

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-73-92>

Анализ функциональных возможностей технических средств измерения механических параметров летательных аппаратов

И. Е. Мухин¹, Д. С. Коптев¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является анализ функциональных возможностей классических и перспективных датчиков контроля механических параметров летательных аппаратов на примере датчиков деформации и вибрации для выявления их актуальных направлений развития.

Методы исследования основаны на понятиях теории сенсорных систем, теории диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов. Используются методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Проанализированы принципы работы, а также функциональные возможности основных классических датчиков, используемых в летательных аппаратах для контроля параметров деформации и вибрации. Произведена критическая оценка возможностей применения анализируемых сенсоров применительно для реализации в различных задачах авиационной диагностики механических параметров.

Результаты. Установлено, что воздействие полетных нагрузок на планер и ответственные узлы летательных аппаратов сопровождается появлением скрытых деформаций в виде механических напряжений, которые разделяются на две составляющие – нормальную и тангенциальную. Получены аналитические зависимости для расчета названных величин при использовании оптоволоконных датчиков с распределенными ячейками Брэгга, преобразующими изменение собственных линейных размеров в изменение длины отраженной волны. Необходимым условием получения корректных результатов измерений является температурная компенсация ячеек, что позволяет локализовать места деформаций с точностью до расположения конкретной ячейки. Представлены практические результаты использования альтернативных датчиков обнаружения скрытых деформаций (трещин) на основе методов радиочастотной идентификации в различных частотных диапазонах.

Заключение. Развитием метода диагностики напряженно-деформируемых состояний узлов авиационного комплекса является использование частотно-доплеровских волоконно-оптических датчиков, имеющих высокое отношение сигнал/шум и сферическую диаграмму направленности, что позволит разработать технические средства мониторинга динамики внутренних деформаций контролируемых агрегатов в режиме реального времени. В качестве перспективных направлений исследований в области создания новых датчиков с новыми физическими свойствами следует рассматривать оптоволоконные брэгговские датчики с наклонной решеткой.

Ключевые слова: летательный аппарат; авиационный комплекс; пьезоэлектрический тензодатчик; система радиочастотной идентификации; датчики на основе оптоволокна; ячейки Брэгга; диагностика технического состояния; планер; виброизмерения; деформация механических элементов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Мухин И. Е., Коптев Д. С. Анализ функциональных возможностей технических средств измерения механических параметров летательных аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 73–92. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-73-92>.

Поступила в редакцию 16.01.2023

Подписана в печать 10.02.2023

Опубликована 30.03.2023

Analysis of the Functional Capabilities of Technical tools for Measuring Aircraft Mechanical Parameters

Ivan E. Mukhin¹, Dmitry S. Koptev¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to analyze the functionality of classical and advanced sensors for controlling the mechanical parameters of aircraft using the example of strain and vibration sensors to identify their current areas of development.

Methods. Research methods are based on the concepts of the theory of sensory systems, the theory of diagnostics and forecasting of the technical condition of aircraft. Methods of multi-criteria analysis, parametric and structural synthesis are used. The principles of operation, as well as the functionality of the main classical sensors used in aircraft to control the parameters of deformation and vibration, are analyzed. A critical assessment of the possibilities of using the analyzed sensors for implementation in various tasks of aviation diagnostics of mechanical parameters has been made.

Results. It has been established that the impact of flight loads on the airframe and critical components of aircraft is accompanied by the appearance of hidden deformations in the form of mechanical stresses, which are divided into two components: normal and tangential. Analytical dependencies are obtained for calculating the above quantities using fiber-optic sensors with distributed Bragg cells that convert the change in their own linear dimensions into a change in the reflected wavelength. A necessary condition for obtaining correct measurement results is the temperature compensation of the cells, which makes it possible to localize the places of deformations with an accuracy up to the location of a particular cell. The practical results of using alternative sensors for detecting hidden deformations (cracks) based on radio frequency identification methods in various frequency ranges are presented.

Conclusion. The development of the method for diagnosing stress-strain states of aircraft complex units is the use of frequency-Doppler fiber-optic sensors with a high signal-to-noise ratio and a spherical radiation pattern, which will allow developing technical means for monitoring the dynamics of internal deformations of controlled units in real time. As promising areas of research in the field of creating new sensors with new physical properties, fiber-optic Bragg sensors with an inclined grating should be considered.

Keywords: aircraft; aircraft complex; piezoelectric strain gauge; radio frequency identification system; fiber-optic sensors; Bragg cells; technical condition diagnostics; airframe; vibration measurements; deformation of mechanical elements.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Mukhin I. E., Koptev D. S. Analysis of the Functional Capabilities of Technical tools for Measuring Aircraft Mechanical Parameters. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control,*

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023; 13(1): 73–92

Введение

Развитие современных летательных аппаратов (ЛА) гражданского и военного назначения характеризуется стремительным увеличением степени функциональной насыщенности, обусловленной расширением круга решаемых задач. В области военной авиации непрерывно возрастают требования по увеличению возможностей боевого применения в условиях ведения противником активного противодействия, а в гражданской авиации – широким внедрением средств автоматизации процессов управления полетом и посадкой в условиях повышенного трафика полетов на урбанизированных территориях. Данные факторы способствовали практической реализации принципиально важного перехода от раздельного проектирования планеров и узлов к проектированию авиационных комплексов (АК), представляющих единую сложную систему с множеством взаимообусловленных и взаимосвязанных целей.

Отличительные особенности связаны с глубокой интеграцией комплексной системы управления АК, системой управления силовой установки и многими другими системами [1]. Любая сложная комплексная система нуждается как в плановой диагностике, так и в проверке работоспособности в реальном масштабе времени. Основой системы диагностики и прогнозирования технического состояния являются показания периферийных датчиков контроля параметров ЛА. В большинстве случаев физическая основа работы всех датчиков

для анализа технического состояния АК заключается в преобразовании механических и тепловых величин в электрические для их дальнейшего преобразования и анализа. Существует значительное многообразие таких датчиков [2; 3]. Однако в авиационной отрасли с течением времени непрерывно возрастает противоречие между требуемой полнотой контроля параметров систем и агрегатов ЛА, приводящее к росту количества и массы датчиков в геометрической прогрессии и ограничениям по допустимой суммарной их массе с бортовыми средствами обработки первоначальной диагностической информации. Наличие данных ограничений не позволяет обеспечить необходимую полноту контроля параметров АК. Поэтому целесообразным является определение актуальных направлений развития и применения датчиков, соответствующих жестким требованиям по точности, массогабаритным характеристикам и устойчивости к внешним воздействующим факторам.

Целью статьи является анализ функциональных возможностей классических и перспективных датчиков контроля механических параметров ЛА на примере датчиков деформации и вибрации для выявления их актуальных направлений развития.

Материалы и методы

Рассмотрим основные разновидности классических и перспективных датчиков с точки зрения их применимости в перспективных ЛА для контроля параметров деформации и вибрации.

Пьезоэлектрический датчик – измерительный преобразователь механического усилия в электрический сигнал; его действие основано на использовании пьезоэлектрического эффекта.

На рисунке 1 приведен внешний вид такого датчика.



Рис. 1. Внешний вид тензодатчика

Fig. 1. Appearance of the load cell

На данном рисунке 1 представлен однокомпонентный пьезоэлектрический датчик вибрации, обеспечивающий возможность измерения виброколебаний конструкции только по одной оси координат. Существуют и трехкомпонентные датчики вибрации, которые могут

измерять параметры вибрации одновременно по трем координатным осям. Подобные датчики применяют для анализа резонансных частот несущих конструкций ЛА, но только при наземных испытаниях, так как в условиях реального полета подобные сенсоры не выдерживают длительных нагрузок и выходят из строя [4; 5].

Датчики деформаций на основе углеродистых волокон относятся к перспективным, которые позволяют оценивать величину деформации испытуемых объектов. Основу составляют углеродные нанотрубки, которые, в свою очередь, наклеиваются на исследуемую поверхность. При деформации объекта происходит сжатие-растяжение датчика, в результате изменяется его сопротивление, изменение которого возможно зафиксировать обычными методами. Увеличенные изображения волокон и реальный датчик деформаций, наклеенный на испытуемую поверхность, представлены ниже (рис. 2).

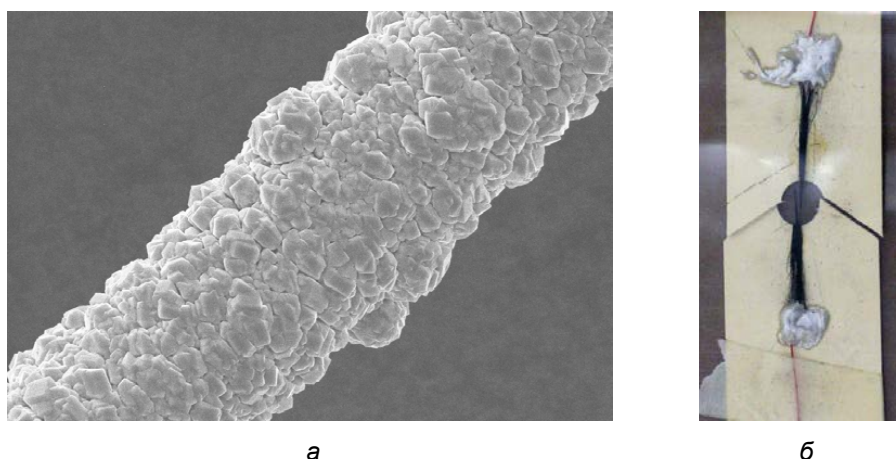


Рис. 2. Увеличенное изображение углеродистых волокон (а) и реальный датчик деформаций, наклеенный на испытуемую поверхность (б)

Fig. 2. An enlarged image of carbon fibers (a) and a real strain gauge glued to the test surface (b)

Реальный диаметр этих волокон достигает несколько десятков нанометров, поэтому технология изготовления относится к нанотехнологии [6]. Линейные размеры таких волокон достигают несколько сантиметров [7]. При жестком закреплении таких волокон на испытываемые элементы летательного аппарата

возможно осуществлять контроль напряженно-деформированных состояний.

На рисунке 3 приведен график зависимости падения напряжения в вольтах на углеродных датчиках от степени деформации в микроstrain (одна миллионная метра).

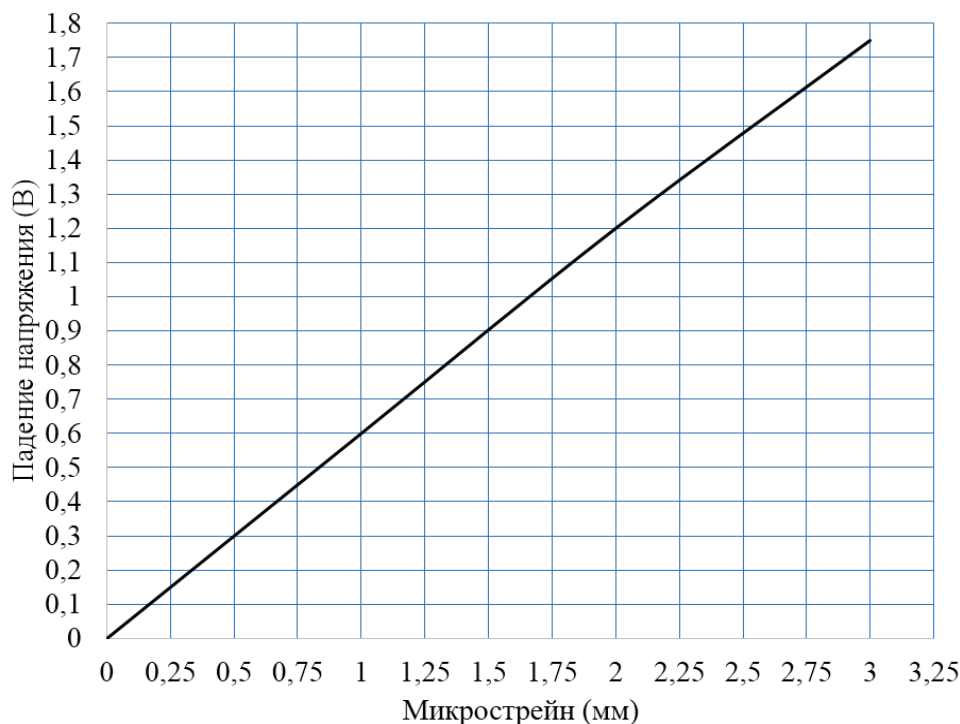


Рис. 3. График зависимости падения напряжения на углеродных датчиках от степени деформации

Fig. 3. Graph of the dependence of the voltage drop on carbon sensors on the degree of deformation

По горизонтальной оси отложены линейные размеры деформации испытываемой пластины в микроstrain, а по вертикальной – падение напряжения на датчике при его деформации (при деформации происходит изменение сопротивления датчика при постоянном протекающем токе через него, что приводит к изменению падения напряжения на этом датчике).

Для диагностирования трансмиссии ЛА активно используют результаты

практических исследований [8] по применению систем пассивной низкочастотной и высокочастотной радиочастотной идентификации (РЧИ) в качестве встроенных сенсоров для выявления дефектов на зубьях трансмиссии в ранних стадиях (появление мелких трещин). Обычно РЧИ называют систему, которая состоит из трех основных элементов: РЧ-метки, РЧ-считывателя и компьютера (рис. 4).



Рис. 4. Обобщенная структурная схема системы радиочастотной идентификации

Fig. 4. Generalized block diagram of the RFID system

РЧИ-метки представляют миниатюрные электронные устройства, которые состоят из микрочипа и антенны. РЧИ-метки делятся на две основные категории: пассивные (не имеют батареи и имеют неограниченный срок службы) и активные (имеют батареи питания, которые или заряжаются, или заменяются). Системы РЧИ также делятся по различным частотам, которые группируются по 4-м основным диапазонам: низкие частоты (НЧ), высокие частоты (ВЧ), сверхвысокие частоты (ОВЧ) и ультравысокие частоты (УВЧ). В таблице диапазоны частот, в которых работает

РЧИ, сгруппированы по 4-м категориям [9; 10].

Основу применения такого метода составляют антенна РЧИ, повторяющая контур зуба зубчатой передачи, и чип РЧИ. Сущность диагностирования заключается в изменении проводного соединения между чипом метки и её антенной, где провод повторяет контур/конфигурацию зубчатого колеса. Когда трещина зуба шестеренки повреждает измененное проводное соединение, РЧИ-метка перестаёт передавать данные в РЧИ-считыватель, таким образом, происходит обнаружение трещины [11].

Таблица. Рабочие диапазоны частот систем РЧИ

Table. Operating frequency ranges of RFID systems

Показатели		Диапазон	Используется РЧИ
LF	Низкие частоты	От 30 кГц до 300 кГц	125 кГц
HF	Высокие частоты	От 3 МГц до 30 МГц	13,56 МГц
VHF	Сверхвысокие частоты	От 30 МГц до 300 МГц	Не используется для РЧИ
UHF	Ультравысокие частоты	От 300 МГц до 3 ГГц	868 МГц, 915 МГц

Анализ технической осуществимости построен на использовании пассивной РЧИ в качестве датчика обнаружения трещин на зубчатом колесе. Система с пассивной РЧИ-меткой обычно включает в себя три компонента: считыватель, пассивную метку и вычислительную систему множественного доступа. Пассивная метка оснащена антенной и

кремниевым чипом, куда входят основные модуляционные схемы и энергонезависимая память. Метка попадает в электромагнитное поле, создаваемое антенной, подключенной к считывателю.

На рисунке 5 изображена типовая силовая диаграмма и диаграмма связей системы РЧИ ближнего радиуса действия, работающие по принципу модуляции нагрузкой.

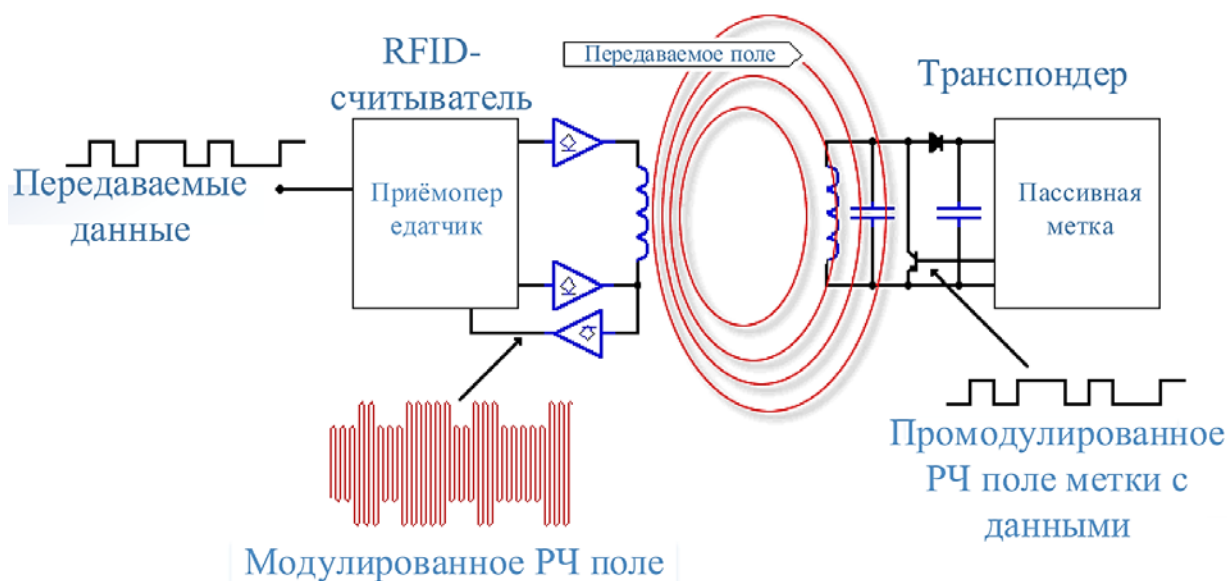


Рис. 5. Механизм связи для меток РЧИ ближнего радиуса действия, работающих в диапазонах ниже 100 МГц

Fig. 5. Communication mechanism for near field RFID tags operating below 100 MHz

Принцип работы основан на последовательном процессе передачи энергии от считывателя на радиочастотную метку и приема модулированного сигнала на считыватель.

Метки в НЧ- и ВЧ-диапазонах, которые работают в частотном диапазоне ниже 100 МГц и в ближнем радиусе действия, имеют низкую скорость передачи данных, однако меньше подвержены влиянию факторов окружающей среды.

Для данных систем РЧИ антенны считывателя и метки в основном имеют форму спирали или контура [12].

Для беспроводного обмена данными между считывателем и пассивной меткой контуры магнитных силовых линий РЧ-считывателя должны достичь антенны пассивной метки, и наоборот. Когда пассивная метка РЧИ или считыватель находятся на металлической поверхности, антенна располагается в непосредственной близости от металло-

конструкции. Вихревые токи наблюдаются внутри металла вблизи антенны из-за магнитных силовых потоков считывателя или метки. Подобный вихревой ток

также порождает магнитное поле, которое искривляет силовые потоки магнитного поля, необходимые для обмена данными (рис. 6).

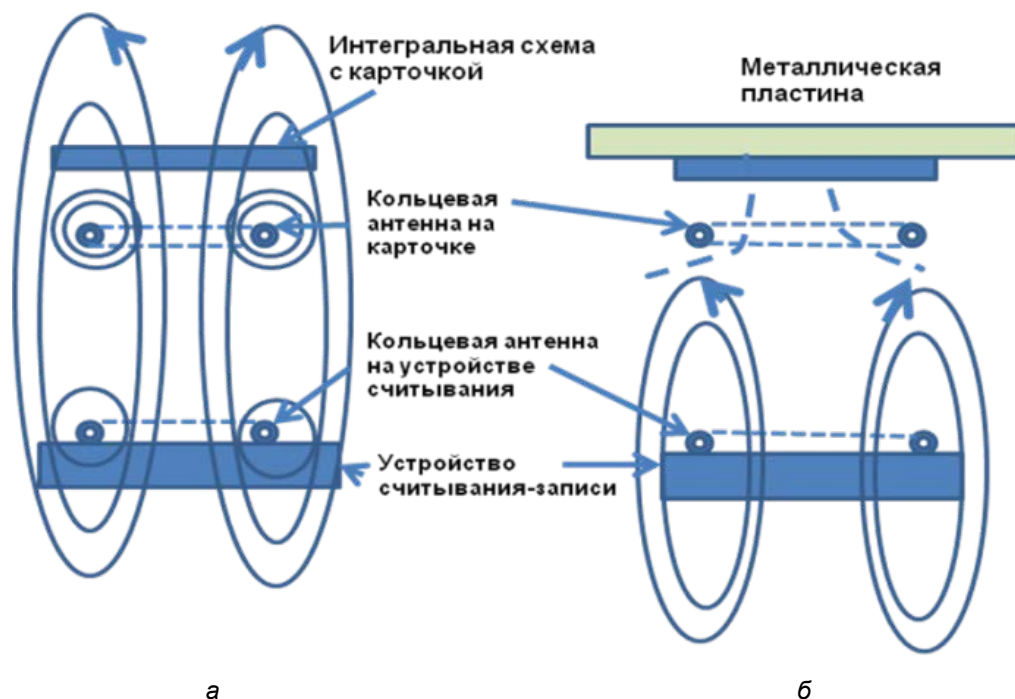


Рис. 6. Условия взаимодействия без участия (а) и с участием (б) металлоповерхности

Fig. 6. Interaction conditions without participation (a) and with participation (б) of the metal surface

На расстоянии порядка 10 м от считывателя приёмная антенна РЧИ получает только часть электромагнитной энергии, остальная часть которой отражается обратно из-за несогласованного волнового сопротивления, возникающего между антенной и контуром нагрузки. Если изменять волновое сопротивление антенны во времени, метка может отражать часть энергии, пропорциональной её собственной. Метод несогласованного сопротивления называется обратным излучением. Принято, что метки с соединением на дальнем расстоянии работают с электромагнитным полем в УВЧ-диапазоне. РЧИ дальнего

радиуса действия используется на расстояниях более 3-х метров [13].

Для систем РЧИ дальнего радиуса действия, работающих в диапазоне выше 100 МГц, антенны применяются при работе считывателя и метки и устроены по принципу электрического диполя. При размещении электрической дипольной антенны вблизи от металлической поверхности происходит заметное изменение её сопротивления. Изменение сопротивления расстраивает антенну (влияет на её резонансную частоту). Следовательно, передача энергии от РЧ-считывателя на метку и обратно значительно снижается. Если

меньше энергии сообщается, количество переданной мощности тоже снижается, что, в свою очередь, влияет на дальность считывания системы. Размещение антенны вблизи металлоконструкций вызывает изменения в работе параметров антенны, таких как коэффициент

направленности и диаграмма направленности [14].

На рисунке 7 изображена типовая диаграмма связей системы РЧИ дальнего радиуса действия, работающая на частотах выше 100 МГц.

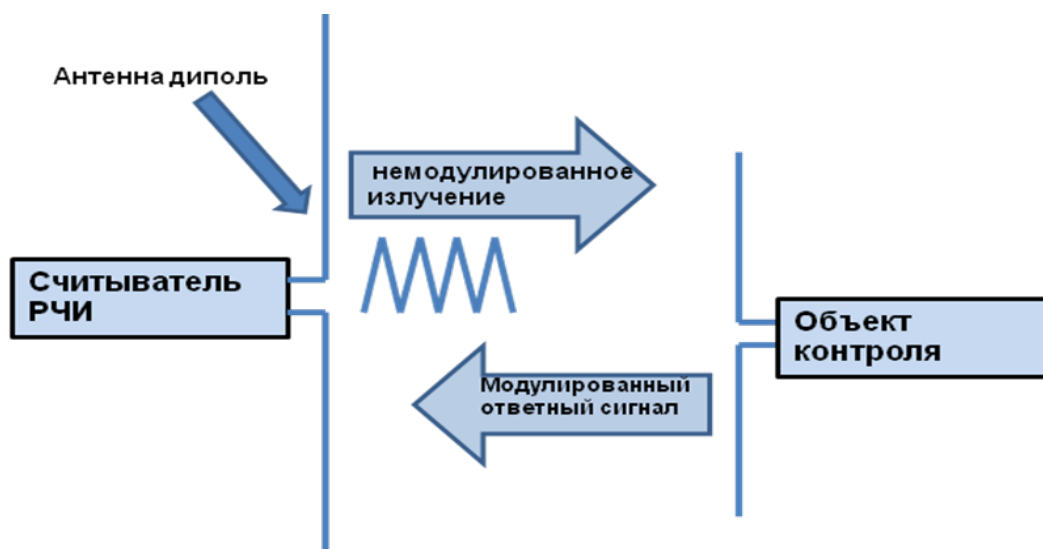


Рис. 7. Механизм связи для меток РЧИ дальнего радиуса действия, работающих в диапазонах выше 100 МГц

Fig. 7. Communication mechanism for long range RFID tags operating in bands above 100 MHz

Идея использования пассивной РЧ-метки в качестве датчика обнаружения трещины зуба зубчатого колеса (ЗК) требует модификации проводного соединения между чипом РЧ-метки и её антенной, при которой видоизменённое соединение повторяет очертания ЗК по секторам. На рисунке 8 показана идея использования множества РЧ-меток как датчиков обнаружения трещины зуба ЗК. Провода, выделенные чёрным, – это видоизменённое соединение между чипом РЧ-метки и её антенной [15].

Трещина ЗК будет обнаружена в том случае, если такой дефект нарушит про-

водное соединение и РЧ-метка перестанет работать, а именно метка перестанет взаимодействовать с РЧ-считывателем посредством радиоволн. Выбор подходящей по всем параметрам системы РЧИ как датчика обнаружения трещин является относительно сложным процессом. Дальность связи между считывателем и меткой – это компромисс между набором оптимальных технических соотношений и в конечном счёте зависит от множества факторов [16]. Конструктивное исполнение антенн метки и считывателя является принципиально важным фактором.

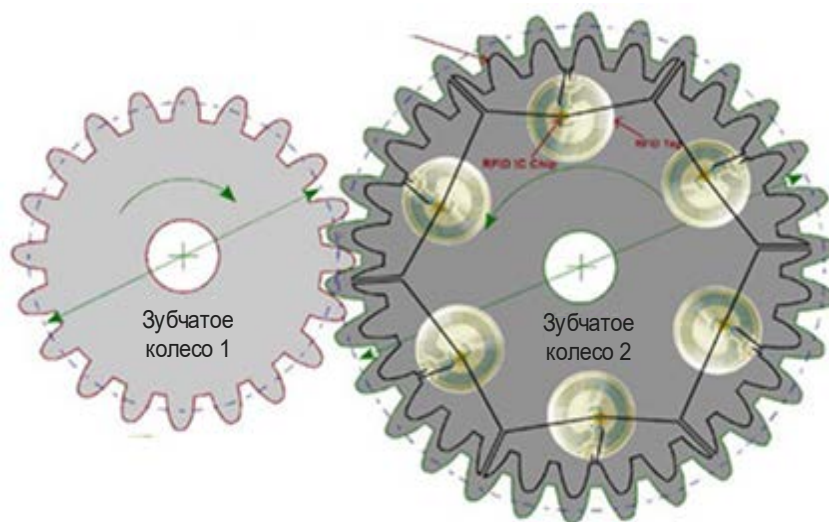


Рис. 8. Иллюстрация использования пассивной РЧ-метки в качестве датчика обнаружения трещины зуба ЗК (метки по масштабу не соотносятся с передачей зацепления)

Fig. 8. Illustration of the use of a passive RFID tag as a sensor for detecting a cracked tooth in the gear (tags in scale do not correspond to the transmission of gearing)

Пункты, приведённые ниже, являются основными и общими факторами при выборе системы РЧИ:

- частотный диапазон (зависит от нормативов в этой сфере в той стране, где будет использоваться система РЧИ);
- размер и форма (метка должна крепиться или встраиваться на интересующий объект);
- дальность считывания (требуется определить минимальное расстояние для считывания);
- объекты (работа системы РЧИ зависит от объектов, на которые она помещается);
- антенна считывателя (так же, как и антенны метки) настраивается с учетом индукционного контакта с металлическими предметами;
- ориентация и поляризация (ориентация антенны метки относительно поляризации электромагнитного поля считывателя может оказывать существенное влияние на связь и дальность считывания);

– динамика (системы РЧИ могут применяться для движущихся по ленточному транспортёру с определённой скоростью объектов). По сравнению со статично-расположенными метками время нахождения движущихся меток в магнитном поле меньше, и повышаются требования к скорости считывания. В рамках рассматриваемой проблематики метки крепятся на поверхность колеса и вращаются вместе с ним, в то время пока антенна считывателя стационарно закреплена строго под низом, где проходят метки;

– надёжность (РЧ-считыватели и метки должны выдерживать перепады температур, влажности и давления (нагрузки), а также нагрузку таких процессов, как сборка и пластование на колесе).

Следует иметь в виду, что для обнаружения трещины металлического зуба зубчатого колеса необходимо учитывать нахождение этой метки в окружении металлических предметов (антенны метки и считывателя будут работать в закрытой металлической среде). В среде, где имеются металлоконструкции, будут

наблюдаться изменения диаграммы направленности и искажения направленности излучения антенн. Самый распространенный способ уменьшения подобных эффектов – введение магнитного слоя между металлической поверхностью и пассивной меткой таким образом, как показано ниже (рис. 9).

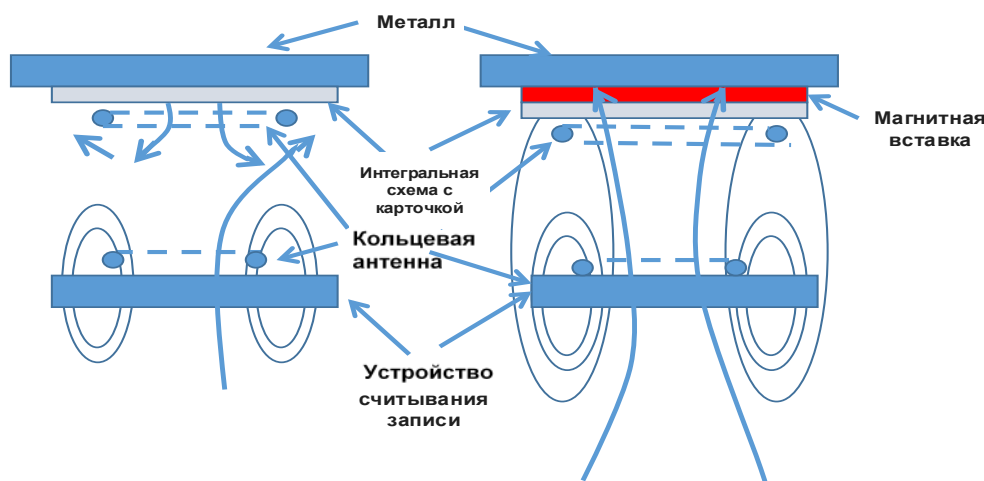


Рис. 9. Система РЧИ без введения магнитной платы (а) и с магнитной платой (б)

Fig. 9. RFID system without the introduction of a magnetic board (a) and with a magnetic board (b)

Проведен ряд исследований, позволивших установить достоверность такого решения [17]. Показано, что эпоксидная смола будет наиболее подходящим материалом для крепления таких меток к поверхности исследуемого металла. Смешивание намагниченных частиц с эпоксидной смолой позволит формировать требуемый магнитный слой. Для того чтобы система РЧИ диапазона ВЧ/НЧ функционировала как датчик обнаружения трещин зуба ЗК, она должна быть включена в коробку передач. Если рассматривать системы силовой передачи вертолёта, температура внутри коробки передач при 100% нагрузки должна достигать 100°C. Большинство пассивных меток ВЧ/НЧ, существующих на рынке, имеют максимальный рабочий диапазон между 60 и 70°C.

Еще одна область исследования касается поверхности ЗК, на которую крепится модифицированная метка. Если рассматривать коробку передач самолета, то зацепляющиеся шестерни внутри коробки передач не являются предметом для периодического технического осмотра. По этой причине, если видоизменённые метки РЧИ вводятся в коробку передач, они остаются исправными на протяжении всего срока службы коробки передач. Для поддержания частоты ложных сигналов на низком уровне необходимо разработать метод, который сцепит РЧ-метку с поверхностью ЗК.

Особый интерес для авиационного применения представляет использование датчиков измерения нагруженных состояний элементов планера на основе оптоволокна с ячейками Брэгга (рис. 10).

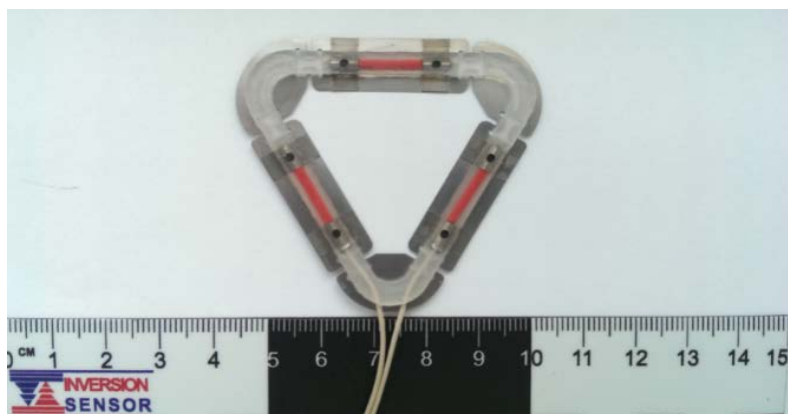


Рис. 10. Датчик Брэгга для измерения нормальной и тангенциальной составляющей напряжений

Fig. 10. Bragg sensor for measuring the normal and tangential stress components

На рисунке 10 представлена «розетка» из трех оптоволоконных датчиков Брэгга, расположенных под углом 60° друг к другу. Каждая из ячеек имеет свою среднюю частоту, что позволяет однозначно идентифицировать ее местоположение на борту летательного аппарата. Такая конфигурация позволяет опреде-

лять напряженно-деформирующие состояния в 360° по поверхности. Реальные размеры оптоволоконного датчика Брэгга составляют 4–5 см [18; 19; 20].

На рисунке 11 представлены преимущества датчиков измерения механических напряжений на основе оптоволокон с ячейками Брэгга.

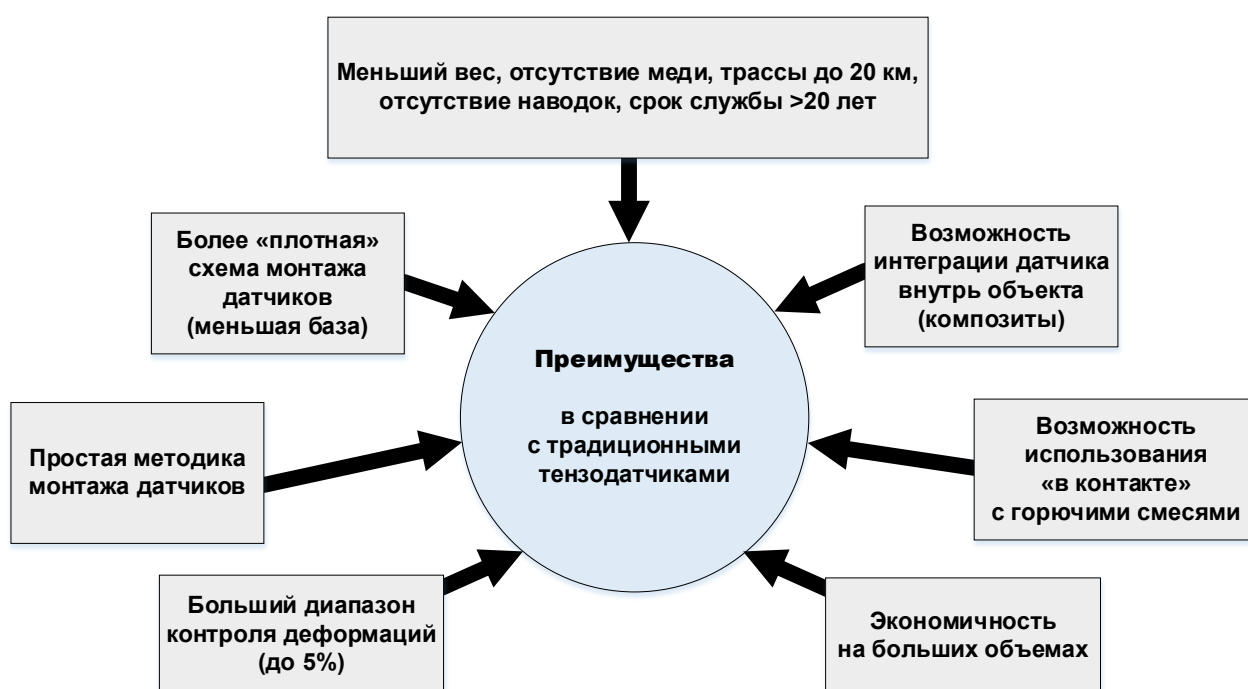


Рис. 11. Преимущества датчиков на основе оптоволокон с распределенными ячейками Брэгга

Fig. 11. Benefits of fiber optic sensors with distributed Bragg cells

Результаты и их обсуждение

При воздействии на планер и ответственные узлы ЛА полетных нагрузок в них возникают механические деформации, приводящие к механическим напряжениям. Механическое напряжение разделяют на две составляющие – нормальное напряжение (направленное по нормали к сечению) и касательное (тангенциальное, в плоскости сечения).

Если на элементарную площадку действуют только нормальные напряжения (касательные равны нулю), то такие напряжения называются главными.

В большинстве случаев сложного (трехосного) напряженного состояния напряжениями вдоль одной оси можно пренебречь. В этом случае имеет место плоское напряженное состояние. В случае сложного нагружения конструкции (растяжение + изгиб + кручение) имеет место плоское напряженное состояние. При экспериментальном исследовании напряженного состояния возможны три случая:

1. В исследуемой точке конструкции имеет место линейное напряженное состояние и известно направление нормального напряжения σ (рис. 12, а).

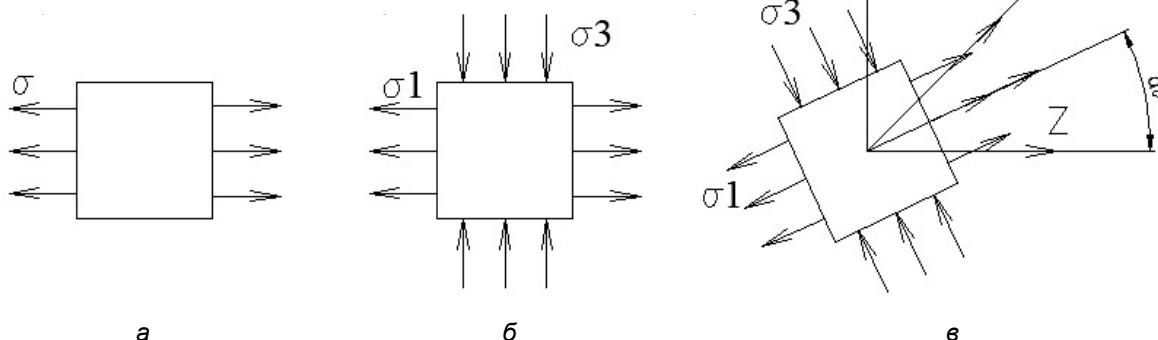


Рис. 12. Случаи напряженного состояния: а – линейное; б – плоское с известным направлением главных напряжений; в – плоское с неизвестным направлением главных напряжений

Fig. 12. Cases of stress state: а – linear; б – flat with a known direction of principal stresses; в – flat with unknown direction of principal stresses

В этом случае для определения величины нормального напряжения σ достаточно установить один волоконно-оптический тензодатчик (ВОТД) с одной брэгговской решеткой вдоль направления нормального напряжения σ . Величина деформации ε определяется опытным путем и при известном модуле продольной упругости E (Па), значение σ находят согласно закону Гука:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1)$$

2. В исследуемой точке конструкции имеет место плоское напряженное состояние с известным направлением главных напряжений. Для определения величин этих напряжений необходимо установить ВОТД с двумя брэгговскими решетками в направлении главных напряжений σ_1 и σ_3 . С помощью ВОТД

определяют величины главных деформаций ε_1 и ε_3 , после чего по соотношениям закона Гука (2) при плоском напряженном состоянии находят значения главных напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3), \\ \sigma_3 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1).\end{aligned}\quad (2)$$

3. В исследуемой точке конструкции имеет место плоское напряженное состояние и направление α_0 главных напряжений не известно. В этом случае необходимо установить ВОТД с тремя брэгговскими решетками в двух взаимно перпендикулярных направлениях осей z , x и под углом $\alpha = 45^\circ$ к ним.

Определив из измерений деформации вдоль осей Z , X и 45° ε_z , ε_x , ε_{45} и используя зависимость

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_z \cos^2 \alpha + \varepsilon_x \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \gamma_{zx} \cdot \sin 2\alpha, \quad (3)$$

вначале находят деформацию сдвига по формуле (2) при $\alpha = 45^\circ$:

$$\gamma_{zx} = \varepsilon_z + \varepsilon_x - 2\varepsilon_{45}, \quad (4)$$

затем по обобщенному закону Гука (5) – (7) определяют величину нормальных напряжений σ_z и σ_x на двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль осей Z и X) и касательное (тангенциальное) напряжение τ_{zx} в плоскости ZX :

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_z + \mu\varepsilon_x), \quad (5)$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_z), \quad (6)$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx} = \frac{E}{2(1+\mu)}(\varepsilon_z + \varepsilon_x - 2\varepsilon_{45}). \quad (7)$$

Величину и направление главных напряжений находят по следующим формулам:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2}, \quad (8)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{2\tau_{zx}}{\sigma_z - \sigma_x}\right). \quad (9)$$

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- датчики на основе углеродных волокон на данный момент находятся в стадии исследования и предполагают их внедрение в структуру контролируемых поверхностей, что представляет существенную технологическую трудность;
- датчики на основе эмиссионной плазмы требуют достаточно высокой чистоты контролируемой поверхности и неприменимы в реальных условиях загрязненной поверхности для контроля;
- датчики на основе волн Лэмба достаточно хорошо применимы при статических испытаниях на Земле, однако для применения в полете они непригодны в силу необходимости большого количества питающих проводов и трудностей отстройки от помех, возникающих в полете;
- датчики на основе магнитной ленты находятся в стадии изучения и обладают малой защищенностью от электромагнитных помех;
- датчики на основе вихретоковых методов позволяют достаточно полно об-

наруживать деформации контролируемой поверхности, но требуют большого объема аппаратуры, что пригодно только в условиях контроля на Земле.

Выводы

Таким образом, для реализации поставленных задач в области диагностики технического состояния планера и основных механических узлов должны применяться датчики с минимальными массогабаритными показателями и потребляемой мощностью. К числу таких перспективных датчиков относятся датчики на основе оптоволокна с распределенными ячейками Брэгга, позволяющими контролировать напряженно-деформируемые состояния планера и основных механических узлов. На базе таких датчиков весьма перспективно разработать технические средства, позволяющие осуществлять мониторинг динамики внутренних деформаций контролируемых узлов и агрегатов в реальном масштабе времени, основанный на измерении спектра внутренних ускорений

нагруженных узлов планера и основных агрегатов с учетом фазовых соотношений. Развитием метода диагностики напряженно-деформируемых состояний планера и основных узлов летательных аппаратов является метод, основанный на использовании частотно-доплеровских волоконно-оптических датчиков, имеющих существенно высокое отношение сигнал/шум при достаточной широкполосности и сферической диаграмме направленности.

В качестве перспективных направлений исследований в области создания перспективных датчиков с новыми физическими свойствами следует считать оптоволоконные брэгговские датчики с наклонной решеткой. Эти датчики, обладающие уникальным свойством разделения режима поляризации, показали такие векторные функции обнаружения, которые позволяют не только измерить амплитуду загрузки и скручивания, но и определить направление измеряемых величин.

Список литературы

1. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов, Д. С. Коптев / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 211 с.
2. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Коптев Д. С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики, и прогностики состояния авиационного комплекса «человек – машина» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 46–57.

3. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Стратегия разработки систем диагностики и прогно-стики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Информа-ционно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 2. С. 65–70.
4. Датчики для измерения, контроля, диагностики и управления физических и тех-нологических процессов: справочник: в 2 т. / под общ. ред. А. В. Гориша. М.: Москов-ский государственный университет леса, 2012. Т. 1, кн. 1. 576 с.
5. Янчик В. В., Панич А. Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический датчик посту-пательного и углового ускорения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. № 2. С. 191–199.
6. Induced superconductivity in the quantum spin Hall edge / S. Hart, H. Ren, T. Wagner, P. Leubner, M. Mühlbauer, C. Brüne, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, A. Yacoby // Nature Physics. 2014. Vol. 10. P. 638–643. <https://doi.org/10.1038/nphys3036>.
7. Temperature-dependent optical properties of plasmonic titanium nitride thin films / H. Reddy, U. Guler, Zh. Kudyshev, A.V. Kildishev, V. M. Shalaev, A. Boltasseva // ACS Photonics. 2017. Vol. 4, N 6. P. 1413–1420. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00127>.
8. Хаханов В. И., Филиппенко И. В. Особенности построения систем радиочастот-ной идентификации // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2008. № 6/3 (36). С. 9–12.
9. Выбор варианта системы радиочастотной идентификации на основе модифици-рованного метода анализа иерархий / В. В. Бутенко, С. А. Багдасарян, А. Г. Кащенко, Г. А. Кащенко, Р. В. Семенов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2012. № 4. С. 4–9.
10. Радиочастотная идентификация – перспективное направление развития радио-электронных систем / В. В. Бутенко, С. А. Багдасарян, Г. А. Кащенко, О. В. Николаев, Р. В. Семенов // Труды научно-исследовательского института радио. 2010. № 3. С. 80–84.
11. Comparison Of Protocols For Ubiquitous Wireless Sensor Network / A. Muthanna, A. Paramonov, A. Koucheryavy, A. Prokopiev // 6th Intern. Congress on Ultra Modern Tele-communications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014. St. Petersburg: IEEE Computer Society, 2015. P. 334–337.
12. Identification of the Internet of Things Devices with Augmented Reality Technolo-gies / V. Teltevskaia, V. Zelenov, N. Shustov, V. Kulik, R. Kirichek, M. Makolkina // Tele-com IT. 2017. Vol. 5, is. 4. P. 64–70.
13. Wu Hao-Ping. Intelligent Parking Management System Utilizing RFID // The ACM MobiSys 2019 on Rising Stars Forum – RisingStarsForum’19. New York: ACM Press, 2019. P. 37–41.

14. Zhai Yue, Guo Qiang, Min Hao. An Effective Velocity Detection Method for Moving UHF-RFID Tags // 2018 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA). Macao: IEEE, 2018. P. 1–5.
15. RFID-Based Navigation of Subway Trains / A. M. Kostrominov, O. N. Tyulyandin, A. B. Nikitin, M. N. Vasilenko, A. T. Osminin // 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Varna: IEEE, 2020. P. 1–6.
16. Unterhuber A. R., Iliev Stoyan, Biebl Erwin. Influence of the Vehicle Velocity on the Number of Reads in UHF RFID Scenarios // 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Pisa: IEEE, 2019. P. 421–426.
17. Vehicle identification system through the interoperability of an ultra high frequency radio frequency identification system and its database / Jessie R. Balbin, Ramon G. Garcia, Flordeliza L. Valiente, Brian Christopher F. Aaron, Christopher John D. Celimen, Juan Carlos K. De Peralta, Joshua P. Despabiladeras // 2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). Manila: IEEE, 2017. P. 1–5.
18. Ерасов В. С., Яковлев Н. О., Нужный Г. А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 440–448.
19. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms / H. Guo, G. Xiao, N. Mrad, J. Yao // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 3687–3705.
20. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) / Е. Н. Каблов, О. В. Старцев, И. М. Медведев, И. С. Шелемба // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 26–34. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34>.

References

1. Mukhin I. E., Mukhin A. I., Mikhailov S. N., Koptev D. S. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh i letatel'nykh apparatov [Methodological foundations of synthesis of diagnostic systems for the technical condition of spacecraft and aircraft]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018. 211 p.
2. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Koptev D. S. Napravleniya i prakticheskie rezul'taty sozdaniya metodov i sredstv diagnostiki, i prognostiki sostoyaniya aviatsionnogo kompleksa "chelovek – mashina" [Directions and practical results of creating methods and diagnostic tools, and prognostics of the state of the aviation complex "man – machine"]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, in-*

formatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 46–57.

3. Koptev D. S., Mukhin I. E. Strategiya razrabotki sistem diagnostiki i prognostiki tekhnicheskogo sostoyaniya perspektivnykh letatel'nykh apparatov [Strategy for the development of diagnostic systems and prognostics of the technical condition of promising aircraft]. *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy = Information-Measuring and Control Systems*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 65–70.

4. Datchiki dlya izmereniya, kontrolya, diagnostiki i upravleniya fizicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov [Sensors for measuring, monitoring, diagnostics and control of physical and technological processes]; ed. by A.V. Gorish. Moscow, Moscow State University of Forest Publ., 2012, vol. 1, book 1. 576 p.

5. Yanchich V. V., Panich A. E. Dvukhparametrovyi p'ezoelektricheskii datchik postupa-tel'nogo i uglovogo uskoreniya [Two-parameter piezoelectric sensor of translational and angular acceleration]. *Izvestiya Yuzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences*, 2016, no. 2, pp. 191–199.

6. Hart S., Ren H., Wagner T., Leubner P., Mühlbauer M., Brüne C., Buhmann H., Mo-lenkamp L. W., Yacoby A. Induced superconductivity in the quantum spin Hall edge. *Nature Physics*, 2014, vol. 10, pp. 638–643. <https://doi.org/10.1038/nphys3036>

7. Reddy H., Guler U., Kudyshev Zh., Kildishev A.V., Shalaev V. M., Boltasseva A. Tem-perature-dependent optical properties of plasmonic titanium nitride thin films. *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1413–1420. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00127>

8. Khakhanov V. I., Filippenko I. V. Osobennosti postroeniya sistem radiochastotnoi identifikatsii [Features of the construction of radio frequency identification systems]. *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii = East European Journal of Advanced Technologies*, 2008, no. 6/3 (36), pp. 9–12.

9. Butenko V. V., Bagdasaryan S. A., Kashchenko A. G., Kashchenko G. A., Semenov R. V. Vybor varianta sistemy radiochastotnoi identifikatsii na osnove modifitsirovannogo metoda analiza ierarkhii [Choosing a variant of the radio frequency identification system based on a modified method of hierarchy analysis]. *Trudy Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Radio = Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*, 2012, no. 4, pp. 4–9.

10. Butenko B. V., Bagdasaryan C. A., Kashchenko G. A., Nikolaev O. V., Semenov R. V. Radiochastotnaya identifikatsiya – perspektivnoe napravlenie razvitiya radioelektronnykh sis-tem [Radio frequency identification – a promising direction for the development of radioelec-tronic systems]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta radio = Proceedings of the Scien-tific Research Institute of Radio*, 2010, no. 3, pp. 80–84.

11. Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., Prokopiev A. Comparison Of Protocols For Ubiquitous Wireless Sensor Network. 6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014. St. Petersburg, IEEE Computer Society, 2015, pp. 334–337.
12. Teltevsckaya V., Zelenov V., Shustov N., Kulik V., Kirichek R., Makolkina M. Identification of the Internet of Things Devices with Augmented Reality Technologies. *Telecom IT*, 2017, vol. 5, is. 4, pp. 64–70.
13. Wu Hao-Ping. Intelligent Parking Management System Utilizing RFID. The ACM MobiSys 2019 on Rising Stars Forum – RisingStarsForum'19. New York, ACM Press Publ., 2019, pp. 37–41.
14. Zhai Yue, Guo Qiang, Min Hao. An Effective Velocity Detection Method for Moving UHF-RFID Tags. 2018 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA). Macao, IEEE, 2018, pp. 1–5.
15. Kostrominov A. M., Tyulyandin O. N., Nikitin A. B., Vasilenko M. N., Osminin A. T. RFID-Based Navigation of Subway Trains. 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Varna, IEEE Publ., 2020, pp. 1–6.
16. Unterhuber A. R., Iliev Stoyan, Biebl Erwin. Influence of the Vehicle Velocity on the Number of Reads in UHF RFID Scenarios. 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Pisa, IEEE Publ., 2019, pp. 421–426.
17. Jessie R. Balbin, Ramon G. Garcia, Flordeliza L. Valiente, Brian Christopher F. Aaron, Christopher John D. Celimen, Juan Carlos K. De Peralta, Joshua P. Despabiladeras. Vehicle identification system through the interoperability of an ultra high frequency radio frequency identification system and its database. 2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). Manila, IEEE Publ., 2017, pp. 1–5.
18. Yerasov V. S., Yakovlev N. O., Nuzhny G. A. Kvalifikatsionnye ispytaniya i issledovaniya prochnosti aviatsionnykh materialov [Qualification tests and strength studies of aviation materials]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2012, no. 5, pp. 440–448.
19. Guo H., Xiao G., Mrad N., Yao J. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms. *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 3687–3705.
20. Kablov E. N., Startsev O. V., Medvedev I. M., Shelemba I. S. Volokonno-opticheskie datchiki dlya monitoringa korrozionnykh protsessov v uzlakh aviatsionnoi tekhniki (obzor) [Fiber-optic sensors for monitoring corrosion processes in aviation equipment nodes (review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. 3 (48), pp. 26–34. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34>

Информация об авторах / Information about the Authors

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Мухин Иван Ефимович, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru

Ivan E. Mukhin, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru