

Быстров И.Р.

студент 4 курса автомобильного факультета
Воронежского государственного
лесотехнического университета имени
Г. Ф. Морозова, РФ

Ельшин С.Н.

Директор по персоналу ЗАО «Воронежский
шинный завод», РФ

Прядкин В.И.

доктор техн. наук, профессор кафедры
автомобилей и сервиса Воронежского
государственного лесотехнического
университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Bystrov I.R.

4th year student of the Automobile
Faculty of Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov, Russian Federation

Yelshin S.N.

Director of Personnel CJSC Voronezh Tire
Plant, Russian Federation

Pryadkin V.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor of
the Department of cars and service, Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Russian Federation

КИБЕР ШИНЫ: ПРОБЛЕМЫ ИТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

CYBER TIRES: PROBLEMS AND TRENDS OF IMPROVEMENT

Аннотация. В статье приведен анализ основных направлений совершенствования интеллектуальных шин для электромобилей и беспилотного транспорта. Показана эволюция совершенствования интеллектуальных шин и переход от шины как пассивного узла, к узлу, активно влияющему на режим и безопасность движения автомобиля.

Abstract. This article analyzes the key results of innovative smart tires for electric and autonomous vehicles. It shows the evolution of smart tires from a passive component to one that actively influences vehicle performance and safety.

Ключевые слова: интеллектуальная шина, электронные датчики, микрочипы, дорожные условия, пятно контакта шины, износ протектора, бортовой компьютер, беспилотные транспортные средства.

Keywords: intelligent tire, electronic sensors, microchips, road conditions, tire contact spot, tread wear, on-board computer, unmanned vehicles.

Введение

В последнее время мировая автомобильная промышленность движется к еще более электрифицированному и беспилотному транспорту. Разработкой новых технологий и современных электронных систем управления автомобилем обусловлена необходимость создания так называемых «умных шин», интегрированных с бортовым компьютером [1,2].

С момента своего массового производства несколько десятилетий назад, шины всегда были пассивными элементами, которые играли решающую роль в безопасности движения автомобиля. В настоящее время мировая шинная отрасль находится на пороге революционных преобразований, сущность которых

заключается в переходе от шин, пассивно влияющих на режимы движения автомобиля, к «умным» интеллектуальным шинам, активно оказывающим влияние на тормозную динамику, управляемость, топливную экономичность, и, как следствие, на безопасность движения.

Система управления режимами движения автомобиля в реальных дорожных условиях в настоящее время отстаёт от всех остальных подсистем. Для того, чтобы иметь возможность предоставить оперативно необходимые характеристики контакта шины с дорогой, требуется, чтобы шина становилась частью интеллектуальной системы, которая предоставляет информацию бортовому контроллеру автомобиля. С этой целью необходимо объединить в одно единое целое - моделирование режимами движения автомобиля, современные достижения в приборостроении, тестирование, обработку больших массивов данных от различных датчиков и разработку алгоритмов [2].

Принципиально новым направлением и технологическим достижением является разработка и создание инновационных шин с электронными компонентами. Интеллектуальные шины разрабатываются более двух десятилетий, однако интенсивное их развитие в настоящее время обусловлено в первую очередь потребностью производителей беспилотного электрического транспорта. Будущее «умных» шин непосредственно связано с цифровыми технологиями и полной интеграцией с электронными системами беспилотного автомобиля. Автоматизация беспилотного электротранспорта предъявляет новые требования, в том числе и к шинам. Автопилот, управляющий машиной, должен следить за дорожными условиями, когда контроль возложен на датчики, установленные в шинах. «Умные» шины, должны собирать и предоставлять важную информацию, необходимую при управлении беспилотной техникой.

Шина - единственный узел автомобиля, контактирующий с дорожной поверхностью, она обеспечивают сцепление с дорожным полотном и реализует толкающие и тормозные усилия в пятне контакта шины с дорожным полотном. Специальные электронные датчики и микрочипы, располагаемые на ободу колеса во внутренней полости шины и имплантированные в протекторе, получают информацию о силе трения, силе контакта между покрышкой и дорожным полотном, средней нагрузке и количестве оборотов. Установленные в шине датчики определяют её состояние, температуру и внутреннее давление, величину остаточного ресурса рисунка протектора. Также датчики передают информацию на бортовой компьютер автомобиля о необходимости замены шины и прочие характеристики их работы. Микрочипы оцифровывают и передают пакет

информации о состоянии шин и характере дорожного полотна непосредственно в бортовой компьютер автомобиля. Полученная информация от различных датчиков шины полностью переопределяет работу всех электронных систем для обеспечения безопасного режима торможения, устойчивости движения в занимаемой полосе [3].

Технологии интеллектуальных шин

На первом этапе создания интеллектуальных шин были разработаны электронные системы контроля износа шин, интегрированные с различными датчиками и технологиями для обеспечения мониторинга их состояния в режиме реального времени. Эти системы используют множество датчиков (рис. 1), каждый из которых выполняет определенные функции. При этом, при разработке возникла необходимость решения ряда проблем, связанных с расположением датчика внутри шины, совместимостью датчиков со свойствами материала шины, обеспечением постоянной передачи данных бортовому компьютеру автомобиля и обеспечением датчиков питанием для этого [4].

Датчики измерения глубины протектора измеряют глубину протектора покрышек. Оптимальная глубина протектора обеспечивает надежное сцепление с дорогой и предотвращает аквапланирование. Системы используют комбинации датчиков. Используются как контактные, так и бесконтактные методы измерения. Так, лазерные датчики сканируют поверхность протектора и измеряют его глубину с высокой точностью.

Механические датчики представляют собой простые приспособления, которые выдвигаются в зависимости от глубины протектора или отслеживают скорость вращения колеса. Это самый базовый способ мониторинга, но он является недостаточно точным [5].

Оптические датчики используют световые лучи или камеры для определения глубины протектора. Эти системы являются точными, но требовательны к качеству освещения и чистоте изделия [5].

Ультразвуковые датчики используют звуковые волны и могут находить не только глубину протектора, но и выявлять другие механические повреждения. Эти датчики менее подвержены внешним факторам, таким как грязь и осадки [5].

Датчики давления контролируют уровень давления в шинах. Низкое давление приводит к быстрому износу и повышенному риску повреждения конструкции шины [5].

Датчики температуры измеряют температуру шины во время движения. Повышение температуры указывает на проблемы, такие как недостаток давления или механические повреждения [5].

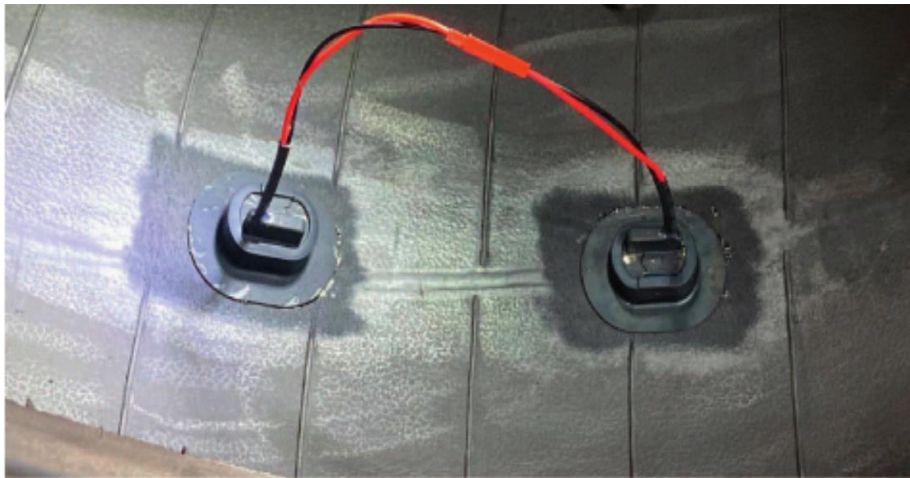


Рисунок 1 – Акселерометр, прикрепленный к шине с внутренней стороны

К основным преимуществам электронных систем контроля износа шин относятся параметры, улучшающие эксплуатационные свойства автомобиля. Это прежде всего повышение безопасности движения, благодаря информированию водителей о критических состояниях шин, что снижает риск аварий. Возрастает экономичность эксплуатации автомобилей, так как система позволяет заранее выявлять проблемы и избежать серьезных поломок и дорогостоящих ремонтов. Постоянный мониторинг и своевременное обслуживание значительно увеличивают срок службы шин [6].

Французский производитель Michelin разработал одну из самых совершенных систем контроля состояния шин TPMS (Tire Pressure Monitoring System). В отличие от простых систем, лишь сигнализирующих о падении давления, технология Michelin представляет собой комплексный мониторинговый инструмент, интегрированный в электронную систему управления транспортным средством [5,7].

TPMS от Michelin представляет собой систему, которая отслеживает давление в шинах и глубину протектора. Она использует беспроводные датчики, которые устанавливаются на каждом колесе. Данные передаются на бортовой компьютер, который анализирует полученную информацию и уведомляет водителя при необходимости. Кроме того, Michelin предлагает мобильное приложение, позволяющее водителям контролировать состояние шин и получать рекомендации.

Основу системы составляют высокоточные датчики последнего поколения, устанавливаемые внутри каждого колеса. Эти миниатюрные устройства, разработанные с использованием авиационных технологий, способны измерять не только давление с невероятной точностью ± 0.1 бар, но и целый спектр критически важных параметров: температуру шины в различных зонах, степень деформации протектора, фактическую нагрузку на ось и даже микроскопические изменения структуры резиновой смеси. Особенностью технологии Michelin является использование запатентованного алгоритма анализа теплового поля, позволяющего выявлять потенциальные проблемы на самых ранних стадиях. Датчики передают информацию по защищенному радиоканалу на бортовой компьютер автомобиля. Эта система анализирует данные с учетом множества факторов: стиля вождения, дорожных условий, загрузки автомобиля и даже качества дорожного покрытия. В результате водитель получает не просто предупреждение о низком давлении, а комплексные рекомендации: от необходимости проверить развал-схождение до оптимального значения давления для предстоящей поездки с учетом погодных условий.

Для коммерческого транспорта Michelin предлагает специализированное решение Track Connect, где каждый датчик представляет собой автономный вычислительный модуль с защищенным корпусом. Система способна одновременно контролировать до 54 осей, что делает её незаменимой для крупных автопарков. Реальная экономия от внедрения этой технологии достигает 18%, как показал опыт компании DHL, где система помогла оптимизировать графики замены шин и сократить количество внеплановых простоев [7].

В последнее время компания Michelin интегрирует датчики непосредственно в конструкцию шин, как в моделях Pilot Sport 4S. Система регистрирует такие факторы, как перегрев шины, неравномерный износ протектора при агрессивном вождении и другие. Для электромобилей разработана специальная версия, которая помогает увеличить запас хода за счет идеального поддержания давления воздуха в шинах. Срок службы современных датчиков для шин Michelin достигает 7 лет, что вдвое превышает показатели большинства аналогов. При этом система остается совместимой с 95% автомобилей, оснащенных TPMS. Уникальность подхода компании Michelin заключается в том, что их решение – это не просто система предупреждения, а интеллектуальный помощник, который действительно позволяет увеличить срок службы шин, снизить расход топлива и повысить безопасность движения [7].

Шинная компания Bridgestone разработала линейку шин Ecoria, направленную на улучшение показателей экономичности и снижения вредных выбросов. Шины Ecoria имеют встроенные технологии мониторинга. Они не только помогают снизить расход топлива за счет уменьшения сопротивления качению, но и позволяют следить за состоянием шин в режиме реального времени. Компания Bridgestone разработала уникальную систему TDMS, основанную на виброакустическом анализе. Микрофоны в колесных арках и датчики на подвеске фиксируют малейшие изменения в частотном спектре качения, позволяя выявлять такие опасные дефекты, как расслоение корда или появление повреждений. Точность диагностики достигает 89%, что подтверждено независимыми тестами NTSB [8].

В последнее время все ведущие мировые производители шин проводят поисковые и научные исследования по разработке технологий «умных» шин нового поколения в различных направлениях.

Техническими специалистами компании Pirelli разработана концептуально новая шина Cyber Tire, которая содержит массивы датчиков, подключенных к электронным системам автомобиля в соответствии с различными условиями вождения. Получаемая информация от датчиков необходима для оптимизации эффективности торможения, повышения устойчивости и контроля тяги в режиме реального времени [9].

Интеллектуальная шина, благодаря вставленному в корпус микрочипу и датчикам, анализирует дорожные условия и характер сцепления с дорожным полотном, определяет, является ли дорога сухой, влажной или обледеневшей; оценивает вертикальную нагрузку, а также боковые и продольные силы, чтобы определить момент начала аквапланирования; определяет тип асфальта на дороге. Так же определяет параметры пятна контакта и угол наклона шины, температуру и давление воздуха в ней, частоту вращения и износ протектора. Имплантированный в шину датчик осуществляет электронный контроль за режимами движения автомобиля. Все данные в режиме реального времени непрерывно передаются по беспроводной сети на бортовые компьютеры и электронные системы автомобиля: систему электронной стабилизации (ESP) и тормозную систему (ABS), снабжая более детальной информацией о состоянии шин. Благодаря применению трехмерного акселерометра, в отличие от нынешних устройств, монтируемых в шинах автомобилей, они способны исправлять и корректировать ранее заданный режим движения [9,10].

В основе системы Cyber Tire лежат миниатюрные сенсорные модули, встроенные непосредственно в конструкцию шины. Эти датчики нового поколения измеряют не только традиционные параметры (давление и температуру), но и такие критические показатели, как локальные деформации протектора в различных точках контакта с дорогой, фактическое распределение нагрузок по площади пятна контакта, микроскопические изменения структуры резиновой смеси, уровень вибраций на разных скоростях [9].

Особенностью технологии Pirelli является использование акустического анализа износа. Встроенные пьезоэлектрические датчики регистрируют изменения звуковых волн, возникающих при качении шины. Алгоритмы искусственного интеллекта анализируют эти данные, определяя степень износа с точностью до 0,1 мм, что существенно превышает возможности визуального осмотра [9,11].

Инновационные разработки ведущих производителей интеллектуальных шин

Процесс автоматизации дорожного движения регламентирует новые требования к автомобильным шинам для гибридных и электрических транспортных средств. Остаточный заряд аккумуляторных батарей в электрокарах в настоящее время рассчитывается с использованием стандартных параметров, но бортовая электроника CyberCar от Pirelli позволяет предоставлять более точную информацию. Определив точный вес транспортного средства, центральный блок управления более точно рассчитает оставшуюся зарядку, что важно для электрокаров, которые, в отличие от машин с ДВС, заряжаются медленно. Кибершина на основе датчиков подключается к стандарту широкополосной мобильной связи 5G и через свою сеть передаёт информацию о риске аквапланирования, определяемом шинами, другим транспортным средствам. Далее информация об опасности на конкретном участке передается другим транспортным средствам, чтобы они, при необходимости, смогли заранее скорректировать маршрут.

Система интегрирована с бортовыми компьютерами автомобилей. В реальном времени она предоставляет водителю информацию через: графический интерфейс мультимедийной системы, голосовые предупреждения при критическом износе шин, а также выдает рекомендации по оптимальному давлению в шинах для конкретных условий эксплуатации.

Компания Goodyear разработала концепт «умной» резины, которая избавит водителей от проблем, связанных с внезапным износом шин во время дальних поездок. Разработанная технология Re Charge позволяет восстанавливать изношенный протектор. Инновационная шина представляет собой безвоздушную покрышку (рис. 2), снабжённую биоразлагаемым протектором, который способен регенерировать благодаря специальной капсуле с особым биоразлагаемым материалом [12].

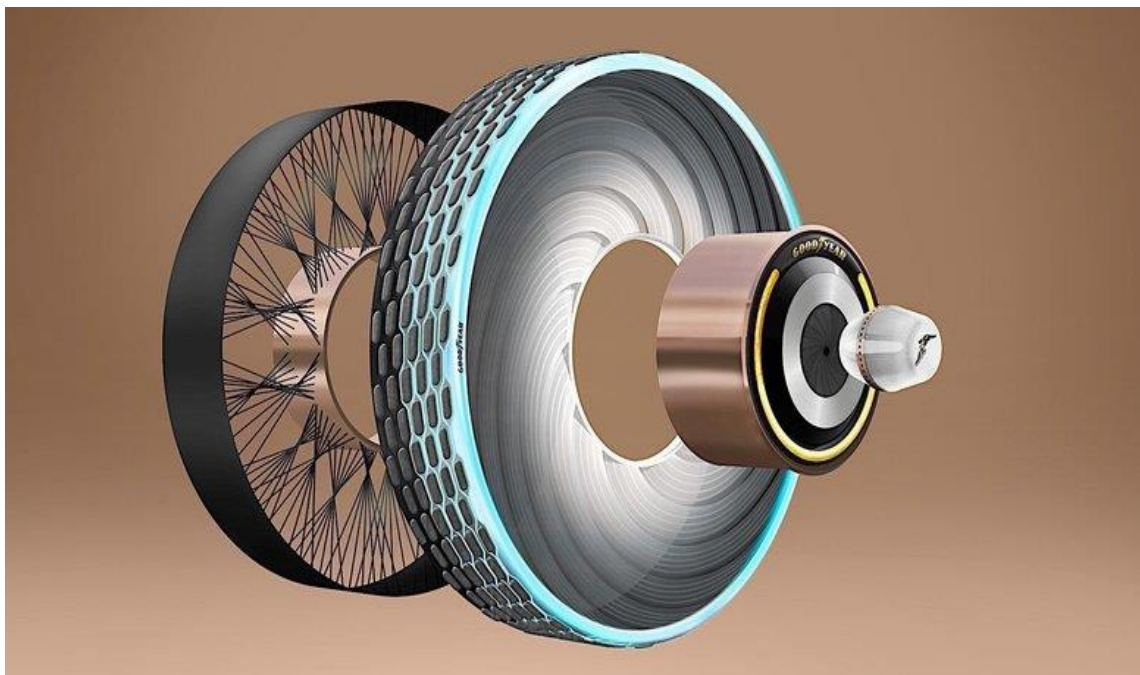


Рисунок 2 – Образец безвоздушной покрышки с биоразлагаемым протектором

Проект представляет собой безвоздушную покрышку, лишённую герметичной камеры. Такой шине не страшны проколы и порезы. Она снабжена биоразлагаемым протектором, который способен регенерировать благодаря специальной капсуле с особым биоразлагаемым материалом. В шины прессуют высокотехнологичное соединение из возобновляемых материалов, включая каучук из одуванчиков и синтетическую паутину. Смесь поступает на поверхность колеса через сеть тонких трубок, после чего высыхает и затвердевает, образуя новый слой протектора. Помимо функционального преимущества по сравнению с обычными шинами Re Charge предлагает более экологичный подход, поскольку здесь не используется тот же диоксид кремния. Раствор для обновления протектора хранится в сменных капсулах в ступице колеса. В зависимости от стиля вождения и погодных условий их можно менять и использовать для оптимизации сцепления с шиной с дорожным покрытием и расхода топлива. Предложенная технология позволяет изменять свойства вещества в капсуле с учётом усло-

вий эксплуатации покрышек, климатической обстановки и даже стиля вождения [12].

Корейскими инженерами совместно со студентами английского колледжа RCA в рамках дизайнерского проекта, разработаны инновационные смарт-шины Nexonic и HLS-23 представленные на рисунке 3.



Рисунок 3 – Инновационные смарт-шины Nexonic и HLS-23

Шины Hankook Nexonic устанавливаются на беспилотные транспортные средства, управляемые дистанционно. Они оснащаются комплексом датчиков, определяющим тип и состояние дорожного полотна, его температуру, а также уровень сцепления в пятне контакта. Собранные данные обрабатываются в контроллере, который отдает управляющие команды на адаптивный протектор, подстраивая его под выявленные эксплуатационные условия. Эта система призвана обеспечить максимальный комфорт и безопасность движения в беспилотных транспортных системах. Эти шины ориентированы на работу в системах из нескольких автоматически движущихся транспортных средств. Помимо основных дорожных датчиков, они имеют датчики связи, анализирующие взаимное положение отдельных единиц транспорта и позволяющие им поддерживать заданную дистанцию [13].

Южнокорейская автомобилестроительная компания Hyundai представила новую конструкцию колес и шин со встроенными цепями противоскольжения (рис. 4), которые можно активировать и убирать простым нажатием кнопки.

Данное решение может положить конец трудоемкому процессу установки и снятия традиционных зимних цепей.



Рисунок 4 – Шина со встроенными цепями противоскольжения

Согласно технологии Hyundai каждая из покрышек имеет шесть поперечных канавок с углублениями, совпадающих по расположению с шестью спицами колеса. Внутри этих канавок находятся толстые проволоки, похожие на цепи противоскольжения, которые глубоко втянуты в протектор. Частично они изготовлены с использованием твердых сплавов с памятью формы: при прохождении электрического тока происходит активация и расширение элементов. Работает это следующим образом: к модулям через колёсный диск подводятся электрические контакты. Последние при подаче тока разогревают элементы из особого сплава, заставляя их менять свою форму, в результате чего те выдвигают наружу из шины поперечные планки-зацепы, которые и обеспечивают лучшее сцепление. В сложных дорожных условиях при движении по снегу, льду или грязи, достаточно включить систему, нажав на кнопку в салоне автомобиля. Сплав возвращается к своей первоначальной форме, поднимая проволочную петлю выше уровня протектора. В результате, на шинах формируются грунтозацепы, препятствующие скольжению, заносам и потери устойчивости, обеспечивая безопасность движения [14].

Специалисты ведущей шинной компании Bridgestone разработали «умную» резину с радиометками для шин автобусов и грузовиков. Встроенные метки радиочастотной идентификации (RFID) обеспечивают подключение шины к облачным системам, что позволяет автопаркам постоянно отслеживать изнашиваемость шин и своевременно реставрировать их протекторы. Следствием должно стать увеличение срока службы резины и сокращение углеродного следа [15].

Компания Hankook разработала Smart Tire System (рис. 5), в котором используются датчики, фиксирующие состояние шины, как глубину протектора, так и давление. Шина адаптируется к температуре дороги и условиям поверхности, чтобы обеспечивать более комфортное и безопасное вождение. Шина оснащена семью датчиками, которые позволяют сканировать дорогу в реальном времени. Протектор имеет форму гексагонов, которые расширяются и сужаются в зависимости от текущих условий [16].



Рисунок 5 – Шина компании Hankook с применением Smart Tire System

Современные шины пятого поколения оснащаются принципиально новыми типами чипов, представляющих собой сложные микрокомпьютерные системы, которые кардинально отличаются от предыдущих решений. Эти интеллектуальные устройства сочетают в себе многофункциональные сенсорные массивы, энергонезависимую архитектуру и мощные вычислительные возможности, превращая обычные шины в высокотехнологичные компоненты транспортных экосистем будущего. В отличие от простых RFID-меток третьего поколения или облачных систем четвертого поколения, чипы 5G содержат до двенадцати различных типов датчиков в одном компактном корпусе, включая наноразмерные тензодатчики, квантовые термометры и оптические LIDAR-сканеры, что позволяет осуществлять мониторинг состояния шины на принципиально новом уровне точности [15,17].

Энергонезависимая архитектура этих чипов решает ключевую проблему автономного питания через инновационные решения - трибоэлектрические генераторы преобразуют энергию трения качения, термомодули используют разницу температур, а сверхтонкие графеновые батареи обеспечивают десятилетний срок службы. Вычислительные возможности поражают воображение: встроенные нейропроцессоры способны выполнять до четырех триллионов операций в секунду, обеспечивая локальную обработку данных искусственным ин-

теллектом без необходимости подключения к облачным сервисам. Особого внимания заслуживает технология цифрового двойника, создающего виртуальную копию шины с точностью 99,7%, что позволяет прогнозировать остаточный ресурс с погрешностью менее половины процента.

Прорывные технологии в чипах пятого поколения включают функции самовосстанавливающейся диагностики, когда система не только обнаруживает микроскопические повреждения диаметром до 0,3 мм, но и активирует встроенные полимерные герметики, а также возможности коммуникации нового уровня в рамках экосистемы V2X. Современные чипы, такие как Continental Crystal TAG с фотонными кристаллами или Michelin Quantum Tread с квантовыми сенсорами трения, уже сегодня демонстрируют фантастические возможности, превращая шины из пассивных компонентов в активный узел системы управления транспортным средством. Несмотря на существующие вызовы, связанные с радиопомехами, кибербезопасностью и высокой стоимостью, отрасль активно ищет и находит решения [17].

Шинная компания Goodyear разработала электронную концепцию Eagle 360, которая представляет собой шины с интегрированными датчиками, контролирующими все параметры. Используя искусственный интеллект и алгоритмы машинного обучения, система может предсказывать проблемы и обеспечивать активное управление состоянием шин. Система так же может рекомендовать водителю избегать определенных участков дороги при выявлении снижения сцепления. Рисунок протектора трансформируется сам в зависимости от погодных условий. Сфера Eagle 360 Urban постоянно контролирует своё состояние. Если обнаружен прокол, место повреждения не используется как пятно контакта, начинается химический процесс самовосстановления. При значительном износе оболочки автомобиль отправляется на станцию технического обслуживания [18].

Выводы

1. Передовые тенденции автоматизации и цифровизации в автомобилестроении, свидетельствуют, что электронные системы контроля износа шин продолжают развиваться, применяя инновации, такие как искусственный интеллект и анализ больших данных, для ещё более эффективного управления и повышения безопасности автомобилей.

2. Концепция разработки и создания интеллектуальных шин основывается на широком использовании микрочипов, различных датчиков, нейронных

сетей, а также умных материалов с памятью. Одним из главных направлений разработки «умных» шин ведущими шинными компаниями и различными исследовательскими центрами является создание конструкций шин, осуществляющих самотестирование своего состояния.

3. Улучшение технологий, интеграция интеллектуальных шин с другими системами автомобиля, а также растущий интерес к устойчивым решениям в транспортной сфере создают множество возможностей для будущего.

Список литературы

1. Muhammad H. Rashid Handbook of Power Electronics in Autonomous and Electric Vehicles / Muhammad H. Rashid // Academic Press – 2024.
2. T. Zhao Road Sensing with Intelligent Tires for Driving Assistance Applications / T. Zhao, M. Kaliske, Y. Wei // Tire Science and Technology. – 2022.
3. P. Behroozinia Tire health monitoring using the intelligent tire concept / P. Behroozinia, S. Taheri, R. Mirzaeifar // Structural Health Monitoring. – 2013.
4. M. Hernández Santana Rubber Materials Fundamentals, Sustainability, and Applications / M. Hernández Santana, S. Utrera-Barrios // Elsevier – 2025.
5. Сысоева С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности: материалы 8 части научной статьи / Сысоева С. // Компоненты и технологии. – 2007.
6. S. Hong Tire-Road Friction Coefficient Estimation Based on Tyre Sensors and Lateral Tyre Deflection: Modelling, Simulations and Experiments / S. Hong // Vehicle System Dynamics. – 2013.
7. TPMS: Система контроля давления в шинах / MICHLIN URL: <https://www.michelin.com.my/> (дата обращения: 15.04.2025).
8. N. Roveri OPTYRE—RealTime Estimation of Rolling Resistance for Intelligent Tyres / N. Roveri, G. Pepe, F. Mezzani, A. Carcaterra, A. Culla, S. Milana // Sapienza University of Rome. – 2019.
9. Pirelli. (2022). Инновации в производстве шин. – URL: <https://www.pirelli.com> (дата обращения: 16.04.2025).
10. S. Khaleghian Estimation of the Tire Contact Patch Length and Normal Load Using Intelligent Tires and Its Application in Small Ground Robot to estimate the Tire-Road Friction / S. Khaleghian, O. Ghasemalizadeh, S. Taheri // Tire Science and Technology. – 2016.
11. I. Al-Najati Tire strain piezoelectric energy harvesters: a systematic review / I. Al-Najati, S.Y. Pung, K. Wai Chan // IJPEDS. – 2022.
12. Goodyear. (2020) The Goodyear re Charge Concept – Making Tyre Changing Easy with Customised Capsules that Renew your Tyres – URL: <https://www.goodyear.com.my/goodyear-recharge-concept> (дата обращения: 16.04.2025).
13. Hankook. (2019). Hankook Tire wins the IDEA 2019 for its innovative concept tires. URL: <https://www.hankooktire.com/au/en/company/media-list/media-detail.603041.html?ysclid=mfxj0580zd582649809> (дата обращения: 15.04.2025).
14. Hyundai. (2022). Let It Snow! Hyundai Motor and Kia Develop Shape Memory Alloy Integrated Snow Chain Technology. – URL: <https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/0000000380> (дата обращения: 15.04.2025).
15. Bridgestone начинает выпуск «умных» грузовых шин (2022). – URL: <https://motorshef.ru/news/72259> (дата обращения: 16.04.2025).
16. Hankook. – URL: <https://www.hankooktire.com/global/en/tires/smart.html?ysclid=mfxkzww5ap828619237> (дата обращения: 16.04.2025).

17. J. Patterson Thermal Tires / J. Patterson // Publifye AS. – 2025.
18. Goodyear (2017) The tire of the future will be able to sense, decide, transform and interact – URL:<https://www.goodyear.com.ph/about-us/news/goodyear-eagle-360-urban> (дата обращения: 16.04.2025).

References

1. Muhammad H. Rashid Handbook of Power Electronics in Autonomous and Electric Vehicles / Muhammad H. Rashid // Academic Press – 2024.
2. T. Zhao Road Sensing with Intelligent Tires for Driving Assistance Applications / T. Zhao, M. Kaliske, Y. Wei // Tire Science and Technology. – 2022.
3. P. Behroozinia Tire health monitoring using the intelligent tire concept / P. Behroozinia, S. Taheri, R. Mirzaeifar // Structural Health Monitoring. – 2013.
4. M. Hernández Santana Rubber Materials Fundamentals, Sustainability, and Applications / M. Hernández Santana, S. Utrera-Barrios // Elsevier – 2025.
5. Sysoeva S. Actual technologies and applications of sensors of automotive active safety systems: materials of the 8th part of the scientific article / Sysoeva S. // Components and technologies. – 2007.
6. S. Hong Tire-Road Friction Coefficient Estimation Based on Tire Sensors and Lateral Tire Deflection: Modeling, Simulations and Experiments / S. Hong // Vehicle System Dynamics. – 2013.
7. TPMS: Tire Pressure Monitoring System / MICHLIN URL: <https://www.michelin.com.my/> (date of access: 04/15/2025).
8. N. Roveri OPTYRE—RealTime Estimation of Rolling Resistance for Intelligent Tyres / N. Roveri, G. Pepe, F. Mezzani, A. Carcaterra, A. Culla, S. Milana // Sapienza University of Rome. – 2019.
9. Pirelli. (2022). Innovations in tire manufacturing. – URL: <https://www.pirelli.com> (accessed: 04/16/2025).
10. S. Khaleghian Estimation of the Tire Contact Patch Length and Normal Load Using Intelligent Tires and Its Application in Small Ground Robot to estimate the Tire-Road Friction / S. Khaleghian, O. Ghasemalizadeh, S. Taheri // Tire Science and Technology. – 2016.
11. I. Al-Najati Tire strain piezoelectric energy harvesters: a systematic review / I. Al-Najati, S.Y. Pung, K. Wai Chan // IJPEDS. – 2022.
12. Goodyear. (2020) The Goodyear re Charge Concept – Making Tyre Changing Easy with Customised Capsules that Renew your Tyres – URL:<https://www.goodyear.com.my/goodyear-recharge-concept> (date of access: 04/16/2025).
13. Hankook. (2019). Hankook Tire wins the IDEA 2019 for its innovative concept tires. URL:<https://www.hankooktire.com/au/en/company/media-list/media-detail.603041.html?ysclid=mfxj0580zd582649809> (accessed: 04/15/2025).
14. Hyundai. (2022). Let It Snow! Hyundai Motor and Kia Develop Shape Memory Alloy Integrated Snow Chain Technology – URL: <https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/00000000380> (date of issue: 04/15/2025).
15. Bridgestone starts production of "smart" truck tires (2022). – URL: <https://motorshef.ru/news/72259> (date of access: 04/16/2025).
16. Hankook. – URL:<https://www.hankooktire.com/global/en/tires/smart.html?ysclid=mfxkzww5ap828619237> (accessed: 04/16/2025).
17. J. Patterson Thermal Tires / J. Patterson // Publifye AS. – 2025.
18. Goodyear (2017) The tire of the future will be able to sense, decide, transform and interact – URL:<https://www.goodyear.com.ph/about-us/news/goodyear-eagle-360-urban> (date of request: 04/16/2025).