

А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров

ПРОТОКОЛЫ ОБМЕНА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ¹

A. P. Adamov, A. A. Adamova, S. G. Sementsov, A. T. Temirov

COMMUNICATION PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS OF EVENT REGISTRATION

Аннотация. Актуальность работы обусловлена появлением большого числа новых специализированных протоколов обмена для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события. В отечественной литературе практически не рассматривается именно этот класс беспроводных сетей. Целью работы является проведение расширенного анализа протоколов для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события. Рассматривается базовый протокол передачи данных для такого класса сетей – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol. Демонстрируются его преимущества и недостатки с точки зрения энергопотребления и достоверности принимаемых данных. Показано, что протокол не всегда обеспечивает выбор в качестве вершины кластера узла, имеющего достаточный для передачи данных запас энергии источника питания. Кратко анализируются функциональные возможности каждого протокола, особо выделяются возможности регистрации места возникновения события, регистрации нескольких событий, происходящих одновременно и т.д. Рассматриваются базовые принципы организации каждого протокола. Особое внимание уделяется энергопотреблению сети при использовании того или иного протокола и методам обеспечения достоверности данных, принимаемых блоком управления. Рассмотрены механизмы явного и неявного подтверждения приема данных блоком управления и соседними узлами сети. Для протоколов реального времени проведена оценка вносимой задержки между регистрацией события сенсором и приемом информации о нем блоком управления. Проанализированы методы предотвращения перегрузки в сети при наличии большого числа активных сенсоров. По результатам проведенного сравнительного анализа создана сводная таблица, демонстрирующая особенности каждого протокола и его функциональные возможности.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протоколы обмена, регистрация событий, динамическая кластеризация, энергопотребление, достоверность передаваемых данных, вершина кластера, сенсорный узел.

Abstract. The relevance of the work is due to the emergence of a large number of new specialized exchange protocols for wireless sensor networks focused on event registration. In the domestic literature, this class of wireless networks is practically not considered. The goal of the work is to conduct an extended protocol analysis for wireless sensor networks oriented to event registration. We consider the basic data transfer protocol for this class of networks – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol. Its advantages and disadvantages in terms of power consumption and reliability of received data are demonstrated. It is shown that the protocol does not always provide the choice of a node as the top of a cluster, which has an energy supply source sufficient for data transmission. The functional capabilities of each protocol are briefly analyzed, the possibilities of registering the place of occurrence of an event, recording several events occurring simultaneously, etc. are highlighted. The basic principles of the organization of each protocol are considered. Particular attention is paid to the power consumption of the network when using a particular protocol and methods to ensure the reliability of data received by the control unit. The mechanisms of explicit and implicit acknowledgment of data reception by the control unit and neighboring network nodes are considered. For real-time protocols, the estimated delay between the registration of an event by the sensor and the receipt of information about it by the control unit was evaluated. Analyzed methods of preventing overload in the network in the presence of a large number of active sensors. According to the results of the comparative analysis, a summary table was created, demonstrating the features of each protocol and its functionality.

Key words: wireless sensor networks, communication protocols, event registration, dynamic clustering, power consumption, data reliability, cluster head, sensor node.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ №17-07-00689.

Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) все шире проникают во все области науки и техники. Они используются для решения широкого круга задач, позволяя автоматизировать процесс сбора и первичной обработки различной информации и регистрации событий. Сенсорные сети в общем случае включают в себя набор чувствительных элементов (сенсоров) со встроенным радиомодулем, а также блок управления, осуществляющий сбор информации. Сенсоры могут передавать информацию как друг другу, так и непосредственно блоку управления в зависимости от используемого протокола обмена данными. Оптимизация информационного обмена между сенсорами и блоком управления может происходить исходя из одного или нескольких критериев, таких как максимальная надежность регистрируемых данных, минимальное энергопотребление, минимальные задержки в сети и т.д. Различные стратегии оптимизации подразумевают как различную архитектуру сети, так и различные методы маршрутизации данных. В данной статье мы ограничимся рассмотрением методов маршрутизации и протоколов обмена для БСС, ориентированных на регистрацию некоего события.

Долгое время базовым протоколом для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события, являлся протокол Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol. Он обеспечивал динамическую генерацию сенсорного кластера, обеспечивающего сбор и передачу данных блоку управления с наименьшими затратами энергии. Синтезировалось динамически изменяющееся дерево транзакций между сенсором источником и блоком управления.

В то же время данный протокол имел ряд существенных недостатков, например, все узлы имели одинаковую вероятность стать вершиной кластера без учета их запаса энергии, что могло привести к потерям данных. В настоящее время разработан целый ряд более современных протоколов, обеспечивающих либо большую функциональность (определение места возникновения события, регистрация множества событий, происходящих одновременно), либо снижение энергопотребления при заданном уровне достоверности принимаемых данных.

Такой подход позволяет выбрать тот или иной протокол исходя из решаемой сенсорной сетью задачи и оптимизировать ряд наиболее важных в данном конкретном случае параметров сети.

Анализ функционирования распределенных сенсорных сетей

Сенсорные сети, ориентированные на регистрацию события, большую часть времени находятся в состоянии ожидания, в котором их энергопотребление минимально. В состоянии ожидания сенсоры не принимают и не передают данные. В активный режим сенсоры переходят только после регистрации события, когда воздействие на чувствительный элемент превышает некоторое пороговое значение [1, 2].

Поскольку запас энергии каждого сенсора ограничен, то важнейшей задачей при реализации таких БСС является минимизация энергии, затрачиваемой на сбор и передачу информации блоку управления. Одним из путей снижения энергопотребления является использование различных протоколов динамической кластеризации после регистрации события [3]. Динамическая кластеризация позволяет не только снизить энергопотребление за счет построения оптимального дерева транзакций для каждого источника данных, но и адаптивно подстраивать достоверность передаваемых данных с помощью служебных сигналов обратной связи [4].

Формирование кластера активизируется неким событием и кластеры создаются в режиме реального времени для правильной реакции на событие. Каждый кластер включает в себя только те сенсоры, которые в данный момент времени передают данные конкретному блоку управления. В результате формируется архитектура, показанная на рис. 1.

С точки зрения энергоэффективности в БСС наибольший практический интерес представляют модификации базового протокола передачи данных – *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), который представляет собой TDMA-протокол с динамической кластеризацией [5–8]. Задача протокола – минимизация энергии, необходимой для создания и обслуживания кластеров сенсоров. LEACH является иерархическим протоколом, в котором сенсоры передают данные вершине кластера, где происходит накопление и компрессия данных и далее их передача блоку управления. LEACH-протокол предполагает, что каждый сенсор имеет запас энергии достаточный для передачи данных непосредственно блоку управления или ближайшей вершине кластера.

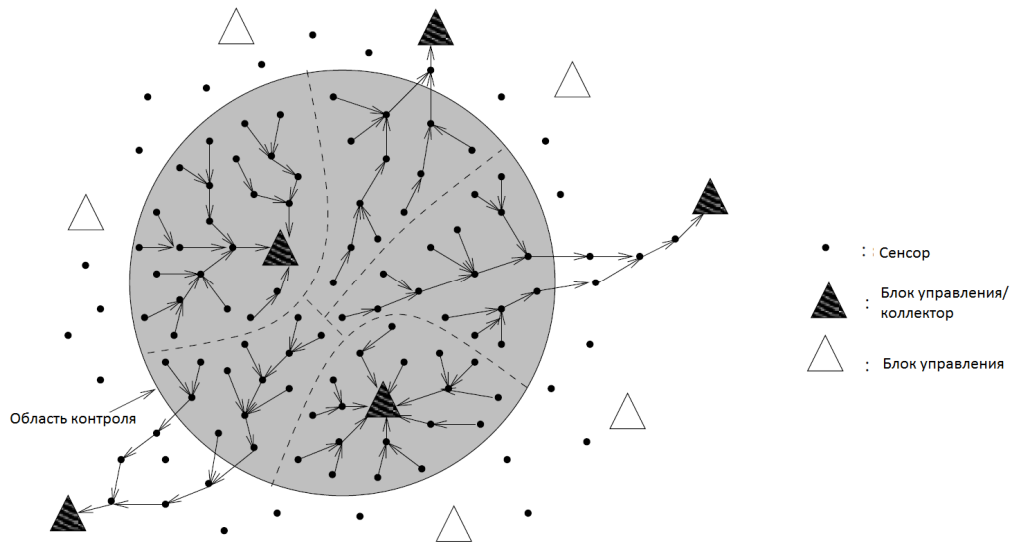


Рис. 1. Процесс кластеризации при наличии нескольких блоков управления

Поскольку алгоритм LEACH не оперирует информацией о текущем энергетическом состоянии сенсорного узла, то он не дает гарантий по выбору «хорошего» сенсорного узла в качестве головного узла кластера, и в этом качестве может быть выбран давно не избираемый член кластера с неудовлетворительными энергетическими характеристиками.

Анализ протоколов обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий

Рассмотрим более современные протоколы, созданные на основе LEACH.

Event-to-Sink Reliable Transport (ESRT) Protocol – решение о наличии события принимается на основании информации о количестве сенсоров, находящихся в зоне события, а не информации от одного сенсора [9, 10]. Достоверность обнаружения события подстраивается за счет изменения частоты передачи пакетов. Если достоверность снижается ниже требуемой, протокол повышает частоту отчетов, если достоверность выше, чем требуется, протокол снижает частоту отчетов. К преимуществам протокола можно отнести то, что приемник данных собирает информацию только о числе узлов в области события и обеспечивает различный уровень достоверности обнаружения исходя из информации о состоянии сети. Основной недостаток – метод централизованного управления не является энергоэффективным. В случае если в зоне действия датчика происходит несколько событий одновременно, то настройка частоты пакетов для всех узлов датчика, не приведет к повышению производительности, поскольку события могут быть независимы друг от друга.

Loss Tolerant Reliable Event Sensing (LTRES) Protocol – контроль за перегрузкой выполняется на основе механизма адаптации скорости передачи данных конечного узла [11]. Блок управления вычисляет уровень достоверности обнаружения события и передает это значение передающим узлам. Основываясь на этой информации, передающие узлы обновляют скорость передачи данных, таким образом контролируя перегрузку. Преимущества протокола – управление сетевым трафиком, быстрое и надежное распознавание событий. Основной недостаток – снижение энергоэффективности из-за использования механизма адаптации скорости передачи данных в источнике.

Reliable Robust and Real-Time (RRRT) Protocol – в протоколе используются две концепции: привязка к задержке «событие-действие», определяемой приложением, и комбинированный механизм управления перегрузкой, позволяющий достичь требуемой достоверности обнаружения и снизить расход энергии [12, 13]. Преимущества протокола – надежное обнаружение событий, энергоэффективность. Основной недостаток – использование механизмов обнаружения и контроля перегрузки приводит к дополнительным расходам энергии.

Simultaneous Multiple Event-to-Sink Reliable Transport (SMESRT) Protocol – протокол предназначен для получения достоверной информации об одновременном обнаружении нескольких событий [14]. Он позволяет управлять сетевой нагрузкой с целью уменьшения трафика в приемнике и экономии энергии. Сенсорные узлы, которые обнаружили событие, образуют кластер и генериру-

ют идентификатор события. Идентификатор события распространяется с использованием внутрисетевого протокола передачи данных либо на основе метода идентификации события на основе кластера. Для балансировки энергии сенсоров вершина кластера перемещается между всеми узлами кластера. Узлы, обнаружив событие, отправляют пакеты с информацией о событии в вершину кластера на заданной частоте для определенного периода или длительности. Затем вершина кластера информирует блок управления о состоянии сети. Преимущества протокола – управление нагрузкой на вершины кластера, обеспечивающее меньший трафик, протокол может назначать различную частоту передачи для разных событий. Недостаток – назначение различных частот передачи приводит к дополнительным потерям энергии.

Congestion and Delay Aware Routing (CODAR) Protocol – протокол делит сенсорные узлы на две категории: критические и обычные [15]. Критические узлы – это узлы ближайшие к месту возникновения события. Если же вблизи узла ничего не происходит, критические узлы становятся обычными. Основная задача протокола заключается в повышении достоверности и своевременности передачи данных критическими узлами и предотвращении переполнения. Протокол использует два механизма: предотвращение переполнения и управление задержкой доставки от источника к приемнику.

Преимущества протокола – обеспечивает доставку критически важных данных с заданными задержками, имеет механизм снижения перегрузки за счет обхода перегруженных узлов во время выбора маршрута. Основные недостатки – не эффективен при большом количестве критических узлов, низкая энергоэффективность.

Delay Sensitive Transport (DST) Protocol – основная задача протокола – своевременно и надежно передавать информацию о событии в приемник данных с минимальными потерями энергии и без перегрузок [16]. Протокол использует два основных механизма: обнаружения перегрузки и транспортировки событий. Механизм обнаружения перегрузки для протокола реализуется следующим образом. Любой узел датчика, буфер которого переполняется из-за перегрузки, информирует приемник о состоянии перегрузки с помощью бита уведомления о переполнении в заголовке пакета с информацией о событии. Механизм транспортировки событий в реальном времени выполняет детектирование событий в реальном времени с привязкой к задержке между событием и его обнаружением. Основной компонент задержки между событием и его обнаружением – задержка при передаче и обработке события.

Преимущества – обнаружение и контроль перегрузок. Недостаток – механизм корректировки частоты передачи данных требует дополнительного расхода энергии.

Optimized Energy-Delay Sub-Network Routing (OEDSR) Protocol – протокол предполагает, что узлы находятся либо в режиме ожидания, либо в состоянии сна, но как только происходит событие узлы, которые находятся рядом с областью возникновения события, становятся активными и формируют подсеть [16]. Эта подсеть внутри неактивной сети экономит энергию, поскольку только некоторые узлы в сети активны в ответ на событие. Активные узлы образуют кластер и выбирают вершину. Преимущества протокола – формирование кластеров приводит к снижению потерь энергии, формирование подсети экономит энергию, так как активна только часть сети. Недостатком является то, что большое число пакетов, передаваемых между сенсорными узлами и блоком управления может привести к появлению задержек.

Real-Time and Reliable Transport (RT) 2 Protocol – основная задача протокола – обеспечить достоверную передачу параметров события от датчика в приемник данных или базовую станцию с минимальными потерями энергии и получить своевременную реакцию на информацию от сенсора [16]. Протокол одновременно обеспечивает обмен в режиме реального времени и выполнение требований, предъявляемых к достоверности данных. В этом протоколе используются два вида узлов: сенсорные узлы (sensor nodes) и активные узлы (actor nodes). Сенсорные узлы обнаруживают событие и передают полученную информацию в активные узлы. Активные узлы взаимодействуют друг с другом, чтобы принять решение, а затем отправляют пакет с информацией о событии в блок управления через другие активные узлы.

Преимущества – адаптация к динамической структуре сети. Основной недостаток – настройка конфигурации приводит к появлению дополнительных задержек.

Event Reliability Protocol (ERP) – протокол выполняет надежную передачу пакетов, содержащих информацию о событии, и минимизирует количество избыточных пакетов [16]. После того

как сенсорный узел обнаружил событие, он отправляет пакет с информацией о нем на узел следующего скачка, этот узел сохраняет пакет в свой буфер, а затем передает на следующий скачок. Когда передавший информацию узел «слышит», что узел следующего скачка передает отправленный им пакет, то он воспринимает это как неявное подтверждение о успешной отправке. Затем узел удаляет пакет из очереди и обрабатывается следующий пакет. Преимущества – достоверная передача информации о событии, протокол минимизирует избыточную передачу пакетов данных. Недостаток – менее энергоэффективен по сравнению с другими протоколами.

COLLaborative Event deteCtion and Tracking (COLLECT) protocol – протокол включает в себя три процедуры [12, 17]:

- процедура разбиения – сенсорные узлы в области возникновения события объединяются в логические треугольники;
- процедура определения события – сенсорный узел определяет место возникновения события принимая сообщения от датчиков, в границах логических треугольников;
- процедура определения границ – выполняется выбор граничных датчиков для определения границы области возникновения события.

Преимущества – полностью распределенная структура протокола, сенсор мгновенно обнаруживает и отслеживает событие. Недостаток – не экономичен.

Reliable Energy Aware Routing (REAR) Protocol – в протоколе каждый сенсорный узел подтверждает успешную передачу данных другим узлам при помощи взаимодействия DATA-ACK [17]. Блок управления отправляет ACK пакет сенсорным узлам, который указывает, что пакет с информацией о событии успешно принят. Если сенсорный узел принимает пакет в течение таймаута, то он начинает передачу нового пакета. Преимущество – обеспечивает эффективную маршрутизацию. Недостаток – дополнительные энергозатраты из-за использования очередей и оценок.

Efficient Event Detection Protocol (EEDP) – задача протокола – своевременная передача пакета с информацией о событии от сенсорного узла в блок управления или приемник данных с наименьшим трафиком [17]. В основе протокола лежат две процедуры: процедура первичного обнаружения и процедура аварийной маршрутизации. Процедура первичного обнаружения – это процедура точного определения на основе правил принятия решения произошло событие или нет. Процедура аварийной маршрутизации – это процедура передачи пакета в приемник с использованием «жадного» алгоритма, для обеспечения достоверности при этом используется простая динамическая схема с несколькими копиями данных.

Преимущества – точное обнаружение событий, на приемник или базовую станцию не пересылается значительный объем данных. Недостаток – низкая надежность, поскольку только один узел принимает решения и отправляет информацию о событии в приемник.

Stop-and Wait-Implicit Acknowledgement (SWIA) Protocol – протокол ограничивает передачу сенсорным узлом следующего пакета, до тех пор, пока он получит ACK пакет для предыдущего отправленного пакета [18]. В протоколе применяется механизм неявного подтверждения, использующий широковещательный характер БСС. Узел датчика после передачи пакета прослушивает канал и тем самым уменьшает сетевой трафик. Преимущества – нет дополнительного заголовочного пакета, сокращение трафика, пакеты событий, которые не востребованы, не передаются. Недостаток – использование механизма неявного подтверждения приводит к задержкам в сети.

Energy Efficient-Low Latency Express Routing Protocol (EELLER) – протокол относится к категории иерархических протоколов маршрутизации [18]. Он использует метод кластеризации для минимизации количества скачков, необходимых для передачи данных, а также достижения высокой энергоэффективности. Когда событие обнаружено, данные о нем передаются скачок за скачком через вершины кластеров. В иерархической маршрутизации узлы с большим запасом энергии используются для отправки информации, а узлы с низким запасом используются только для детектирования события. Преимущества – энергоэффективность, накопление данных приводит к большей точности обнаружения событий. Недостаток – менее надежный.

Information Quality Aware Routing (IQAR) Protocol – в отличие от других схем протокол учитывает информацию о событии во время агрегации и пересылки данных [18]. Протокол использует подход, основанный на построении деревьев транзакций. Достоверность данных зависит от точности информации о событии. В этом протоколе каждый сенсорный узел независимо обнаруживает и собирает данные о событии и для каждой выборки принимает бинарное решение, которое ис-

пользуется для проверки того, произошло ли это событие или нет. Если произошло событие, результатом бинарного решения для выборки будет 1, иначе это будет 0.

Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol (TEEN) – протокол TEEN – иерархический протокол, который группирует сенсорные узлы в кластеры с выбором вершины кластера [18]. При этом используется несколько иерархических уровней кластеров со своими вершинами. На каждом уровне вершина агрегирует данные и передает вершине более высокого уровня. TEEN оптимизирован для отслеживания быстроизменяющихся величин. Вершина кластера передает пороговые значения *hard* («жесткий») и *soft* («мягкий») другим узлам. «Жесткий» порог – это минимальное значение, при котором сенсорный узел, включит свой передатчик. Когда сенсорный узел измеряет величину, которая находится на уровне «жесткого» порогового значения или превышает его, он начинает передачу данных только тогда, когда значение этой величины изменяется, а изменение равно или больше, чем «мягкий» порог. Эта стратегия направлена на уменьшение затрат энергии на передачу сообщений.

Основным недостатком является то, что если контролируемое значение не достигнет порогового уровня, то, пользователь не получит никакой информации. Таким образом, данный алгоритм не применим для приложений, где передача информации должна быть регулярна.

Adaptive Periodic Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol (APTEEN) – протокол APTEEN является развитием протокола TEEN [18]. Его архитектура аналогична архитектуре TEEN, но при этом сенсорные узлы и периодически передают данные и реагируют на любое внезапное изменение значения измеряемого параметра. Агрегация данных выполняется вершиной кластера. APTEEN использует три типа запросов: исторический для анализа предыдущих значений; единовременный для получения моментального снимка сети и постоянный для контроля событий в течение определенного периода времени.

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) protocol – в основе протокола лежит использование дескрипторов высокого уровня – «метаданных» для описания передаваемых данных [18]. Узлы обмениваются между собой «метаданными» через механизм «переговоров». Каждый узел, когда получает новые данные, сообщает об этом своим соседям, и если кто-то из соседей заинтересован в получении этих данных, то он, может их получить, отправив сообщение с соответствующим запросом. Но информацию о данных получают все узлы сети, даже если они ее не запрашивали.

Недостатком протокола является то, что он не гарантирует доставку данных, поэтому не подходит для приложений, которые требуют надежной периодической доставки пакетов данных.

По результатам проведенного анализа была составлена сводная таблица базовых характеристик рассмотренных протоколов (табл. 1).

Таблица 1

Базовые характеристики протоколов

Протокол	Sink-centric	Node-centric	Надежный	Контроль перегрузки	Энерго-эффективность	Устойчивость к потерям данных	Восстановление потерь
1	2	3	4	5	6	7	8
ESRT	да	нет	V				Весь маршрут
LTRES	да	нет		V		ACK/NACK	Весь маршрут
RRRT	да	нет	V			SACK	Весь маршрут
SMESRT	да	нет	V			ACK/NACK	Весь маршрут
CODAC	да	нет	V	V			Весь маршрут
DST	да	нет		V			Весь маршрут
OEDSR	да	нет			V	ACK/NACK	Весь маршрут
(RT)2	да	нет			V	SACK	Весь маршрут
ERP	нет	да	V			iACK	На каждом скачке
COLLECT	нет	да	V				На каждом скачке
REAR	нет	да	V			ACK	
EEDP	нет	да		V			На каждом скачке

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
SWIA	да	нет		V			На каждом скачке
EELLER	нет	да			V		На каждом скачке
IQAR	нет	да			V		На каждом скачке
TEEN and APTEEN	да	нет			V		Весь маршрут
LTRES	да	нет		V		ACK/NACK	Весь маршрут
SPIN	нет	да			V		На каждом скачке

Заключение

Представленный обзор протоколов не претендует на полноту. Он лишь демонстрирует возможности того или иного протокола при построении беспроводных сенсорных сетей, активируемых событием. Выбор того или иного протокола является многокритериальной задачей, которая решается исходя из энергетических возможностей сенсоров, требуемого времени доставки и достоверности принимаемых данных. Современные протоколы обмена, которые являются развитием базового протокола LEACH, позволяют оптимизировать один или несколько параметров передачи данных, являющихся критическими для данного конкретного приложения.

Библиографический список

1. Адамов, А. П. Способ надежного питания элементов сенсорной сети от беспроводного интерфейса / А. П. Адамов, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 79–83.
2. Адамов, А. П. Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 2. – С. 248–251.
3. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.
4. Власов, А. И. Визуальные модели синтеза эффективных энергосистем / А. И. Власов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – 2018. – С. 90–92.
5. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с.
6. Ahuja, R. K. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications / R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, J. B. Orlin. – New Jersey : Prentice Hall, 1993.
7. Akyildiz, F. Wireless sensor and actor networks: research challenges / F. Akyildiz, I. H. Kasimoglu // Ad Hoc Networks. – 2004. – № 2 (4). – P. 351–367.
8. Conti, M. Cross-layering in mobile ad hoc network design / M. Conti, S. Giordano, G. Maselli, G. Turi // IEEE Computer. – 2004. – № 37 (2). – P. 48–51.
9. Dressler, F. Self-Organization in Sensor and Actor Networks / F. Dressler. – New York : John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
10. Akyildiz, I. F. Wireless Sensor Networks / I. F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran. – New York : John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
11. Aspnes, J. A theory of network localization / J. Aspnes, W. Whiteley, Y. R. Yang // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2006. – № 5 (12). – P. 1663–1678.
12. Taruna, S. Event Driven Routing Protocols For Wireless Sensor Network / S. Taruna, Megha R. Tiwari, S. Shringi // International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA). – 2013. – Vol. 3, № 2.
13. Manjeshwar, A. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks / A. Manjeshwar, D. P. Agrawal // International Parallel & Distributed Processing Symposium. – 2001. – P. 1–7.
14. Vehbi, C. G. A Real-Time and Reliable Transport (RT)² Protocol for WSN and Actor Networks / C. G. Vehbi, B. A. Ozgur, Ian F. Akyildiz // IEEE/ACM Transactions On Networking. – 2008. – Vol. 16, № 2. – P. 359–370.
15. Javier, L. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks / L. Javier, G. Villalba, A. L. Sandoval Orozco // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 8399–8421.

References

1. Adamov A. P., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 79–83.
2. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nano-elektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems (MES)]. 2016, no. 2, pp. 248–251.
3. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199.
4. Vlasov A. I. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: materials V international. scientific.- techn. Conf. students, young scientists and specialists]. 2018, pp. 90–92.
5. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsivinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensornykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Study of methods of synthesis of distributed sensor systems by the criterion of minimizing the network load]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017, 75 p.
6. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
7. Akyildiz F., Kasimoglu I. H. *Ad Hoc Networks*. 2004, no. 2 (4), pp. 351–367.
8. Conti M., Giordano S., Maselli G., Turi G. *IEEE Computer*. 2004, no. 37 (2), pp. 48–51.
9. Dressler F. *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
10. Akyildiz I. F., Mehmet Can Vuran *Wireless Sensor Networks*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
11. Aspnes J., Whiteley W., Yang Y. R. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2006, no. 5 (12), pp. 1663–1678.
12. Taruna S., Tiwari Megha R., Shringi S. *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. 2013, vol. 3, no. 2.
13. Manjeshwar A., Agrawal D. P. *International Parallel & Distributed Processing Symposium*. 2001, pp. 1–7.
14. Vehbi C. G., Ozgur B. A., Akyildiz Ian F. *IEEE/ACM Transactions On Networking*. 2008, vol. 16, no. 2, pp. 359–370.
15. Javier L., Villalba G., Sandoval Orozco A. L. *Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*. 2009.

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РД,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
honored worker of science RD,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

Adamova Arina Alexandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Темиров Алибулат Темирбекович

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета радиоэлектроники,
телекоммуникаций и мультимедийных технологий,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: ali.temirov@rambler.ru

Temirov Alibulat Temirbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of the faculty of radio electronics,
telecommunications and multimedia technologies,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

УДК 621.316

Адамов, А. П.

Протоколы обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий / А. П. Адамов,
А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. –
№ 3 (23). – С. 124–132. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-15.