

## Волоконно-оптическая мультисенсорная система мониторинга комплектных распределительных устройств

*П.Е. Денисенко<sup>1</sup>, Е.П. Денисенко<sup>1</sup>, Р.Ш. Мисбахов<sup>2</sup>, А.Н. Васев<sup>2</sup>,  
В.А. Иваненко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань*

<sup>2</sup>*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань*

<sup>3</sup>*АО НПО Каскад, г. Чебоксары*

**Аннотация:** В работе представлен подход к комплексному измерению температуры, влажности и электрической дуги для щитов комплектных распределительных устройств. Использование полигармонического сигнала заданной формы позволило опрашивать одновременно два датчика. Датчики температуры и влажности выполнены в виде в волоконных брэгговских решеток со специальными спектральными характеристиками.

**Ключевые слова:** Волоконная решётка Брэгга, датчик, влажность, температура, электрическая дуга, комплектный шкаф, энергетическая система распределения, оптоволокно, линза, свет.

Общемировой опыт эксплуатации энергетических распределительных устройств показывает, что их надёжность и безаварийность, обеспечение максимального ресурса работы невозможны без комплексного внедрения современных средств контроля и диагностики с использованием волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решёток (далее ВБР), обладающими множеством преимуществ [1-3].

Для щитов низковольтных комплектных устройств (далее НКУ) была разработана волоконно-оптическая мультисенсорная система мониторинга температуры шин и контактов НКУ, влажности окружающей среды и регистрации электрической дуги. Мониторинг температуры заключается в непрерывных измерениях и контроля нагрева шин и контактов НКУ. Измерение влажности позволяет контролировать изменения микроклимата помещений. Контроль короткого замыкания, сопровождающийся горением открытой электрической дуги необходим для своевременного формирования селективной команды на отключение поврежденного элемента распределительного устройства. Так как горение дуги сопровождается высочайшей температурой (доходит до нескольких тысяч градусов по шкале Цельсия) [4], данный процесс может за доли секунды уничтожить оборудование (плавление стали начинается через 200 мс после начала процесса горения) [5], поэтому высокая скорость определения позволит спасти оборудование от полного

уничтожения и, соответственно, снизить стоимость ремонта. Быстродействие и характеристики волоконных датчиков этому способствуют [6, 7].

Принцип работы системы основан на использовании двух ВБР со специальными формами спектральных характеристик в качестве сенсорных элементов и собирающей линзы, служащей для повышения чувствительности на торце волокна при регистрации электрической дуги [8]. Структурная схема оптической части системы представлена на рис.1, где 1 – излучение дуги, а 2 – собирающая линза.

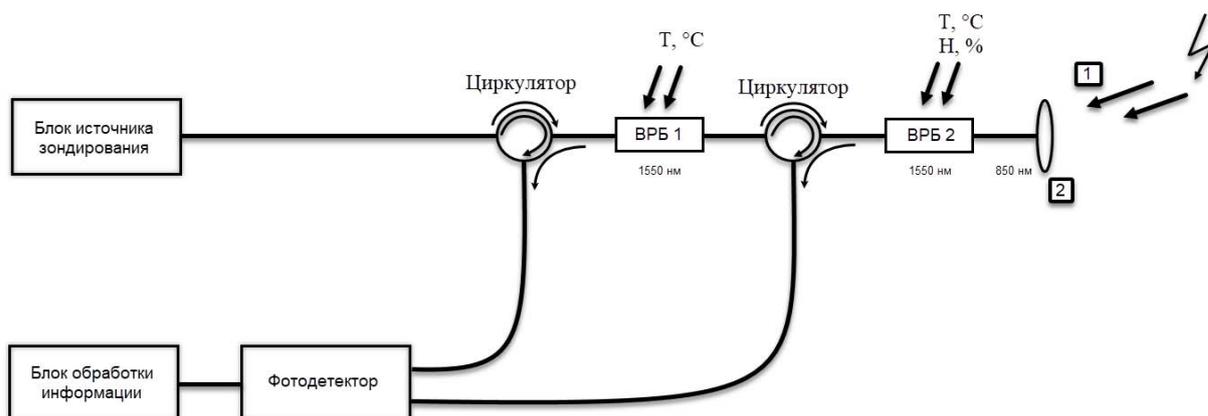


Рис. 1. – Структурная схема комплексированного датчика

В качестве чувствительных элементов датчика будут использовать ВБР со специальной формой спектра. Данное решение было принято по причине присутствия значительной нелинейности измерительных характеристик [9]. Проблема присутствует в области «больших» и «малых» значений приложенных физических полей, которые регистрировались на нелинейных участках ВБР. Для получения более линейного спектра пропускания/отражения, были выбраны ВБР с ассиметричной треугольной формой спектра.

Использование одного фотодетектора в схеме позволяет упростить конструкцию датчика, уменьшить вероятность выхода из строя устройства.

В качестве метода опроса датчиков выбрано зондирование ВБР полигармоническим сигналом [10]. Спектры двух ВБР представлены на рис.2:

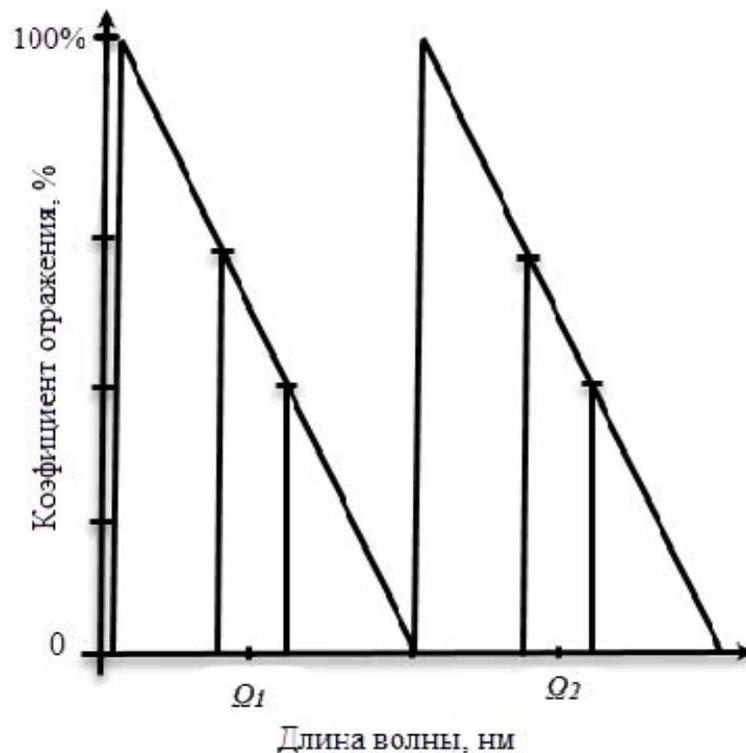


Рис. 2. – Ассиметричные треугольные спектры двух ВБР

Зависимость резонансной длины волны волоконной брэгговской решётки  $\lambda_{BG}$  от температуры среды описывается уравнением, исходя из [11]:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n_{eff}^{co}\lambda_{BG} \left[ \alpha + \frac{1}{n_{eff}^{co}} \frac{dn_{eff}^{co}}{dT} \right] \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры;

$\alpha$  – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

Это соотношение даёт типичные значения сдвига  $\delta\lambda_{BG}$  в зависимости от температуры ( $\sim 0.01$  нм/°C). Зависимость смещения брэгговской длины волны от изменения показателя преломления оболочки  $n_{sur}$  можно определить, воспользовавшись выражением:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2 \left( \lambda_{BG} \frac{dn_{eff}}{dn_{sur}} \right) \Delta n_{sur}$$

Зависимость влажности от смещения резонансной длины волны, вызываемое действием полиимидной оболочки составляет приблизительно 5% на 0.05 нм смещения [12].

Были получены зависимости мощности от смещения центральной длины волны для ВБР1 и ВБР2. Показано, что кривые обеих решёток практически совпадают. Это позволяет утверждать, что температура оказывает одинаковое влияние на обе сенсорные ВБР (рис.3):

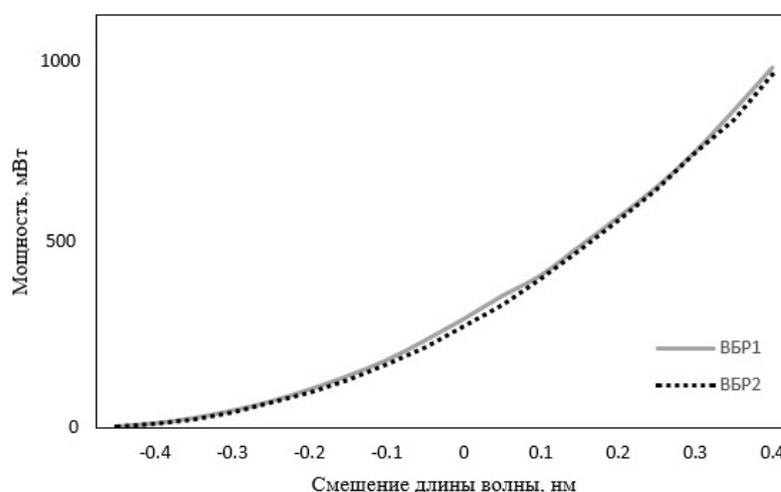


Рис. 3. – Зависимость мощности от смещение центральной длины волны для ВБР1 и ВБР2

Если на ВБР 2 воздействует влажность, полиимидная плёнка, нанесённая волокну, вызывает деформацию оптического волокна, что вызывает смещение длины волны [13]. По величине деформации, можно судить о влажности воздуха, что продемонстрировано в зависимости смещения от влажности на рис.4. Данный график наглядно показывает возможность использовать ВБР2 для измерения показателя влажности.

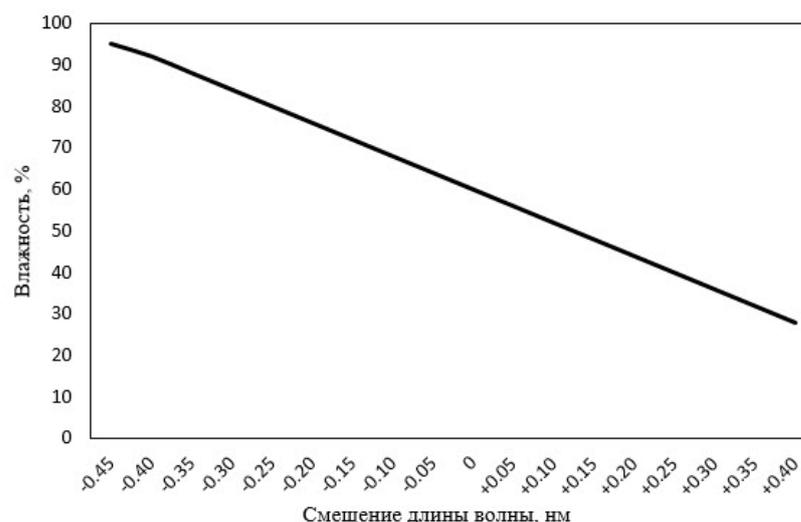


Рис. 4. – Зависимость влажности от смещения центральной длины волны для ВБР2. Измерения светового сигнала, излучаемого дугой, регистрируется на длине волны 850 нм. Порог светового излучения был выбран 10000 люкс для того, чтобы предотвратить ложные срабатывания при колебаниях естественного светового фона.

Комплексное решение регистрации различных параметров, в сравнении с традиционными решениями, позволяет осуществить одновременный контроль за несколькими факторами, влияющими на надежность и стабильность работы НКУ. Система комплексного измерения параметров физических полей позволяет интегрировать ее в существующие системы контроля параметров КРУ.

### Литература

1. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/).
2. Мисбахов Р.Ш., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Сахабутдинов А.Ж., Артемьев В.И., Куревин В.В., Пуртов В.В. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343/).

3. Нуреев И.И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605/).
  4. Гуревич В. И. Принцип построения дуговой защиты распределительных устройств 6-10 кВ. - "Энергетика и электрификация", 1992. №3. С. 47-49.
  5. Fiber Optic Sensor Systems for Arc Flash Detection // broadcom.com URL: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-4503EN> (date of access: 06.06.2018).
  6. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. Энергоатомиздат. 1990. 256 с.
  7. Нгуен Суан Мань, Попов Г.А. Система сбора данных по параметрам конструкций интеллектуального здания на основе волоконно-оптических датчиков // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/).
  8. Сидоров А.И., Агафонова Д.С. Волоконный датчик искры и электрической дуги: пат 2459222 Рос. Федерация; –№ 2010153036/28; заявл. 23.12.2010; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
  9. Morozov O.G., Denisenko P.E., Denisenko E.P., Zastela M.Y., Kuznetsov A.A., Kazarov V.Y. Fiber-optic Bragg sensors with special spectrum shapes for climatic test systems // Proceedings of SPIE. 2016. V. 10342, P. 1034217
  10. Морозов О.Г., Ильин Г.И., Морозов Г.А., Нуреев И.И., Фасхутдинов Л.М. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587/).
  11. Васильев, С. А., Медведков О.И., Королёв И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 12. С. 1085–1103.
  12. Lin Yao, Gong Yuan, Wu Yu, Wu Huijuan Polyimide-Coated Fiber Bragg Grating for Relative Humidity Sensing // Photonic Sensors. 2015. № Vol. 5. No. 1. pp. 60–66.
  13. Kronenberg Pascal, Rastogi Pramod K., Giaccari Philippe, Limberger Hans G. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings // Optics Letters. 2002. Vol.27, No.16. pp.1385-1387.
-



## References

1. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/).
  2. Misbahov R.Sh., Misbahov R.Sh., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznecov A.A., Sahabutdinov A.Zh., Artem'ev V.I., Kurevin V.V., Purtov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343/).
  3. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605/).
  4. Gurevich V. I. Energetika i ehlektrifikaciya. 1992. №3. pp. 47-49.
  5. Fiber Optic Sensor Systems for Arc Flash Detection broadcom.com URL: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-4503EN> (date of access: 06.06.2018).
  6. Busurin V.I., Nosov Ju.R. Volokonno-opticheskie datchiki: Fizicheskie osnovy, voprosy rascheta i primenenija. [Fiber-optic sensors: Physical principles, calculation and application issues]. Jenergoatomizdat. 1990. 256 p.
  7. Nguen Suan Man', Popov G.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2015. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/).
  8. Sidorov A.I., Agafonova D.S. Volokonnyj datchik iskry i jelektricheskoy dugi: pat 2459222 Ros. Federaciya [Fiber sensor sparks and electric arcs: Pat 2459222 ROS. Federation]. URL: [www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2459222&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2459222&TypeFile=html) (date accessed: 06.06.2018).
  9. Morozov O.G., Denisenko P.E., Denisenko E.P., Zastela M.Y., Kuznetsov A.A., Kazarov V.Y. Proceedings of SPIE. 2016. V. 10342, p. 1034217
  10. Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A., Nureev I.I., Fashutdinov L.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587/).
  11. Vasil'ev, S. A. Volokonnye reshetki pokazatelja prelomlenija i ih primenenija. S. A. Vasil'ev, O. I. Medvedkov, I. G. Korolev, A. S. Bozhkov, A. S. Kurkov, E. M. Dianov. Kvantovaja jelektronika. 2005. T. 35, № 12. pp. 1085–1103.
  12. Lin Yao, Gong Yuan, Wu Yu, Wu Huijuan. Photonic Sensors. 2015. № Vol. 5, No. 1. pp. 60–66.
  13. Kronenberg Pascal, Rastogi Pramod K., Giaccari Philippe, Limberger Hans G. Optics Letters. 2002. Vol.27, No.16. pp.1385-1387.
-