | – | – | – | – | – | 247,0 | 244,9 | 245,6 | 245,9 | 245,9 | – |
| | σ , МСм/м | – | – | – | – | – | 58,9 | 60,6 | 60,0 | 59,8 | 59,8 | – |
| Разности $U_{изм}$ и σ образцов | $\Delta U_{изм}$, мВ | – | – | – | – | – | –2,6 | –2,6 | –2,6 | –2,6 | –2,6 | – |
| | $\Delta\sigma$, МСм/м | – | – | – | – | – | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | – |

В таблице 6 приведены результаты измерений ВТП с прямоугольными вырезами в его сердечнике на образцах 3 и 4 размерами $23,093 \times 44,306 \times 40,0$ мм на частоте 1460 Гц (см. табл. 1), а также значения их электропроводности (см. табл. 5), рассчитанные по резуль-



татам измерений накладным ВТП на частоте $f = 2,0$ кГц ($I = 10$ мА), и разность этих величин в процентах.

Таблица 6

Результаты измерений на образцах 3 и 4 с помощью ВТП с П-образным сердечником и значения их электропроводности

| № образца | $U_{\text{изм}}, \text{В}$ | $\Delta U_{\text{изм}}, \text{мВ}$ | $\sigma, \text{МСм/м}$ | $\Delta\sigma/\sigma_{\text{макс}} \cdot 100, \%$ |
|-----------|----------------------------|------------------------------------|------------------------|---|
| 3 | 89,168 | 12,0 | 56,8 | 2,91 |
| 4 | 89,156 | | 58,5 | |

Из данных таблицы 6 следует, что при измерении на этих образцах $\Delta U_{\text{изм}}$ составляет величину $12 \text{ мВ} / 2,91 = 4,12 \text{ мВ}$ (при изменении электропроводности на 1 %). Тогда, если относительная разность электропроводности полуфабрикатов меди марки М1, из которых изготавливаются обмотки статоров гидро- и турбогенераторов, не будет превышать $\Delta\sigma = 1,36 \%$, то $\Delta U_{\text{изм}} = 4,12 \text{ мВ} \cdot 1,36 = 5,6 \text{ мВ}$.

Из данных работы [27] при измерении на частоте 1460 Гц ВТП с прямоугольными вырезами в его сердечнике при изменении толщины контролируемых соединений относительно номинальной толщины (23,3 мм) на $\pm 0,1$ мм следует, что $\Delta U_{\text{изм}} = 89$ мВ. Следовательно, вариация относительной разности электропроводности полуфабрикатов меди марки М1 на 1,36 %, как уже указывалось ранее, несущественно ($\pm 3,1 \%$) влияет на учет изменения геометрических размеров соединений при измерении на частоте $f = 1460$ Гц и на результаты контроля качества пайки боковых стенок хомутов.

4. Заключение

Установлено, что вариация относительной разности удельного электросопротивления (электропроводности) на 1,36 % согласно ГОСТ 193-79 и ГОСТ 1173-2006 полуфабрикатов меди марки М1, из которых изготавливаются токоведущие обмотки статоров гидро- и турбогенераторов, приводит к появлению погрешности определения степени пропаянности их боковых стенок до 15,5 %, что необходимо учитывать при проведении вихретокового контроля.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО «Константа» Сясько В. А. и Соломенчуку П. В. за предоставленный комплект аттестованных образцов удельной электрической проводимости СО-220.

Литература

1. Broad review of four-point probe correction factors: enhanced analytical model using advanced numerical and experimental cross-examination / A. Chelly, S. Glass, J. Belhassen, A. Karsenty // Results in Physics. – 2023. – Vol. 48. – P. 106445–106454. – DOI: 10.1016/j.rinp.2023.106445.
2. Evaluation of 475°C embrittlement in UNS S32750 super duplex stainless steel using four-point electric conductivity measurements / G. Gutiérrez-Vargas, A Ruiz., V. H. López-Morelos, J.-Y. Kim, J. González-Sánchez, A. Medina-Flores // Nuclear Engineering Technology. – 2021. – Vol. 53 (9). – P. 2982–2989. – DOI: 10.1016/j.net.2021.03.018.



3. Conductivity estimation of non-magnetic materials using eddy current method / P. Huang, Y. Ding, J. Li, L. Xu, Y. Xie // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2022. – Vol. 38 (1). – P. 130–146. – DOI: 10.1080/10589759.2022.2077939.
4. A decay time approach for linear measurement of electrical conductivity / C. Ye, Z. Su, A. Rosell, L. Udpa, S. Udpa, T. Capobianco, A. Tamburrino // *NDT & E International*. – 2019. – Vol. 102. – P. 169–174. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.001.
5. Mirzaei M., Ripka P., Grim V. Conductivity measurement of nonferrous plates using a novel sensor with triangular arrangements of triple coils // *2022 Joint MMM InterMag Conference (INTERMAG)*, New Orleans, LA, USA, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827796.
6. Electromagnetic and eddy current NDT in weld inspection: a review / P. Gao, C. Wang, Y. Li, Z. Cong // *Insight*. – 2015. – Vol. 57 (6). – P. 337–345. – DOI: 10.1784/insi.2015.57.6.337.
7. Eddy current sensor and inversion technique for estimation of the electrical conductivity profile of the graphite bricks in an advanced gas-cooled reactor core / H. Tesfalem, A. Peyton, A. Fletcher, M. Brown, B. Chapman // *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XX). Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Series*. – 2017. – Vol. 42. – P. 253–264. – DOI: 10.3233/978-1-61499-767-2-253. – Available at: <https://ebooks.iospress.nl/publication/46626>
8. Ma X., Peyton A. J., Zhao Y. Y. Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals // *NDT & E International*. – 2006. – Vol. 39. – P. 562–568. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.03.008.
9. Ma X., Peyton A. J. Eddy current measurement of the electrical conductivity and porosity of metal foams // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2006. – Vol. 55 (2). – P. 570–576. – DOI: 10.1109/TIM.2006.873549.
10. Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards / Z. Huang, J. Zhu, X. Wu, R. Qiu, Z. Xu, J. Ruan // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 312. – P. 127755–127762. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127755.
11. Eddy currents: theory and applications / E. E. Kriezis, T. D. Tsiboukis, S. M. Panas, J. A. Tegopoulos // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – Vol. 80 (10). – P. 1559–1589. – DOI: 10.1109/5.168666.
12. Eddy current testing of conductive materials / H. G. Ramos, A. L. Ribeiro, P. Jezdik, J. Neskudla // *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. – 2008. – P. 964–968. – DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547176.
13. De Halleux B., De Limburg Stirum B., Pchelintsev A. Eddy current measurement of the wall thickness and conductivity of circular non-magnetic conductive tubes // *NDT & E International*. – 1996. – Vol. 29. – P. 103–109. – DOI: 10.1016/0963-8695(96)00001-1.
14. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. – Т. 2, кн. 2 : Вихретоковый контроль. – М. : Машиностроение, 2003. – 688 с.
15. Terekhin I. V., Slavinskaya E. A. Evaluating specific electrical conductivity of two-layered nonmagnetic objects by pulsed eddy-current method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. 55. – P. 286–292. – DOI: 10.1134/S1061830919040120.
16. Sophian A., Tian G., Fan M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 30. – P. 500–514. – DOI: 10.1007/s10033-017-0122-4.
17. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography / C. Maierhofer, M. Röllig, H. Steinfurth, M. Ziegler, M. Kreutzbruck, C. Scheuerlein, S. Heck // *NDT & E International*. – 2012. – Vol. 52. – P. 103–111. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
18. Phased Array Ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets / R. Principe, L. M. Vallejo, J. Bailey, R. Berthet, L. Favier, L. Grand-Clement, F Savary // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2018. – Vol. 28 (4). – P. 1–8. – DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.



19. Малый В. В., Костюхин А. С., Кинжагулов И. Ю. Разработка технологии неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов и определение принципов её автоматизации // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2022. – № 3 (61). – С. 11–17.
20. Дорофеев А. Л. Электро-индуктивная дефектоскопия. – М. : Машиностроение. – 1967. – 231 с.
21. Eddy current of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets / L. Kogan, A. Nichipuruk, F. Savary, R. Pricipe, V., Datskov E. Rozenfeld, B. Khudjakov // *Insight*. – 2015. – Vol. 57 (12). – P. 697–702. – DOI: 10.1784/insi.2015.57.12.697.
22. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles / E. V. Rozenfeld, A. P. Nichipuruk, L. K. Kogan, B. A. Khudyakov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2010. – Vol. 46. – P. 281–291. – DOI: 10.1134/S1061830910040066.
23. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment / L. K. Kogan, A. P. Nichipuruk, E. V. Rozenfeld, B. A. Khudyakov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2010. – Vol. 46 – P. 292–301. – DOI: 10.1134/S1061830910040078.
24. Kogan L. K., 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. – Vol. 54. – P. 784–791. – DOI: 10.1134/S1061830918110049.
25. Контроль качества паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов на заводе «Электросила» / В. А. Сясько, М. Б. Ройтгарц, М. Ю. Коротеев, П. В. Соломенчук // *В мире неразрушающего контроля*. – 2010. – № 2 (48). – С. 1–9.
26. A finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings / A. I. Potapov, V. A. Syasko, M. Y. Koroteev, P. V. Solomenchuk // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2014. – Vol. 50. – P. 264–273. – DOI: 10.1134/S1061830914050064.
27. Kogan L. K., Stashkov A. N., Nichipuruk A. P. Quality control of soldering of side walls of clamps in current-carrying connections of electric machines taking into account the influence of their sizes // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2022. – Vol. 58. – P. 1142–1152. – DOI: 10.1134/S1061830922700140.