

**КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГЕОМЕТРИИ ШИН ОБМОТОК
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Иваненко В.А.^{1,2}, Нуреев И.И.¹, Сахабудинов А.Ж.¹,
Мисбахов Рус.Ш.¹, Артемьев В.И.¹, Телишев А.М.²*

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²АО «Научно-производственное объединение «Каскад»
428027, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Хузангая, д.18 корпус 1

Аннотация: Силовые трансформаторы (СТ) играют основополагающую роль в системах передачи электроэнергии от источника до потребителя и относятся к классу наиболее важного и дорогостоящего оборудования, используемым в электроэнергетике. В связи с этим диагностика их дефектов и контроль параметров на месте дает множество преимуществ для обеспечения надежной передачи электроэнергии. Невосприимчивость к электромагнитным помехам, изоляционная стойкость, высокая чувствительность и разрешающая способность, а также малые габариты волоконно-оптических датчиков (ВОД) делают их очень привлекательными для применения в системах мониторинга параметров надежности СТ. Наиболее широкий спектр приложений в СТ нашли ВОД температуры, влажности и деформации обмоток. В статье представлен краткий анализ ВОД температуры и контроля геометрии обмоток СТ, отмечены их достоинства и недостатки, и поставлена задача научных исследований для разработки нового типа датчиков с радиофотонным адресным опросом – комбинированных адресных волоконных брэгговских структурах (АВБС) фазоволнового типа и систем контроля температуры и геометрии шин обмоток на их основе. Определены направления научных исследований для достижения цели исследований - улучшение метрологических и технико-экономических характеристик волоконно-оптических многосенсорных систем контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов на основе использования в них АВБС комбинированного типа как чувствительных элементов и элементов мультиплексирования.

Ключевые слова: радиофотоника; энергетика; силовые трансформаторы, обмотка, контроль сжатия, волоконно-оптический датчик, адресные волоконные брэгговские структуры фазового, волнового и фазоволнового типа, обработка в радиодиапазоне полученной в оптическом диапазоне частотной информации.

Введение

Силовые трансформаторы (СТ) играют жизненно важную роль в системах цифровой электроэнергетики, а именно передачи энергии от источника до центра потребления. Диагностика производительности СТ на месте дает множество преимуществ для обеспечения передачи электроэнергии с высокой надежностью в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61850, ГОСТ Р МЭК 60870, ГОСТ Р 51317 (МЭК 61000), ГОСТ Р 55191 (МЭК 60270). Невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность, высокая изоляция, а также малые габариты оптического датчика делают их очень привлекательным для применения в мониторинге СТ. Среди основных параметров контроля при мониторинге СТ выделяют уровень частичных разрядов, концентрацию растворенных газов, температуру, вибрацию, изменение геометрии обмоток, влажность и др.

Методы оптической сенсорики предоставляют многочисленные возможности для мониторинга СТ [1-14]. В то же время они являются относительно новой концепцией для исследователей и инженеров-электриков. Таким образом, все еще существует много

пробелов в знаниях, что ограничивает скорость перехода от лабораторных исследований до полевых приложений.

Исследованиям волоконно-оптических сенсорных элементов, многосенсорных систем на их основе, систем активной и пассивной волоконно-оптической связи посвящены труды российских ученых С.А. Васильева, И.О. Медведкова, А.Х. Султанова, И.Л. Виноградовой, А.В. Бурдина, В.А. Бурдина, С.А. Бабина, О.В. Иванова, А.С. Раевского, Т.И. Мурашкиной, А.В. Голенищева-Кутузова и др., ведущих исследований в НЦВО РАН, УГАТУ, ПГУТИ, НГУ, УФ ИРЭ РАН, ННГТУ им. Р.Е. Алексеева, ПГУ, КГЭУ и др. Известны разработки зарубежных ученых E. Udd, J.P. Yao, I. Bennion, A. Loyassa, X. Chen, J. Wang, J. Carmany и др. Практические разработки фирм Нева Технолоджи, OPSSENS, FiberSense, ПАО ПНППК, Инверсия-Сенсор и др. применяются для построения волоконных сенсорных систем различного назначения. Ежегодно ведущие научные общества проводят международные симпозиумы и конференции, посвященные данной проблематике. Среди самых значительных – симпозиумы РНТОРЭС, IEEE, OSA, SPIE.

При этом общими остается ряд нерешенных задач.

1. Стоимость системы мониторинга имеет решающее значение для всей системы электросети. Недавно разработанные методы с высокой чувствительностью и разрешающей способностью должны соответствовать принципам проектирования с более низкой стоимостью, более простой структурой, более дешевой демодуляцией и мультиплексированием. Это важный фактор, который следует учитывать при практическом применении.

2. Следует отметить, что в энергетике главное – надежность. Следует дополнительно исследовать оптические датчики на предмет повышения их надежности, особенно когда датчики устанавливаются внутри шин обмоток силового трансформатора с ситуационно возможной температурой выше 300 °С.

1. АВБС и их применение в интеллектуальной энергетике

В последнее время сообщалось о новых разработках в области оптических датчиков для мониторинга СТ. Если основным и универсальным типом датчика для указанных выше параметров мониторинга до 2015-2020 года считались волоконные решетки Брэгга, то далее на их позиции начинают активно заступать АВБС [15-19], разработанные в Казанской школе радиофотоники, чему свидетельствует ряд защищенных докторских и кандидатских диссертаций, проведенных НИОКР с энергетическими предприятиями (АО «НПО «Каскад»», АО ИРЗ и др.) и ВУЗами (КГЭУ, КФУ и др.) и выполненных государственных заданий.

Общим преимуществом АВБС является возможность их мультиплексирования по адресным частотам и реализация радиопотонного опроса, что позволяет строить многосенсорные мультипараметрические сети с высокой точностью измерений. АВБС делятся на два типа: волновые (2λ -АВБС), состоящие из двух ВБР с разными центральными длинами волн, разнесенными на адресную радиочастоту, и фазовые (2π -АВБС), представляющие собой ВБР с двумя фазовыми π -сдвигами, также разнесенными на адресную радиочастоту.

С одной стороны, 2λ -АВБС проще мультиплексируются в последовательность по топологии «точка-точка», оптимальная топология для 2π -АВБС «параллельная шина». С другой стороны, 2π -АВБС позволяют получить более высокую разрешающую способность измерений в силу более узкой полосы пропускания окон прозрачности (единицы-десятки МГц), чем у ВБР 2λ -АВБС (сотни МГц-единицы ГГц). Поэтому одной из главных задач данной работы является создание комбинированной АВБС, обладающей преимуществами обоих описанных типов структур.

2. Постановка задачи научных исследований

Для проверки работоспособности комбинированных АВБС и проверки их преимуществ выберем решение задач измерения температуры токовых шин обмоток [1, 4-14] и задач изменения геометрии обмоток СТ [20-24] в случае возникновения короткого замыкания или удара молнии. По решению первой задачи, достаточно типовой, можно сравнить полученные результаты с аналогичными и верифицировать их. По решению второй будут получены новые результаты, не освещенные в литературе или не найденные нами при обзоре литературных и патентных источников.

Отмеченные выше обстоятельства обуславливают актуальность темы и постановку научно-технической задачи разработки комбинированных АВБС для контроля температуры и изменения геометрии токовых шин обмоток силовых трансформаторов. Тематика и содержание работы соответствуют плану научных исследований, выполняемых КНИТУ-КАИ, в том числе по государственному заданию 2023-2025 гг., и АО «НПО «Каскад»».

Объект исследования – волоконно-оптические многосенсорные системы контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов.

Предмет исследования – волоконно-оптические многосенсорные системы на основе адресных волоконных брэгговских структур комбинированного типа для контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов.

Цель исследования – улучшение метрологических и технико-экономических характеристик волоконно-оптических многосенсорных систем контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов на основе использования в них адресных волоконных брэгговских структур комбинированного типа как чувствительных элементов и элементов мультиплексирования.

Научная задача исследования состоит в разработке методов анализа и принципов построения волоконно-оптических многосенсорных систем контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов, определение которых происходит по изменению величин продольных и поперечных деформаций в сенсорах на основе адресных волоконных брэгговских структур комбинированного типа, вызванных соответственно тепловым удлинением/укорочением шин при изменении их температуры и изменением силы сжатия обмоток силового трансформатора при аномальных режимах его работы, основанные на измерении параметров сигналов биений между частотными компонентами адресных структур, лежащих в радиодиапазоне.

3. Основные направления исследований и ожидаемые результаты

Сформулируем основные направления для достижения цели и решения научной задачи исследований.

1. Исследование существующих и перспективных методов и средств волоконно-оптической сенсорики для мониторинга параметров СТ; определение путей их дальнейшего развития на основе использования в них АВБС комбинированного типа как чувствительных элементов и элементов мультиплексирования.

2. Анализ оптомеханики АВБС комбинированного типа, построение их цифрового двойника (математическая модель), исследование возможных конфигураций АВБС комбинированного типа, формирования их адресов, радиофотонных методов их интеррогации, методов записи в волокне. Проведение компьютерных и физических экспериментов для определения и верификации полученных аналитических выражений и измерительных характеристик.

3. Разработка принципов построения ВОД на основе АВБС комбинированного типа для контроля продольных деформаций и температуры, а также устройств их

мультиплексирования и интеррогации при объединении в многосенсорную пассивную оптическую сеть (МПОС).

4. Разработка принципов построения ВОД на основе АВБС комбинированного типа для контроля поперечных деформаций и изменения геометрии обмоток, а также устройств их мультиплексирования и интеррогации при объединении в МПОС.

Научная новизна полученных результатов должна состоять в следующем.

1. Будут выявлены резервы улучшения метрологических и технико-экономических характеристик МПОС, основанные на применении в них АВБС комбинированного типа как новых чувствительных элементов и элементов адресного мультиплексирования.

2. Будет разработан цифровой двойник и исследованы оптомеханика и конфигурации АВБС комбинированного типа, их спектральное описание, принципы формирования их адресов, алгоритмы радиофотонных методов их интеррогации и методов записи в волокне, позволившие говорить о создании нового фазово-волнового типа АВБС, лишенного недостатков АВБС фазового и волнового типа и обладающего всеми их преимуществами.

3. Впервые будет разработана математическая модель и получены аналитические выражения, позволяющие осуществлять процесс адресного контроля температуры в шинах обмоток СТ по функции изменения величины продольной деформации на участках с встроенными в них АВБС комбинированного типа.

4. Впервые будет разработана математическая модель и получены аналитические выражения, позволяющие осуществлять процесс адресного контроля изменения геометрии обмоток силовых трансформаторов по функции изменения величины поперечной деформации, вызванной изменением силы их сжатия, на участках с встроенными в них АВБС комбинированного типа.

Практическая ценность работы будет заключаться в разработке нового типа ВОД – АВБС комбинированного типа и МПОС на их основе, решающих задачи контроля температуры и изменения геометрии обмоток СТ с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками с учетом преимуществ радиофотонной интеррогации. Новизна полученных технических решений будет подтверждена патентами на изобретение РФ.

Оценки показывают, что могут быть достигнуты абсолютная погрешность измерения продольных деформаций на уровне $\pm 0,01$ пм и поперечных деформации на уровне $\pm 0,01$ кг, что на порядок превышает известные. Использование полученных решений позволяет в два/три раза снизить стоимость МПОС за счет применения новых АВБС комбинированного типа и радиофотонных средств их опроса и мультиплексирования.

Результаты исследований будут внедрены на энергообъектах АО «НПО «Каскад»», использованы при выполнении госзадания Минобрнауки, а также в других областях научно-исследовательской деятельности КНИТУ-КАИ.

Заключение

Поставлена задача научных исследований для достижения улучшения метрологических и технико-экономических характеристик МПОС контроля температуры и изменения геометрии шин обмоток СТ на основе использования в них АВБС комбинированного типа как чувствительных элементов и элементов мультиплексирования и определены направления для ее решения.

Оценки показывают, что могут быть достигнуты абсолютная погрешность измерения продольных деформаций на уровне $\pm 0,01$ пм и поперечных деформации на уровне $\pm 0,01$ кг, что на порядок превышает известные. Использование полученных решений позволяет в два/три раза снизить стоимость МПОС за счет применения новых АВБС комбинированного типа и радиофотонных средств их опроса и мультиплексирования.

Список литературы

1. Маскевич К.Б. Волоконно-оптическая парадигма диагностического мониторинга цифровой энергетики. Основа концепции "SMART GRIDS PLUS" / К.Б. Маскевич, Р.Ш. Мисбах, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. - 2018. - № 4 (148). - С. 18-25.
2. Мисбах Р.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах / Р.Ш. Мисбах, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2019. - Т. 15, № 3. - С. 101-110.
3. Мисбах Р.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик для измерения относительной влажности в комплектных распределительных устройствах / Р.Ш. Мисбах, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Радиостроение. - 2020. - № 1. - С. 1-16.
4. Денисенко П.Е. Волоконно-оптическая мультисенсорная система мониторинга комплектных распределительных устройств / П.Е. Денисенко, Е.П. Денисенко, Р.Ш. Мисбах Р.Ш. // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 4 (51). - С. 37.
5. Cheng Y. Online frequency response analysis based on magnetic coupling to detect winding deformations in transformers / Cheng Y, Bi J., Chang W. et al. // High Volt. - 2019. - Vol. 5, Iss. 3. - Pp. 343-349.
6. De Melo A.G. Static and dynamic evaluation of a winding deformation FBG sensor for power trans-former applications / De Melo A.G. , Benetti D., de Lacerda L.A. et al. // Sensors. - 2019. - Vol. 19. - P. 4877.
7. Kung P. Online detection of windings distortion in power transformers by direct vibration measurement using a thin fiber optics sensor / P. Kung, R. Idsinga, J.B. Fu et al. // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). - 2016. - Pp. 576-578.
8. Kung P. A comprehensive condition monitoring solution for the transformer / P. Kung, L. Wang, M.I. Comanici // IEEE XXth International Conference on Electrical Machines. - 2012. - Pp. 1520-1525.
9. Liu Y. Research on a new fiber-optic axial pressure sensor of transformer winding based on fiber Bragg grating / Liu Y., Li L., Zhao L. et al. // Photonic Sensors. - 2017. - Vol. 7, Iss. 4.- Pp. 365-371.
10. Udd E. Fiber-grating sensors having longitudinal-strain-inducing jackets and sensor systems and structures including such sensors // Patent US, no. 9453771, 2016.
11. Fu H. Transversal loading sensor based on tunable beat frequency of a dual-wavelength fiber laser / H. Fu, X. Shu, C. Mou et al. // IEEE Photonics Technology Letters. - 2009. - Vol. 21, Iss. 14. - Pp. 987-989.
12. Kong F. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator/ F. Kong, W. Li, J.Yao // Opt. Lett. - 2013. - Vol. 38. - Pp. 2611-2613.
13. Liu Y. A feasibility study of transformer winding temperature and strain detection based on distributed optical fibre sensors / Liu Y., Tian Y., Fan X. et al. // Sensors. - 2018. - Vol. 18. - P. 3932.
14. Liu Y. Detection and identification of transformer winding strain based on distributed optical fiber sensing / Liu Y., Tian Y., Fan X. et al. // Appl. Optics. - 2018. - Vol. 57, Iss. 22. - Pp. 6430-6438.
15. Мисбах Р.Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Мисбах Р.Ш., Мисбах Р.Ш., Морозов О.Г. и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017.- № 3 (46). - С. 24.
16. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov // Computer Optics. - 2019. - Vol. 43. - No 4. - Pp. 535-543.

17. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6, № 1. - С. 6-13.

18. Morozov O.G. Modeling and Record Technologies of Address Fiber Bragg Structures Based on Gratings with Two Symmetrical PI-Phase SHIFTS / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, R.Sh. Misbakhov // в сборнике: Сборник трудов ИТНТ-2019 (V международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии», Самара, 21-24 мая 2019 г. -2019. - С. 11-15.

19. Morozov O.G. Modeling and Record Technologies of Address Fiber Bragg Structures Based on Two Identical Ultra Narrow Gratings with Different Central Wavelengths / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, R.Sh. Misbakhov // С. 16-19.

20. Wagreich R.B. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre / R.B. Wagreich, W.A. Atia, H. Singh et al. // Electron. Lett. - 1996. - Vol. 32.- Pp. 1223-1224.

21. Lawrence C.M. Measurement of transverse strains with fiber Bragg gratings / C.M. Lawrence, D.V. Nelson, E. Udd // Proc. SPIE. - 1997. - Vol. 3042. - P. 218.

22. Dunphy J.R. Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating / Dunphy J.R., Meltz G., Varasi M. et al. // Patent US, no. 5399854, 1995.

23. Stepanov D.Yu. High-resolution measurements of fibre Bragg grating transmission spectra / D.Yu. Stepanov, J. Canning, Z. Brodzeli // European Conference on Optical Communication. 1998. Pp. 407-409.

24. LeBlanc M. Transverse load sensing by use of pi-phase-shifted fiber Bragg gratings / M. LeBlanc, S.T. Vohra, T.E. Tsai et al. // Optics Letters. - 1999. - Vol. 24. - Pp. 1091-1093.

MONITORING OF THE TEMPERATURE AND GEOMETRY OF THE POWER TRANSFORMER WINDINGS. FORMULATION OF THE PROBLEM OF SCIENTIFIC RESEARCH

*Ivanenko V.A.^{1,2}, Nureev I.I.¹, Sakhabutdinov A.Zh.¹, Misbakhov Rus.Sh.¹,
Artemyev V.I.¹, Telishev A.M.²*

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

JSC "Scientific and Production Association "Kaskad"
428027, Chuvash Republic, Cheboksary, st. Khuzangaya, 18 building 1

Abstract. Power transformers (PT) play a fundamental role in power transmission systems from source to consumer and belong to the class of the most important and expensive equipment used in the power industry. In this regard, diagnosing their defects and monitoring parameters on site provides many advantages to ensure reliable transmission of electricity. Immunity to electromagnetic interference, insulation resistance, high sensitivity and resolution, as well as small dimensions of fiber optic sensors (FOS) make them very attractive for use in systems for monitoring the reliability parameters of PT. The widest range of applications in PT found FOS of temperature, humidity and winding deformation. The article presents a brief analysis of FOS of temperature and control of the geometry of the PT windings, their advantages and disadvantages are noted, and the task of scientific research is set for the development of a new type of sensors with microwave photonic address interrogation - combined addressed fiber Bragg structures (AFBS) of phase-wave type and temperature control and the geometry of the windings monitoring systems based on them. The directions of scientific research are determined to achieve the research goal - improving the metrological and technical and economic characteristics of fiber-optic multi-sensor systems for temperature control and changing the geometry of power

transformer windings based on the use of combined type AFBS in them as sensitive elements and multiplexing elements.

Keywords: microwave photonics; energy; power transformers, winding, compression monitoring, fiber optic sensor, addressed fiber Bragg structures of phase, wave and phase-wave types, processing in the radio range of frequency information received in the optical range.

Статья представлена в редакцию 25.12.2022