

*Д.В. ГРЕЦКИХ, канд. техн. наук, В.Г. ЛИХОГРАЙ, канд. физ.-мат. наук,  
А.А. ЩЕРБИНА, канд. техн. наук, С.Н. САКАЛО, канд. техн. наук,  
Т.С. ТКАЧЕВА, канд. техн. наук.*

## **СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ**

### **Введение**

Одним из направлений развития современных систем беспроводной передачи информации является создание интеллектуальных беспроводных сред (сетей) сенсоров (WSN – Wireless Sensor Networks), в которых множество устройств и датчиков (сенсоров), взаимодействуя между собой, осуществляют передачу большого массива различной информации. Стремительное развитие WSN способствует успешному практическому внедрению актуальных и, безусловно, востребованных коммуникационных технологий для поддержки нового качества обмена информации, услуг, сервисов и приложений. Например, на основе WSN можно осуществлять удаленный мониторинг различных конструкций, механизмов, узлов и деталей, состояния здоровья человека и т.д. [1, 2]. Привлекательной особенностью WSN является то, что их датчики могут работать в естественных, промышленных или опасных и агрессивных средах. Важным при реализации WSN является их энергоэффективные автономные недорогие решения с низким уровнем энергопотребления. Помимо этого, WSN имеют еще ряд важных преимуществ – высокую гибкость и распределенный интеллект при реализации удаленного мониторинга в режиме реального времени.

В данной работе решалась задача построения бортовой системы контроля подвески автомобиля (СКПА) на базе технологий, применяемых в WSN, а также технологий беспроводной передачи энергии. Целесообразность применения этих технологий обусловлена особенностью бортовой СКПА: ее электронная схема и датчики размещаются на подвижной части подвески автомобиля, а прокладка проводных линий питания и линий передачи данных от них на систему обработки – бортовой компьютер, устанавливаемый обычно на неподвижной (кузовной) части автомобиля, является проблематичным и в большинстве случаев затруднительным.

По этой причине для реализации бортовой СКПА предлагается использовать энергоэффективные технологии, применяемые в WSN, а для их питания рассмотреть возможность применения технологий беспроводной передачи энергии (БПЭ). В рамках решения этой задачи предложена структурная схема СКПА и рассмотрены варианты схем беспроводной передачи данных и беспроводного питания ее электронных компонентов (тензодатчиков, процессорный блок).

Решение данной задачи, безусловно, является актуальным, т.к. подвески автомобилей испытывают большие динамические нагрузки и напряжения, определяемые конструктивными особенностями автомобилей (в частности, на переднюю подвеску приходятся дополнительные нагрузки, связанные с размещением двигателя в его передней части или при выполнении поворотов «влево-вправо» и т.д.). Все это приводит к усталости металла подвески и, как следствие, к ее деформации и повреждениям. Автомобиль при движении даже с частично поврежденной подвеской представляет серьезную опасность.

В работе рассмотрены особенности построения WSN и альтернативные способы питания их узлов. Разработана структурная схема СКПА и предложены варианты технической реализации подсистем беспроводной передачи данных и беспроводного питания электронных узлов СКПА (тензодатчиков, процессорного блока). Предложен подход для строгого электродинамического анализа СКПА, который позволяет учитывать влияние металлических конструкций подвески и днища автомобиля и взаимное влияние антенн подсистем передачи данных и энергии на характеристики СКПА.

## 1. Общие принципы построения WSN

Прежде чем перейти к реализации СКПА, рассмотрим особенности построения узлов WSN и альтернативные подходы в организации их питания.

Типовой беспроводный сенсорный узел в составе WSN (рис. 1) включает в себя следующие основные блоки [3]: блок сенсоров с аналогово-цифровым преобразователем (Sensor Unit), процессорный блок с памятью (Processor Unit), блок радиосвязи (Communication RF Unit) и блок питания (Power Unit).

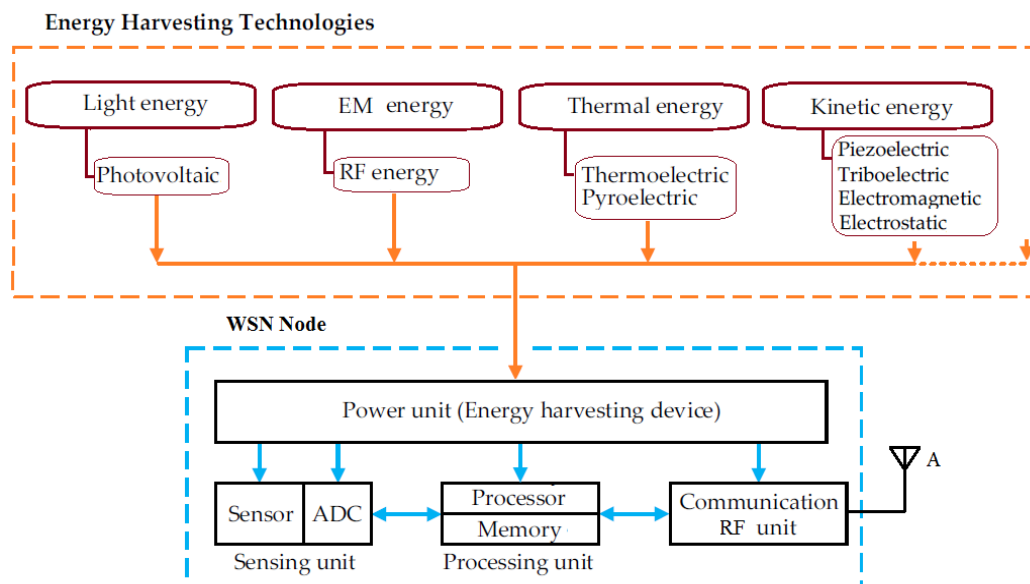


Рис. 1. Типовой узел WSN и возможные способы его питания

Различные датчики (сенсоры) преобразуют информацию о значениях контролируемых параметров в электрические сигналы – напряжение, ток, частоту и т.д. После этого сигналы контролируемых параметров преобразуются в цифровой код и поступают в процессорный блок, например на базе микроконтроллера (МК), где с учетом значений этих сигналов и в соответствии с заложенным в МК программным обеспечением через исполнительные механизмы (реле, электродвигатели, соленоиды, и т.д.) принимаются решения по управлению или отображается информация о техническом состоянии объекта управления в реальном масштабе времени. Блок радиосвязи осуществляет взаимодействие узла WSN с сетевыми устройствами. Важным компонентом узлов WSN является их блок питания!

Выбор коммуникационных технологий при построении WSN зависит от многих факторов, таких как потребляемая мощность устройства (питание от сети или аккумулятора), форм-фактор, пропускная способность (поточковый трафик или отдельные команды), интеграция в существующие системы и т.д. Актуальными являются такие беспроводные технологии как Wi-Fi (IEEE 802.11xx), Bluetooth (IEEE 802.15.1), Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE, BLE), ZigBee, Thread (IEEE 802.15.4) и др. На их основе можно создавать интеллектуальные WSN для обмена данными между устройствами сети. В табл. 1 приведены типовые характеристики отмеченных выше радиотехнологий, актуальных для задач мониторинга [3].

Анализ данных табл. 1 показывает, что радиокommunikационные технологии BLE, ZigBee и Thread, работающие в диапазоне ISM 2.4 ГГц (Industrial Scientific Medical), имеют самое низкое энергопотребление (от единиц микроватт до десятков милливольт), что привлекательно для организации питания узлов WSN на основе альтернативных источников энергии.

Сравнительные характеристики технологий построения беспроводных сетей

Протокол	ZigBee	Thread	Bluetooth LE	Wi-Fi (IEEE 802.11n)
Диапазон частот	ISM 2.4 ГГц	ISM 2.4 ГГц	ISM 2.4 ГГц	ISM 2.4 ГГц
Пропускная способность	250 кбит/с	250 кбит/с	до 2 Мбит/с	до 600 Мбит/с
Дальность действия	<100 м	<100 м	<300 м	<1000 м
Потребляемая мощность: - ждущий режим: - режим передачи: - режим приема:		4 мкВт 84 мВт 72 мВт	8 мкВт 60 мВт 53 мВт	300 мкВт 350 мВт 270 мВт
Топология сети	Ячеистая сеть MESH	Ячеистая сеть MESH	«Точка-точка» ячеистая сеть	«Звезда» ячеистая сеть,
Уровни протоколов	Сетевой и прикладной	Сетевой	Сетевой и прикладной	Канальный
Безопасность	Шифрование AES-128 и аутентификация	Шифрование AES-128 и аутентификация	Асимметричное шифрование	Шифрование и аутентификация
IP-подключение	Дополнительный шлюз	Собственная адресация IPv6	Дополнительный шлюз	Встроенная функция

## 2. Альтернативные источники питания устройств WSN

При решении различных практических задач многие устройства WSN могут работать в условиях, когда замена батарей питания неудобна или даже невозможна. Это серьезная проблема, которая сдерживает применение WSN при решении важных актуальных прикладных задач, в частности построение СКПА. По этой причине альтернативные источники энергии могут стать эффективным решением в устранении указанных недостатков, которые в ряде случаев сдерживают практическую реализацию WSN.

В самом общем случае для беспроводного питания устройств WSN различного назначения можно выделить следующие подходы [3]:

- извлечение энергии из окружающей среды (EH – Energy Harvesting);
- радиочастотная (беспроводная) передача энергии (WPT – Wireless Power Transmission).

В рамках первого подхода можно выделить (рис. 1): падающую солнечную энергию (Light Harvesting) дневного света; электромагнитную (EM – Electromagnetic) или радиочастотную (RF – Radio Frequency) энергию разных источников радиоизлучения (RF Harvesting); тепловую энергию (Thermal Energy Harvesting) в результате преобразования изменения температуры окружающей среды в электрическую энергию; кинетическую/потенциальную энергию от источников механического движения (Mechanical Energy Harvesting) [3].

Солнечный или искусственный свет можно собирать и аккумулировать на основе фотоэлектрического эффекта (Photovoltaic). С помощью солнечных батарей, изготовленных из полупроводниковых материалов, осуществляется прямое преобразование световой радиации в электрическую энергию, но преимущественно в дневное время суток [3].

Электромагнитная или радиочастотная энергия – это искусственный источник, созданный человеком, не зависит ни от погодных условий, ни от времени суток. Извлечение EM/RF энергии привлекательно для беспроводного питания удаленных устройств в т.ч. WSN. Кроме того, постоянно возникающие новые коммерческие и некоммерческие беспроводные радиосистемы и устройства (сотовая мобильная радиосвязь, Wi-Fi и т.д.) открывают новые возможности приема доступной RF энергии круглосуточно в режиме 24/7 в любое время и практически в любом месте.

Сбор термоэлектрической энергии (Thermoelectric) – это результат преобразования рассеянной тепловой энергии в электрическую с помощью термоэлектрических генераторов (термопар), работающих на эффекте Зеебека [3]. Альтернативным способом преобразования тепловой энергии является пьезоэлектрический эффект (Pyroelectric), условием сбора энергии которого является изменение во времени температуры, в результате чего интенсивность спонтанной поляризации некоторых диэлектриков приводит к появлению электрического поля [3].

Источниками механической энергии являются различные виды кинетической/потенциальной энергии (Piezoelectric, Triboelectric), вызванные движением/деформацией объектов или электростатической энергии кулоновских сил (Electrostatic) [3]. Источниками механической энергии, например, являются вибрации работающего двигателя, несущих конструкций моста, амортизаторов движущегося автомобиля и др.

Перечисленные способы извлечения энергии из окружающей среды – это устойчивые источники зеленой энергии, которые требуют дальнейших исследований и в перспективе могут быть эффективно использованы для выработки полезной электроэнергии. Как пример, питание электронной схемы СКПА можно осуществлять за счет преобразования механической энергии вибрации работающего двигателя и деформации амортизаторов в электрическую энергию. Сравнительные характеристики различных ЕН технологий извлечения энергии приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Сравнительные характеристики некоторых технологий ЕН

Технологии/ параметры ЕН	Плотность потока извлекаемой мощности от источника ЕН	Выделенная плотность потока мощности в ходе преобразования ЕН	КПД преобразования ЕН, %	Технологии, устройства ЕН
Световая энергия (Light)	0.1 мВт/см <sup>2</sup> (в помещ.)	10 мкВт/см <sup>2</sup> (в помещ.)	10–24	Photovoltaic
	100 мВт/см <sup>2</sup> (вне помещ.)	10 мВт/см <sup>2</sup> (вне помещ.)		
Радиочастотная энергия (RF)	0.3 мкВт/см <sup>2</sup> (900 МГц)	0.1 мкВт/см <sup>2</sup>	50	Electromagnetic (EM), Radio Frequency (RF)
	0.1 мкВт/см <sup>2</sup> (1800 МГц)			
Тепловая энергия (Thermal)	100 мВт/см <sup>2</sup>	1 – 10 мВт/см <sup>2</sup>	3	Thermoelectric, Pyroelectric
Механическая энергия (Mechanical)	нет данных	100 мкВт/см <sup>2</sup>	Зависит от вида ЕН	Piezoelectric, Triboelectric, Electrostatic, EM

Анализ ЕН источников энергии (табл. 2) показывает, что соответствующие технологии извлечения энергии, являясь потенциально перспективными, пока не находят широкого применения для питания WSN. Причиной является нестабильность извлечения энергии во времени и в пространстве и низкая удельная плотность извлекаемой энергии рассмотренных выше технологий ЕН. Получаемые в настоящее время плотности потока извлекаемой мощности от источников ЕН в ходе преобразования недостаточны для их практического применения в WSN, в том числе и в СКПА. Поэтому рассмотрим второй подход – радиочастотной передачи энергии (WPT).

В рамках второго подхода WPT мы не говорим о радиочастотной передаче энергии в ближней или индуктивной зоне, которая широко используется в технологиях радиочастотной идентификации (RFID – Radio Frequency IDentification). Технологии RFID основаны на индуктивных, емкостных или резонансных связях и также обеспечивают беспроводную передачу энергии, но в непосредственной близости между устройствами. В случае СКПА сложно

обеспечить незначительное расстояние между устройствами, поэтому передача в ближней или индуктивной зонах для такого случая затруднительна. В рассматриваемом случае основное внимание уделяется радиочастотной передаче энергии в зоне Френеля и дальней зоне.

Целенаправленная передача радиочастотной энергии предполагает использование безлицензионных полос частот для промышленных, научных и медицинских целей (ISM industry–science–medical): 915 МГц, 2,4 и 5,8 ГГц. Величина передаваемой мощности при WPT определяется RF источником, а собранная энергия может быть существенно больше, чем при ЕН. Таким образом, для питания СКПА представляется интересным использовать именно радиочастотную передачу энергии.

В [4] показано, что с начала 2000-х годов стала интенсивно разрабатываться идея беспроводного энергоснабжения маломощных радиоустройств путем извлечения энергии ЭМП с помощью ректенн с последующим преобразованием ее в постоянный ток.

Основным элементом, используемым для преобразования радиочастотной энергии в мощность постоянного тока, является выпрямительная антенна, также называемая ректенна (rectenna). Ректенна – это специальный тип антенн, которые преобразуют (выпрямляют) падающее на них ЭМП в постоянный ток. Типовая ректенна состоит из таких основных компонентов: собственно антенны; фильтра предварительного выпрямления, (LPF – low-pass prerectification filter); схемы выпрямления (rectifying circuit); проходного фильтра постоянного тока или фильтра пост выпрямления (DC pass filter или post rectification filter) [4].

### 3. Структурная схема СКПА

При построении СКПА важным условием является выбор ее элементной базы, от параметров которой зависит эффективность передачи данных о состоянии подвески на бортовой компьютер и в значительной степени возможности организации беспроводного питания ее компонентов. Внешний вид передней подвески автомобиля и возможный вариант расположения сенсоров ней приведены на рис. 2.

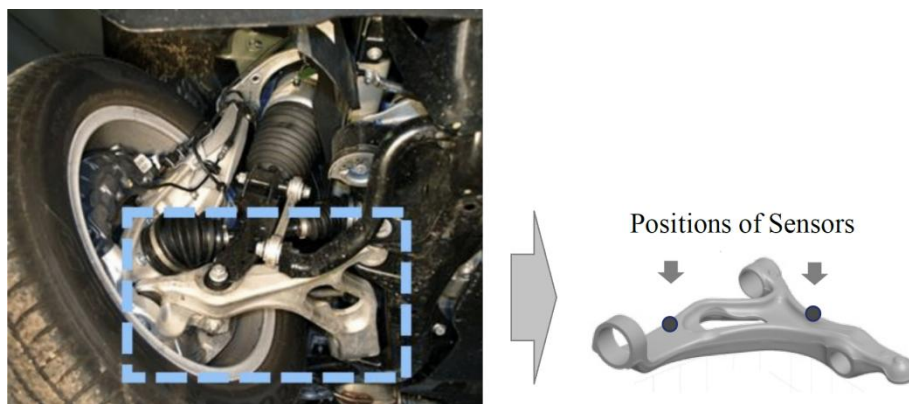


Рис. 2. Внешний вид подвески автомобиля и вариант размещения на ней датчиков

Отправной точкой при разработке системы диагностики является выбор датчиков, определяющих конструктивные изменения (растяжение, сжатие, скручивание) отдельных участков подвески. Измерение деформации – одно из самых сложных в технике электрических измерений, которое проводится с помощью тензорезистивных преобразователей [5]. Сложность измерений определяется малым диапазоном изменения сопротивления тензорезистора под воздействием деформации. Изменение сопротивления тензорезистора чрезвычайно мало и составляет около 0,0002 Ом для сопротивления 120 Ом при деформации 1 мкм/м [5]. Так, деформация 1000 мкм/м (соответствующая приращению напряжения в стали примерно 200 МПа) изменяет сопротивление тензорезистора всего на 0,2 Ом. Для преобразования столь малых изменений сопротивления в выходные сигналы используются мостовые схемы Уитстона [5]. В зависимости от количества тензорезисторов, включаемых в измерительный мост, возможны различные схемы включения (рис. 3): «четверть мост» и «полумост» [5].

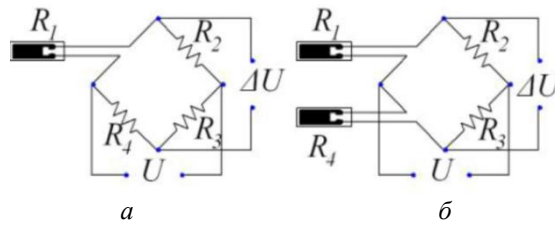


Рис. 3. Модификации измерительного моста: *a* – «четвертьмост»; *б* – «полумост»

В схеме «четверть моста» (рис. 4, *a*) используется двухпроводное подключение, которое наиболее надежно и экономично из-за минимального количества проводов, но используется в случае, когда температура окружающей среды практически не изменяется. Если же температура среды изменяется, то температурное изменение сопротивления соединительных проводов воспринимается измерительным устройством как деформация испытываемого объекта. По этой причине вместо схемы «четверть моста» целесообразно использовать «полумост» с трехпроводным подключением (рис. 4, *б*), при котором второй тензорезистор находится в таких же температурных условиях, что и конструкция подвески, и является компенсационным. В качестве тензосенсоров выбраны тензорезисторы фирмы HBM [6].

Тензорезисторы, включенные по мостовой схеме, преобразуют деформации подвески в электрические сигналы, которые усиливаются и преобразуются в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), например типа ADS1231 [7]. С выхода АЦП цифровые сигналы поступают на схему обработки СКПА (рис. 1). Анализ существующих технических решений показал, что схему обработки СКПА целесообразно реализовать на базе специализированных мультипротокольных микроконтроллеров (МК) семейства STM32, среди которых можно выделить МК STM32WB55 [8, 9]. Этот МК интересен тем, что в своем составе имеет трансивер диапазона ISM 2,4 ГГц с поддержкой коммуникационных протоколов Bluetooth LE 5.0, ZigBee и Thread (стандарт IEEE 802.15.4).

Таким образом, с выхода АЦП ADS1231 сигналы поступают на микроконтроллер STM32WB55 для обработки и передачи результатов по радиоканалу (технологии BLE, ZigBee, Thread) на бортовой компьютер (On-board CPU), который в соответствии с программным обеспечением отображает информацию о техническом состоянии подвески в реальном масштабе времени. На рис. 4 приведен возможный вариант схемы построения системы контроля состояния подвески автомобиля.

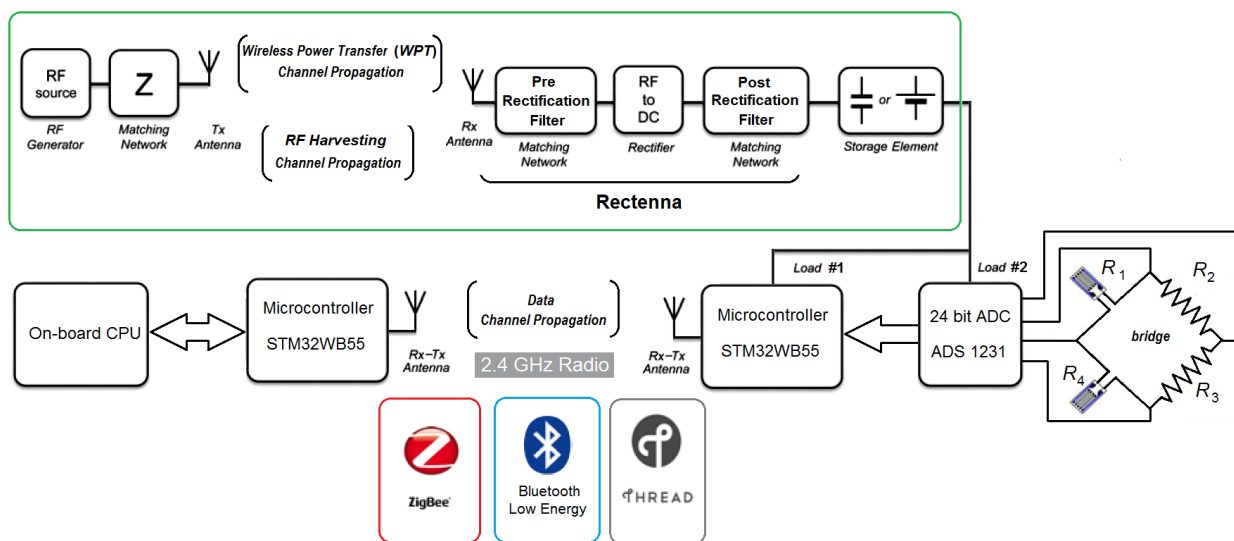


Рис. 4. Структурная схема системы контроля технического состояния подвески автомобиля

Отличительная особенность разрабатываемой СКПА состоит в том, что ее электронная схема и сенсоры (тензорезисторы) размещены на подвижной части подвески, которые затруднительно питать с помощью электрических проводов, тогда как основная часть системы обработки данных (бортовой компьютер) находится на неподвижной (кузовной) части автомобиля. Поэтому ставится задача создания беспроводной системы питания электронной схемы СКПА и передачи данных по радиоканалу в реальном масштабе времени на бортовой компьютер с помощью энергоэффективных коммуникационных технологий (см. табл. 1).

В верхней части рис. 4 даны два варианта питания электронной схемы СКПА, установленной на подвижной части подвески автомобиля. В первом варианте питание осуществляется за счет целенаправленной передачи радиочастотной энергии (WPT – Wireless Power Transmission) на ректенну, которая преобразует ее в постоянный ток. Во втором варианте питания предполагается извлечение радиочастотной энергии из окружающего пространства (RF EH – RF Energy Harvesting).

В работе рассмотрена возможность реализации первого варианта питания, хотя в перспективе можно говорить о создании гибридной системы питания (WPT и RF EH).

#### 4. Эскизный расчет потребляемой мощности узла СКПА, устанавливаемого на подвеске автомобиля

Расчет потребляемой мощности СКПА сводится к определению парциальных мощностей, необходимых для питания микроконтроллера  $P_{STM}$ , АЦП с тензодатчиками  $P_{ADS}$  и суммарной мощности потребления  $P_{\Sigma}$ .

МК STM32WB, управляемый ядром Cortex-M0+, характеризуется низким потреблением энергии (50 мкА/МГц), благодаря чему в режиме приема ток потребления составляет 3,8 мА, а в режиме передачи – 5,5 мА (при выходной мощности 0 дБм) [8,9]. Прецизионный 24-разрядный АЦП ADS1231 имеет суммарный ток потребления 1 мА при напряжении питания 3В [7]. Таким образом, суммарная потребляемая мощность электронными устройствами, установленными на подвижной подвеске

$$P_{\Sigma} = P_{STM} + P_{ADS} = 3V \cdot 5.5\text{mA} + 3V \cdot 1\text{mA} = 19.5\text{ mW}.$$

Для оценки требуемой мощности радиопередатчика необходимо знать КПД выпрямления ректенны. Проведем оценку энергетических характеристик двух вариантов микрополосковых ректенн, состоящих из одиночных излучателей, расположенных на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью равной 2,2 на частоте 2,45 ГГц. В первом варианте излучателем выступает диполь (рис. 5,а), а во втором – петлевой диполь (рис. 5,б). В конструкциях обоих вариантов ректенн применены однополупериодные схемы выпрямления на корпусных диодах Шоттки SMS7621 и предполагается, что в них используются идеальные фильтры. Результаты расчета параметров излучателей ректенн на частоте 2,45 ГГц приведены в табл. 3.

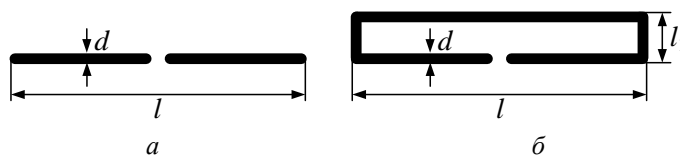


Рис. 5. Излучатели ректенн

Таблица 3

Параметры излучателей исследуемых ректенн

Тип излучателя	Геометрические размеры излучателя, мм	Входное сопротивление излучателя, Ом
Диполь	$l = 60, d = 5$	$Z_{ex} = 94$
Петлевой диполь	$l = 47, d = 5, l_1 = 12$	$Z_{ex} = 243.3$

Зависимость КПД выпрямления от входной мощности для обоих вариантов ректенн при работе их на оптимальную нагрузку [10] приведена на рис. 6 (пунктирная кривая построена для ректенны на основе диполя, сплошная – для ректенны на основе петлевого диполя).

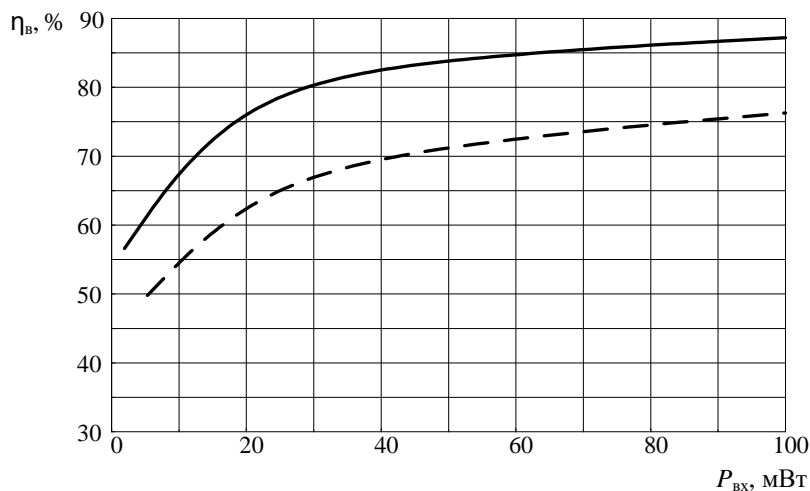


Рис. 6. Зависимость КПД выпрямления ректенны от входной мощности

Из анализа результатов (рис. 6) видно, что для первого варианта ректенны (на основе диполя) для обеспечения  $P_{\Sigma} = 19,5$  мВт нужно, чтобы мощность СВЧ передатчика составляла 30 мВт, а для второго варианта ректенны (на основе петлевого диполя) – 26 мВт.

Эскизные расчеты необходимых уровней мощностей показали, что для выбранной маломощной элементной базы электронной системы тензодатчиков и микроконтроллера STM32WB55 при создании бортовой системы контроля подвески автомобиля, которая питается системой БПЭ, принципиальных трудностей не возникает. На этапах практической реализации системы питания с помощью БПЭ необходимо уделить внимание поиску оптимальных конструкций ректенн с малыми габаритными размерами, массой и высоким КПД выпрямления, что позволит уменьшить мощность передатчика. Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что КПД выпрямления можно повысить за счет выбора типа излучающей структуры ректенны, а также за счет применения эффективных схем выпрямления [11, 12]. Следует отметить, что в зависимости от конструкции подвески может возникнуть ситуация, когда необходимо устанавливать ректенны на выпуклые поверхности, что приведет к необходимости анализа излучающих структур ректенн, реализованных на подложках, повторяющих форму деталей (объектов), на которых они установлены.

Эскизные расчеты показали теоретическую возможность реализации системы БПЭ для питания узлов СКПА, установленных на подвижной части подвески автомобиля. Однако для практической реализации таких систем и их серийного производства необходимы дополнительные исследования, связанные с тем, что днище автомобиля и его отдельные части участвуют в формировании излученного (принятого) антенной электромагнитного поля и поэтому влияют на характеристики ректенн подсистемы БПЭ и антенн подсистемы передачи данных. Знать закономерности этого влияния необходимо как при разработке антенн, так и при определении оптимальных мест их установки на днище автомобиля. Точное определение составляющих поля, расчет электрических характеристик антенн с учетом оказываемого на них влияния и оценка характеристик самой системы возможны только на основе строгого электродинамического подхода, который позволяет решать и задачи обеспечения электромагнитной совместимости системы БПЭ с другими радиоэлектронными средствами автомобиля.

Из сказанного видно, что реализация СКПА с характеристиками, близкими к предельно достижимым, зависит от многих факторов. Основными из них, определяющими в итоге эффективность всей системы, являются конструкция антенн ее передающей и приемной



подсистем системы БПЭ и характеристики канала распространения электромагнитной энергии. В связи с этим важно исследование этих факторов, влияющих на работу системы в целом.

### 5. Электродинамический подход анализа системы БПЭ

С точки зрения системы БПЭ, в составе которой имеются антенны с нелинейными характеристиками (ректенны), в общем случае при произвольном расположении передающей антенны и ректенны и наличии всевозможных рассеивателей, которые являются элементами конструкции подвески, наиболее приемлем электродинамический подход моделирования и определения реальной картины распределения электромагнитного поля в системе. Такой подход позволяет анализировать влияние элементов с нелинейными характеристиками в составе ректенны на выходные параметры и характеристики всей системы БПЭ, а также характеристики ректенны, расположенной в ближней, промежуточной или дальней зонах передающей антенны. При электромагнитном подходе к моделированию систем БПЭ возможно эквивалентное представление их функциональных блоков в виде многополюсников, которые описываются различными матрицами  $Z$ ,  $Y$  либо  $S$ .

Этот подход позволяет учитывать характеристики функциональных блоков системы БПЭ, согласовывать, исследовать взаимные связи между антеннами, учитывать электромагнитные свойства канала распространения электромагнитной энергии. Является привлекательным с вычислительной точки зрения, поскольку позволяет представить передающую и приемную подсистемы в виде эквивалентных схем, требующих небольшого числа циклов полного электродинамического моделирования, после чего полученные схемы различной степени сложности анализируются на схемотехническом уровне.

В [13] было показано, что систему БПЭ (рис. 4), состоящую из передающей (Т) и приемной (R) подсистем, взаимодействующих между собой через канал передачи электромагнитной энергии, можно свести к схеме рис. 7. Схема состоит из линейных (ЛПС) и нелинейных подсистем (НПС), внешних устройств (генераторы, нагрузки) (ВУ) и излучающей системы (ИС), состоящей из передающей антенны, приемной антенны и всевозможных рассеивателей элементов подвески. Для учета электродинамического воздействия системы БПЭ с системой передачи информации о состоянии подвески на бортовой компьютер и другими радиоэлектронными средствами автомобиля, в подсхеме, поставленной в соответствие излучающей системе, введена дополнительная группа входов, которая определяет внесистемное взаимодействие.

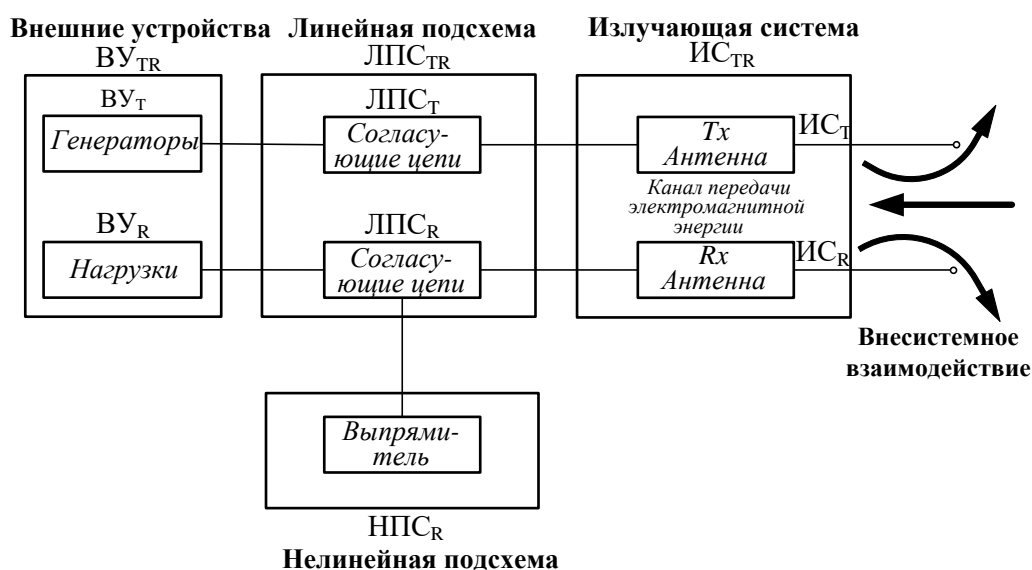


Рис. 7. Представление системы БПЭ в виде подсистем

Преобразуем схему рис. 7. Объединим линейные подсистемы передающей подсистемы ЛПС<sub>Т</sub> и приемной подсистемы ЛПС<sub>Р</sub> в линейную подсистему ЛПС<sub>TR</sub>; излучающую структуру ИС<sub>Т</sub> передающей подсистемы, систему рассеивателей и излучающую структуру ректенны ИС<sub>Р</sub> в подсистему ИС<sub>TR</sub> излучающей структуры БПЭ; а генераторы ВУ<sub>Т</sub> и нагрузки ВУ<sub>Р</sub> – в подсистему внешних устройств ВУ<sub>TR</sub> системы БПЭ. Поставим в соответствие каждой подсистеме системы БПЭ (нелинейной НПС<sub>Р</sub>, линейной ЛПС<sub>TR</sub>, излучающей структуре ИС<sub>TR</sub>, внешним устройствам ВУ<sub>TR</sub>) многополюсники (рис. 8), режимы входов которых описываются в терминах падающих и отраженных волн. Для учета электродинамического взаимодействия системы БПЭ с другими радиоэлектронными средствами автомобиля в многополюснике ИС<sub>TR</sub> выделена дополнительная группа входов – сечение  $\delta' - \delta'$  (рис. 8).

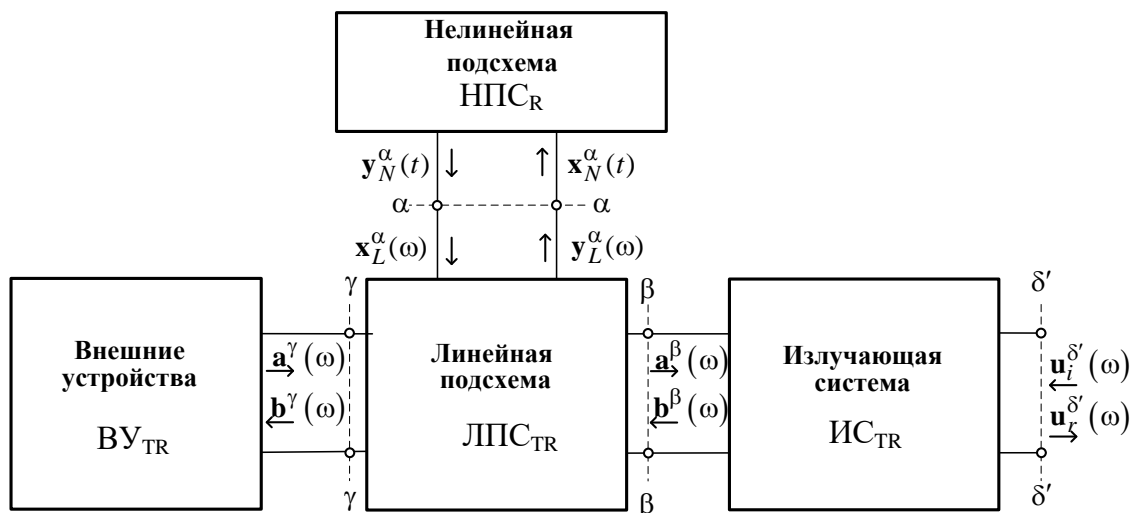


Рис. 8. Представление системы WPT в виде многополюсников

Многополюсник ВУ<sub>TR</sub> описывается блочной матрицей рассеяния  $\mathbf{S}_{SL}(\omega)$ , многополюсник, поставленный в соответствие линейной подсистеме ЛПС<sub>TR</sub> системы БПЭ, описывается блочной смешанной матрицей  $\mathbf{Q}_{TR}(\omega)$ , введенной в [14]; многополюсник, поставленный в соответствие излучающей структуре ИС<sub>TR</sub> системы БПЭ, описывается блочной матрицей рассеяния  $\mathbf{S}_R(\omega)$ , которые имеют следующий вид:

$$\mathbf{S}_{SL}(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_S(\omega) & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_L(\omega) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_{TR}(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{TR}^{\alpha\alpha}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\alpha\beta}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\alpha\gamma}(\omega) \\ \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\alpha}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\gamma}(\omega) \\ \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\alpha}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\beta}(\omega) & \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\gamma}(\omega) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_R(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{R_T}(\omega) & \mathbf{S}_{R_{T-R}}(\omega) \\ \mathbf{S}_{R_{R-T}}(\omega) & \mathbf{S}_{R_R}(\omega) \end{bmatrix}.$$

Нелинейная подсистема НПС<sub>Р</sub> описывается во временной области нелинейным матричным оператором  $\tilde{\mathbf{Q}}_N(t)$  [13].

Физический смысл блоков матрицы рассеяния  $S_R(\omega)$  и способ их определения детально изложены в [15, 17]. Выбор вектора переменных состояния системы БПЭ и формирование уравнений состояния описаны в [13]. Компоненты вектора выходных параметров группируются таким образом, что одна из групп выходных параметров характеризует процессы передачи электромагнитной энергии и ее преобразование в постоянный ток ректенной в самой системе БПЭ (внутрисистемные процессы [17]), а вторая – процессы электродинамического взаимодействия системы БПЭ с другими радиоэлектронными средствами автомобиля (внесистемное взаимодействие [15]).

В [14] полностью определены внешние параметры системы БПЭ, при этом были использованы компонентные уравнения для многополосников ВУ<sub>TR</sub>, ЛПС<sub>TR</sub> и ИС<sub>TR</sub>.

Один из следующих этапов исследований в рассматриваемом направлении – определение блоков матрицы рассеяния излучающей структуры системы БПЭ и дальнейшее определение ее внешних параметров, характеризующих сам процесс передачи энергии на ректенну и взаимодействие системы БПЭ с другими радиоэлектронными средствами автомобиля.

## Выводы

Проанализирована возможность технической реализации бортовой системы контроля состояния подвески автомобиля на базе технологий построения WSN и систем БПЭ микроволновым лучом. Особенностью СКПА заключается в том, что электронные схемы передачи информации с тензодатчиков предполагается размещать на самой подвеске, а для питания этих схем применять технологию целенаправленной передачи радиочастотной энергии на ректенну, которая преобразует ее в постоянный ток.

В такой постановке задачи разработана структурная схема СКПА и предложен вариант технической реализации ее функциональных блоков на базе энергоэффективных компонентов. Показано, что принципиальных трудностей для беспроводного энергоснабжения мало мощных электронных схем тензодатчиков не возникает, а энергоэффективность системы БПЭ можно повысить за счет разработки конструкций ректенн, обладающих высоким КПД выпрямления при низких уровнях мощности их возбуждения. С учетом особенностей функционирования СКПА предложен подход для их строгого электродинамического анализа, который позволяет учитывать влияние металлических конструкций подвески и днища автомобиля и взаимное влияние антенн подсистем передачи данных и энергии на характеристики СКПА.

## Список литературы:

1. Brinster I. Lohn J., Linden D. An Evolved Rectenna for Sensor Networks IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2013. P. 418–419.
2. Kazanc O., Maloberti F., Dehollain C. Simulation Oriented Rectenna Design Methodology for Remote Powering of Wireless Sensor Systems // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2012. P. 2877–2880.
3. Xiaoli Tang, Xianghong Wang, Robert Cattley, Fengshou Gu and Andrew D. Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring // A Review Sensors. 2018. Vol.2013. p.39.
4. Sika Shrestha, Sun-Kuk Noh and Dong-You Choi. Comparative Study of Antenna Designs for RF Energy Harvesting // Hindawi Publishing Corporation: International Journal of Antennas and Propagation. January 2013. p.10.
5. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций // Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
6. www.hbm.ru.
7. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1231.pdf>.
8. Зубарев С., Башмаков П. STM32WB55 – Новое решение STMicroelectronics для создания IoT-устройств // Вестник электроники. 2019. №1 (65). С. 34–39.
9. [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html)
10. Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецких Д.В. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом. Харьков : Коллегиум, 2006. 308 с.
11. Olgun U., Chi-Chih C., Volakis J.L. Investigation of Rectenna Array Configurations for Enhanced RF Power Harvesting // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol.10. P. 262–265.

12. Wang W., Wong H., Han Y. A high-efficiency full-wave CMOS rectifying charge pump for RF energy harvesting applications // *Microelectronics Journal*. 2015. Vol.46. P. 1447–4452.
13. Gretskih D.V., Luchaninov A.I., Vishniakova J.V., Katrich V.A., Nesterenko M.V. Electrodynamic model of a wireless power transmission system // *XXIIIrd International Seminar / Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*. 2018. P. 80–85.
14. Gretskih D., Luchaninov A., Gomozov A., Katrich V., Nesterenko M. External Parameters of Wireless Power Transmission Systems // *XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*. 2019. P. 117–121.
15. Luchaninov A.I., Gretskih D.V., Gomozov A.V., Katrich V.A., Nesterenko M.V. Electrodynamic approach to designing WPT systems with accounting for non-system interactions // *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 107–111.
16. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И. Антенны с нелинейными элементами // *Справочник по антенной технике*. Т.1. ; под. ред. Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина. Москва : ИПРЖР, 1997. С. 207–235.
17. Gretskih D., Luchaninov A., Katrich V., Nesterenko M. Electrodynamic approach to designing wireless power transfer systems (Internal system processes) // *Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. 2019.

*Харьковский национальный  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 09.04.2020*