

# МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.

Уфимский государственный авиационный технический университет

## ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Изделия из композиционных материалов нашли широкое применение благодаря своим прочностным и жесткостным характеристикам, а также коррозионной стойкости. Однако в процессе эксплуатации в композиционных материалах накапливаются микрповреждения, которые со временем могут привести к потере работоспособности конструкции. Различные дефекты появляются и при изготовлении композиционных материалов. Поскольку разрушение композиционных материалов изучено менее подробно, чем металлов, их использование в изделиях с повышенными требованиями к надежности сопряжено с некоторой долей риска. Для удовлетворения высоких требований по надежности необходимо применять современные методы неразрушающего контроля, позволяющие выявить имеющиеся внутренние дефекты, локализовать их положение и определить линейные геометрические размеры. Большинство традиционно применяющихся методов неразрушающего контроля присущи определенные недостатки, не позволяющие зачастую получить качественную и наиболее полную информацию об имеющихся дефектах. Композиционные материалы также находят все более широкое применение в электрических машинах, что позволяет повысить их удельные характеристики. В электрических машинах наиболее нагруженными узлами являются вал, бандажная оболочка ротора, зубцы статора, а также подшипниковые узлы. Поэтому использование композиционных материалов в данных узлах требует создания диагностических комплексов для определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций.

В данной работе представлены методы неразрушающего контроля изделий из композитных материалов. Описаны известные методы контроля технического состояния узлов электрических машин, состоящих из композитных материалов. В статье также представлен разработанный метод вихрекового контроля для бандажных оболочек роторов из углеродного волокна.

**Ключевые слова:** диагностика, композитные материалы, неразрушающий контроль, вихрековый метод, электрические машины.

### ВВЕДЕНИЕ

Изделия из композиционных материалов (КМ) нашли широкое применение благодаря своим прочностным и жесткостным характеристикам, а также коррозионной стойкости. Однако в процессе эксплуатации в КМ накапливаются микрповреждения, которые со временем могут привести к потере работоспособности конструкции. Различные дефекты появляются и при изготовлении КМ. Поскольку разрушение КМ изучено менее подробно, чем металлов, их использование в изделиях с повышенными требованиями к надежности сопряжено с некоторой долей риска [1].

Для решения данных проблем необходимо проводить диагностику дефектов как отдельных изделий, так и сборных конструкций. При этом проводится диагностика внутренних дефектов (расслоение, пустоты, посторонние включения, трещины), контроль сборочных конструкций (клеевых и формовых соединений), а также определение остаточного ресурса теплофизическими, эндоскопическими, вибрационными и другими методами контроля.

Кроме того, целесообразным является создание общей базы данных, в которой будет содержаться информация об известных дефектах, причинах и особенностях аварий, условиях эксплуатации и материалах. Это позволит сформировать статистический фонд, который в перспективе поможет предотвращать наиболее распространенные проблемы.

При этом широкое распространение получила программа FARGR [2], используемая для получения кри-вых деформирования КМ вплоть до разрушения. Данный подход является привлекательной альтернативой трудоемким исследованиям нелинейных задач методами конечных элементов.

Структура КМ следующая: неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, включая армирующие элементы (волокна), определяющие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

КМ находят широкое применение в электрических машинах, что позволяет повысить их удельные характеристики. В работе [3] представлен обзор применения КМ в узлах ЭМ где определены области применения КМ в ЭМ, приведены их достоинства и недостатки и показаны конкретные примеры реализации. Исходя из перспективности применения КМ в ЭМ, в работе [4] приведена оценка ЭМ методами конечных элементов, узлы которой полностью состоят из КМ.

В ЭМ наиболее нагруженными узлами являются вал, бандажная оболочка ротора, зубцы статора, а также подшипниковые узлы. Поэтому использование КМ в данных узлах требует создания диагностических комплексов для определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций. Диагностика статоров из магнитомягких композитных материалов и валов из углеродного волокна описывается в работах [5-7].

Для удовлетворения высоких требований по надежности необходимо применять современные методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие выявить имеющиеся внутренние дефекты, локализовать их положение и определить линейные геометрические размеры. В настоящее время для контроля КМ применяют следующие методы: оптический, акустический (импедансный и велосиметрический), тепловой, радиоволновой и радиационный [8-11].

Большинству традиционно применяющихся методов НК присущи определенные недостатки, не позволяющие зачастую получить качественную и наиболее полную информацию об имеющихся дефектах. Цель данной статьи – представить способ неразрушающего контроля КМ в ЭМ.

ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ БАНДАЖНОЙ  
ОБОЛОЧКИ РОТОРА ЭМ

Объектом исследования в данной работе является высокооборотная ЭМ для микротурбинных установок, основные параметры для построения компьютерной модели представлены в табл. 1.

Объектом исследования в данной работе является высокооборотная ЭМ для микротурбинных установок, основные параметры для построения компьютерной модели представлены в табл. 1.

Бандажные оболочки роторов, применяемые в высокоскоростных ЭМ с постоянными магнитами, являются наиболее ответственными узлами, так как повреждение бандажной оболочки ротора может привести к разрушению электрической машины, без возможности восстановления. В то же время толщина бандажной оболочки должна быть как можно меньше для обеспечения высоких энергетических характеристик ЭМ. С появлением бандажных оболочек из углеродного волокна стало возможным снижение их толщины за счет более высокой прочности по сравнению с металлами. В связи с вышеперечисленным контроль технического состояния бандажной оболочки ротора из КМ является важной задачей при эксплуатации ЭМ. Наиболее перспективным методом для этого является вихреетоковый метод контроля, основанный на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики (электрическими характеристиками материала) и свойствами КМ [13, 14].

Основной инструмент исследований – вихревые токи. На рис. 1 представлена схема вихреетокового контроля бандажной оболочки ротора из углеродного волокна.

Таблица 1  
Основные параметры высокооборотной ЭМ

Параметр	Значение
Выходная мощность, кВт	100
Выходное линейное напряжение, В	400
Частота вращения, об/мин	60000
Внешний диаметр корпуса, мм	177
Материал корпуса	Алюминий
Внешний диаметр статора, мм	137
Внутренний диаметр статора, мм	70
Число пазов статора	24
Активная длина статора, мм	165
Материал магнитопровода статора	Сталь 2411
Число витков в фазе	8
Число слоев обмотки статора	1
Число жил в проводнике	20
Диаметр жилы, мм	0,8
Материал проводников	медь
Внешний диаметр ротора, мм	60
Активная длина ротора, мм	180
Материал магнитопровода ротора	30ХГСА
Число полюсов ротора	4
Высота постоянных магнитов, мм	9
Материал постоянных магнитов	SmCo
Толщина бандажной оболочки ротора, мм	4
Материал бандажной оболочки ротора	Углеродное волокно CFRP 231 [12]

На рис. 1: постоянные магниты 1, ротор 2, бандаж из углеродного волокна 3, магнитопровод статора 4, обмотка статора 5, вихреетоковые преобразователи 6, источник переменного напряжения 7, блок фильтрации и усиления 8, аналого-цифровой преобразователь 9, компьютер 10.

При определенном угловом положении ротора в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна от источника питания переменного напряжения высокой частоты посредством вихреетокового преобразователя возбуждают вихревой ток. При этом вихреетоковые преобразователи при различных режимах совмещают работу источника переменного поля и датчика изменения магнитного поля, и выполняют в виде дополнительных катушек, расположенных на кромках зубцов статора ЭМ. За счет этого в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна под действием «скин-эффекта» на поверхностном и подповерхностном слое на глубине в несколько миллиметров наводятся вихревые токи. Вихревые токи в бандажной оболочке ротора из углеродного волокна создают переменное магнитное поле. Далее снимают переменное напряжение высокой частоты, и вихреетоковые преобразователи работают в качестве датчиков изменения магнитного поля. В бандажной оболочке ротора из углеродного волокна, не содержащем дефектов в виде обрыва углеродных волокон, вихревые токи генерируют противодействующее переменное магнитное поле, которое наводит в вихреетоковом преобразователе, работающем в качестве датчика изменения магнитного поля, высокочастотную электродвижущую силу, которую фильтруют и усиливают по одной частоте в блоке фильтрации и усиления, далее оцифровывают в блоке аналого-цифрового преобразователя и передают в статистическую базу данных на компьютере. При возникновении дефекта, наведенные в бандаже вихревые токи меняют свои величины, значит, и наведенная данным полем амплитуда высокочастотной электродвижущей силы также изменится. Далее сравнивают амплитуды сигналов высокочастотной электродвижущей силы исправного и дефектного бандажа и определяют величину дефекта. Своевременное обнаружение дефекта на его ранних стадиях позволяет повысить надежность при эксплуатации электрической машины.

Для определения работоспособности описанного метода вихреетокового контроля было проведено исследование методами конечных элементов. На рис. 2 представлен вид компьютерной модели ЭМ с вихреетоковыми преобразователями.

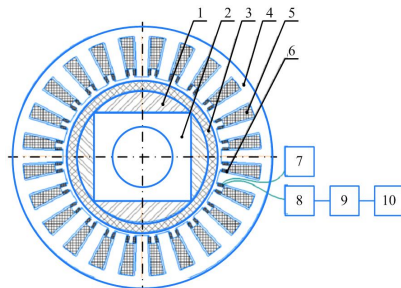


Рис. 1. Схема вихреетокового контроля

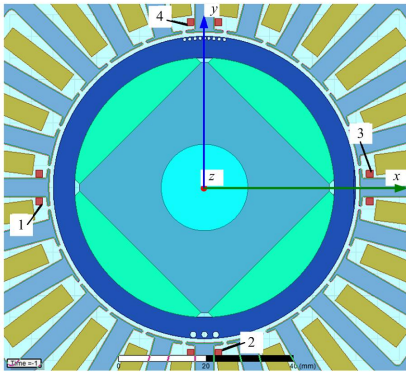


Рис. 2. Вид компьютерной модели ЭМ с вихревыми преобразователями

В табл. 2 представлены результаты расчета для конструкции ЭМ без вихревых датчиков и конструкции с вихревыми датчиками.

Как видно из табл. 2, установка дополнительных датчиков в пазы статора ведет к повышению массы ЭМ на 3,6% и снижению КПД на 0,12% ввиду увеличения высоты зубцов статора.

На рис. 2 номерами 1-4 обозначены вихрековые преобразователи, при этом под вихрековым преобразователем 1 бандажная оболочка была без дефектов, а под преобразователями 2-4 были помещены дефекты в виде пустот различной величины, имитирующих обрывы углеродных волокон. Частота напряжения в вихрековых преобразователях составляла 4000 Гц.

На рис. 3 представлены кривые напряжений, наведенные под действием вихревых токов в вихрековых преобразователях.

На рис. 3 кривые под номерами 1-4 соответствуют номерам вихрековых преобразователей представленных на рис. 2.

Из рис. 3 видно, что дефекты в бандажной оболочке под вихрековыми преобразователями 2-4 наводят напряжение на 0,2...0,4% выше чем под исправным участком 1.

На рис. 4 представлено распределение плотности вихревых токов в бандажной оболочке ротора ЭМ.

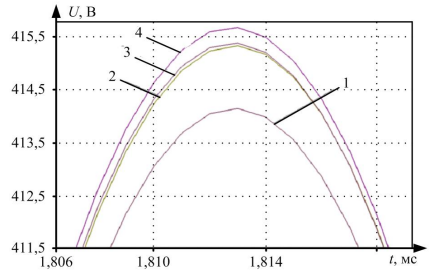


Рис. 3. Кривые напряжений, наведенные под действием вихревых токов

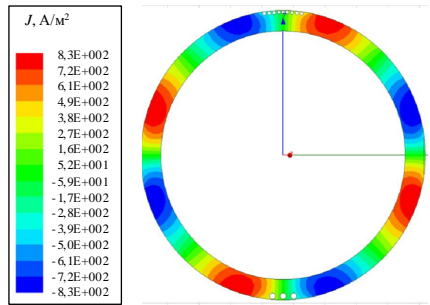


Рис. 4. Распределение вихревых токов в бандажной оболочке ротора ЭМ

Как видно из рис. 4, ввиду низких значений плотностей вихревых токов, влиянием температуры углеволоконного бандажа на результаты измерения вихрековых датчиков можно пренебречь.

Данный метод может найти применение в контроле технического состояния углеволоконных бандажных оболочек роторов ЭМ без необходимости полной разборки самой ЭМ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, расширение области применения КМ требует создания диагностической базы для своевременного определения дефектов. Представленный метод вихрекового контроля бандажной оболочки из углеродного волокна обеспечивает диагностирование величины дефектов бандажных оболочек из углеродного волокна, а также повышение надежности при эксплуатации электрических машин.

*Работа выполнена при поддержке гранта МК-508.2019.8.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Ф.А. Контроль деформированного состояния и диагностика повреждений композиционных материалов с помощью чувствительных элементов на базе углеродных нитей: дис. ... канд. тех. наук. 05.11.13 / Басов Федор Александрович. Москва, 2006.
2. S. Sapozhnikov, A. Shabley. Numerical evaluation of the microdamage kinetics of cross-ply GFRPs based on stochastic micro-meso modeling ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 24-28th June 2018, pp. 24-28.

Таблица 2

Основные параметры высокооборотной ЭМ

Параметр	ЭМ без датчиками	ЭМ с датчиками
Коэффициент заполнения паза, %	55	63
Полные потери, Вт	3780,7	3823,7
КПД, %	96,22	96,1
Масса магнитопровода статора, кг	7,05	7,1
Масса обмотки статора, кг	5,3	6,1
Масса ротора (вал, подшипники, спинка ротора, постоянные магниты, бандаж ротора), кг	5,68	5,68
Масса корпуса, кг	5,3	5,3
Полная масса, кг	23,33	24,18
Удельная масса, кг/кВт	0,23	0,24

3. К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (обзор) / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 9. С. 17-32.
4. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф., Нургалиева Р.А. Оценка эффективности полностью композитных электрических машин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 4. С. 32-39.
5. T.P. Hong, P. Gonon and O. Lesaint. Water absorption in a glass-mica-epoxy composite, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 1, pp. 11-16, February 2009.
6. L. Ferraris, E. Poskovic and F. Franchini Defects detection in laminated and soft magnetic composites devices with a novel thermographic method, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 585-590.
7. Ломазов В. А. Математическая модель тепловой диагностики композитного материала, армированного однонаправленным семейством волокон // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 7. С. 110–115.
8. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов / А.А. Белов, Ю.Д. Иванов, А.А. Шестаков, С.Г. Царева, Н.С. Черницов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. №1. С. 56-59.
9. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
10. Воробьев В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композиционных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. 190 с.
11. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПМК / Б.В. Бойцов, С.Л. Васильев, А.Г. Громашев, С.А. Юргенсон // Труды МАИ. 2011. Вып. №49. С. 1-11.
12. Funck R., (2015). Composite materials in high efficient sleeve applications of electric machines. Circomp GmbH. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf>, дата обращения 04.12.18.
13. Саввинова М.Е. Электропроводящие полимерные композиционные материалы электротехнического назначения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №4. С. 44-49.
14. Голев И. М., Иванова О. М., Бакин К. И. Исследование электрических свойств композитного углеродного материала // Молодой ученый. 2015. №2. С. 5-10.

Поступила в редакцию 28 марта 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### DIAGNOSTICS OF COMPOSITE MATERIALS IN ELECTRICAL MACHINES

Flur R. Ismagilov

D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>.

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>.

Ildus F. Sayakhov

Engineer, a post-graduate student, the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: [isayakhov92@mail.ru](mailto:isayakhov92@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8545-9862>

Products made of composite materials are widely used due to their strength and stiffness characteristics as well as corrosion resistance. However, in the course of operation, microdamages accumulate in composite materials, which, over time can lead to a loss of design performance. Various defects appear in the manufacture of composite materials. Since the destruction of composite materials is studied in less detail than metals, their use in products with increased requirements for reliability is associated with some degree of risk. To meet the high demands on reliability, it is necessary to apply modern methods of non-destructive testing, which allow identifying existing internal defects, localizing their position and determining linear geometric dimensions. Most of the traditionally used methods of non-destructive testing have certain disadvantages, which often make it impossible to obtain high-quality and most complete information about the defects. Composite materials are also becoming more widely used in electrical machines, which allows them to increase their specific characteristics. In electrical machines, the most loaded units are the shaft, the rotor banding, the stator teeth and bearing units. Therefore, the use of composite materials in these sites requires the creation of diagnostic systems to determine the residual resource and prevent accidents.

This paper presents methods for non-destructive testing of products made of composite materials. The main advantages and disadvantages of each method are given. The article also presents the developed method of eddy current testing for the carbon fiber rotor banding.

**Keywords:** diagnostics, composite materials, non-destructive testing, eddy current method, electrical machines.

#### REFERENCES

1. Basov F.A. *Kontrol deformirovannogo sostoyaniya i diagnostika povrezhdeniy kompozitsionnykh materialov s pomoshchyu chuvstvitelnykh elementov na baze uglerodnykh nitay*. Kand. Diss. [Control of the deformed state and diagnosis of damage to composite materials with the help of sensitive elements based on carbon filaments. Ph.D. Diss.], Moscow, 2006.
2. Sapozhnikov S., Shabley A. Numerical evaluation of the microdamage kinetics of cross-ply GFRPs based on stochastic micro-meso modeling ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 24-28th June 2018, pp. 24-28.
3. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Sayakhov I.F. The use of composite materials in electric machines (review). *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2018, no. 9, pp. 17-32. (In Russian).
4. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Sayakhov I.F., Nurgaliyeva R.A. Evaluation of the effectiveness of fully composite electrical machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2018, vol. 61, no. 4, pp. 32-39. (In Russian).
5. Hong T.P., Gonon P. and Lesaint O. Water absorption in a glass-mica-epoxy composite [II: field distribution and diag-

- nostic in a stator bar geometry], IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 1, pp. 11-16, February 2009.
  6. Ferraris L., Poskovic E. and Franchini F. Defects detection in laminated and soft magnetic composites devices with a novel thermographic method, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 585-590.
  7. Lomazov V. A. Mathematical model of heat diagnostics of a composite material reinforced by one-directed fibre family. *Matematicheskoe modelirovaniye* [Mathematical modeling], 1990, vol. 2, no. 7, pp. 110–115. (In Russian).
  8. Belov A.A., Ivanov YU.D., Shestakov A.A., Tsareva S.G., Chernitsov N.S. Modern methods of diagnosing objects made of composite materials. *Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2015, no. 1, pp. 56-59. (In Russian).
  9. Klyuyev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika. Spravochnik* [Nondestructive testing and diagnostics. Reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 656 p. (In Russian).
  10. Vorobyev V.V., Markin V.B. *Kontrol kachestva izgotovleniya i tekhnologiya remonta kompozitsionnykh konstruksiy* [Quality control of manufacturing and repair technology of composite structures]. Novosibirsk: Nauka, 2006. 190 p. (In Russian).
  11. Boytsov B.V., Vasilyev S.L., Gromashev A.G., Yurgenson S.A. Nondestructive testing methods used for structures made of PMK. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI], 2011, no. 49, pp. 1-11. (In Russian).
  12. Funck R., (2015). Composite materials in high efficient sleeve applications of electric machines. Circomp GmbH. Access mode: <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf>, date of application 04.12.18.
  13. Savvinova M.E. Electrically conductive polymer composite materials for electrical use, *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of universities. North Caucasus region. Technical Sciences], 2015, no. 4, pp. 44-49. (In Russian).
  14. Golev I.M., Ivanova O.M., Bakin K.I. Study of the electrical properties of composite carbon material. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 2, pp. 5-10. (In Russian).
- 

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф. Диагностика композитных материалов в электрических машинах // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 65-69. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. Diagnostics of Composite Materials in Electrical Machines. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 65-69. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69)

---