

ENERGY SUPPLY OF SENSORS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS AND THEIR APPLICATIONS

O. Y. Zybareva

Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Russia

A sensor network, a network of integrated embedded devices (sensor nodes) with capabilities of sensing, computation and communication, is used to sense and collect data. A typical and widely deployed category of applications is one that uses sensor nodes with battery power. A major limitation of untethered nodes is finite battery capacity — nodes will work for a finite period, as long as the battery lasts. Finite node lifetime implies finite lifetime of the applications or additional cost and complexity to regularly change batteries. Nodes could use large batteries for longer lifetimes, but will have to deal with increased size, weight and cost.

Some solution techniques have been proposed to maximize the lifetime of battery-powered sensor nodes. These techniques include accumulator battery, routing, energy-aware MAC protocols and redundant location of nodes. The above techniques help extend the life of the application or/and the time interval between battery replacements but do not exclude the obstacles associated with energy.

An alternative technique that applied to solve the problem of finite node lifetime is the use of energy harvesting. Energy harvesting is the use energy from the environment or other energy sources and converting it to electrical energy. The collected electrical energy supplies the sensor nodes. Energy from external sources can increase lifetime and capability of the sensor nodes. Since a node is limited to energy only until the next harvesting opportunity (recharge cycle), it can optimize energy consumption to maximize productivity during this time interval.

There are realizations of energy harvesting nodes using energy sources like human power, wind, and radio frequency energy. The most common and popular technique of energy harvesting is converting solar energy to electrical energy. Although there are many sources of energy harvesting, solar energy is the cheapest, most affordable and convenient source for energy collection. Solar energy is predictable, but it is unregulated energy source — the intensity of the sunlight cannot be controlled. Other methods of energy harvesting convert wind energy or mechanical energy to electrical energy. Since the amount of energy used for conversion can vary, such methods can be considered as controlled sources of energy. No energy source is ideal for all applications. The choice depends on the requirements and limitations of each application.

This paper surveys applications that use the capabilities of sensor networks to receive energy from the environment, its architecture, energy sources and storage technologies. Energy harvesting system consists of three components, the Energy source (performs the function of energy generator), the Harvesting architecture (mechanisms for using and converting external energy into electrical energy) and the Load (consumption of collected energy).

The application of energy harvesting tools can help to receive the tradeoff between the quality of service and lifetime of sensors. For this purposes it needs to solve the following problem. It is required to estimate the periodicity and magnitude of the source of energy harvest and determine the strategy for tuning. At the same time it is required to prevent unreasonable fast depletion of sensor batteries until the next recharge cycle. The corresponding mathematical tools have to be made.

In this paper the mathematical models and methods for node throughput estimation in energy harvesting wireless sensor networks have been discussed. The sensor behavior is modeled by Markov

processes with discrete states and continuous time. There are different types of models. The probabilities of sensor states can be used for network performance optimizing.

It can be concluded that the solar energy is the preferable source of energy for wireless sensor networks. This type of energy is easily available and utilized. The survey of some solutions for energy harvesting sensor nodes architectures is provided. Generally, there are two following architectures. Energy is harvested just-in-time for use and energy is harvested, if it is possible, and stored in some energy buffer for application requirements in future. The alternative energy sources (wind, radio frequency energy harvesting, piezo-electric etc.) are also considered.

Key words: wireless sensor network, energy harvesting, the lifetime of the sensor network node, the probability of the sensor availability, solar energy.

References

1. WERNER-ALLEN G., LORINCZ K., RUIZ M., MARCILLO O., JOHNSON J., LEES J., AND WELSH M. Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano // *IEEE Internet Comput.*, March-April 2006, vol. 10, N 2, P. 18–25.
2. SHAHOV V. V., STREL'NIKOV V. E., NGUEN V. D. K voprosu ob ehffektivnosti besprovodnyh sensornyh setej // *Problemy informatiki*, 2014, N 2, S. 28–38.
3. CHEBROLU K., RAMAN B., MISHRA N., VALIVETI P. K., AND KUMAR R. Brimon: A Sensor Network System for Railway Bridge Monitoring // *Proc. 6th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*. ACM, 2008, P. 2–14.
4. KARPIRISKI M., SENART A., AND CAHILL V. Sensor Networks for Smart Roads // *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, Mar. 2006, P. 310–314.
5. SUJESHA SUDEVALAYAM AND PURUSHOTTAM KULKARNI. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Third Quarter 2011, vol. 13, N 3.
6. SHAHOV V. V., MIGOV D. A., SOKOLOVA O. D. Besprovodnye sensornye seti, osnashchennye sredstvami polucheniya ehnergii iz okruzhayushchej sredy // *Problemy informatiki*, 2014, N 4, S. 69–79.
7. VLADIMIR V. SHAKHOV, DENIS MIGOV, AND ALEX RODIONOV. Operation strategy for energy harvesting wireless sensor networks. *Proc. of the 9th International Conf. on Ubiquitous Information Management and Communication*, ACM New York, USA, 2015.
8. JIANG X., POLASTRE J., AND CULLER D. Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks // *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, April 2005, P. 463–468.
9. TANEJA J., JEONG J., AND CULLER D. Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks // *Proc. 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2008, P. 407–418.
10. RAGHUNATHAN V., KANSAL A., HSU J., FRIEDMAN J., AND SRIVASTAVA M. Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems // *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, April 2005, P. 457–462.
11. PARK C. AND CHOU P. AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes // *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Sept. 2006, vol. 1, P. 168–177.
12. KANSAL A., HSU J., ZAHEDI S., AND SRIVASTAVA M. B. Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks // *Trans. Embedded Computing Systems*, 2007. Vol. 6, N 4, P. 32.
13. PARADISO J. A. AND FELDMEIER M. A Compact, Wireless, Self-Powered Pushbutton Controller // *Proc. 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*. Springer-Verlag, 2001, P. 299–304.

14. SHENCK N. AND PARADISO J. Energy Scavenging with Shoe-mounted Piezoelectrics // IEEE Micro, May/June 2001. Vol. 21, N 3, P. 30–42.
15. KYMISSIS J., KENDALL C., PARADISO J., AND GERSHENFELD N. Parasitic Power Harvesting in Shoes // Second International Symposium on Wearable Computers. Oct 1998, P. 132–139.
16. STARNER T. Human-powered Wearable Computing // IBM Systems Journal., 1996. Vol. 35, N 3–4, P. 618–629.
17. WEIMER M., PAING T., AND ZANE R. Remote Area Wind Energy Harvesting for Low-power Autonomous Sensors // 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2006, P. 1–5.
18. VENTCEL' E. S. Teoriya sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya vuzov / E. S. Ventcel', L. A. Ovcharov. — 2-e izd., ster. M.: Vyssh. shk., 2000.
19. TAN L., TANG S. Energy Harvesting Wireless Sensor Node With Temporal Death: Novel Models and Analyses // IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016.
20. KHOUZANI M. H. R. AND SASWATI SARKAR. Maximum Damage Battery Depletion Attack in Mobile Sensor Networks // IEEE Transaction on Automatic Control, October 2011. Vol. 56, N 10, P. 1–12.
21. TIANHUI MENG, XIAOFAN LI, SHA ZHANG AND YUBIN ZHAO. A Hybrid Secure Scheme for Wireless Sensor Networks against Timing Attacks Using Continuous-Time Markov Chain and Queuing Model // Sensors 2016, 28 September 2016. 16, 1606.
22. VLADIMIR V. SHAKHOV. On Efficiency Improvement of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // Proc. of 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2016), IEEE, Vienna, Austria, June 2016, P. 56–59.
23. SHAHOV V. V., YURGENSON A. N., SOKOLOVA O. D. EHffektivnyj metod generacii sluchajnyh geometricheskikh grafov dlya modelirovaniya besprovodnyh setej // Prikladnaya diskretna matematika, 2016. N 4 (34). C. 99–109.
24. SIMJEE F. AND CHOU P. H. Everlast: Long-life, Supercapacitor-operated Wireless Sensor Node // Proc. 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design. ACM, 2006, P. 197–202.
25. STANLEY-MARBELL P. AND MARCULESCU D. An $0.9 \times 1.2''$, Low Power, Energy-harvesting System with Custom Multi-channel Communication Interface // Proc. Conference on Design, automation and test in Europe. EDA Consortium, 2007, P. 15–20.
26. POLASTRE J., SZEWCZYK R., AND CULLER D. Telos: Enabling Ultra-low Power Wireless Research // Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 2005, P. 364–369.
27. CORKE P., VALENCIA P., SIKKA P., WARK T., AND OVERS L. Long-duration Solar-powered Wireless Sensor Networks // Proc. 4th Workshop on Embedded Networked Sensors. ACM, 2007, P. 33–37.
28. MINAMI M., MORITO T., MORIKAWA H., AND AOYAMA T. Solar biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications // The 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems, 2005, 2007.
29. „Mica, Mica2, Mica2Dot, MicaZ, Telos,“ [El. Res.]. <http://www.xbow.com/products>.
30. „TinyOS,“ [El. Res.]. <http://www.tinyos.net/>.
31. ZHANG P., SADLER C. M., LYON S. A., AND MARTONOSI M. Hardware Design Experiences in ZebraNet // Proc. Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2004, P. 227–238.
32. „TurtleNet,“ [El. Res.]. <http://prisms.cs.umass.edu/dome/turtlenet>.
33. DUTTA P., HUI J., JEONG J., KIM S., SHARP C., TANEJA J., TOLLE G., WHITEHOUSE K., AND CULLER D. Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments // Proc. Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2006, P. 407–415.

34. MUSIANI D., LIN K., AND ROSING T. S. Active Sensing Platform for Wireless Structural Health Monitoring // Proc. Sixth International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2007, P. 390–399.

35. PARK C., LIU J., AND CHOU P. H. Eco: an Ultra-Compact Low-Power Wireless Sensor Node for Real-Time Motion Monitoring // Proc. Information Processing in Sensor Networks. IEEE Press, April 2005, P. 398–403.

36. WANT R. An Introduction to RFID Technology // IEEE Pervasive Comput., 2006. Vol. 5, N 1, P. 25.

ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

О. Ю. Зыбарева

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.72

Узлы беспроводных сенсорных сетей имеют, как правило, автономное питание и иногда не могут выполнять свои функции из-за ограниченной емкости батареи. Альтернативой являются узлы сенсорной сети, которые обладают средствами получения энергии из окружающей среды. В статье рассматриваются архитектурные особенности указанных сенсоров, приведен обзор приложений, в которых используются возможности сенсорных сетей получать энергию из окружающей среды. Также рассматриваются математические модели, разработанные с использованием аппарата Марковских процессов, для оценки эффективности функционирования сенсора.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, сбор энергии из окружающей среды, время жизни узла сенсорной сети, вероятность доступности сенсора, солнечная энергия.

Введение. Беспроводная сенсорная сеть — сеть устройств (сенсоров), обменивающихся информацией по беспроводному каналу связи. Узел данной сети содержит модули сбора и обработки данных, передачи-приема информации и источника питания. В зависимости от приложения в качестве модулей сбора и обработки данных используются различные типы датчиков (например, тепловых, акустических и т. д.), которые позволяют проводить различные измерения в окружающей среде с учетом конкретных приложений. В большей части используются сенсорные узлы с батарейным питанием (как правило, АА-типа). Несколько примеров таких приложений: мониторинг активности вулканов [1], обнаружение и идентификация событий [2], мониторинг состояния сооружений [3] и отслеживание транспортных средств [4]. Не зависящие от единого источника энергии узлы, используемые в таких случаях, облегчают мобильность приложений и размещение в труднодоступных местах.

Основным ограничением не привязанных к постоянному источнику питания узлов является конечная емкость батареи. Узлы будут работать в течение того времени, пока батарея имеет заряд. Конечный срок службы узла подразумевает конечное время жизни приложений или дополнительные затраты для регулярной смены батарей (или замены сенсора полностью). Узлы могут использовать большие батареи для более длительного срока службы, но им придется иметь дело с большими размерами, весом и стоимостью. Для продления срока „жизни“ узлы также могут использовать маломощное оборудование, такое как маломощный процессор и радиопередатчик, за счет меньшей вычислительной способности и более низких диапазонов передачи.

Методы, используемые для продления жизни сенсоров, включают энергоэкономные MAC протоколы и протоколы маршрутизации, специальным образом организованный рабочий цикл сенсора, динамически изменяемую зону мониторинга, избыточные сенсоры и многие другие. Хотя вышеперечисленные методы оптимизируют и адаптируют использование энергии для максимального увеличения времени жизни сенсорного узла, время жизни остается ограниченным и конечным. Они помогают продлить срок службы приложения и/или промежуток времени между заменами батареи, но не исключают задержек, связанных с энергообеспеченностью сенсора. С конечным источником энергии редко могут быть оптимизированы все параметры производительности, например, более высокая емкость батареи означает повышенную стоимость, низкий уровень шума означает снижение надежности считывания, более высокий диапазон передачи подразумевает более высокую потребляемую мощность, а более низкий диапазон передачи подразумевает пути передачи с большим количеством промежуточных узлов (хопов), что приводит к растрате энергии в гораздо большем количестве узлов.

Альтернативным методом, который применяется для решения проблемы конечного времени жизни узла, является использование сенсоров, оснащенных средством получения энергии из окружающей среды (энергия солнца и ветра, электромагнитные волны, вибрация и др.). Получаемая таким образом энергия преобразуется в электрическую и сохраняется в аккумуляторных батареях (источниках питания сенсоров). Далее в данной статье под сенсором будет пониматься узел сенсорной сети, оснащенный средствами получения энергии из окружающей среды. Если источник энергии является большим и периодически/ постоянно доступен, сенсорный узел может функционировать постоянно (не используя режим сна). Кроме того, исходя из периодичности и величины энергозатратной энергии, системные параметры узла могут быть настроены для увеличения производительности узлов и сети. Поскольку узел ограничен количеством энергии только до следующей возможности сбора энергии (цикл перезарядки), он может оптимизировать потребление энергии, чтобы максимизировать производительность в течение этого интервала. Например, узел может увеличить рабочий цикл для повышения надежности считывания или увеличить мощность передачи, чтобы уменьшить длину маршрутов маршрутизации [5, 6, 7].

1. Сенсоры, оснащенные средством сбора энергии из окружающей среды.

Под сбором энергии подразумевают генерацию энергии или преобразование энергии из одной формы в другую. Применительно к сенсорам, энергия от внешних источников может быть собрана для питания узлов и увеличивать их срок службы и возможности. Учитывая профиль использования энергии узла, средства сбора энергии могут удовлетворить частичные или все энергетические потребности сенсора. Широко распространенная и популярная техника сбора энергии — это преобразование солнечной энергии в электрическую. Солнечная энергия неконтролируема — интенсивность прямого солнечного света не может контролироваться — но это предсказуемый источник энергии. Другие методы сбора энергии преобразуют механическую энергию или энергию ветра в электрическую энергию. Поскольку количество энергии, используемой для преобразования, может варьироваться, такие методы можно рассматривать как контролируемые источники энергии.

Типичная система сбора энергии состоит из трех компонентов: источника энергии, архитектуры сбора и элемента рабочей нагрузки. Источник энергии выполняет функцию генератора внешней энергии. Архитектура сбора энергии (energy harvesting architecture) включает в себя механизмы для использования и преобразования входной внешней энер-

гии в электрическую. Элемент рабочей нагрузки обеспечивает потребление энергии рабочими модулями сенсора.

Энергособирающие архитектуры. В целом, архитектура сбора энергии может быть разделена на два типа:

- 1) Сбор–использование: энергия собирается только для использования.

В этом случае система сбора энергии напрямую обеспечивает работу сенсора, и в результате для того, чтобы сенсор работал, выходная мощность системы сбора должна быть постоянно выше минимальной рабочей точки потребления. Если нельзя собрать достаточно энергии для работы, сенсор будет отключен. Резкие изменения в производительности сбора, близкие к минимальной точке питания, приведут к тому, что сенсор будет колебаться в состояниях ВКЛ и ВЫКЛ. Такая система сбора может быть построена для использования механических источников энергии, таких как нажатие клавиш/кнопок, ходьба и т. д.

- 2) Сбор–хранение–использование: энергия собирается по возможности и хранится для будущего использования.

Данная архитектура для обеспечения работы сенсора включает в качестве модуля хранения и источника питания аккумуляторную (перезаряжаемую) батарею. Энергохранилище полезно, когда количество доступной собранной энергии больше, чем ее текущее использование. Энергия хранится для дальнейшего использования, когда возможности сбора энергии не будет или потребление энергии необходимо увеличить для улучшения возможностей и параметров производительности. Сам модуль может быть одноуровневым или двухуровневым. Вторичное хранилище — это резервное хранилище для ситуаций, когда основное хранилище исчерпано [8]. Например, система сбор–хранение–использование может использовать неконтролируемые, но предсказуемые источники энергии, такие как солнечная энергия [8, 9, 10, 11]. В дневное время энергия используется для работы и также сохраняется для последующего использования. В ночное время запасенная энергия консервативно используется для питания сенсора.

Источники собираемой энергии. Важным компонентом любой архитектуры сбора энергии является источник энергии — он определяет количество и скорость использования энергии. Источники энергии имеют разные характеристики по осям управляемости, предсказуемости и величины [12]. Контролируемый источник энергии может обеспечить необходимую для сбора энергию, когда это необходимо, а потребность в энергии неизвестна до сбора энергии. С неконтролируемыми источниками энергии энергия должна быть собрана всякий раз, когда она доступна. В этом случае, если источник энергии предсказуем, тогда модель прогнозирования, которая предсказывает ее доступность, может использоваться для указания времени следующего цикла перезарядки. Кроме того, источники энергии могут быть в целом разделены на следующие две категории: источники энергии окружающей среды: источники энергии из окружающей среды, например, солнечная энергия, энергия ветра и радиочастотная энергия, и человеческая сила: энергия, собранная из движения тела человека [13, 14, 15, 16]. Пассивные источники энергии человека — это те, которые не контролируются пользователем (кровенное давление, теплота тела и дыхание [16]). Активными источниками энергии человека являются те, которые находятся под контролем пользователя, и пользователь проявляет определенную силу для генерирования энергии для сбора урожая, например, движение пальцев, гребля и ходьба [16].

Механизмы преобразования энергии. Выбор механизма преобразования энергии тесно связан с выбором источника энергии. В случае солнечной энергии механизмом преобразования является использование солнечных батарей. Солнечная панель действует как источник тока, и количество генерируемого тока прямо пропорционально его размеру/площади и интенсивности падающего света. Следовательно, в зависимости от требований используются панели с большей площадью или большим количеством солнечных панелей. В случае механических источников энергии, таких как ходьба, нажатие кнопок/клавиш, преобразование в электрическую энергию осуществляется с использованием пьезоэлектрических элементов [13, 14, 15, 16]. Пьезоэлектрические пленки и керамика деформируются при приложении силы и генерируют электрическую энергию. Чем больше размер пленки, тем больше объем собранной энергии. Энергия ветра собирается с использованием роторов и турбин, которые преобразуют круговое движение в электрическую энергию по принципу электромагнитной индукции [11, 17].

Технологии хранения. Технология хранения играет важную роль в системах сбора энергии, и, как следствие, выбор компонента хранения и перезарядки имеет первостепенное значение. Аккумуляторные батареи (распространенный выбор хранения энергии) могут быть изготовлены с помощью любой из нескольких технологий (химический состав). Аккумуляторная батарея представляет собой ячейку для хранения, которую можно заряжать, обращая внутреннюю химическую реакцию. Несколько популярных перезаряжаемых технологий — герметичная свинцово-кислотная (SLA), никелевый кадмий (NiCd), никель-металлгидридный (NiMH) и литий-ионный (Li-ion). Эти аккумуляторные технологии можно охарактеризовать по нескольким критериям — плотность энергии, плотность мощности, эффективность разряда заряда, скорость саморазряда и количество циклов глубокой перезарядки.

Номинальные напряжения для батареек SLA, NiCd, NiMH и Li-ion составляют 6 вольт, 1,2 вольта, 1,2 вольта и 3,7 вольта соответственно. Литиево-ионные батареи имеют самое высокое выходное напряжение, плотность энергии, плотность мощности и эффективность разряда заряда. Они также имеют низкий уровень саморазряда. Хотя никель-металлгидридные батареи имеют лучшую плотность энергии и плотность мощности, чем никелевые кадмиевые батареи, никелевые кадмиевые батареи имеют большее количество глубоких циклов перезарядки. Загерметизированные свинцово-кислотные батареи имеют наименьшие значения для плотности энергии, мощности и количества циклов и, следовательно, являются наименее эффективной технологией хранения. Две технологии хранения, никель-металлгидридные и Li-based, являются хорошим выбором для сенсоров. Литиевые батареи имеют высокое выходное напряжение, плотность энергии, эффективность и умеренно низкий уровень саморазряда. Они не страдают от эффекта памяти — потери емкости из-за повторной мелкой перезарядки. Однако литиевые батареи требуют зарядки для перезарядки — высокий пульсирующий зарядный ток.

Обычно для этой цели требуется вспомогательная батарея или схема зарядки. С другой стороны, никель-металлгидридные батареи могут заряжаться под струей, то есть напрямую подключаться к источнику энергии для зарядки и не нуждаться в сложных цепях импульсной зарядки. Они имеют достаточно высокую энергию, плотность мощности и количество циклов перезарядки. Несмотря на то, что никель-металлгидридные батареи действительно страдают от эффекта памяти, эффект становится обратимым благодаря полностью разряженному аккумулятору после его зарядки. Кроме того, эффективность зарядки никель-металлгидридных аккумуляторов ниже, чем батарей на основе лития. Как

видно, обе технологии хранения имеют свои плюсы и минусы, и выбор зависит от компромисса, определяемого требованиями приложения и ограничениями. В следующих разделах мы представим примеры прототипов, в которых используются никель-металлгидридные и литиевые батареи для различных требований и условий развертывания. В качестве альтернативы суперконденсаторы могут использоваться в качестве компонентов хранения вместо или вместе с перезаряжаемыми батареями. Подобно батареям, суперконденсаторы также хранят заряд, но они саморазряжаются на гораздо более высокой скорости, чем батареи, до 5,9 % в день [9].

Плотность энергии очень низкая, всего 5 Вт/кг по сравнению со 100 Вт/кг никель-металлгидридных батарей. Однако суперконденсаторы имеют высокую эффективность разряда заряда (97–98 %), а также не страдают от эффекта памяти. Суперконденсаторы также могут быть заряженными как никель-металлогидридные батареи и, следовательно, не нуждаются в сложной схеме зарядки. Теоретически суперконденсаторы имеют бесконечные циклы перезарядки и, следовательно, не имеют ограничений на количество раз, когда они могут подвергнуться глубокой перезарядке [8]. Таким образом, суперконденсаторы являются полезными элементами хранения в местах, где достаточная энергия доступна через регулярные промежутки времени. Они также могут использоваться для буферизации имеющейся энергии, если источник энергии неустойчив, то есть суперконденсатор заряжается, и стабильный разряд от конденсатора заряжает батарею.

2. Моделирование поведения сенсора. Для описания поведения сенсора и оценки вероятности его доступности используется аппарат Марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Под Марковским процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем понимается случайный процесс, в котором для любого (случайного) времени t условные вероятности состояний системы S в будущем не зависят от состояния системы в прошлом, но зависят от настоящего ее состояния [18]. Случайный процесс представляет собой случайные переходы системы из одного состояния в другое.

Для оценки вероятности доступности сенсора необходимо получить вероятности состояний Марковского процесса. Переходы системы из одного состояния в другое происходят под воздействием потоков событий, как только произошло какое-то событие, переход из этого состояния осуществляется. Предполагается, что переходы между состояниями осуществляются под воздействием пуассоновских потоков событий [18].

Анализ поведения сенсора с помощью Марковских процессов ранее описывался в [19, 20, 21].

В статье [19] описывается модель сенсора, оснащенного средством получения энергии из окружающей среды, основанная на Марковском процессе. Она состоит из двух состояний: заряжается (H) и не заряжается (I). Для модели также приведен соответствующий инфинитезимальный генератор:

$$Q_E = \begin{pmatrix} -\rho_H & \rho_H \\ \rho_I & -\rho_I \end{pmatrix}$$

Описанная модель была модифицирована, и на ее основе построена модель сенсора с разной, более высокой функциональностью, сделанная для расчета вероятности доступности сенсора. Сенсор считается доступным, если он может выполнять свои функции (сбор информации, передача данных по сети).

В альтернативной модели множество допустимых состояний сенсора состоит из следующих трех: сенсор активен (A), сенсор спит (S), сенсор заряжается (H). Диаграмма

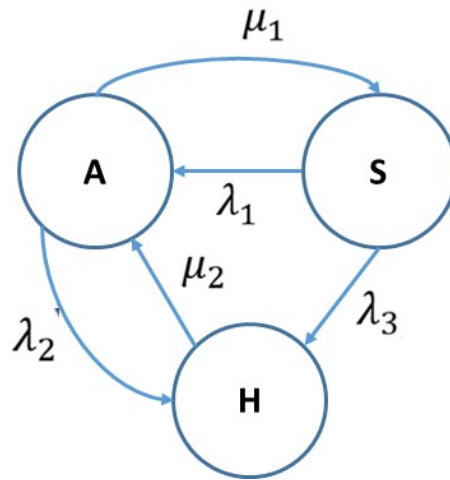


Рис. 1. Диаграмма для модели сенсора с тремя состояниями

состояний и допустимых переходов сенсора из одного состояния в другое для данной модели представлена на рис. 1.

Динамическое поведение сенсора на пространстве состояний $X_s = \{A, S, H\}$ и допустимых переходов между этими состояниями с интенсивностями $\{\mu_i, \lambda_i\}$ описывается с помощью Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Вероятности состояний $p_i \{p_i, i \in X_s\}$ Марковского процесса могут быть вычислены путем решения системы линейных уравнений:

$$PQ = 0, \quad (1)$$

где: $P = \{p_A, p_H, p_S\}$, Q — инфинитезимальный генератор (или матрица переходов согласно диаграмме, рис. 1).

Для рассматриваемой нами модели Q может быть записан следующим образом:

$$Q = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 & \lambda_1 \\ \mu_2 & -\mu_2 & 0 \\ \mu_1 & \lambda_3 & -(\mu_1 + \lambda_3) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для вероятностей p_i выполняется нормировочное условие:

$$\sum_i p_i = 1, \quad i \in X_s. \quad (3)$$

Из уравнения (1) с учетом (2) найдем выражения вероятности состояний p_A , p_H через вероятность состояния p_S , получаем следующие уравнения:

$$p_A = \frac{p_S(\mu_1 + \lambda_3)}{\lambda_1}, \quad (4)$$

$$p_H = \frac{p_S(\mu_1 + \lambda_3)\lambda_2}{\lambda_1\mu_2} + \frac{p_S\lambda_3}{\mu_2}. \quad (5)$$

Из решения системы уравнений (3), (4) и (5) получаются следующие вероятности состояний сенсора:

$$p_A = \frac{\mu_2 (\mu_1 + \lambda_3)}{(\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3)}; \quad (6)$$

$$p_S = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3)}; \quad (7)$$

$$p_H = \frac{\mu_1 \lambda_2 + \lambda_3 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3}{(\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3)}; \quad (8)$$

На основе полученных вероятностей (6)–(8) состояний сенсора с учетом того, что в режиме подзарядки сенсор не может работать, можно получить вероятность доступности сенсора. Она описывается следующей формулой:

$$p = p_A = \frac{\mu_2 (\mu_1 + \lambda_3)}{(\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3)}. \quad (9)$$

В случае, если допускается работа сенсора в режиме зарядки, то получаем следующую формулу для вероятности доступности сенсора:

$$p = 1 - p_S = \frac{\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3}{(\mu_2 \mu_1 + \mu_2 \lambda_3 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3)}. \quad (10)$$

Существуют и другие модели поведения сенсора, основанные на теории Марковских процессов. Используя полученные значения вероятностей состояний, становится возможным проводить сравнительный анализ стратегий повышения эффективности беспроводных сенсорных сетей. Например, рассматривая такой показатель как связность для сетевых топологий типа звезда, цепь, цикл, можно получить аналитическое выражение для функции надежности, что позволяет свести анализ сети к оптимизационной задаче, решаемой стандартными методами [22]. В общем случае задача анализа производительности системы решается с помощью имитационного моделирования, где в качестве сетевой топологии используются случайные геометрические графы [23].

3. Энергосберегающие сенсоры и приложения. *Системы сбора солнечной энергии.* Поскольку солнечная энергия легко доступна и является удобным источником сбора энергии, существует несколько реализаций сенсора для сбора солнечной энергии: Prometheus [8], HydroWatch [9], Heliomote [10], Ambimax [11], Everlast [24] и Sunflower [25]. Эти реализации сбора солнечной энергии различаются по осям характеристик солнечных панелей, типа и емкости батареи, а также сложности схемы перезарядки. Кроме того, все эти сенсоры используют архитектуру сбор–хранение–использование и используют разные варианты для хранения — батареи, суперконденсаторы или оба (многоуровневое хранилище).

Сенсоры с аккумуляторным хранилищем с использованием никель-металлгидридных батарей:

— Узел HydroWatch [9] — это система сбора энергии с одним хранилищем для очистки солнечной энергии, которая использует платформу TelosB [26] с никель-металлгидридными батареями. На рис. 2 показаны узел HydroWatch и системная архитектура его микро-солнечной силовой подсистемы. Входной регулятор используется для

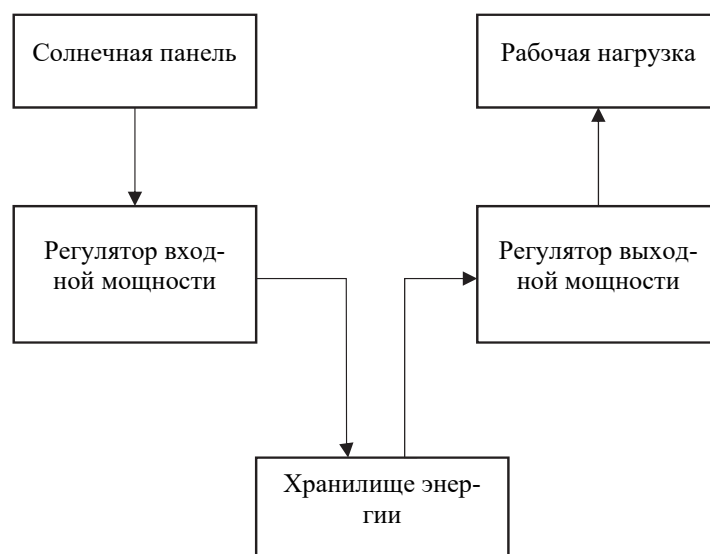


Рис. 2. Архитектура энергосистемы HydroWatch

соответствия пределу тока, пределу напряжения и продолжительности зарядки аккумулятора. Однако из-за использования никель-металлгидридных аккумуляторов, которые могут заряжаться капельной подзарядкой, ограничение продолжительности зарядки не требуется. Поэтому, если можно обеспечить, чтобы рабочее напряжение солнечной панели соответствовало напряжению зарядки батарей, то входной регулятор становится дополнительным компонентом в конструкции. Фактически, поскольку наблюдается, что входной регулятор имеет 50 % КПД [9], его удаление значительно увеличивает энергоэффективность узла HydroWatch. Выходной регулятор используется, чтобы сочетать напряжение батареи и требования к сенсорам. HydroWatch использует никель-металлгидридные батареи, предпочитаемые литий-ионным батареям. Интеграция аппаратного литий-ионного зарядного устройства более сложная по сравнению с логикой зарядки никель-металлгидридных с прямой передачей. Недостатком использования никель-металлгидридных батарей является высокая скорость саморазряда 30 % и низкая эффективность ввода-вывода 66 %, но разработчики компенсируют этот недостаток простой логикой зарядки. С 30-минутным солнечным светом никель-металлгидридные батареи получают более 120 мВт/день (79,2 мВт/день при эффективности 66 %), что достаточно для удовлетворения требований приложений.

Hydrowatch оценивалась с использованием двух сетей: одна в городской среде, а другая — в лесных водоразделах. В городской среде все узлы получали как минимум полчаса солнечного света (> 130 мВтч) каждый день. Интересно отметить, что также наблюдалось, что обычно закрытые солнечные батареи получали больше солнечной энергии в более облачные дни, чем солнечные дни. Это объясняется диффузией света, вызванного облачными слоями. Однако в лесном водоразделе большинство узлов не получало более 50 мВт энергии в день, что было меньше целевого 79,2 мВт/ч. Эта нехватка энергии была вызвана не отсутствием солнечного света, а наличием пятнистого света, размеры точек которого были недостаточно большими, чтобы покрыть всю солнечную панель. Такая панель, которая получила частичное освещение, также ограничивала ток через другие панели, соединенные последовательно с ней. Многие небольшие панели, соединенные в

высокопараллельной конфигурации, приводящие к увеличению добавочного тока, могут быть более подходящими в таких условиях.

— Узел Heliomote [10] также представляет собой систему сбора энергии с одним хранилищем с использованием никель-металлгидридных батарей. Архитектура Heliomote похожа на архитектуру HydroWatch. В отличие от HydroWatch, DC / DC-преобразователь (выходной регулятор) точно не соответствует батарее и нагрузке. Это делает элемент защиты подзарядки обязательным для Heliomote, так как продолжение подачи мощности даже после падения напряжения батареи ниже нижнего порога может привести к повреждению перезаряжаемых батарей. Кроме того, Heliomote использует блок защиты от перегрузки, чтобы предотвратить нестабильность из-за чрезмерной зарядки. Такая защита была необоснованна в дизайне HydroWatch из-за того, что в целевых условиях водораздела сама энергоемкость была очень низкой. Heliomote также имеет компонент мониторинга энергии, который позволяет узлу датчика узнать его доступность и использование энергии.

— Fleck1 [27] также представляет собой систему сбора солнечной энергии с одной стадией хранения с использованием никель-металлгидридных батарей. Эксперименты с Fleck1 показали, что использование DC-DC- преобразователя или регулятора для питания узла от батареи полезно, потому что оно позволяет устройству работать дольше, обеспечивая питание даже при низком напряжении, таком как 1,2 В. Это особенно полезно, если сенсор не оснащен батарейками, то есть вместо батарей используются суперконденсаторы.

Сенсоры с хранилищем на основе суперконденсатора:

— Everlast [24] — это беспроводный сенсор, управляемый суперконденсатором и не использующий батареи для хранения энергии. Everlast — это интегрированная система с датчиками, радио, микроконтроллером и подсистемой сбора энергии, в отличие от Heliomote и HydroWatch, которые являются дополнениями для существующих платформ. На рис. 3 показана блок-схема подсистемы Everlast.

Как показано на рис. 3, компонентами подсистемы энергосбережения Everlast являются: солнечный элемент, суперконденсатор, ЧИМ контроллер и ЧИМ регулятор. Everlast использует частотно-импульсно модулированный (ЧИМ) регулятор для зарядки суперконденсатора. Функция ЧИМ регулятора состоит в том, чтобы зарядить конденсатор, а затем передать энергию на суперконденсатор выходной нагрузки. ЧИМ регулятор состоит из конвертера и повышающего регулятора. Подключение суперконденсатора непосредственно к панели солнечных батарей приводит к тому, что солнечное напряжение падает на напряжение суперконденсатора вместо зарядки суперконденсатора. Таким образом, схема коммутируемого конденсатора (с меньшим конденсатором 1 мкФ) и конвертером используется для эффективной зарядки суперконденсатора нагрузки 100F. Когда солнечное напряжение превышает заданный опорный VMPP, ЧИМ контроллер (компаратор) подает импульс на ЧИМ регулятор, обозначенный как сигнал „управления переключателем“ на рис. 4. Это вызывает поток заряда от входного конденсатора в индуктор конвертера и в нагрузку суперконденсатора, тем самым заряжая его. Когда суперконденсатор полностью заряжен, ЧИМ контроллер выключает ЧИМ регулятор, сравнивая его напряжение с опорным напряжением 2,5 В и отправляя сигнал „Выключение“. Используя этот метод, Everlast утверждает, что срок службы составляет 20 лет при 50 % рабочем цикле и скорости передачи данных 1 Мбит/с.

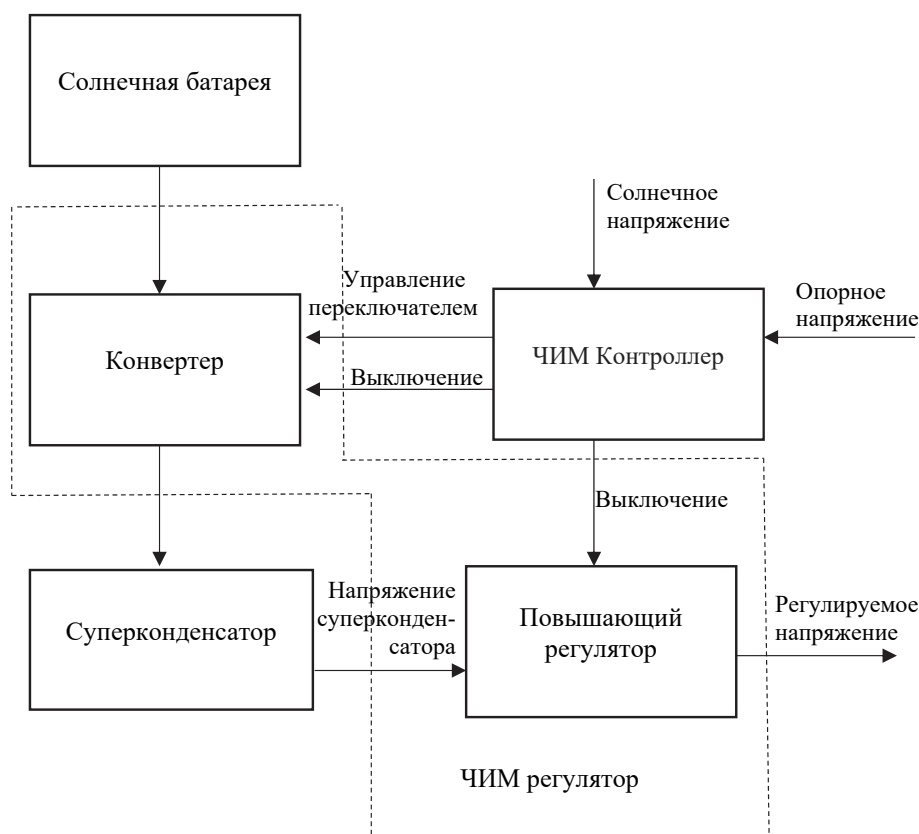


Рис. 3. Блок-схема подсистемы по сбору энергии Everlast

— Solar-Biscuit [28] — еще один пример сенсора с использованием суперконденсаторов. В отличие от Everlast, Solar-Biscuit не имеет регулирования напряжения на входных или выходных сторонах суперконденсатора.

— Sunflower [25] — еще одна реализация сенсора, который использует суперконденсаторы. Как и Everlast, Sunflower использует регулятор переключения для зарядки суперконденсатора с фотодиодов.

Сенсоры с многоуровневым хранилищем:

— Prometheus [8] — система сбора энергии с удвоенной энергией для очистки солнечной энергии с использованием платформы TelosB [26, 29]. В качестве вторичного хранилища он использует два суперконденсатора 22F в качестве основного хранилища и литиево-полимерную батарею емкостью 200 мАч. Для зарядки суперконденсаторов используется панель солнечных батарей размером 3,23 × 1,45 дюйма с выходной мощностью 130 мВт. Во время избыточного заряда суперконденсаторы заряжают литиевую батарею. Блок-схема для Prometheus показана на рис. 4.

Основными компонентами архитектуры системы Prometheus (см. рис. 4) являются панель солнечных батарей, буфер первичной энергии (суперконденсатор), буфер вторичной энергии (литий-полимерная батарея), контроллер заряда и выключатель питания, сопряженный с узлом датчика Telos. По сравнению с архитектурой с одним хранилищем, Prometheus использует дополнительный уровень для хранения и механизм управления зарядкой на базе программного обеспечения.

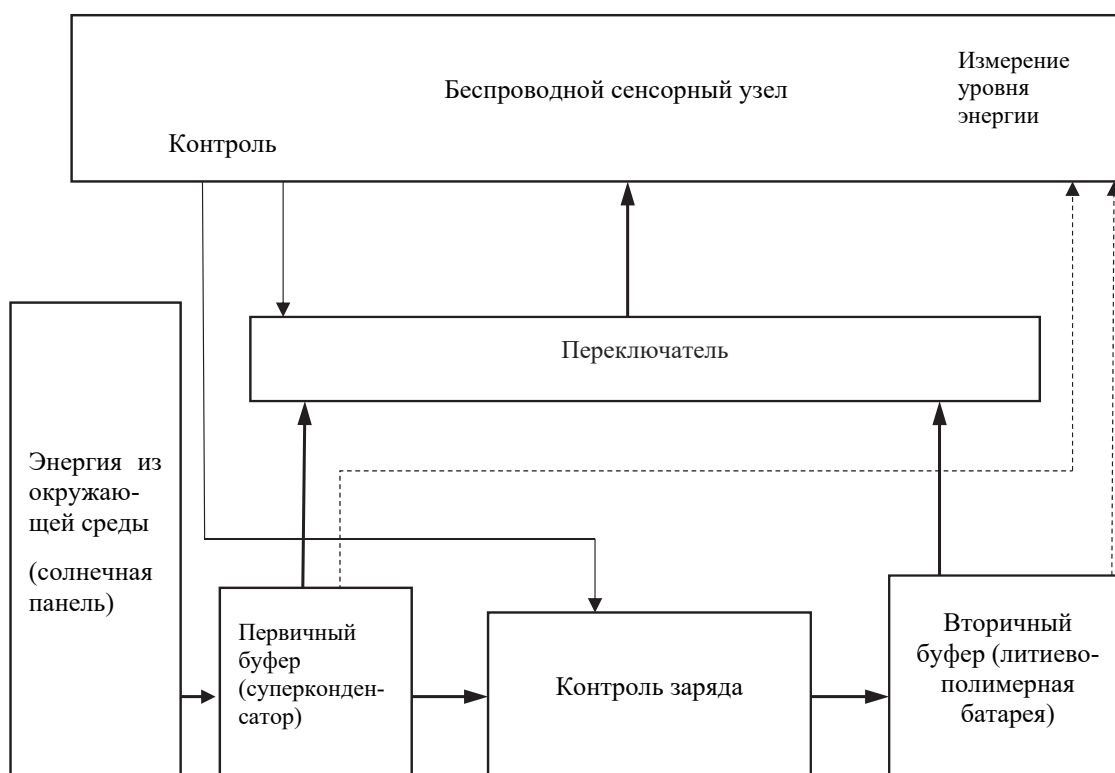


Рис. 4. Архитектура энергосбора Prometheus

Так как все технологии перезаряжаемых батарей имеют ограниченное количество глубоких циклов перезарядки, предпочтительно, чтобы батарея подвергалась более мелким циклам перезарядки, а не глубоким. Это обеспечивается благодаря использованию первой ступени суперконденсаторов, которая может пройти теоретически бесконечные глубокие циклы перезарядки. Использование суперконденсаторов в качестве источника первичной энергии может минимизировать доступ к батарее. Следовательно, батарея не разряжается полностью и происходит мелкая перезарядка. Кроме того, Prometheus использует литиево-полимерную батарею в качестве хранилища второй ступени. Выбор батареек на основе лития вместо никель-металлгидридных батарей заключается в том, чтобы избежать эффекта памяти из-за неглубоких циклов перезарядки.

У Prometheus есть программный драйвер для управления зарядкой буферов хранения энергии и выбора источника питания для сенсора. Блок переключателя, показанный на рис. 4, используется для переключения между двумя источниками питания — суперконденсатором и литий-ионным аккумулятором. На рис. 5 показана логика, реализованная драйвером для переключения между источниками питания. Как показано на диаграмме состояний, если заряд суперконденсатора выше верхнего порога, он используется для питания сенсора. Если заряд суперконденсатора выше верхнего порога, а заряд литиево-ионной батареи ниже верхнего порога, то аккумулятор заряжается от суперконденсатора. Если суперконденсатор находится ниже нижнего порога, и возможна перезарядка, тогда заряжается суперконденсатор. Когда возможность перезарядки конденсатора недоступна, тогда сенсор питается от литий-полимерной батареи до тех пор, пока он не опустится ниже нижнего порога или до тех пор, пока суперконденсатор не будет перезаряжен. Как



Рис. 5. Диаграмма состояний драйвера Prometheus

только энергия снова становится доступной, суперконденсатор заряжается и достигает высокого порога, литий-полимерная батарея заряжается от суперконденсатора. Эта логика реализована с использованием TinyOS [30] на узле Prometheus.

— AmbiMax [11] — еще одна система хранения энергии с двухступенчатой системой хранения. Подобно Prometheus, AmbiMax имеет основное хранилище и вторичное хранилище (литиево-полимерный аккумулятор). Он собирает солнечную энергию и энергию ветра. Однако его конструкция достаточно модульная для размещения других источников, таких как поток воды и вибрация.

В отличие от Prometheus, управление зарядкой AmbiMax осуществляется с помощью аппаратного обеспечения, а не программного обеспечения. Каждая подсистема сбора энергии, связанная с каждым из источников энергии, имеет свой собственный суперконденсатор. AmbiMax автономно выполняет отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ) без программного обеспечения или управления микроконтроллером. Вместо измерения напряжения панели солнечных батарей AmbiMax использует интенсивность света для управления регулятором ШИМ (с широтно-импульсной модуляцией) для отслеживания ТММ. Подсистема сбора солнечной энергии AmbiMax включает в себя панель солнечных батарей, регулятор переключения ШИМ и схему ОТММ. Когда солнечное напряжение падает ниже нижней границы диапазона гистерезиса МПП, регулятор выключается. Он включается только тогда, когда солнечное напряжение поднимается и пересекает верхнюю границу полосы гистерезиса МПП. Следовательно, мощность берется из панели солнечных батарей только в максимальной точке питания. Использование ШИМ-переключающего регулятора между солнечной панелью и суперконденсатором обеспечивает их изоляцию друг от друга — и напряжение на панели солнечных батарей не падает до сверхконденсаторного напряжения, и не будет потока обратного тока от суперконденса-

тора к источнику. Это помогает эффективно заряжать суперконденсатор. Схема компаратора используется для включения зарядного устройства, когда напряжение конденсатора выше порогового значения, а аккумулятор не полностью заряжен.

Приведем примеры приложений беспроводных сенсорных сетей, использующих сенсоры с разными методами сбора энергии.

Использование сенсоров на основе сбора солнечной энергии

— ZebraNet. ZebraNet [31] — это мобильная сенсорная сеть с разреженным сетевым покрытием и высокоэнергетическими GPS-датчиками для отслеживания движения зебры. Непрерывное расположение с использованием технологии GPS отслеживает долгосрочные модели миграции животных, среды обитания и размеры групп. Ошейник ZebraNet имеет 14 солнечных модулей (каждый из которых состоит из трех солнечных элементов), простой компаратор и повышающий преобразователь. ZebraNet имеет литий-ионную перезаряжаемую батарею для поддержки заряда ночью и при плохой погоде.

Подобно Prometheus, он использует программное обеспечение для зарядки своей литиевой батареи. Подобно Everlast и Sunflower, ZebraNet — это интегрированная система. Он использует микроконтроллер для управления системными операциями. Микроконтроллер также отвечает за определение уровня напряжения батареи и его зарядки.

— TurtleNet. Цель TurtleNet [32] — решить проблемы чувствительности и коммуникации, связанные с отслеживанием черепах на месте. Эти усилия аналогичны проекту ZebraNet и распространяются на дизайн ZebraNet для вечного отслеживания дикой природы. В узле TurtleNet eFlux используется литий-ионная перезаряжаемая батарея, которая заряжается с помощью солнечного элемента. Аппаратное обеспечение TurtleNet адаптировано из аппаратного обеспечения Helimote и, следовательно, не является интегрированной системой, такой как узел ZebraNet. Поскольку черепахи, как ожидается, проводят большую часть времени под водой, узел становится водонепроницаемым, упаковывая его в термоусадочную трубу и герметизируя концы водостойкой эпоксидной смолой.

— Трио — многоцелевое отслеживание. Трио [33] — это сенсор, собирающий солнечную энергию, используемый в сети статических сенсоров для сбора данных на месте. Сенсор Трио основывается на дизайне Prometheus и реализует модификации, чтобы преодолеть некоторые проектные недочеты Прометея. Трио-тест состоит из 557 солнечных мотивов Трио, семи шлюзовых узлов Трио и корневого сервера [33]. Вся система Трио представляет собой иерархию из трех уровней: трио-узлов, трио-шлюзов и корневого сервера. Цель Трио — оценить алгоритмы многоцелевого отслеживания в масштабе.

— SHiMmer. SHiMmer [34] — это беспроводная платформа для обнаружения и приведения в действие для мониторинга работоспособности системы. Как и Everlast, SHiMmer также является системой сбора солнечной энергии, которая использует суперконденсатор в качестве хранилища. SHiMmer использует метод локализованных вычислений, известный как активная сеть, в которой узел приводит в действие структуру, воспринимает вибрацию и затем локально выполняет вычисления для обнаружения и локализации повреждения. Оба действия и сбор данных выполняются с использованием пьезоэлектрических элементов, встроенных в конструкцию, которые должны контролироваться с помощью регулятора напряжения. SHiMmer использует солнечные элементы для зарядки суперконденсатора. Для создания напряжения питания для микроконтроллера от суперконденсатора используется повышающий преобразователь.

Использование сенсоров пьезоэлектрического типа. Пьезоэлектрические узлы сбора энергии используют механическую силу для деформирования пьезоэлектрического мате-

риала, что приводит к разности электрических потенциалов. Для достижения преобразования механической силы в электрическую энергию используются два вида пьезоэлектрических материалов: пьезоэлектрические пленки, например, поливинилиденфторид и пьезоэлектрическая керамика, например титанат цирконата свинца. Пьезоэлектрические пленки являются гибкими и проявляют пьезоэлектрический эффект из-за переплетенных длинноцепочечных молекул, притягивающих и отталкивающих друг друга. С другой стороны, пьезоэлектрическая керамика жесткая, и ее кристаллическая структура отвечает за создание пьезоэлектрического эффекта.

Использование сенсоров, использующих другие источники сбора энергии.

— Сенсоры, собирающие энергию ветра. Реализация, которая собирает энергию ветра, — AmbiMax [11]. Реализация AmbiMax [11] на Эко-узле [35] собирает энергию ветра с использованием ветровой турбины. Выходная мощность ротора используется для выполнения ОТММ. Частота ротора подается на преобразователь, который выводит соответствующий сигнал напряжения.

Работа [11] показывает, что действительно возможно собрать энергию ветра для использования в сетях беспроводных датчиков. Тем не менее, размер ветряных турбин может быть проблемой: турбины, используемые в AmbiMax, имеют длину тела 200 мм и радиус развертки лезвия 155 мм. По сравнению с небольшими узлами форм-фактора эти размеры намного больше, и добавлены ограничения для развертывания. Еще одна попытка в сборе энергии ветра представлена в [17], в которой используется движение вала анемометра, чтобы включить генератор переменного тока, и используется импульсный преобразователь нагрузки для преобразования движения в потенциал батареи.

— Использование радиочастотной энергии: когда временное поле электромагнитной радиочастоты проходит через антенную катушку, на катушке генерируется переменное напряжение. Магнитная связь благодаря взаимной индуктивности создает напряжение. В радиочастотной сборке пассивная RF-метка использует переданную ему радиочастотную энергию, чтобы питать себя — это форма сбора энергии. Это не относится к активным RF-меткам, которые имеют собственное питание от батарей и не зависят от внешней радиочастотной энергии.

В системах радиочастотной идентификации RFID-считыватель запрашивает RFID-метку, которая, в свою очередь, отвечает своей собственной идентификацией. Это используется для идентификации, поиска и отслеживания людей, активов и животных. RF-сигнал посылается RFID-считывателем, а RFID-метка возбуждается напряжением, полученным из взаимной индуктивности их петлевых антенн [36].

Ответ метки включает в себя амплитудную модуляцию принятого несущего сигнала в соответствии с его собственными идентификационными данными, которые хранятся в энергонезависимой памяти. Это называется модуляцией обратного рассеяния. RFID-считыватель продолжает отправлять RF-сигналы и отслеживать отражения для изменения амплитуды. Любое изменение амплитуды означает наличие RFID-метки. Таким образом, в отличие от обычных зондирующих приложений, где сам датчик собирает энергию, здесь датчик (RFID-считыватель) ощущает присутствие энергосброса (RFID-метки). Приложения на аналогичных линиях с узлами, делающими больше, чем просто отправку назад их идентификаций, могут стать интересным направлением для исследования. В качестве примера можно привести мобильный приемник данных, перемещающийся в интересующей области, и исходные узлы, собирающие радиочастотную энергию от приемника и возвращающие обратно нужные данные.

Заключение. Были описаны реализации узлов сбора энергии с использованием источников энергии, таких как солнечная энергия, энергия ветра, энергия человека и радиочастотная энергия. Солнечная энергия является самым дешевым, наиболее доступным и наиболее легко усваиваемым источником энергии. Хотя энергия ветра также является источником энергии окружающей среды (и, следовательно, легко доступна), но оборудование для сбора энергии ветра громоздко по сравнению с размерами сенсоров, и эффективность его преобразования намного ниже по сравнению со сбором солнечной энергии. В случае использования других источников энергии необходимо их постоянное надежное присутствие, например, при использовании человеческой силы необходимы постоянные усилия человека для сбора значительного количества энергии. Следовательно, напрашивается вывод: в настоящий момент солнечная энергия как источник для сбора энергии для сенсоров наиболее востребована.

Список литературы

1. WERNER-ALLEN G., LORINCZ K., RUIZ M., MARCILLO O., JOHNSON J., LEES J., AND WELSH M. Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano // IEEE Internet Comput., March-April 2006, vol. 10, N 2, P. 18–25.
2. ШАХОВ В. В., СТРЕЛЬНИКОВ В. Е., НГУЕН В. Д. К вопросу об эффективности беспроводных сенсорных сетей // Проблемы информатики. 2014. № 2. С. 28–38.
3. CHEBROLU K., RAMAN B., MISHRA N., VALIVETI P. K., AND KUMAR R. Brimon: A Sensor Network System for Railway Bridge Monitoring // Proc. 6th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. ACM, 2008, P. 2–14.
4. KARPIRISKI M., SENART A., AND CAHILL V. Sensor Networks for Smart Roads // Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, Mar. 2006, P. 310–314.
5. SUJESHA SUDEVALAYAM AND PURUSHOTTAM KULKARNI. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Third Quarter 2011, vol. 13, N 3.
6. ШАХОВ В. В., МИГОВ Д. А., СОКОЛОВА О. Д. Беспроводные сенсорные сети, оснащенные средствами получения энергии из окружающей среды // Проблемы информатики. 2014. № 4. С. 69–79.
7. VLADIMIR V. SHAKHOV, DENIS MIGOV, AND ALEX RODIONOV. Operation strategy for energy harvesting wireless sensor networks. Proc. of the 9th International Conf. on Ubiquitous Information Management and Communication, ACM New York, USA, 2015.
8. JIANG X., POLASTRE J., AND CULLER D. Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks // Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 2005, P. 463–468.
9. TANEJA J., JEONG J., AND CULLER D. Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks // Proc. 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2008, P. 407–418.
10. RAGHUNATHAN V., KANSAL A., HSU J., FRIEDMAN J., AND SRIVASTAVA M. Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems // Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 2005, P. 457–462.
11. PARK C. AND CHOU P. AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes // 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Sept. 2006. V. 1. P. 168–177.

12. KANSAL A., HSU J., ZAHEDI S., AND SRIVASTAVA M. B. Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks // *Trans. Embedded Computing Systems*, 2007. Vol. 6, N 4, P. 32.
13. PARADISO J. A. AND FELDMEIER M. A Compact, Wireless, Self-Powered Pushbutton Controller // *Proc. 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*. Springer-Verlag, 2001, P. 299–304.
14. SHENCK N. AND PARADISO J. Energy Scavenging with Shoe-mounted Piezoelectrics // *IEEE Micro*, May/June 2001. Vol. 21, N 3, P. 30–42.
15. KYMISSIS J., KENDALL C., PARADISO J., AND GERSHENFELD N. Parasitic Power Harvesting in Shoes // *Second International Symposium on Wearable Computers*, Oct 1998, P. 132–139.
16. STARNER T. Human-powered Wearable Computing // *IBM Systems Journal*. 1996. V. 35. N 3–4. P. 618–629.
17. WEIMER M., PAING T., AND ZANE R. Remote Area Wind Energy Harvesting for Low-power Autonomous Sensors // *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 2006, P. 1–5.
18. ВЕНТЦЕЛЬ Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000.
19. TAN L., TANG S. Energy Harvesting Wireless Sensor Node With Temporal Death: Novel Models and Analyses // *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016.
20. KHOUZANI M. H. R. AND SASWATI SARKAR. Maximum Damage Battery Depletion Attack in Mobile Sensor Networks // *IEEE Transaction on Automatic Control*, October 2011. Vol. 56, N 10, P. 1–12.
21. TIANHUI MENG, XIAOFAN LI, SHA ZHANG AND YUBIN ZHAO. A Hybrid Secure Scheme for Wireless Sensor Networks against Timing Attacks Using Continuous-Time Markov Chain and Queuing Model // *Sensors* 2016, 28 September 2016. 16, 1606.
22. VLADIMIR V. SHAKHOV. On Efficiency Improvement of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // *Proc. of 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2016)*, IEEE, Vienna, Austria, June 2016, P. 56–59.
23. ШАХОВ В. В., ЮРГЕНСОН А. Н., СОКОЛОВА О. Д. Эффективный метод генерации случайных геометрических графов для моделирования беспроводных сетей // *Прикладная дискретная математика*. 2016. № 4 (34). С. 99–109.
24. SIMJEE F. AND CHOU P. H. Everlast: Long-life, Supercapacitor-operated Wireless Sensor Node // *Proc. 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design*. ACM, 2006, P. 197–202.
25. STANLEY-MARBELL P. AND MARCULESCU D. An 0.9×1.2 “, Low Power, Energy-harvesting System with Custom Multi-channel Communication Interface // *Proc. Conference on Design, automation and test in Europe*. EDA Consortium, 2007, P. 15–20.
26. POLASTRE J., SZEWCZYK R., AND CULLER D. Telos: Enabling Ultra-low Power Wireless Research // *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, April 2005, P. 364–369.
27. CORKE P., VALENCIA P., SIKKA P., WARK T., AND OVERS L. Long-duration Solar-powered Wireless Sensor Networks // *Proc. 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*. ACM, 2007, P. 33–37.
28. MINAMI M., MORITO T., MORIKAWA H., AND AOYAMA T. Solar biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications // *The 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems*, 2005, 2007.
29. „Mica, Mica2, Mica2Dot, MicaZ, Telos,“ [El. Res.]. <http://www.xbow.com/products>.
30. „TinyOS“. [El. Res.]. <http://www.tinyos.net/>.
31. ZHANG P., SADLER C. M., LYON S. A., AND MARTONOSI M. Hardware Design Experiences in ZebraNet // *Proc. Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. ACM, 2004, P. 227–238.
32. „TurtleNet“. [El. Res.]. <http://prisms.cs.umass.edu/dome/turtlenet>.

33. DUTTA P., HUI J., JEONG J., KIM S., SHARP C., TANEJA J., TOLLE G., WHITEHOUSE K., AND CULLER D. Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments // Proc. Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2006, P. 407–415.

34. MUSIANI D., LIN K., AND ROSING T. S. Active Sensing Platform for Wireless Structural Health Monitoring // Proc. Sixth International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2007, P. 390–399.

35. PARK C., LIU J., AND CHOU P. H. Eco: an Ultra-Compact Low-Power Wireless Sensor Node for Real-Time Motion Monitoring // Proc. Information Processing in Sensor Networks. IEEE Press, April 2005, P. 398–403.

36. WANT R. An Introduction to RFID Technology // IEEE Pervasive Comput., 2006. Vol. 5, N 1, P. 25.



В 2013 году Зыбарева О.Ю. поступила на механико-математический факультет Новосибирского государственного университета и окончила его в 2017 году (бакалавриат). Спе-

циализировалась на кафедре дискретной математики и информатики.

In 2013 Zybareva O. Y. entered the Mechanics and Mathematics Department of Novosibirsk State University and finished it in 2017 (bachelor's degree). She specialized in the Department of Discrete Mathematics and Informatics.

Дата поступления — 20.06.2017