

## СИСТЕМА НЕИНВАЗИВНОГО КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА И ЖИЗНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАЦИЕНТОВ НА ОСНОВЕ СМАРТ-МАТРАСА С ВСТРОЕННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ АДРЕСНЫМИ СТРУКТУРАМИ

*Р.М. Муратов*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева–КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса,10

**Аннотация.** В статье предлагается система мониторинга жизненных показателей пациентов на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) для ухода за больными в домах-интернатах для престарелых и инвалидов. Система может отслеживать жизненно важные показатели, например, точно измерить частоту пульса и частоту дыхания со средней погрешностью менее 1 удара в минуту, обнаружить внезапное повышение температуры и неожиданный подъем пациента с постели ночью, что имеет решающее значение для поддержания высокого качества лечения больного. В основе сенсорной части системы используются датчики давления на основе адресных волоконных брэгговских решеток. В отличие от дорогостоящих оптико-электронных интеррогаторов в системе применен радиофотонный интеррогатор, построенный на одном фотоприемнике для регистрации отраженных от решеток ЛЧМ-излучений на частотах биений, лежащих в радиодиапазоне.

**Ключевые слова:** частота дыхания, давление тела на поверхность, матрас, подъем/падение с постели, адресные волоконные брэгговские структуры, мониторинг.

### Введение

Одним из основных методов медицины критических состояний является клинический мониторинг, предполагающий непрерывный контроль состояния пациента на основе регистрации биологических сигналов и оценки диагностических показателей организма с целью выявления отклонения показателей от нормы, предупреждения опасностей и осложнений, возникающих в процессе лечения. Особенно важен круглосуточный мониторинг здоровья и самочувствия пациентов в домах-интернатах для престарелых и инвалидов. Мониторинг жизненно важных показателей, таких как частота пульса, дыхания и температура, а также факт падения - распространенные причины, по которым обитатели дома престарелых обращаются к врачу или попадают в больницы. Однако нынешняя практика ухода за больными отнимает много времени и утомительна, поскольку обычно медицинскому персоналу приходится лично проводить периодические проверки [1-3]. Более того, такие проверки проходят нечасто и потенциальна возможность несвоевременного реагирования в связи с пропуском наступления критического ухудшения состояния здоровья.

В статье предложена система мониторинга жизненно важных показателей пациентов на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) для ухода за больными в домах-интернатах для престарелых и инвалидов. Система может отслеживать показатели жизнедеятельности, таких как частота пульса, частота дыхания, температура, движение и подъем или падение пациентов с постели. Она способна точно измерять частоту пульса и частоту дыхания со средней погрешностью менее 1 удара в минуту, обнаруживать внезапное повышение температуры и неожиданный подъем или падение с постели ночью,

что имеет решающее значение для поддержания высокого качества ухода за пациентами. В случаях, когда состояние здоровья любого из пациентов ухудшается или обнаруживается ненормальное поведение, медицинский персонал в режиме реального времени будет немедленно уведомлен системой о состоянии каждого пациента [4-5].

Предлагаемая система мониторинга состояния пациента используется матрицу датчиков 4 x 10, из них активные - тридцать четыре сенсорных элемента, установленные в тонком пенополиуретановом наматраснике, который накладывается на матрас и соединенных оптоволоконном с интеррогатором. Датчики установлены стратегических зонах: на затылочной части головы, плечах, локтях, бедрах, в области таза, голених и пятках (рис.1). Размеры стандартного матраса и наматрасника 2000 x 900 мм. Датчики закреплены с шагом 150 - 200 мм.

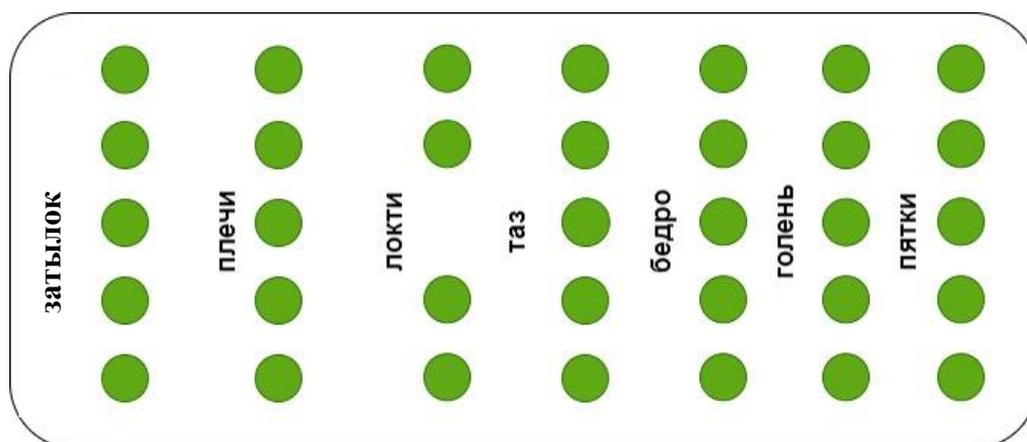


Рис. 1. Схема размещения датчиков на матрасе

Для оптимизации процедуры установки и защиты физической целостности сенсорных элементов при измерении давления, датчики встраиваются в цилиндр из термопроводящей эпоксидной смолы диаметром 2 см, при этом датчики располагаются в средней точке цилиндра.

При освещении оптоволоконна, содержащего волоконно-брэгговские структуры (ВБС), широкополосным источником света отражается только набор длин волн, удовлетворяющих условию Брэгга, все остальные пропускаются. Условие Брэгга задается следующим уравнением:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda,$$

где  $\lambda_B$  — отраженная брэгговская длина волны,  $n_{eff}$  — эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна,  $\Lambda$  — период решетки.

Таким образом, когда к верхней поверхности полимерного цилиндра прикладывается давление, он растягивается, вызывая деформацию оптического волокна и, следовательно, модулируя отраженную длину волны Брэгга (рис. 2) [6]:



Рис. 2. Конструкция датчика и влияние давления на датчик

На  $\lambda_B$  могут влиять изменения деформации ( $\Delta l$ ) и/или температуры ( $\Delta T$ ). Следовательно, отраженная длина волны Брэгга изменяется ( $\Delta\lambda_B$ ) согласно следующему уравнению:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{B,l} + \Delta\lambda_{B,T} = S_l\Delta l + S_T\Delta T,$$

где  $\Delta\lambda_{B,l}$  связан со сдвигом длины волны, вызванным деформацией, а  $\Delta\lambda_{B,T}$  - с тепловым влиянием на тот же параметр.  $S_l$  и  $S_T$  представляют собой коэффициенты чувствительности ВБР к деформации и температуре.

В качестве адресных сенсорных элементов, которые будут контролировать давление, с которым пациент давит на матрас, предлагается использовать АВБС с двумя симметричными  $\pi$ -сдвигами ( $2\pi$ -ВБР), с возможностью радиофотонного опроса адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [7].

Адресная структура ВБР представляет собой три последовательные ВБР с двумя фазовыми сдвигами между ними. Широкополосное лазерное излучение, прошедшее через  $2\pi$ -ВБР, формирует двухчастотное излучение в области окон прозрачности, соответствующих спектральному расположению двух симметричных фазовых  $\pi$ -сдвигов вблизи центральной частоты средней решётки. На рис. 3 представлено схематическое изображение структуры такой АВБС и спектральная характеристика отражения.

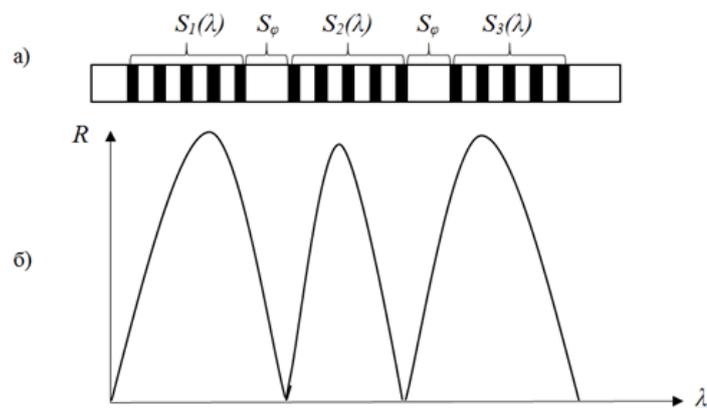


Рис. 3. Структура АВБС: а – структура, б – условная спектральная характеристика отражения

Брэгговские частоты (центральные длины волн) АВБС одинаковы, они имеют равную полосу пропускания, а адресность измерений обеспечивается уникальным разносом частот между двумя окнами прозрачности в спектре АВБС, который не изменяется при наложении на АВБР деформационных или температурных полей.

Для моделирования характеристик ВБР хорошо зарекомендовал себя метод, основанный на построении матриц передач. Согласно этому методу ВБР разбивается на  $N$  однородных секций (рис. 3), для которых определяются коэффициенты отражения и передачи как амплитуды распространяющихся в направленном и встречном направлениях мод после прохождения  $m$ -ой секции[11].

Матрица передачи каждой секции описывается следующим образом:

$$S_m(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{iq(\lambda)l} - r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{-r(\lambda)e^{-iq(\lambda)l} + e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda)e^{-iq(\lambda)l} - e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-iq(\lambda)l} - r(\lambda)^2 e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix},$$

где  $l$  – длина сегмента,  $r(\lambda) = [q(\lambda) - \sigma\beta(\lambda)]/k$ ,  $(\lambda) = \sqrt{\sigma\beta(\lambda)^2 - k^2}$ ,  $\sigma\beta(\lambda) = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_B)$  – параметр расстройки контура,  $\lambda_B$  – брэгговская длина волны ВБР,  $k = \pi\sigma n/\lambda_B$  – постоянная распространения,  $\sigma n = n_{mod}/n_{eff}$  – индекс модуляции коэффициента преломления,  $n_{mod}$  – величина наведенного показателя преломления ВБР,  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления сердцевины волокна [11].

Результирующая матрица ВБР запишется в виде произведения матриц передачи каждой секции и двух матриц фазовых сдвигов:

$$T_{res}(\lambda) = S_1(\lambda)S_\varphi S_2(\lambda)S_\varphi S_3(\lambda).$$

Желаемая адресная частота АВБС с двумя фазовыми сдвигами может быть получена путем задания соответствующей длины среднего участка такой структуры [8-9].

На рис. 4 представлена функциональная опто-электронная схема системы опроса 2.N АВБС с различными N адресами. На массив АВБС с источника лазерного излучения – 1 подается непрерывное широкополосное излучение (диаграмма, а) с шириной спектра, соответствующего максимальному диапазону измерений.

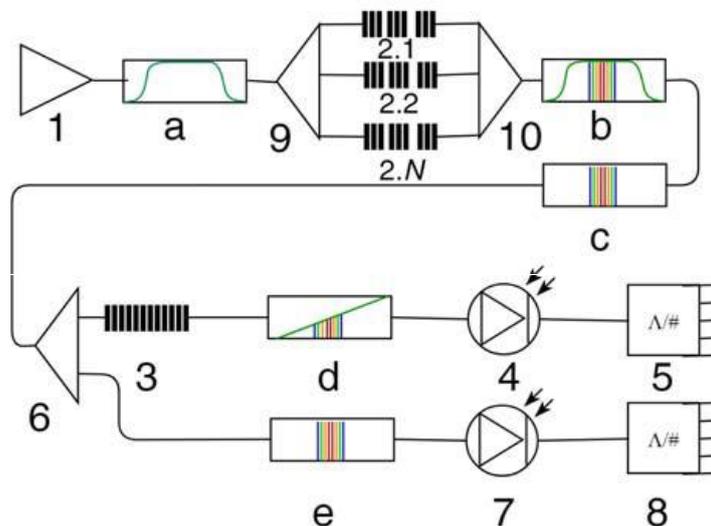


Рис. 4. Функциональная опто-электронная схема опроса массива АВБС

Исходное излучение через делитель мощности светового потока – 9 поступает на массив АВБС 2.1–2.N (на схеме они разделены параллельно). Каждая из 2.N АВБС пропускает двухчастотное излучение, которое объединяется посредством оптоволоконного сумматора мощности – 10, с формированием полигармонического излучения, приведенного на диаграмме (с). С помощью оптоволоконного делителя мощности – 6 оптический сигнал делится на два канала – измерительный и опорный для контроля мощности. Сигнал в измерительном канале проходит через линейный наклонный фильтр с известной линейной

характеристикой – 3 и поступает на измерительный фотоприемник – 4, после чего оцифровывается на АЦП – 5. Сигнал с АЦП – 5 методом частотной (аналоговой или цифровой) фильтрации служит для определения положения АВБС. В опорном канале сигнал без изменения направляется на измерительный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала – 7, и оцифровывается на АЦП – 8. Анализ сигнала ведется на основе отношения мощностей в измерительном и опорном каналах, таким образом достигается нормировка интенсивности выходного сигнала [10].

Амплитудно-частотный вид сигнала, поступающий на измерительный фотоприемник – 7, приведен на рис. 5.

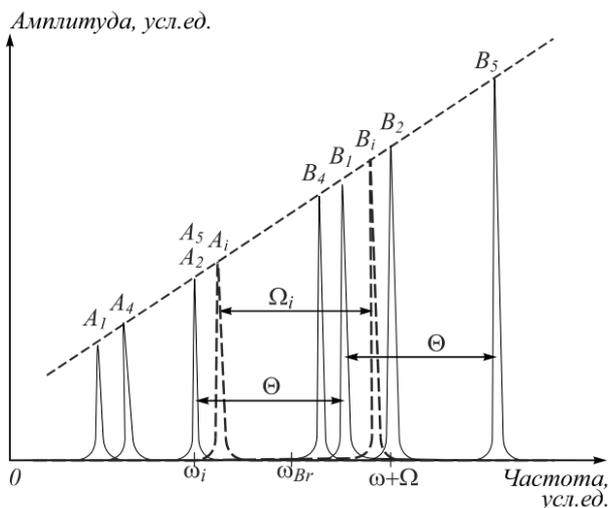


Рис. 5. Форма спектрального отклика сигнала, поступающего на измерительный фотоприемник

На фотоприемнике, как на нелинейном квадратичном элементе, возникают парные биения всех частотных составляющих –  $A_i$  и  $B_i$ . Полученный сигнал принимается на аналого-цифровой преобразователь и служит источником информации для определения центральных длин волн всех входящих в измерительную систему сенсоров.

Результирующий сигнал после фотоприемника на АЦП имеет вид [10]

$$P(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left( \begin{array}{l} A_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k)t) + \\ A_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t) + \\ B_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t) + \\ B_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t) \end{array} \right).$$

Спроектируем систему неинвазивного контроля движения тела пациента на матрас, состоящую из массива датчиков АВБС. Разобьем 34 датчика на семь оптических каналов по 4-5 датчиков (рис. 1): затылочная часть головы, плечи, локти, таз, бедро, голень и пятки. Поскольку прием, обработка и анализ данных в каждом оптическом канале производится независимо, адресные и центральные частоты АВБС в каждом из оптических каналов могут быть выбраны одинаковыми, чтобы унифицировать элементную базу.

На рис. 6 представлена функциональная электрическая схема измерения на основе радиофотонных методов опроса АВБС, где ЛД - источник лазерного широкополосного излучения, ОП – оптические переключатели RSC Coaxial Fiber Optic 1x8 Switch, АВБС - массив АВБС с фазовым сдвигом, расположенные в контрольных зонах матраса, НФ – наклонный фильтр, ФД – измерительный фотоприемник, АЦП – высокоскоростной

аналого-цифровой преобразователь AD9467, с частотой преобразования 300 МГц, МП – высокопроизводительный микроконтроллер STM32H725ZGT6 с тактовой частотой 550 МГц.

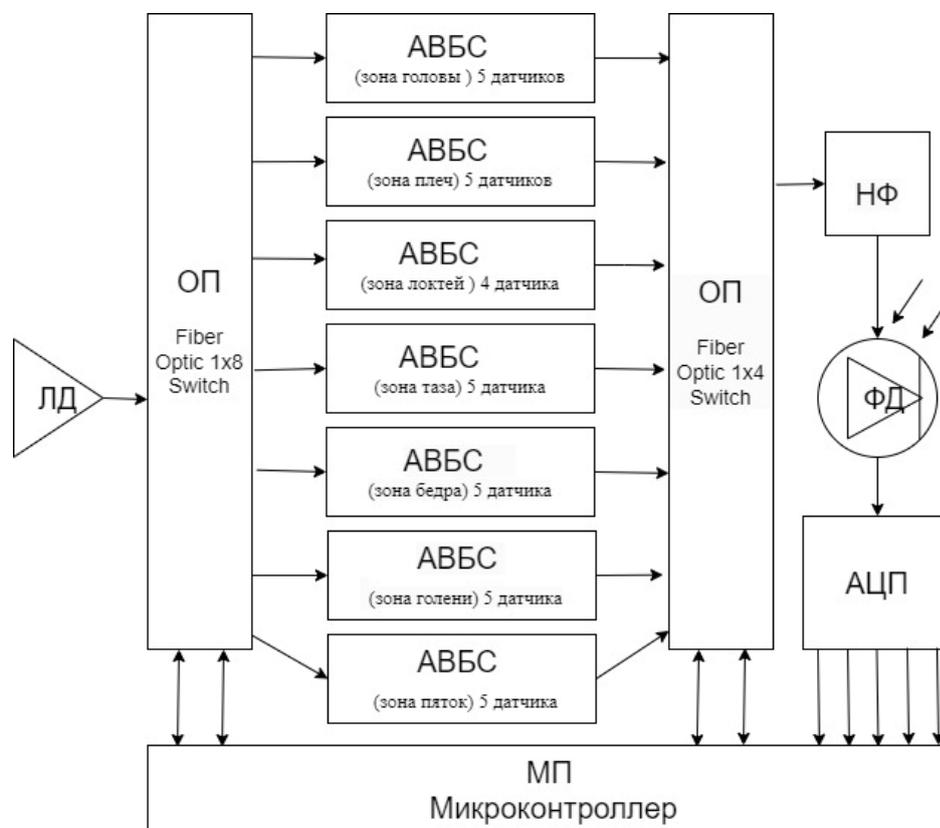


Рис. 6 Схема измерения на основе радиофотонных методов опроса АВБС

Источник лазерного излучения ЛД с длиной волны 1550 нм подключается к оптическому переключателю (ОП), который последовательно с частотой 100 Гц подключает лазерное излучение к одному из семи каналов АВБС датчиков. Каждый оптический канал состоит из массива АВБС-датчиков. Все ВБР имеют одинаковую длину 1 мм и коэффициент отражения 5%. Длина волны Брэгга всех решеток составляет 1550 нм. Излучение проходит через фильтр НФ с наклонной амплитудно-частотной характеристикой и образует асимметричное лазерное излучение, которое поступает на фотоприёмник ФД, после чего оцифровывается 16-битным АЦП и обрабатывается высокопроизводительным управляющим микроконтроллером МП, где осуществляется фильтрация сигналов на адресных частотах АВБС. После фильтрации сигнала на адресных частотах в режиме реального времени производится определение центральных частот АВБС датчиков.

ОП - двунаправленные волоконно-оптические переключатели коаксиального типа (скорость переключения 5 - 10 мсек), в которых одно MEMS-зеркало перенаправляет излучение от общего волокна на один из портов и наоборот, управляется микроконтроллером по интерфейсу I2C.

В рассмотренной системе количество измерительных датчиков может достигать пяти и более. Однако, установка большего числа датчиков усложнит систему и приведет к появлению множественных перекрестных частот биений в связи с уменьшением расстояний между АВБС.

## Заключение

В статье рассмотрена система неинвазивного мониторинга давления тела пациента на матрас с помощью волоконно-оптических адресных сенсоров АВБС с фазовым сдвигом для ухода за пациентами домов-интернатов для престарелых и инвалидов. Используя оптоволоконную технологию АВБС для создания самих датчиков, а также компьютерное приложение для медицинского персонала, данная система может непрерывно контролировать пациентов на койках и позволяет удаленно выявлять ухудшение состояния пациента и ненормальное поведение на ранних стадиях наступления приступа.

## Список литературы

1. Patil, S.P. Adult obstructive sleep apnea: Pathophysiology and diagnosis/ S.P. Patil, H. Schneider, A.R. Schwartz et al. // *Chest* 2007. – 132. – P. 325–337.
2. McGloin, H.; Adam, S.K.; Singer, M. Unexpected deaths and referrals to intensive care of patients on general wards. Are some cases potentially avoidable? / H. McGloin, S.K. Adam, M. Singer // *JR Coll Physicians Lond.* - 1999. – 33. – P. 255–259.
3. Schellenberger S. Continuous In-Bed Monitoring of Vital Signs Using a Multi Radar Setup for Freely Moving Patients / S. Schellenberger, K. Shi, F. Michler et al. // *Sensors.* – 2020. - V.20,20. – 5827. DOI: 10.3390/s20205827
3. Mok, W. Attitudes towards vital signs monitoring in the detection of clinical deterioration: Scale development and survey of ward nurses / W. Mok, W. Wang, S. Cooper et al. // *Int. J. Qual. Health Care.* – 2015. – 27. – P. 207–213. DOI: 10.1093/intqhc/mzv019
4. Федеральный перечень реабилитационных мероприятий, технических средств реабилитации и услуг, предоставляемых инвалиду, утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2005 г. N 2347-р.
5. Tavares, C. Wheelchair Pressure Ulcer Prevention Using FBG Based Sensing Devices /C. Tavares, M.F. Domingues, T. Paixao et al. // *Sensors.* – 2019. - V. 20, 1. - 212. DOI: 10.3390/s20010212
6. Мисбахов, Р.Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев и др. // *Инженерный вестник Дона.* – 2017. – № 2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343/).
7. Аглиуллин, Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Рус.Ш. Мисбахов и др. // *Труды учебных заведений связи.* – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6–13. – DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13.
8. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // *Компьютерная оптика.* – 2019. – Т. 43. - № 4. – С. 535-543. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
9. Zhu Y.W. Heart Rate Estimation from FBG Sensors using Cepstrum Analysis and Sensor Fusion / Y.W. Zhu, V. S.F. Foo, E. Hao et al.// *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014*
10. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // *Компьютерная оптика.* – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 535-543. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
11. Мисбахов, Р.Ш. Волоконно-оптическая многосенсорная система для контроля температуры коммутационных и токоведущих элементов энергетических объектов на

основе брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми сдвигами: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.11.07: 2019/ Мисбахов Рустам Шаукатович. – Казань. – 2017. – 174с.

12. Сахабутдинов А.Ж. Трехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры - новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей. / А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев и др. // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс-Наука». – 2021. - №6. DOI 10.24412/2308-6920-2021-6-166-167.

## **NON-INVASIVE CONTROL OF BODY MOVEMENT AND VITAL SIGNS OF PATIENTS BASED ON SMART MATTRESS WITH BUILT-IN FIBER OPTIC ADDRESS STRUCTURES**

*R.M. Muratov*

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

**Abstract:** The article proposes a system for monitoring the well-being of patients based on targeted fiber Bragg structures (AVBS) for patient care in residential homes for the elderly and disabled. The system can monitor vital signs such as pulse, respiratory rate, temperature, movement, i.e. it is able to accurately measure the pulse rate and respiratory rate with an average error of less than 1 beat per minute, detect sudden temperature rise and unexpected rise from bed at night, which is crucial to maintain a high quality of patient treatment. The sensor part of the system is based on pressure sensors based on addressable fiber Bragg gratings. Unlike expensive optoelectronic interrogators, the system uses a radiophoton interrogator built on a single photodetector to register reflected from the arrays of LFM radiation at the beat frequencies lying in the radio range.

**Keywords:** respiratory rate, body pressure, mattress, getting out of bed, targeted fiber Bragg structures, monitoring.

Статья представлена в редакцию 27.03.2023 г.