

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЕРЕДОВЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Р.Р. Губайдуллин, Т.А. Аглиуллин

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

Аннотация. В работе представлен обзор систем контроля динамических характеристик колес транспортных средств, таких как: силы, моменты, угловые скорости. Были рассмотрены существующие и перспективные системы контроля, определены обобщающие характеристики систем указанного класса, что позволило предложить классификацию, позволяющую определить область применения и специфические особенности систем каждого класса. Определены перспективные направления развития передовых систем контроля динамических характеристик сцепления колеса с дорожным покрытием и способы их реализации в системах активной безопасности транспортных средств. По совокупности задач, стоящих перед передовыми системами контроля динамических характеристик, и техническими возможностями систем контроля определены перспективные пути развития, основанные на использовании волоконно-оптических измерительных систем с радиофотонными методами съема и обработки сигнала, и применением адресных волоконных брэгговских структур в качестве чувствительного элемента датчика.

Ключевые слова: радиофотонные сенсорные системы, волоконная брэгговская решетка, адресные волоконные брэгговские структуры, контроль динамических характеристик колес транспортных средств.

Введение

С развитием современных систем активной безопасности (САБ) транспортных средств (ТС), таких как: система предотвращения блокировки колес, противобуксовочная система, система курсовой устойчивости и ряда других, стали появляться системы оценки сил, моментов, угловых скоростей и других динамических характеристик, действующих на колеса транспортного средства при их движении и контакте с дорожным полотном. Концепцию данных систем в инженерном сообществе, как правило, называют «интеллектуальной» или «умной» шиной. В зарубежной литературе используются термины «Intelligent tire», «Smart tire», «Sensor wheel» [1–5]. Главной отличительной особенностью данных систем является то, что они нацелены на решение проблемы определения и контроля параметров сцепления колеса с дорожным полотном в динамике при различных условиях (погодные явления, состояние дорожного полотна и шины). Эффективность классических САБ, основанных на определении силы сцепления за счет контроля коэффициента проскальзывания колеса, ограничена использованием математических алгоритмов корректировки параметров эмпирических или полуэмпирических моделей шин под текущие условия сцепления. Используемые алгоритмы, как правило, основываются на рекурсивных методах, таких как ПИД-регулятор или фильтр Калмана, которые требуют все более мощных вычислительных средств, при этом не гарантируя эффективной работы алгоритма во всем диапазоне использования ТС [6–9]. Для решения данной проблемы в системах концепции «умной шины» закладываются другие математические модели, основанные на простых физических моделях [10–15]. Согласно классификатору моделей шин, представленному в [16], они используют несколько физических параметров,

позволяющих им более точно описать процесс взаимодействия колеса с дорожным полотном при различных условиях эксплуатации ТС, и точнее оценить динамические характеристики сцепления колеса с дорогой.

За последние четверть века предложено большое количество различных интеллектуальных систем контроля динамических характеристик колес ТС, призванных сменить классические системы контроля, которые впервые были использованы в 1940-х годах в авиации. Классические подходы оценки динамических характеристик сцепления колеса с дорожным полотном и по сей день продолжают развиваться путем развития алгоритмов корректировки математических моделей шин в САБ. Первые разработки интеллектуальных систем датируются 1990-ми годами и основываются на технологии тензометрии (тензорезисторы, пьезоэлементы); в 2000-х годах появились системы оптического контроля и на основе акселерометрии; в последние два десятилетия получили развитие сенсорные системы на основе оптоволоконных датчиков. Классификация систем активной безопасности транспортных средств позволит, как усовершенствовать уже существующие системы, так и определить пути развития систем этого класса.

Целью работы является классификация измерительных систем контроля динамических характеристик сцепления колес транспортного средства с дорожным полотном, определение перспективных направлений развития передовых систем подобного класса для решения задач повышения эффективности САБ транспортных средств.

Тип физических полей

По типу измеряемых физических полей различают три основных и один дополнительный подходы для оценки динамических характеристик сцепления колеса с дорожным полотном: классический, ускорение компонентов колеса, деформация компонентов колеса.

Классический подход основан на измерении двух параметров: угловой скорости колеса и ускорения кузова автомобиля [16–20]. Первые системы измеряют только угловую скорость колеса. На вращающуюся ступицу колеса устанавливается реперный диск с насечками, а на элемент подвески неподвижный датчик, измеряющий угловую скорость колеса. На основе данных с датчика и заложенных в систему рекурсивных алгоритмов [17–19], определяется коэффициент проскальзывания колеса, который используется для оценки продольной силы сцепления колеса с дорожным полотном. Позже для измерения угла рыскания в кузов ТС стали устанавливать гироскоп, который дополнительно измеряет ускорение кузова автомобиля. На основе данных об угловой скорости колеса и ускорения кузова автомобиля оценивается угол рыскания кузова ТС и боковая сила сцепления колес с дорогой. Непосредственное измерение других динамических характеристик, таких как: моменты, действующие на колесо; вертикальная нагрузка на колесо - значительно затруднено, и поэтому зачастую такие характеристики оцениваются косвенно специальными алгоритмами, что, однако, не гарантирует высокой точности оценки этих параметров.

Второй подход основан на измерении ускорения (в двух-трех осях), действующего на элементы колеса. Для этого на объект контроля устанавливается от одного до нескольких гироскопов [21, 22]. На их основе система оценивает угловую скорость и действующие на колесо в координатных осях силы. Однако, оценка моментов сил в подобных системах остается ограниченной и, так же, как и в классических системах, требует специальных алгоритмов.

Третий подход основан на измерении деформаций элементов колеса или подвески ТС [1–5, 23–36]. Для измерения деформаций изучаемых объектов применяются контактные либо бесконтактные измерительные средства. Контактные измерительные средства устанавливаются в элементы колеса или подвески, а бесконтактные размещаются на

соседних элементах колеса или подвески. Максимально укомплектованные системы, основанные на измерении деформации, теоретически способны с высокой точностью обеспечить контроль всех основных динамических характеристик, таких как: силы и моменты в трех координатных осях, действующие на колесо в пятне контакта с дорожным полотном; угловую скорость колеса; тангенциальные, радиальные и осевые деформации компонентов колеса.

Помимо средств измерения механических характеристик сцепления колеса с дорогой используются и средства контроля температурного поля колеса и шины [2, 3, 23]. Изменение температурного поля компонентов колеса может оказывать влияние на показания датчиков, измеряющих деформацию, таких как: резистивные, пьезоэлектрические и волоконные. К тому же адгезивные свойства шины напрямую зависят от ее температуры [10, 11, 37–39]. Таким образом, точный контроль динамических механических характеристик сцепления колеса требует измерения поля температуры для компенсации показаний датчиков деформации и оценки адгезивной составляющей силы сцепления колеса с дорожным полотном. Подобный контроль возможно организовать либо с помощью отдельных датчиков температуры, либо с помощью датчиков, способных измерять температуру и деформацию одновременно, например, оптоволоконных датчиков, использующих в качестве чувствительного элемента волоконные брэгговские решетки (ВБР).

Метод измерительного преобразования

Основой каждой системы контроля является датчик и чувствительный элемент, измеряющий одно или несколько физических полей и обеспечивающий измерительное преобразование. Выбор типа датчика определяется типом эффектов или явлений, на базе которых основывается его принцип действия. За время развития систем контроля учеными и инженерами было предложено огромное количество типов датчиков, большая часть датчиков были рассмотрены и классифицированы по эффектам, на которых основана работа датчиков и сопоставлены с измеряемыми физическими полями.

В основе датчика угловой скорости могут лежать чувствительные элементы на основе эффекта электромагнитной индукции, на эффекте анизотропной магниторезистивности, на эффекте Холла, и на оптических эффектах на основе лазера и фотодетектора. Как правило, они так и называются: индукционные, магниторезистивные, датчики Холла, и оптические.

Индукционный датчик скорости наиболее прост по конструкции и принципу работы [40]. Его основу составляет катушка индуктивности, внутри которой размещен мощный постоянный магнит и железный магнитный сердечник. Торцы катушки с магнитным сердечником располагаются напротив металлического зубчатого колеса, жестко установленного на ступице. В покое в катушке датчика тока нет. Во время движения транспортного средства вблизи магнитного сердечника датчика проходят зубцы ротора, что приводит к изменению магнитного поля, что порождает в катушке индуктивности переменный ток. Причем частота тока зависит от скорости вращения ротора, которая определяется скоростью движения автомобиля. Главным достоинством индукционного датчика является отсутствие необходимости в подводе электропитания к нему. Однако это достоинство является и существенным недостатком, так как ТС необходимо преодолеть минимальную–скорость, достаточную для формирования переменного магнитного поля, позволяющего фиксировать наличие тока в цепи датчика. Это накладывает существенные ограничения на работу САБ при малых скоростях ТС [16].

Магниторезистивные датчики скорости основаны на эффекте изменения электрического сопротивления ферромагнитных материалов при изменении их ориентации в магнитном поле [41,42]. В чувствительном элементе датчика используются

металлические проводники, определенным образом распределяющие силовые линии магнитного поля. Пластины из специального железоникелевого сплава и проводники помещены в интегральную микросхему, в которой располагается и система регистрации выходного сигнала. Микросхема устанавливается в датчик, располагающийся напротив импульсного ротора — пластикового кольца с намагниченными участками, которое жестко устанавливается на ступице колеса. В покое сопротивление ферромагнитных пластин остается неизменным. Во время движения транспортного средства мимо чувствительного элемента датчика проходят намагниченные участки импульсного кольца, что изменяет направление магнитного поля, а это, в свою очередь, изменяет сопротивления пермаллоевых пластин. В результате, на выходе формируется импульсный сигнал, частота которого пропорциональна скорости движения автомобиля. Данный тип датчика угловой скорости считается достаточно точным и надежным для классических систем [16].

Датчик Холла основан на возникновении поперечной разности потенциала в плоском проводнике, помещенном в магнитное поле [42]. Основу датчика составляет интегральная микросхема, за которой располагается постоянный магнит, а вокруг может располагаться металлическая пластина - магнитопровод. Все это помещено в корпус, в задней части которого находится электрический разъем или проводник с разъемом. Датчик располагается напротив импульсного ротора, который может выполняться либо в виде металлического зубчатого колеса, либо кольца с намагниченными участками. Импульсный ротор жестко монтируется на ступице колеса. Интегральная схема Холла постоянно формирует цифровой сигнал в виде прямоугольных импульсов заданной частоты. В покое этот сигнал имеет минимальную частоту или вообще отсутствует. При движении автомобиля мимо датчика проходят намагниченные участки ротора, что влечет за собой изменение тока в датчике. Частота импульсного сигнала зависит от скорости вращения колеса. Как и магниторезистивный датчик, датчик Холла считается достаточно точным и надежным для классических систем контроля [16].

Оптический датчик угловой скорости представляет собой комбинацию источника и приемника света, закрепленных неподвижно, а также диска с отверстиями, закрепленного на ступице колеса между приемником и источником света. В качестве источника света может быть использован лазер или светодиодная лампочка, а роль приемника сигнала выполняет фотодетектор. При вращении колеса между источником и приемником излучения проходят отверстия диска, в результате чего на фотодетекторе происходит колебание интенсивности света с частотой, равной частоте вращения колеса. Достоинством данного устройства является возможность обеспечения высокой помехозащищенности от электромагнитных излучений (ЭМИ), в отличие от индукционного, магниторезистивного датчиков и датчика Холла. Недостатками данного типа датчика являются: необходимость обеспечения электропитания источника света и чувствительность элементов системы к загрязнению. Несмотря на недостатки, подобный датчик был применен в проекте ORTug в качестве одного из измерительного устройства транспортного средства-лаборатории [2,3,29].

При разработке различных измерительных систем наибольшую популярность получили гироскопы, представляющие собой микроэлектромеханические системы (МЭМС). Чувствительные элементы МЭМС компактные, потребляют мало электроэнергии и могут производить достаточно точные измерения с частотами порядка нескольких кГц. В самом простом одноосевом гироскопе есть две неподвижные массы,двигающиеся в противоположных направлениях. Как только прикладывается внешняя угловая скорость, на массу действует сила Кориолиса, под действием которой происходит смещение масс на величину, пропорциональную прикладываемой скорости. Измерение положения масс меняет расстояние между подвижными электродами-роторами и неподвижным статором, что приводит к изменению емкости конденсатора, формируя

выходной сигнал. Выходные электрические сигналы распознаются МЭМС гироскопом, определяя направление, скорость и ускорение движения [43]. Поскольку перемещение в пространстве гироскоп определяет на основе данных изменения скорости по времени, то данные датчики обладают тем недостатком, что накапливают ошибки. Это приводит к требованию их регулярной калибровки или перезапуске процесса измерения [21]. Следует отметить, что корректная работа МЭМС гироскопа требует компенсации температуры [44].

Тензорезистивные датчики, как правило, представляют собой твердые проводники, изменяющие сопротивление под действием деформации [4, 5]. В некоторых системах можно встретить гибкие тензорезисторы, например, в [35, 45–47] были использованы гибкие резисторы на основе углеродных резистивных элементов. К достоинствам данного типа чувствительных элементов следует отнести их хорошую изученность, наличие большего разнообразия чувствительных элементов, и возможность измерений с частотой дискретизации до десятков килогерц. К недостаткам следует отнести: необходимость в обеспечении электропитанием; паразитный тензорезистивный эффект за счет разницы коэффициентов температурного расширения подложки и материала резистора; влияние температуры на сопротивление. Последнее особенно актуально для резисторов на основе углеродной пленки, у которых погрешность от температурного влияния может достигать 10%. Помимо этого, длина гибких резисторов может достигать нескольких сантиметров, что снижает локальность измерений.

Большое промышленное применение получили измерительные системы на основе пьезоэлементов. Одним из производителей сенсор-колес и сенсор-ступиц, использующих подобные чувствительные элементы и получивших широкое промышленное применение, является компания Kistler [27, 28]. Несколько пьезоэлементов устанавливаются в специально созданные колесные диски или ступицы для измерения их деформации. Принцип работы пьезоэлементов основан на способности кристаллов вырабатывать электрический ток при их деформации. Напряжение вырабатываемого тока зависит от величины деформации. Достоинствами пьезоэлектрических систем являются: высокая частота дискретизации измерений до нескольких килогерц; высокая точность измерений; отсутствие необходимости в электропитании датчиков. Основным недостатком таких систем является требование температурной компенсации измерений, подверженность влиянию ЭМИ.

Коллективом авторов Y. Xiong и A. Juhani предложены несколько оптических сенсорных систем по измерению деформации шины на основе анализа отражения луча лазера от внутренней стороны шины (рис. 1). Предложенные системы были представлены в конфигурациях, измеряющих деформацию в одной или нескольких точках [30–32].



Рис. 1. Лазерная система измерения деформации шины [31]

Другой коллектив авторов Matsuzaki R., Hiraoka N. разработал оптическую сенсорную систему, измеряющую деформацию шины с помощью заранее нанесенных маркеров на внутреннюю сторону шины и фотокамеры (на основе ПЗС матрицы) для мониторинга их перемещения [1].

К достоинству данных систем относят отсутствие необходимости физического контакта чувствительного элемента с объектом контроля. Недостатками являются: массогабаритные характеристики измерительных устройств, интегрированных в колесо, создающие дисбаланс колеса при его вращении; необходимость в организации электропитания измерительного оборудования во вращающемся объекте; требование в точной калибровке измерительного оборудования для минимизации влияния эффектов искажения света при его отражении от поверхности; слабая защищённость от ЭМИ.

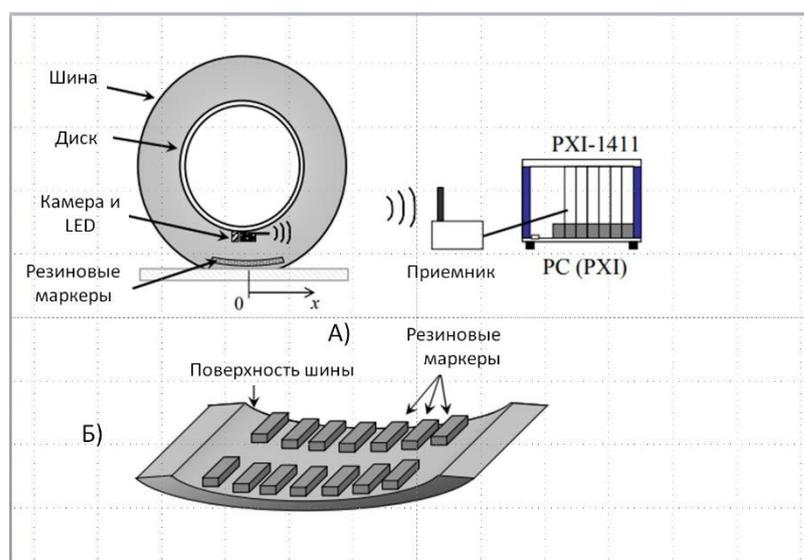


Рис. 2. Экспериментальная установка системы измерения изображения шины: (а) общий вид и (б) внутренняя поверхность шины [1]

Разными коллективами авторов были предложены концепции измерительных систем, использующих различные волоконные чувствительные элементы:

1) Коллективом ученых: Martin Fontaine, Alex Coiret, Julien Cesbron, Vincent Baltazart и David Betaille - была разработана система измерения статической вертикальной нагрузки с помощью волоконно-оптических распределенных датчиков закреплённых на внутренней стороне шины, (рис. 3) [34]. Работа системы основана на принципах импульсной оптической рефлектометрии (OTDR, англ. Optical Time Domain Reflectometry), в которой рассеяние может происходить на неоднородностях материалах (Рэлеевское рассеяние), акустических волнах (рассеяние Манделъштамма-Бриллюэна) и молекулярных колебаниях (Рамановское рассеяние) [48–50]. Общий принцип измерения заключается в мониторинге амплитуды отраженного излучения в среде распространения. Измерительная система направляет зондирующий импульс в исследуемую среду, который отражаясь от разного рода неоднородностях возвращается в приемник оптического излучения. Приемник формирует измерительный сигнал, состоящий из амплитудно-частотной характеристики излучения, меняющейся в зависимости от времени. По изменениям амплитуды или смещению частоты излучения определяется величина деформации и температуры в среде, а координата воздействия определяется временем, которое требуется оптическому сигналу для достижения приемника оптического излучения.

Достоинствами подобного типа чувствительных элементов является: возможность использования обычного оптического волокна в качестве чувствительного элемента; возможность создания измерительной системы, защищенной от ЭМИ; малый вес и габариты чувствительного элемента; отсутствие необходимости подвода электропитания к чувствительному элементу; возможность использования отраженного оптического сигнала; возможность мультиплексирования чувствительных элементов. Главными недостатками данной системы является: высокая стоимость измерительного оборудования; относительно низкая частота дискретизации (до сотен герц) и необходимость использования надежных методов фиксации датчиков, не допускающих релаксацию натянутого оптического волокна или компенсации данного эффекта. Подробно явление релаксации и методов нивелирования ее влияния подробно рассмотрено в работе [51].



Рис. 3. Экспериментальная установка оценки статической вертикальной нагрузки на основе волоконно-оптических распределенных датчиках [34]

2) Исследователи из Sapienza University (Италия) предложили волоконно-оптическую сенсорную систему измерения деформации шины, впоследствии названую OPTyre, (рис. 4) [2, 3, 29]. Чувствительными элементами их системы являются ВБР, закрепленные на внутреннюю поверхность шины. Основополагающим принципом измерения системы является принцип спектрального разделения каналов (WDM — Wavelength Division Multiplexing) [52], который заключается в разделении излучения на спектральные участки, внутри каждого из которых формируется оптический отклик от отдельной ВБР. Волоконные брэгговские решетки представляют собой массив слабоотражающих зеркал, сформированный на равном расстоянии малого участка в сердцевине оптического волокна. Центральная частота спектра отражения ВБР прямо пропорциональна расстоянию (период ВБР) между зеркалами и коэффициенту преломления основной моды распространяющегося оптического излучения.

Период ВБР, в свою очередь, зависит от деформации растяжения/сжатия или теплового расширения участка оптического волокна, содержащего ВБР. В силу этого, чувствительный элемент на базе ВБР, позволяет одновременно измерять как температуру, так и деформацию объекта контроля путем мониторинга центральной частоты отраженного излучения. В качестве системы приема и обработки спектра оптического излучения применяется интеррогатор — специальный прибор определения смещения центральной частоты ВБР, основанный на анализаторе спектра. Частота дискретизации измерений этих сложных измерительных устройств не превышает нескольких килогерц.



Рис. 4. Схема экспериментальной установки оценки деформации шины на основе ВБР [3]

Достоинства и недостатки данной системы во многом повторяют достоинства OTDR-систем. Отличие лишь в частоте дискретизации выходного сигнала, которая выше на один порядок и необходимости использования специальным образом сформированные чувствительные элементы на базе ВБР.

3) В более ранних исследованиях авторов данной работы были предложены системы измерения деформации шины и подшипника качения (рис. 5) [23–26], использующие адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС), способные работать на пропускание и отражение оптического сигнала [53–64]. Адресная волоконная брэгговская структура формирует двухчастотный спектральный отклик в оптическом диапазоне. Разностная частота между частотами двухчастотного отклика много меньше несущих оптических частот и находится в радиочастотной области спектра, она определена как адресная частота. Адресная частота инвариантна к воздействию физических полей и не меняется при изменении периода АВБС. Полученный оптический отклик от АВБС пропускается через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, и принимается на фотоприемнике. Фильтрация результирующего сигнала на адресной частоте позволяет определить смещение центральной частоты АВБС и, как следствие, определить величину физического воздействия.



Рис. 5. Экспериментальная установка для оценки деформации внешнего кольца роликового подшипника на основе АВБС [25]

Сенсорная система, использующая АВБС датчики, обладает всеми достоинствами систем оптоволоконных измерительных систем. Кроме того, АВБС система может использовать в качестве приемника сигнала дешевые фотодетекторы и АЦП; частота дискретизации измерений системы ограничена лишь частотой дискретизации АЦП и может достигать десятков мегагерц. К недостаткам таких систем следует отнести мультипликативную реакцию на одновременное воздействие деформации и температуры и невозможность разделить одновременное воздействие двух полей в смещении спектрального отклика, что влечет за собой непереносимое требование использования датчиков компенсации температуры и по аналогии с предыдущими системами использование методов установки датчиков, предотвращающих релаксацию оптического волокна.

Для контроля температуры шины и термокомпенсации помимо волоконных датчиков в измерительных системах могут использоваться и другие виды датчиков температуры: термоэлектрические, полупроводниковые, пирометрические, терморезистивные, акустические и пьезоэлектрические.

В основе работы термоэлектрического датчика лежит эффект Зеебека, согласно которому, у всех металлов существует определенная валентность [65]. При воздействии внешних факторов, сообщающих свободным электронам дополнительную энергию, электроны покидают атом, создавая движение заряженных частиц. В случае совмещения двух металлов с различным потенциалом выхода электронов и последующим нагреванием места соединения возникнет разность потенциалов, которая и используется для измерения температуры. Датчики подобного типа могут обладать погрешностью менее 0,5% и частотой дискретизации измерений порядка нескольких килогерц и компактными размерами [66].

Полупроводниковые чувствительные элементы изготавливаются на основе кристаллов с заданной вольтамперной характеристикой, так при повышении температуры полупроводниковый датчик начинает выдавать большее значение тока [67]. Данный тип датчиков обладает достоинствами, схожими с термоэлектрическим датчиком.

Принцип действия пирометра основан на измерении мощности теплового излучения объекта в инфракрасном диапазоне [68]. Достоинством является возможность бесконтактного измерения, а к недостаткам следует отнести большие габариты, малую точность (основная погрешность 0,2–1% [69]) и частоту дискретизации измерений порядка 6 Гц [70].

Терморезистивные датчики основаны на эффекте изменения сопротивления от температуры материала [71]. Достоинства данного датчика схожи с полупроводниковым.

Акустические датчики температуры основаны на эффекте зависимости скорости прохождения звуковых колебаний от температуры материала или его поверхности. Непосредственно сам сенсор производит сравнение звука, генерируемого источником, с отраженным звуком, скорость распространения которого зависит от температуры тела [72]. Такой тип измерений является бесконтактным, однако он уступает по точности измерений некоторым контактными датчикам (погрешность около 0,15-0,5% [73]).

Пьезоэлектрический датчик температуры основан на эффекте прямого пьезоэффекта, то есть изменения линейных размеров пьезоэлемента под воздействием электрического тока, при этом частота его колебаний зависит от температуры. Таким образом, зная зависимость температуры пьезоэлемента от частоты его колебания, можно легко измерить температуру изучаемого объекта. Данный тип датчиков также является довольно точным (погрешность около 0,02 °С [74]) и может производить измерения с частотой в несколько килогерц [33,75].

Классификация по месту установки

Системы контроля динамических характеристик колеса транспортного средства можно классифицировать, исходя из места установки датчиков [1-27]. При анализе систем по месту установки учитывались следующие факторы.

1) Возможность измерения моментов в трех координатных осях, действующих на колесо. Исходя из литературных источников [2–5, 23, 26–29, 31], наиболее эффективно динамические характеристики измеряются в тех системах, где чувствительные элементы установлены непосредственно на шине или на колесном диске. В системах с другими местами крепления данная возможность сильно ограничена, что связано в первую очередь с меньшей деформацией элементов [25, 36], к которым крепится чувствительный элемент.

2) Пространственная дискретизация — возможность локального измерения для детального изучения процессов контакта колеса с дорогой за счет массива данных. Очевидно, что наибольшей пространственной дискретизацией обладает система с чувствительными элементами, расположенными на наибольшем радиусе вращения колеса (на шине), (рис. 6).

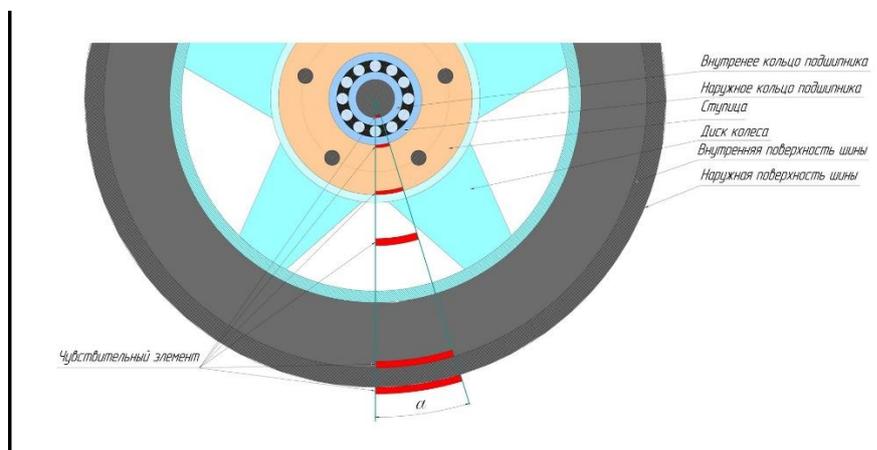


Рис. 6. Эпюра зависимости габаритов чувствительного элемента относительно места его установки [23]

3) Сложность установки чувствительного элемента определяется комплексом необходимых мероприятий для размещения и фиксации чувствительного элемента. Наиболее сложным местом установки является шина, поскольку она является наиболее деформируемым элементом. Чувствительный элемент необходимо вначале закрепить с небольшим натягом внутри шины, а затем, не повредив его, надеть шину на колесо, что сильно усложняет работу [2, 3, 29, 34].

4) Сложность эксплуатации системы определяется возможностью легкой замены колеса при использовании системы. Очевидно, что при замене колеса чувствительные элементы, установленные на предыдущем колесе, должны быть заменены новыми, установленными на новом колесе [25, 76].

5) Сложность организации питания и связи [77].

6) Наиболее сложно организовать высокую точность измерений в системах, установленных на значительном удалении от места контакта колеса с дорогой [2, 3, 23, 29, 36, 76]. К таким местам относят узлы подвески ТС, так, например, при установке чувствительного элемента на неподвижном кольце подшипника (красный круг на рис. 7,а) закрепленном на узле подвески, при изменении положения рычага подвески (синяя полоса на рис. 7) изменятся и направления векторов (красные стрелки на рис. 7,б), по которым датчик определяет силу реакции опоры (зеленные стрелки на рис. 7) от продольной силы

сцепления колеса с дорогой (фиолетовые стрелки на рис. 7). В результате чего, векторы, по которым определяется сила и по которым действуют реакции опоры в продольном направлении, могут оказаться не параллельными из-за жесткого крепления к узлам подвески, что будет приводить к ошибке измерения продольной силы сцепления.

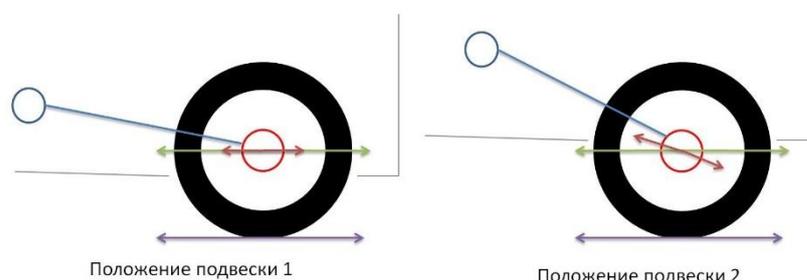


Рис. 7. Влияние положения подвески на положение вектора, воспринимающего нагрузки системой измерения.

Классификация рассмотренных систем представлена в Таб. 1.

Таб. 1. Классификация и сравнительный анализ систем

Место	Достоинства	Недостатки
Шина	<ul style="list-style-type: none"> - большие возможности для измерения моментов, действующих на колесо; - высокая пространственная дискретизация измерений 	<ul style="list-style-type: none"> - сложности с организацией питания и связи в системе; - сложности с установкой чувствительного элемента; - сложности в эксплуатации
Диск	<ul style="list-style-type: none"> - имеется возможность измерить моменты, действующие на колесо; - простота установки чувствительного элемента; - хорошая пространственная дискретизация измерений 	<ul style="list-style-type: none"> - сложности с организацией питания и связи в системе; - сложности в эксплуатации
Ступица	<ul style="list-style-type: none"> - имеется возможность измерить моменты, действующие на колесо; - простота установки чувствительного элемента; - простота эксплуатации 	<ul style="list-style-type: none"> - сложности с организацией питания и связи в системе
Подвижное кольцо подшипника	<ul style="list-style-type: none"> - простота установки чувствительного элемента; - простота эксплуатации 	<ul style="list-style-type: none"> - сложности с организацией питания и связи в системе; - сложности с измерением моментов, действующих на колесо; - низкая пространственная дискретизация измерений
Неподвижное кольцо подшипника	<ul style="list-style-type: none"> - простота установки чувствительного элемента; - простота организации питания и связи в системе; - простота эксплуатации 	<ul style="list-style-type: none"> - сложности с измерением моментов, действующих на колесо; - низкая пространственная дискретизация измерений
Подвеска	<ul style="list-style-type: none"> - простота установки чувствительного элемента; - простота организации питания и связи в системе; - простота эксплуатации 	<ul style="list-style-type: none"> - низкая точность измерения

Способ организации связи

Передача полезной информации от датчика к измерительной системе или от измерительной системы к бортовой компьютерной системе ТС является крайне важной задачей. Очевидно, что наиболее просто данная задача решается в системах, где датчик или измерительное оборудование находится на борту транспортного средства или на не вращающихся узлах подвески. В таких случаях для передачи информации используется кабельная сеть, что является самым простым, надежным и недорогим способом. Однако в некоторых системах контроля датчики и измерительное оборудование могут располагаться на вращающихся элементах. В этих случаях используют различные варианты решений [77].

1) В проекте ОРТуре [2, 3, 29] задача была решена с помощью вращательного механизма, установленного соосно с осью вращения колеса (рис. 8). Вращательный механизм состоит из неподвижного оптического разъёма, установленного на шарнирный сустав, который в свою очередь закреплён на кузове транспортного средства, и вращающейся ответной части оптического разъёма, установленного на колесо. К неподвижной части через оптический кабель подключается устройство опроса оптоволоконных датчиков, а к подвижной части подключаются сами датчики. Данная схема имеет ряд достоинств и недостатков. К достоинствам можно отнести: возможность применения одного опрашивающего устройства; малый размер электронных компонентов измерительной системы, что позволяет обеспечить повышенную защиту измерительного оборудования от ЭМИ; малый вес и габариты; относительная технологичность изготовления узлов и деталей механизма. В качестве недостатков стоит отметить то, что применение вращающегося разъёма влечет за собой дополнительные потери мощности излучения, что требует использование более мощного источника лазерного излучения; в системах с датчиками, работающими на прохождение сигнала использование двухканального вращающегося оптического разъёма сильно снижает частоту дискретизации измерений, поэтому целесообразно использовать одноканальный разъем и волоконные датчики, работающие на отражение сигнала.



Рис. 8. Вращающийся одноканальный оптический разъем [76]

2) В измерительных сенсор-колесах компании Kistler [27, 28] задача была решена за счет вращающихся электрических разъёмов, где их контакты выполнены в виде колец на подвижной и не подвижных частях (рис. 9). К достоинствам отнесем возможность применения одного опрашивающего устройства, относительную технологичность изготовления и многоканальность. В качестве недостатков стоит отметить низкую защищенность от ЭМИ относительно оптического разъёма, большую массу и габариты.



Рис. 9. Одножильный электрический разъем [28]

3) Использование беспроводной связи [33] измерительного устройства с бортовой системой накладывает дополнительный ряд ограничений: опрашивающее устройство, датчик или измерительное устройство и беспроводной передатчик должны быть установлены на колесе, что увеличивает величину неподрессоренной массы и риск дисбаланса колеса при вращении; слабая защищенность от ЭМИ.

Способ организации электропитания

Способы организации питания волоконно-оптических сенсорных систем измерения динамических характеристик колеса транспортного средства [1-3, 16-21, 24-26, 28-31, 33, 42-44, 72] можно разделить на несколько групп, рациональность использования которых напрямую зависит от способа организации связи между чувствительными элементами и измерительным блоком. По способу организации связи системы можно разделить на четыре основные группы: системы с проводной связью, системы с беспроводной связью, системы с вращающимся электрическим коннектором, системы с вращающимся оптическим коннектором. Схема классификатора систем по способу организации питания системы в соответствии с выбранным способом организации связи представлена на рис. 10.

Перечисленные способы организации связи согласуются со способами организации питания следующим образом.

1) При расположении всей измерительной системы на борту или на не вращающихся узлах подвески транспортного средства, проще, дешевле и надежнее всего объединить проводной связью.

2) При установке волоконно-оптического измерительного блока на борту транспортного средства его питание обеспечивается от электросети борта транспортного средства, а связь с волоконными элементами на подвижных частях через оптический вращающийся разъем [76].

3) При использовании лазера с фотодетектором (ФД), установленным вместе с измерительным блоком в колесе транспортного средства, связь возможно организовать через вращающийся оптический коннектор, который будет выполняет двойную функцию — передачу сигнала накачки на ФД и отправку измерительного сигнала на измерительный блок. Помимо этого, связь можно организовать и через электрический вращающийся коннектор или беспроводной канал. Но подобная организация в большинстве случаев нерациональна, поскольку требует обеспечение одновременно и оптического вращающегося разъёма для питания ФД и беспроводной связи или вращающегося электрического коннектора для передачи измерительного сигнала на измерительный блок.

4) Использование генератора электрической энергии в колесе транспортного средства рационально можно использовать вместе с беспроводной связью, где в качестве генератора может использоваться пьезоэлемент, подвергающийся деформации при вращении колеса аналогично тому, как это было предложено в [77]. В этом случае вся измерительная система располагается в колесе транспортного средства.

5) Случай использования аккумуляторных батарей по способу организации и компоновки системы аналогичен случаю с использованием генератора.

6) При использовании вращающегося электрического коннектора, питание и организацию связи рационально использовать через данный коннектор. При этом вся или частично измерительная система может располагаться в колесе транспортного средства.

Перспективы развития систем контроля динамических характеристик колеса транспортного средства

Для определения тенденций развития передовых систем контроля динамических характеристик колеса ТС представленные классификации систем были объединены в единый групповой классификатор (рис. 10).

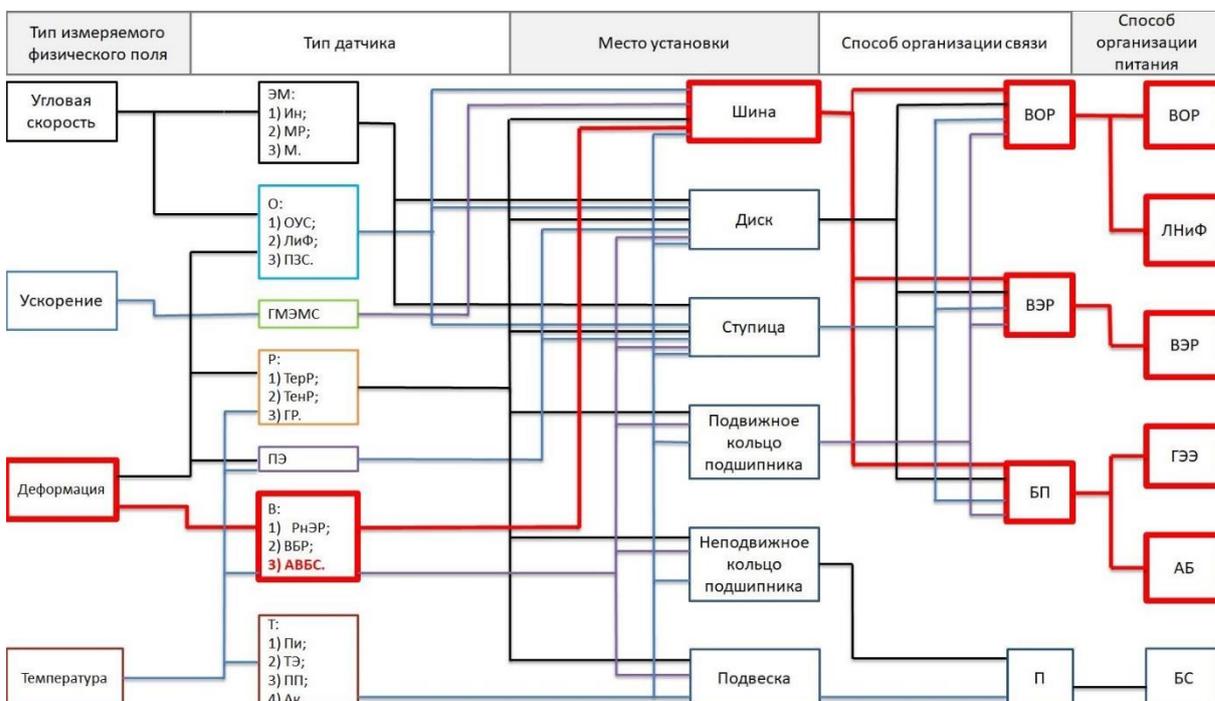


Рис. 10. Классификатор систем контроля динамических характеристик колеса транспортного средства, где: ЭМ – электромагнитные датчики, Ин – индукционный датчик, МР – магниторезистивный датчик, М – магнитный датчик (Холла), О – оптические датчики, ОУС – оптический датчик угловой скорости, ЛиФ – лазер и фотодетектор, ПЗС - прибор с зарядовой связью, ГМЭМС – гироскоп МЭМС, Р – резистивные датчики, ТерР – терморезистивный датчик, ТенР – тензорезистивный датчик, ГР – гибкий резистор, ПЭ – пьезоэлемент, В – волоконные датчики, РнЭР – распределенные на эффектах рассеяния, ВБР – волоконная брэгговская решетка, АВБС – адресная волоконная брэгговская структура, Т – температурные датчики, Пи – пирометр, ТЭ – термоэлектрический датчик, ПП – полупроводниковый датчик, Ак – акустический датчик, ВОР – вращающийся оптический разъем, ВЭР – вращающийся электрический разъем, БП – беспроводная связь, П – проводная связь, ЛНиФ – питание через лазер накачки и фотодетектор, ГЭЭ – генератор электроэнергии, АБ – аккумуляторная батарея, БС – питание через бортовые системы.

Исходя из предложенной классификации систем контроля динамических характеристик колеса ТС, можно выделить тот тип систем, который наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к передовым системам контроля динамических характеристик колеса и может решать современные задачи активной безопасности. Так классификация систем по типу измеряемых физических полей (рис. 10), свидетельствует, что измерительная система в составе системы контроля должна измерять как механическую составляющую взаимодействия колеса с дорожным полотном, так и тепловую, для компенсации теплового воздействия на показания датчика и учета влияния температуры на силы адгезии шины к дорожному полотну. Данным требованиям наиболее полно отвечаю

резистивные, пьезоэлектрические и волоконные измерительные системы. Однако датчики, основанные на использовании резисторов и пьезоэлементов, имеют недостаток, заключающийся в различной чувствительности и диапазоне работы измерительных сигналов (сила тока для резистивных и напряжение для пьезоэлектрических) деформационных и температурных датчиков. В результате одновременный контроль механических и тепловых составляющих взаимодействия колеса с дорожным полотном, может потребовать разделить деформационные и температурные резистивные или пьезоэлектрические датчики на два отдельных массива, работающие в разных каналах опрашивающего устройства. Или может потребоваться использование двух отдельных устройств опроса, что усложнит и удорожит измерительную систему. В отличие от резистивных и пьезоэлектрических датчиков температурные и деформационные волоконные датчики могут быть объединены в единый массив и опрошены единым устройством без потери качества измерений в едином диапазоне работы измерительных сигналов.

С точки зрения полноты анализа и реализации функциональных возможностей систем активной безопасности наиболее перспективным направлением развития передовых измерительных систем согласно классификации (табл. 1) по месту установки датчиков являются системы, где датчик устанавливается непосредственно в шину. Это объясняется тем, что именно такой тип установки датчиков обеспечивает наибольшую пространственную дискретизацию измерений, которая позволяет более полно исследовать процесс взаимодействия колеса с дорожным полотном и оценить важные динамические параметры, такие как моменты сил, действующие в пятне контакта шины с дорожным полотном, в отличие от систем, которые измеряют деформацию подшипников или узлов подвески транспортного средства.

Согласно классификации систем по способу организации связи (рис. 10, красная линия), среди измерительных систем можно выделить наиболее перспективную, а именно радиофотонную, систему, основанную на использовании АВБС. Ключевым достоинством данной системы с точки зрения организации связи является возможность передачи полезной информации на борт транспортного средства в виде различных типов сигналов, а именно: через вращающийся оптический разъем может быть передан оптический отклик от АВБС; через электрический вращающийся разъем может быть передан как простейший электрический сигнал от фотодетекторов, так и цифровой сигнал от АЦП; через беспроводную связь можно организовать передачу цифрового сигнала от АЦП. Таким образом, для системы измерения на основе АВБС доступна возможность передавать сигнал на борт тремя видами сигналов, в то время как системы, основанные на распределенных волоконных датчиках и на ВБР могут передать полезную информацию двумя видами сигналов: оптический отклик от датчиков в виде оптического сигнала и цифровой сигнал от устройств, опрашивающих датчики. Разнообразие способов передачи полезного сигнала согласно классификации систем по способу организации питания позволяет использовать большее количество вариантов питания в зависимости от задач, предъявляемых к измерительной системе. Так для транспортных средств, требующих повышенной защищенности от ЭМИ, наиболее подходящими системами будут являться системы, использующие для связи вращающийся оптический разъем, а для организации питания чувствительных элементов тот же разъем или лазер накачки в паре с фотодетектором. Для легковых транспортных средств наиболее рациональным будет использование систем с беспроводной связью и аккумуляторными батареями, так как данные компоненты наиболее компактные и простые для интеграции в конструкцию ТС. Для большегрузных транспортных средств может требоваться дублирование САБ, так как неполадки САБ большегрузных ТС могут создавать значительную угрозу безопасности движения. Следовательно, такие ТС могут быть укомплектованы двумя независимыми средствами

контроля, которые основаны на связи через вращающийся электрический разъем и беспроводную связь. Так как шины большегрузных ТС значительно больше легковых, в них значительно проще разместить генераторы электроэнергии, что должно снять необходимость регулярной зарядки аккумуляторов системы контроля и повысить потребительские качества системы.

Помимо вышеперечисленных достоинств, измерительная система на основе АВБС обладает еще рядом преимуществ, а именно: наибольшей частотой дискретизации измерений по времени; высокой защищенностью от ЭМИ; как самое простое и недорогостоящее устройство опроса среди волоконных систем.

Таким образом, основываясь на проведенном анализе, следует, что радиофотонные системы измерений динамических характеристик шины в пятне контакта являются наиболее передовой концепцией систем измерения динамических характеристик колеса, соответствующей концепциям современных систем активной безопасности транспортного средства.

Заключение

Была проведена систематизация и построена классификация систем контроля динамических характеристик колеса транспортного средства по типу измеряемых физических полей, по физическому принципу измерительного преобразования, по месту установки, по способу организации связи и электрического питания. Для каждого разряда классификации перечислены достоинства и недостатки, а также возможные способы применения. Исходя из полученной классификации, определены наиболее перспективные направления развития передовых систем контроля динамических характеристик взаимодействия колеса с дорогой, среди которых определена система, наиболее полно отвечающая требованиям современных систем активной безопасности транспортных средств и позволяющая увеличить эффективность систем данного класса. Итогом проделанной работы стала идея перехода к радиофотонной сенсорной системе контроля деформации и температуры шины, основанной на использовании адресных волоконных брэгговских структур, которая обладает наибольшими возможностями по передаче полезного сигнала на борт транспортного средства, с высокой пространственной и временной дискретизации измерений, простым и дешевым методом опроса, защищенностью от электромагнитного излучения, а также высокой точностью измерений

Список литературы

1. Matsuzaki R. Strain Monitoring and Applied Load Estimation for the Development of Intelligent Tires Using a Single Wireless CCD Camera / R. Matsuzaki, N. Hiraoka, A. Todoroki, et al. // *J. Solid Mech. Mater. Eng.* - 2012. - V.6. - P.935–949.
2. Roveri N. OPTYRE—Real Time Estimation of Rolling Resistance for Intelligent Tyres / N. Roveri, G. Pepe, F. Mezzani, A. Carcaterra et al. // *Sensors.* - 2019. - V. 19. - № 23. - P. 5119.
3. Roveri N. OPTYRE – A new technology for tire monitoring: Evidence of contact patch phenomena / N. Roveri, G. Pepe, A. Carcaterra // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015
4. Mendoza-Petit M.F. A Strain-Based Intelligent Tire to Detect Contact Patch Features for Complex Maneuvers / M.F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Diaz et al. // *Sensors.* - 2020. - V. 20. - № 6. - P. 1750.

5. Mendoza-Petit M.F. A Strain-Based Method to Estimate Tire Parameters for Intelligent Tires under Complex Maneuvering Operations / M.F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Diaz et al. // *Sensors*. - 2019. - V. 19. - № 13. - P. 2973.
6. Doumiati M. Vehicle Dynamics Estimation using Kalman Filtering: Experimental Validation / Doumiati M. et al. – John Wiley & Sons, 2012.
7. Vagisha V. A Review on Intelligent PID Controllers in Autonomous Vehicle / V.Vagisha, S. Swati, D. Subhranil, D. Sudhansu, S. Sitanshu // *Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0, Select Proceedings of ICETSGAI4.0*, 2021.
8. Hongxiao Y. A model predictive control approach combined unscented Kalman filter vehicle state estimation in intelligent vehicle trajectory tracking / Y. Hongxiao, D. Jianmin, T. Saied, C. Huan, Q. Zhiquan // *Advances in Mechanical Engineering*, 2015.
9. Agliullin T. Torque Vectoring Control on Ice for Electric Vehicles with Individually Actuated Wheels / T. Agliullin, V. Ivanov, V. Ricciardi, R.M. Acosta, K. Augsburg, C. Sandu et al. // *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 2020.
10. Farroni F. A Real-time physical analytical Grip Model for Tyre Rubber in sliding Contact with Road Asperities / F. Farroni, M. Russo, F. Timpone et al. // *ATA - Ing. Dell'Autoveicolo*. - 2014. - V. 67. – P. 30.
11. Farroni F. A physical-analytical model for a real-time local grip estimation of tyre rubber in sliding contact with road asperities / F. Farroni, M. Russo, R. Russo // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering published online 2014*.
12. Freidovich L. LuGre-Model-Based Friction Compensation / L. Freidovich, A.Robertsson, A. Shiriaev и др. // *Control Syst. Technol. IEEE Trans. On*. 2010. - V. 18. - P.194–200.
13. Марков А.С. Исследование коэффициента трения эластичной автомобильной шины при изменении износа рисунка протектора / А.С. Марков, Н.И. Овчинникова // *Вестник ИрГТУ*. – №2 (21). – 2017. – С. 191-189.
14. Бойко А.В. Математическая модель для расчета коэффициента сцепления от проскальзывания с использованием нормальных и касательных распределенных нагрузок по длине пятна контакта эластичной шины с дорогой и беговым барабаном диагностического стенда / А.В. Бойко, В.Б. Распопина // *Вестник ИрГТУ – №10 (93) – 2014.– С. 168-172*.
15. Бойко А.В. Математическая модель для расчета нормальных и касательных напряжений в пятне контакта эластичной шины с дорогой и беговым барабаном диагностического стенда // *Вестник ИрГТУ – №11 (70) – 2012. – С. 128-131*.
16. Tire and Vehicle Dynamics - 3rd Edition [Электронный ресурс]. URL:<https://www.elsevier.com/books/tire-and-vehicle-dynamics/pacejka/978-0-08-097016-5> (дата обращения: 15.03.2025).
17. Canudas-de-Wit C. A new model for control of systems with friction / Canudas-de-Wit C., H. Olsson, K.J. Astrom et al. // *IEEE Trans. Autom. Control*. -1995. - V. 40. - № 3. - P. 419–425.
18. Canudas-de-Wit C., Horowitz R. Observers for tire/road contact friction using only wheel angular velocity information / C. Canudas-de-Wit, R. Horowitz // *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304)*, 1999. - №4. - P. 3932–3937.
19. Acosta M. Blundell Road Friction Virtual Sensing: A Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches / M. Acosta, S. Kanarachos, M // *Appl. Sci*. - 2017. - V.7. - № 12. – P. 1230.
20. Zhang B. Vertical Tire Forces Estimation of Multi-Axle Trucks Based on an Adaptive Treble Extend Kalman Filter / B. Zhang, T. Xu, H. Wang et al. // *Chin. J. Mech. Eng*. 2021. - V. 34.

21. Niskanen A., Tuononen A. Three 3-Axial Accelerometers Fixed Inside the Tyre for Studying Contact Patch Deformations in Wet Conditions // *Veh. Syst. Dyn.* - 2014. - V. 52. - P. 287–298.
22. Savaresi S.M. New regressors for the direct identification of tire deformation in road vehicles via “In-Tire” accelerometers / S.M. Savaresi, M. Tanelli, P. Langthaler et al. // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* - 2008. - V. 16. - № 4. -P. 769–780.
23. Gubaidullin R.R. Application of addressed fiber bragg structures for measuring tire deformation / R.R. Gubaidullin, Sakhabutdinov A.J, Aggliullin T.A. et al. // *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* - 2019. - P. 1–7.
24. Gubaidullin R.R. Fiber optic tire speed sensor / R.R. Gubaidullin, Sakhabutdinov A.J, Aggliullin T.A. et al. // *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021.* - P. 1–7.
25. Gubaidullin R.R. Addressed fiber bragg structures in load-sensing wheel hub bearings / R.R. Gubaidullin, Sakhabutdinov A.J, Aggliullin T.A. et al. // *Sensors.* - 2020. - V. 20. - № 21. - P. 6191.
26. Gubaidullin R.R. Addressed FBG-structures for tire strain measurement / R.R.Gubaidullin, Sakhabutdinov A.J, Aggliullin T.A. et al. // *Proc SPIE Int Soc Opt Eng SPIE, 2019. Vol. 11146.* - P. 6.
27. Hopping K. Extending the HSRI tyre model for large inflation pressure changes / K. Hopping, K. Augsburg, F. Buchner // *Conference: engineering for a changing world: 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau – Ilmenau, 2017.*
28. RoaDyn P1HT wheel torque transducer for commercial vehicles [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kistler.com/en/product/type-9299a/?application=13> (дата обращения: 15.03.2025).
29. Coppo F. A multisensing setup for the intelligent tire monitoring / F. Coppo , G. Pepe, N. Roveri et al. // *Sensors.* - 2017. - V. 17. - № 3. - P. 576.
30. Tuononen A. A multi-laser sensor system to measure rolling deformation for truck tyres / Tuononen A., Xiong Y. // *Int. J. Veh. Perform.* - 2017. - V. 3. - P. 115.
31. Xiong Y. Rolling deformation of truck tires: Measurement and analysis using a tire sensing approach / Y. Xiong, A. Tuononen // *J. Terramechanics.* - 2015. - V. 61. - P. 33–42.
32. Xiong Y., Tuononen A. A laser-based sensor system for tire tread deformation measurement / Y. Xiong, A. Tuononen // *Meas. Sci. Technol.* - 2014. - V. 25. - P. 115103.
33. Gurkan E. Rajesh Estimation of Tire-Road Friction Coefficient Using a Novel Wireless Piezoelectric Tire Sensor / E. Gurkan, A. Lee, R. // *EEE Sensors Journal.* - V. 11(2). P.267 – 279.
34. Fontaine M. In-tire distributed optical fiber (DOF) sensor for the load assessment of light vehicles in static conditions / M. Fontaine, A. Coiret, J. Cesbron и др. // *Sensors.* - 2021. - V. 21. - № 20. - P. 6874.
35. Breglio G. Feel-tire unina: development and modeling of a sensing system for intelligent tires / G. Breglio, A. Irace, V.R. Marrazzo и др. // *2019 IEEE 5th International forum on research and technology for society and industry (RTSI).* - 2019. - P. 453–458.
36. Kentaro NISHIKAWA tub bearing with integrated multi-axis load sensor // *NTN TECHNICAL REVIEW.* - No.79 (2011) C. 58-63.
37. Andrews R.D. Elastoviscous properties of polyisobutylene. I. Relaxation of stress in whole polymer of different molecular weights at elevated temperatures / R.D. Andrews, N.Hofman-Bang, A.V. Tobolsky // *J. Polym. Sci.* - 1948. - V. 3. - № 5. - P. 669–692.
38. Ferry J.D. The Relaxation Distribution Function of Polyisobutylene in the Transition from Rubber-Like to Glass-Like Behavior / J.D. Ferry, L.D. Grandine, E.R. Fitzgerald// *J. Appl. Phys.* - 1953. - V. 24. - № 7. - P. 911–916.

39. Williams M.L. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids / M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry // *J. Am. Chem. Soc.* - 1955. - V. 77. - № 14. - P. 3701–3707.
40. Январёв С.Г. Метод измерения скорости движения объекта с использованием индукционных датчиков / С.Г. Январёв // Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2019. - С. 331–332.
41. Сысоева С. Автомобильные бесконтактные датчики магнитного поля. Новый взгляд на разработку и применение мостовых ASIC/ С. Сысоева // *Компоненты и Технологии.* - 2014. - № 10 (159).
42. Захаров И.С. Сравнительный анализ чувствительности эффектов Холла и магниторезистивного к влиянию допусков крепления датчика скорости автомобиля на точность / И.С. Захаров, С.Ф. Яцун, С.С. Сысоева // *Известия Курского Государственного Технического Университета.* - 2004. - № 1 (12).
43. Коновалов С. Ф. Моделирование процессов компенсации нулевого сигнала в МЭМС гироскопе / С.Ф. Коновалов, В.П. Подчерзцев, Ю.А. Пономарев // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Баумана.* - 2012. - № 9.
44. Некрасов Я. А. Результаты исследования МЭМС-Гироскопа с температурной самокомпенсацией / Некрасов Я. А., Люкшонков Р. Г. // "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2015. - С. 288–293.
45. Yang X. Flexible Strain Sensors Fabricated by Fused Deposition Modeling-Based Multimaterial 3D Printing with Conductive Polyurethane Composites / X. Yang, H. Ren, C. Wu et al. // 2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), 2021.
46. Cai G. Extremely Stretchable Strain Sensors Based on Conductive Self-Healing Dynamic Cross-Links Hydrogels for Human-Motion Detection / G. Cai, J. Wang, K. Qian et al. // *Adv. Sci.* - 2016. - V.4.
47. Christ J. 3D printing of highly elastic strain sensors using polyurethane / Mutiwall Carbon Nanotube Composites / J. Christ, C. Hohimer, N. Aliheidari и др. // *SPIE Smart structures and materials + nondestructive evaluation and health monitoring*, 2017. - 1016511 p.
48. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) [Электронный ресурс]. [URL:https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-tendentsii-razvitiya-raspredeleennyh-voлоконно-opticheskikh-sensornyh-sistem-obzor/viewer](https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-tendentsii-razvitiya-raspredeleennyh-voлоконно-opticheskikh-sensornyh-sistem-obzor/viewer) (дата обращения: 15.03.2025).
49. Aybatov D.L. Distributed temperature fiber bragg grating sensor / D.L. Aybatov, R.R. Kiyamova, O.G. Morozov et al. // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7374:10.* 2009. - V. 7374.
50. Nureev I. I. Distributed Raman sensor system with point spots for downhole telemetry / Nureev I. I., Gubaidullin R.R., Kadushkin V.V. et al. // *Institute of Physics and IOP Publishing Limited*, 2020. - P. 12142.
51. Созонов, Н. С. Экспериментально-теоретическое исследование влияния конструктивных элементов волоконно-оптического датчика деформации на его показания и методика корректировки передаточной функции / Н. С. Созонов, И. Н. Шардаков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2017. – № 4. – С. 173-188. – DOI 10.15593/perm.mech/2017.4.12.
52. Mukherjee B. WDM optical communication networks: progress and challenges // *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2000. - V. 18. - № 10. - P.1810–1824.
53. Морозов О. Г. Радиофотонный метод определения угла прихода отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О.Г.Морозов, Г.А. Морозов, Г.И. Ильин и др. // *Вестник поволжского государственного*

технологического университета. Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 1 (49).

54. Морозов О.Г. Трехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры - новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей / О.Г. Морозов, Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И. и др. // Фотон-Экспресс. - 2021. - № 6 (174).

55. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts / O. G. Morozov, A. Z. Sakhabutdinov, I. I. Nureev, R. S. Misbakhov // Journal of Physics: Conference Series : V International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2019, Samara, 21–24 мая 2019 года. - Vol.1368, 2. – Samara: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022048. – DOI 10.1088/1742-6596/1368/2/022048. – EDN ANOQRB.

56. 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.

57. Заболотный В.А. Алгоритм формирования двухчастотного зондирующего излучения для мониторинга симметричных высокодобротных волоконно-оптических структур / В.А. Заболотный, Т.А. Аглиуллин, Т.Р. Сахбиев, и др. // Научно-Технический Вестник Поволжья. - 2020. - № 6.

58. Аглиуллин Т.А. Управление тонкой структурой трёхкомпонентных адресных брэгговских измерительных преобразователей, последовательно записанных в оптическое волокно квазираспределённой радиофотонной сенсорной системы / Т.А. Аглиуллин, Кузнецов А.А. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2020. - № 4 (48). - С. 72-81. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.4.72>

59. 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.

60. Курбиев И. У. Многосенсорные радиофотонные системы на адресных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решетках / И.У. Курбиев, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов // Сборник материалов научно-практической конференции Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2021. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, 2021. - С. 158–160.

61. Мягдеев Р.М. Подходы к моделированию спектральных характеристик ВБР с фазовым сдвигом, сформированным неоднородностью / Р.М. Мягдеев, Р.О. Васимов, А.А. Кузнецов и др. // Фотон-Экспресс. - 2021. - № 6 (174).

62. Мягдеев Р. М. Способ записи ВБР с фазовым сдвигом на искусственно введенной неоднородности / Р.М. Мягдеев, Р.О. Васимов, А.А. Кузнецов // Фотон-Экспресс.- 2021. - № 6 (174).

63. Феофилактов С.В. Квази-распределенная акустическая сенсорная система для контроля движения среды в полой трубе / С.В. Феофилактов, А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов и др. // Сборник тезисов докладов Международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика – 2020", 2020. - С. 13–18.

64. Куликов Е.В. Система для оценок износа ствола по данным измерения его деформаций с использованием адресных волоконных брэгговских решеток / Е.В. Куликов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев и др. // Сборник тезисов докладов I Российской научной конференции Радиофотоника, фотоника и исследование свойств вещества, 2020. - С. 199–200.

65. Никачадзе Д.М. Исследование характеристик термоэлектрических датчиков температуры / Д.М. Никачадзе, Л.М. Асатуров // Материалы ежегодной III Всероссийской

научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе», 2020. - С. 71–75.

66. Клевцов С. И. Источники погрешностей и алгоритмические пути повышения точности измерения температуры датчиками температур / С.И. Клевцов // Известия ТРТУ.– 2003. – № 3(32). – С. 37-44.

67. Котяшев В.С. Сравнительный анализ цифровых полупроводниковых датчиков температуры / В.С. Котяшев, Р.Е. Багжанов, Р.К. Собянин, И.С. Терновая // Высшая Школа. - 2016. - № 1.

68. Фрунзе А.В. Методическая погрешность энергетических пирометров, обусловленная влиянием на результат измерения расстояния между пирометром и объектом / А.В. Фрунзе // Измерительная Техника. - 2012. - № 10.

69. Фрунзе А. Влияние методических погрешностей пирометров на выбор прибора / А. Фрунзе // Фотоника. – 2012. – № 3(33). – С. 46-51.

70. Афанасьев А.В. Инфракрасный микропроцессорный пирометр с диафрагмальной оптикой / А.В. Афанасьев, И.Я. Орлов // Приборы и техника эксперимента. - 2003. - №1. - С. 149-152.

71. Ковалев А.В. Экспериментальное исследование постоянства терморезистивного коэффициента термохимического датчика в расширенном интервале рабочих температур / А.В. Ковалев // Вестник Гомельского Государственного Технического Университета им. П.О. Сухого. - 2004. - № 2.

72. Крышталь Р.Г. Устройства на поверхностных акустических волнах для чувствительных элементов датчиков температуры / Р.Г. Крышталь, А.П. Кундин, А.В. Медведь // Радиотехника и электроника. - 2017. - Т. 62. - № 3.

73. Ткачев А.Л. Классификация акустических датчиков / А.Л. Ткачев, В.М.Мусалимов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – С. 328-332.

74. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю.А. Заболотной. – Москва: Изд-во Техносфера, 2005. – 592 с.

75. Phase Shifts Induced by the Piezoelectric Transducers Attached to a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating / Chen X., Painchaud Y., Ogusu K. и др. // J. Light. Technol. - 2010.- V. 28. - № 14. - P. 2017–2022.

76. Губайдуллин Р.Р. Разработка конструкции устройства для подключения оптоволоконных датчиков к вращающемуся телу // Материалы Международной молодёжной научной конференции XXIV Туполевские чтения (Школа молодых ученых), 2019. - С. 495–499.

77. Jousimaa O. Energy harvesting system for intelligent tyre sensors / O. Jousimaa, Y. Xiong, A.J. Niskanen et al. // 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2016. - P. 578–583.

TRENDS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ADVANCED SYSTEMS FOR MONITORING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VEHICLE WHEEL

R.R. Gubaydullin, T.A. Agliullin

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

Abstract. The paper presents an overview of systems for monitoring the dynamic characteristics of vehicle wheels, such as: forces, moments, angular velocities. Existing and prospective monitoring systems were considered, general characteristics of the systems of this class were determined, which made it possible to propose a classification that allows determining the scope of application and specific features of the systems of each class. Promising directions for the development of advanced systems for monitoring the dynamic characteristics of wheel adhesion to the road surface and methods for their implementation in active safety systems of vehicles were determined. Based on the set of tasks facing advanced dynamic characteristics monitoring systems and the technical capabilities of monitoring systems, promising development paths have been identified based on the use of fiber-optic measuring systems with radio-photonic methods of signal acquisition and processing, and the use of addressable fiber Bragg structures as a sensitive element of the sensor.

Keywords: microwave-photonic sensor system, fiber optic sensor system, fiber Bragg grating, addressed fiber Bragg structures.

Статья представлена в редакцию 15.03.2025г.