

# Применение беспроводных систем мониторинга температуры ПАВ-Термо производства ОАО «Авангард» в электрических шкафах

Ситкин М.К.<sup>1</sup>, Строганов К.А.<sup>2</sup>, Люлин Б.Н.<sup>2</sup>, Попова. Е.М.<sup>2</sup>, Шубарев В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «Авангард», г. Санкт-Петербург

**Аннотация:** Приведены результаты разработки ОАО «Авангард» системы мониторинга температуры токоведущих частей в электрических шкафах на базе пассивных акустоэлектронных датчиков и результаты опытных эксплуатаций в ГУП «Петербургский метрополитен» и ПАО «Россети Сибирь» (г. Омск).

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, ПАВ-датчики, ПАВ-резонаторы, линия задержки на ПАВ, пьезоэффект

## 1. Введение

В рамках стратегического плана развития предприятия одним из инновационных технологических продуктовых направлений была выбрана технология наноакустоэлектроники, в частности технология на эффекте поверхностных акустических волн (ПАВ). Главным продуктовым направлением этой технологии было определено создание беспроводных систем мониторинга температуры на базе пассивных радиоканальных контактных датчиков температуры с функцией радиочастотной идентификации (системы ПАВ-Термо). Для принятия решения было несколько причин:

1. Выполненные работы по проекту «SAWHOT» совместно с научными организациями России, ФРГ, Франции, Греции, Швейцарии, Дании в рамках седьмой рамочной научно-технической программы ЕС и России показали технологическую возможность создания датчиков на ПАВ с использованием разрешённого диапазона частот 2,4 ГГц (ISM) с широким диапазоном измеряемых температур.

2. Созданный в рамках Российско-Белорусской научно-технической программы Союзного государства «Микросистемотехника» Научно-производственный центр микросистемотехники ОАО «Авангард» (ЦМСТ) обеспечил возможность разработки таких изделий и независимое от иностранного аутсорсинга производство [1].

3. На фоне постоянного увеличения потребления электроэнергии и необходимости обеспечения надёжного снабжения ею потребителей. По статистике ( $\approx 27\%$ ) пожаров возникают из-за нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования (НПУиЭ) и около 30% - приходится на НПУиЭ в сельской местности, причем аварии в электросетях становятся здесь уже преобладающей причиной [2]. Аналогичные причины пожаров происходят и за рубежом. Статистика, фирмы Siemens [3], показывает, что ежегодно в Германии регистрируется  $\approx 600\ 000$  случаев повреждений, возникших по причине пожара; общая стоимость ущерба составила примерно 6 миллиардов Евро.

4. Растущая цифровизация, внедрение технологий IoT, Blockchain потребовали использования новых технологий нано- и микросистемотехники, исключая (или уменьшающих) влияние «человеческого фактора», обеспечивающих постоянный надёжный on-line мониторинг удалённого, труднодоступного электрооборудования.

5. Появление заинтересованных продвинутых потребителей таких систем в России

и за рубежом.

В качестве базовой структуры топологии чипа датчика была выбрана линия задержки на ПАВ на рабочую частоту 2,4 ГГц. По сравнению с разрабатываемыми нашими партнёрами за рубежом системами на ПАВ – резонаторах (частоты 434 МГц), это решение обеспечивает работу в разрешённой полосе частот ISM - диапазона (2400.0 - 2483.5 МГц) с безопасной мощностью излучения до 100 мВт и обеспечивают минимизацию габаритов чувствительного элемента (чипа) датчика. В настоящее время несколько фирм в США и КНР [4-6] предлагают подобные системы с использованием ПАВ-датчиков на резонаторах в отличие нашей системы, использующей ПАВ-датчики на линиях задержки. Анализ технических характеристик систем на ПАВ-датчиках на резонаторах показал, что используются следующие полосы частот (данные взяты из электронных презентаций компаний):

- 423.92 MHz - 443.92MHz (Chengdu Westsensor Technology Co., Ltd., КНР);
- 425 MHz - 442 MHz (IntelliSAW, США);
- 426 MHz- 449MHz или 451MHz - 474MHz (Sanhe Power Tech, КНР).

В России разрешено использование полосы частот без оформления частных решений ГКРЧ только в диапазоне 433,075 МГц - 434,750 МГц. Поэтому внедрение таких систем в России (и не только в России) будет крайне затруднительно (точнее невозможно) по сравнению с нашей, работающей в разрешённой полосе частот ISM диапазона.

## 2. Принцип работы системы. Преимущества датчиков на ПАВ

Датчик температуры на ПАВ содержит пьезоэлектрическую подложку (чип), на поверхности которой методом фотолитографии нанесены металлизированные электроды, образующие встречно-штыревой преобразователь (ВШП) и набор рефлекторов – кодовые отражателей (см. рисунок 1). ВШП предназначен для преобразования акустической волны в электромагнитную энергию за счёт прямого и обратного пьезоэффекта (по аналогии принципа работы пьезозажигалки). Основой производства ПАВ-датчиков является достигнутый мировой уровень технологии фотолитографии с разрешением 0.35 мкм, обеспечивающий высокую повторяемость и надёжность изделий.

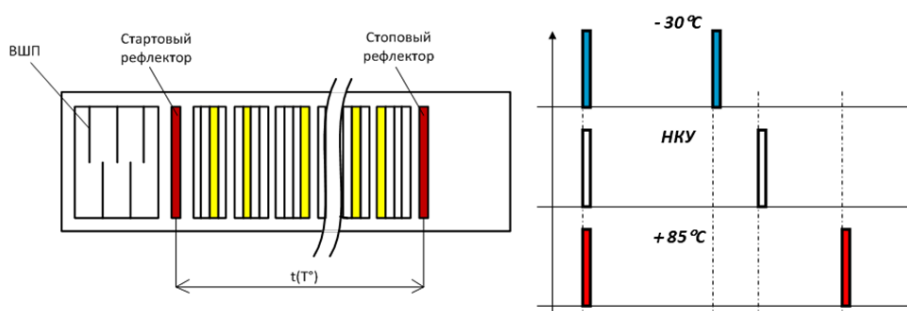


Рисунок 1. Принцип работы чувствительного элемента датчика.

При опросе датчика температуры считыватель излучает радиосигнал, который через антенну датчика поступает на ВШП (см. рисунок 2). Далее за счёт явления обратного пьезоэффекта в преобразователе происходит возбуждение поверхностной акустической волны, распространяющейся вдоль поверхности подложки.

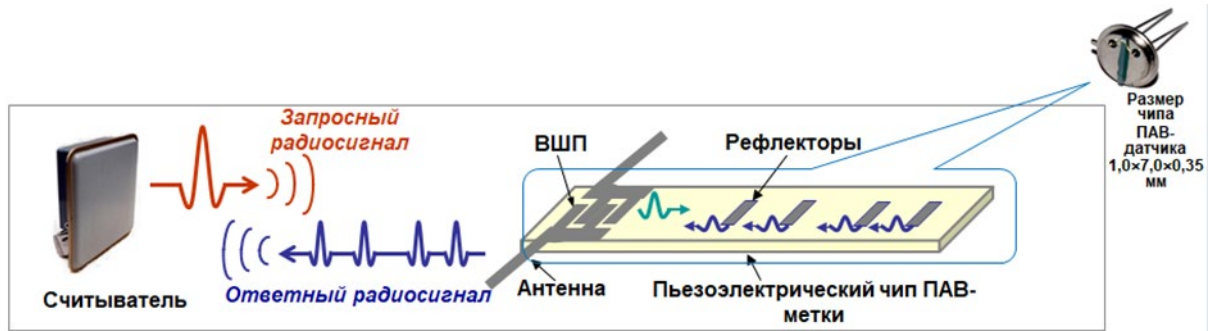


Рисунок 2. Принцип работы системы.

В процессе прохождения акустической волны она отражается от каждого из электродов и возвращается обратно на преобразователь, который преобразует её обратно в изменённый радиосигнал, ретранслируемый через антенну датчика на считыватель. При увеличении или уменьшении температуры происходит расширение материала чипа, за счёт чего расстояние между электродами и расстояние между первым и последним отражателем изменяются. В считывателе производится оценка времени задержки каждого отражённого сигнала от соответствующего электрода, на основе которой происходит вычисление значения температуры.

*Конкурентные преимущества датчиков:*

- ПАВ-датчики температуры абсолютно пассивные (без источников питания);
- опрос датчиков осуществляется по радиоканалу в диапазоне частот 2,45 ГГц на расстоянии от 0,1 до 4 м (что соответствует требованиям Правила устройства электроустановок [7];
- точность определения температуры ( $\pm 4^\circ\text{C}$ ), что достаточно для определения аварийных ситуаций;
- широкий диапазон контролируемых температур от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+120^\circ\text{C}$ ;
- возможность идентификации точки измерения температуры по радиочастотному идентификационному коду датчика для определения местоположения точки измерения;
- высокая радиационная стойкость и устойчивость к воздействию климатических, механических и электромагнитных помех. Возможна эксплуатация в таких местах, как атомные реакторы, подстанции и пр., т.к. датчики на ПАВ, в отличие от датчиков на основе полупроводников, невосприимчивы к ионизирующему излучению и поэтому могут постоянно использоваться в зоне облучения [8].

### 3. Результаты апробаций системы ПАВ-Термо

Проблемы работы электрооборудования в тоннелях метро следующие:

1. В рабочее время, во время движения электропоездов, полноценный контроль состояния контактных соединений (КС) в шкафу (см. рисунок 3), в нагруженном состоянии, невозможен с использованием переносных приборов, например тепловизоров, т.к. контактный рельс под напряжением и проход в тоннель запрещён.
2. Наличие вибрации и постоянного изменения токов через контакты (пусковые токи двигателей электропоезда до нескольких тысяч ампер) и постоянный нагрев и охлаждение контактов – причина откручивания гаек в КС;
3. Применение воска (см. рисунок 4) для индикации ~~интерных~~ мест перегревов или периодическая переборка КС не информативны и дорогостоящи.



Рисунок 3. Шкаф ЛР-163 в закрытом состоянии и антенная сборка системы ПАВ-Термо-В.

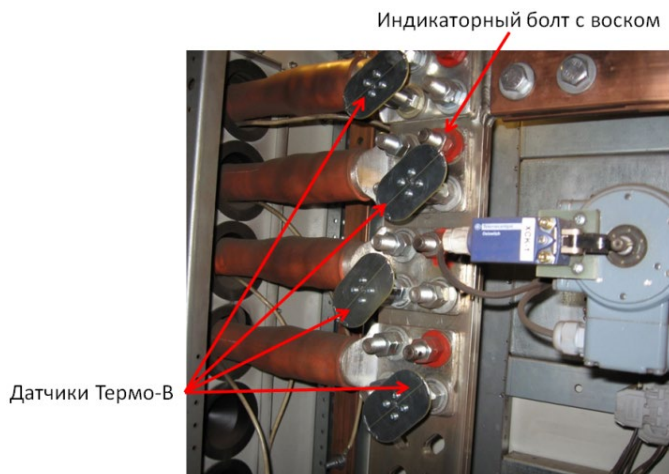


Рисунок 4. Место установки датчиков Термо-В и индикаторных болтов в шкафу ЛР-163

На рисунке 5 представлены результаты измерений за 36 часов (воскресенье и часть понедельника).

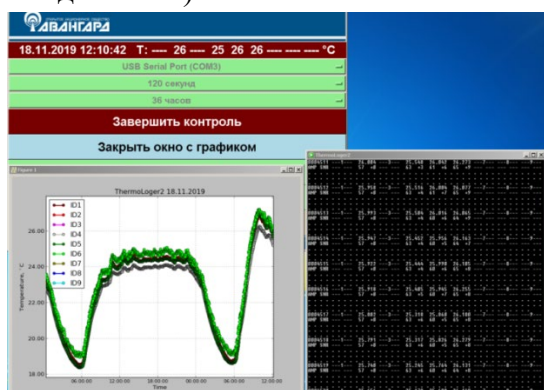


Рисунок 5. Результаты измерений за 36 часов в шкафу ЛР-163.

В процессе ОЭ сотрудниками метрополитена произведена высокоскоростная запись энергетических параметров работы шкафа: напряжений, токов, мощности. Полученные данные были проанализированы и соотнесены с данными по нагреву КС. В результате получен коэффициент нагрева КС фидера ЛР-163 в зависимости от проходящей энергии через кабели, питающие контактный рельс. На конец 2019 года

С ноября 2019 по июнь 2020 гг. (8 месяцев) специалистами предприятия совместно техническими службами Санкт-Петербургского метрополитена была проведена опытная эксплуатация (ОЭ) системы на одном из участков тоннеля метрополитена. Результаты измерений по цифровому интерфейсу RS 485 передавались на сервер, установленный у дежурного электрика, позволяющий хранить и обрабатывать полученную информацию.

На графике видно, что:

1. Нагрузка равномерно распределена между четырьмя шинами. Оборудование работает штатно. Аварийных перегревов нет.
2. Температура шин (нагрузка) в воскресенье (центр графика) практически одинакова весь день. В понедельник (правая часть) максимальная температура фиксируется около 9-10 часов утра в период максимальной загрузки метрополитена во время максимального заполнения вагонов пассажирами.

он составил  $8,4^{\circ}\text{C}/\text{МВт}\cdot\text{ч} \pm 7\%$ . Его возможное изменение в сторону увеличения в дальнейшем будет свидетельствовать о деградации КС. При этом графики температур системы ПАВ-Термо полностью коррелируют с графиками загрузки метрополитена и перевозимым количеством пассажиров, а значит энергопотреблением поездов.

Результаты показывают возможность использования системы не только в целях обеспечения безопасности движения и работы метрополитена, но и on-line мониторинга потребления энергии поездами, в т.ч. в пиковые нагрузки, пассажиропотоки и загруженности поездов в течение суток и дней недели. Система позволяет контролировать температуру и перегревы КС в шкафах, хранить эту информацию на сервере у дежурного электрика, заблаговременно планировать ремонты для исключения аварий и пожаров.–

Помимо Санкт-Петербургского метрополитена в ПАО «Россети Сибирь» (г. Омск) комплектами ПАВ-Термо-В оборудованы контактные соединения выключателей ячеек 10 кВ двух фидеров. Опытно-промышленная эксплуатация (ОПЭ) комплектов ПАВ-Термо-В осуществляется с 13 октября 2020 г. по настоящее время. За время непрерывной работы в процессе ОПЭ двумя комплектами ПАВ-Термо-В проведён анализ нагревов КС в момент максимальных нагрузок, и оценка состояния КС по полученным статистическим данным за время проведения ОПЭ. В ходе проведения ОПЭ было выявлено, что комплекты соответствуют заявленным производителем техническим характеристикам.

#### 4. Заключение

Показанное в данной статье оборудование производства ОАО «Авангард» является одним из элементов функционирования интеллектуальных электрических сетей (Smart Grids), предназначенное для обеспечения безопасности и энергоэффективности в электроэнергетике. Работы ОАО «Авангард» в этой области в инициативном плане ведутся в рамках ряда международных контрактов с зарубежными партнёрами. Тем не менее, предприятие заинтересовано в продвижении данной продукции на рынок РФ и готово представить её для апробации у отечественных потребителей. Ряд систем поставлено за рубеж (КНР, Англия). Помимо этого проведена опытная эксплуатация системы в ОАО «РЖД», г. Волхов.

Конструкция топологии чувствительного элемента, применяемого в датчиках ПАВ-Термо, в виде кодовой линии задержки на ПАВ, конструкция датчика на ПАВ и система ПАВ-Термо защищены патентами Российской Федерации [9-11].

#### Список литературы

1. И. Баранник, Ю. Белогубов, Н. Иванов. Центр микросистемотехники. Передовые инженерные решения. Электроника, наука, технология, бизнес №4 с.130 – 2014 г.
2. <https://www.piter220.ru/1674-pozhary-ot-elektroprovodki.html>
3. <http://low-medium-voltage.siemens.ru/products/lv/Protect/afd/5SM6/>
4. <http://www.wiestsensor.com/html/Products/system/sys3/>
5. <https://www.altanova-group.com/en/products/temperature-humidity-pd-monitoring/sensors/temperature-sensors-low-profile-wireless-temperature-sensors>
6. <https://www.samwha-cn.com/>
7. <http://etp-perm.ru/el/pue>
8. <http://sawcomponents.de/en/news/>
9. Патент РФ №RU2585911C1. Способ устранения коллизии в наборе датчиков и устройство для его реализации / Шубарев В.А., Люлин Б.Н., Кронидов Т.В., Калинин В.А. – 2016 г.
10. Патент РФ №RU2748868C1 «Система измерения температуры шин электрических шкафов», 2021 г.
11. Патент РФ №RU204272U1 «Беспроводной датчик измерения температуры шин электрических шкафов», 2021 г.