DOI: 10.55648/1998-6920-2023-17-1-66-75

Исследование радиохарвестера*

А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: Объектом исследования является альтернативный источник энергии, устройства контроля и распределения энергии применительно к интеллектуальным источникам питания беспроводных сенсорных сетей. Целью работы является разработка технического решения интеллектуального источника электропитания для повышения кибербезопасности и энергоэффективности в телекоммуникациях. Результаты работы: разработана функциональная схема интеллектуального источника электропитания беспроводных сенсорных сетей в виртуальной среде; выполнено имитационное моделирование физических процессов с применением системы автоматизированного проектирования, параметризация и оптимизация источника электропитания. Приведенные поведенческие модели допускают использование любой программной среды по схемотехническому моделированию. Разработанная поведенческая модель схемы источника питания беспроводных сенсорных сетей на основе микросхемы LT3980 может быть использована при создании аналогичных устройств. Моделирование позволяет повысить достоверность выбора оптимального решения по структуре, повысить надёжность ещё на этапах проектирования, оптимизировать технические характеристики, конструкцию разрабатываемого устройства и снизить его стоимость.

Ключевые слова: харвестер, источник электропитания, моделирование, контроль, сенсор.

Для цитирования: Сажнев А. М., Рогулина Л. Г. Исследование радиохарвестера // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 66–75. https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-66-75.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

© Сажнев А. М., Рогулина Л. Г., 2023

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; переработанный вариант – 14.12.2022; принята к публикации 17.01.2023.

1. Введение

Одним из важных вопросов организации беспроводных сенсорных сетей (БСС) является обеспечение эффективного электропитания всех элементов сенсорной сети. Требования микроминиатюризации привели к существенному уменьшению размеров сенсоров, что позволяет встраивать их непосредственно в контролируемый объект. В то же время эти требования привели к существенному усложнению подсистем электропитания сенсоров. К контроллерам управления обычно не предъявляются жесткие требования по массогабаритным характеристикам, что позволяет реализовать их в стационарном исполнении. В общем случае конструкции сенсоров не предусматривают замену элементов автономного питания, что подразумевает ограниченность времени жизни БСС скоростью разряда источника питания. Беспроводные сенсорные узлы расходуют энергию для передачи, обработки сообщений и первоначальных вычислений. Срок службы сенсорного узла сильно зависит от срока службы

^{*} Работа выполнена в рамках государственного задания № 071-03-2022-001.

элементов питания, в качестве которых достаточно часто выступают обычные аккумуляторные батареи. Энергия, расходуемая во время передачи сообщений, может составлять до 75 % от доступного энергетического ресурса. При этом должны быть решены задачи как по отправке сообщений, так и по их маршрутизации.

Концепция интеллектуальных источников питания основана на наличии доступных источников энергии в различных формах – механической (энергии вибраций, ускорения, механического напряжения), тепловой, оптической, жидкостной и радиочастотной. Отбор энергии из окружающей среды, запасание и использование ее для питания компонентов позволяет питать беспроводные сенсорные узлы и другие элементы вне зависимости от срока службы батарей питания и обеспечивать достаточную выходную мощность.

2. Модель и результаты исследования

В качестве одного из таких источников энергии в статье рассматривается радиочастотный энергохарвестер [1, 2]. Радиочастотные харвестеры могут извлекать радиочастотную энергию (РЧ) из окружающей среды и преобразовывать ее в постоянный электрический ток, который может быть использован для беспроводной подзарядки батарей или питания безбатарейных устройств [3, 4]. Радиочастотный харвестер автоматически отключает зарядку, когда на аккумуляторе или конденсаторе достигается требуемый уровень напряжения. Упрощенная функциональная схема собирателя радиочастотной энергии представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема интеллектуального источника энергии

Принимаемые радиоволны могут лежать в любом частотном диапазоне и определяются исходя из радио обстановки конкретной местности и условий применения. Это могут быть вещательные станции или любые другие со стабильным временем выхода в эфир, а также локальные радиосети. Например, одним из наиболее распространенных вариантов является использование частот для промышленных, научных и медицинских целей ISM (Industrial, Scientific and Medical), которые определены сектором радиосвязи Международного союза электросвязи ITU-R и доступны без лицензий в большинстве стран.

Некоторые из этих частот используются в беспроводных локальных сетях. Это частоты 433 МГц в Европе, России и 915 МГц в Северной Америке. Локальные сети используют частоты: 6.7 МГц, 13.5 МГц, 26.9МГц, 40.6 МГц, 433 МГц, 902 МГ, 2.4 ГГц, 5.7 ГГц и 24 ГГц. Основными преимуществами использования радиочастот ISM являются широкий спектр частот и доступность по всему миру. Они не привязаны к конкретному стандарту, тем самым дают большую свободу для реализации энергосберегающих стратегий в сенсорных сетях [5–9]. Видно, что возможности по частоте очень широкие.

Входных цепей и умножителей напряжения, работающих параллельно, может быть несколько. Они являются резонансными системами и могут работать на один общий накопитель. Принципиальная схема одного из вариантов входной цепи с емкостным накопителем приведена на рис. 2. На этом рисунке входная цепь L1, C1 с умножителем напряжения на конденсаторах C2...C11 настроена в резонанс с генератором V1 (эквивалент антенны). Моделирование процессов в таком источнике проводилось посредством использования программы LTspice XVIII. Модель умножителя напряжения состоит из десяти каскадов и построена на базе диодов Шоттки серии RB717F. Несущая частота источника радиосигналов V1 находится в полосе пропускания контура входной цепи L1, C1 с резонансной частотой:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} = \frac{1}{6.28 \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-6} \cdot 0.36 \cdot 10^{-9}}} = 8.4 \cdot 10^{6} \, \Gamma \mathrm{u} \tag{1}$$



Рис. 2. Входная цепь с умножителем напряжения n = 10

Волновое сопротивление этого контура составляет:

$$\rho = \sqrt{\frac{L1}{C1}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-6}}{0.36 \cdot 10^{-9}}} = 52.7 \text{ Om}$$
(2)

Учитывая, что для согласованной передачи энергии можно использовать либо неполное включение контура, либо волновое сопротивление контура должно составлять 50 Ом, что при емкостях умножителя C2...C11, равных 0.36 нФ, дает требуемую величину индуктивности $L = \rho^2 \cdot C = 50^2 \cdot 0.36 \cdot 10^{-9} = 0.9 \cdot 10^{-6}$ Гн, что близко к заданной на схеме.

В качестве выпрямительных диодов для умножителя напряжения используются диоды Шоттки, их вольтамперные характеристики приведены на рис. 3.

Видно, что при малых токах (менее 100 мкА) падение напряжения составляет 0.1–0.2 В. Это соизмеримо с уровнем сигнала, снимаемого с входного контура.

Для выбора числа каскадов умножителя напряжения были сняты зависимости коэффициента выпрямления от тока нагрузки, которые приведены на рис. 4.



Рис. 3. Вольтамперные характеристики диода в прямом направлении



Рис. 4. Зависимость коэффициента выпрямления умножителя от тока нагрузки

На графиках обозначено: U_0 , I_0 – постоянные составляющие напряжения и тока нагрузки (резистор R1), U_2 – амплитуда напряжения на конденсаторе C1, n – число каскадов умножения.

Таким образом, источником энергии для дальнейшего использования является выходной конденсатор умножителя напряжения *C*11, который может питать нагрузку (*R*_{*H*}) только в ограниченном интервале времени – *t* разряда, как это показано на рис. 5.



Рис. 5. Диаграмма работы харвестера

Поскольку полезная нагрузка харвестера питается импульсами напряжения, то средняя мощность на интервале разряда (работы) может существенно превышать среднюю мощность за период коммутации ключей (Т). При разряде напряжение снижается по экспоненте, и при глубине разряда до 10 % (на начальном участке) закон можно считать линейным, тогда

$$u_C(t) \cong U_{CMAX} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right),\tag{3}$$

где $\tau = C \cdot R_{H}$ – постоянная цепи разряда.

Тогда $t_{II} = 0.1 \cdot \tau$, а при C = 0.36 нФ и $R_{H} = 1$ МОм получаем: $t_{II} = 0.1 \cdot 0.36 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{6} = 36$ мкс.

Тогда структурная схема рис. 1 принимает следующий вид:



Рис. 6. Структурная схема харвестера радиосигнала

Период работы синхронных ключей определяется средней за период мощностью на выходе $\frac{P_{U}}{P_{CP}} = \frac{T}{t_{U}}$, откуда $T = t_{U} \cdot P_{U} / P_{CP}$. Так при $t_{U} = 36$ мкс, $P_{U} = 1$ мВт, $P_{cp} = 10$ мкВт, период равен $T = 36 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3} / (10 \cdot 10^{-6}) = 3.6 \cdot 10^{-3}$ с.

В качестве примера на рис. 7 приведена функциональная схема харвестера с умножителем по схеме рис. 2. На рис. 8 показаны основные эпюры, поясняющие работу схемы.



Рис. 7. Функциональная схема харвестера радиосигнала



Рис. 8. Эпюры к схеме на рис. 7

Для использования полученной РЧ-энергии применяется DC/DC преобразователь [10, 11] на базе микросхемы LT3980, которая представляет собой контроллер питания с функцией понижающего преобразования напряжения и частотой переключения от 100 кГц до 2.4 МГц. Входное напряжение может достигать 58 В, а при переходных процессах допускается 80 В.

Схема обладает малыми потерями при коммутации благодаря высокому сопротивлению встроенного транзисторного ключа (200 МОм) с усилителем. Величина тока диода контролируется на выводе DA, что необходимо для защиты цепей во время переходных процессов входного напряжения. Выходная пульсация схемы не превышает 15 мВ. Выходное напряжение задается с помощью резисторного делителя R3, R4 между выходом и выводом FB исходя

из соотношения:
$$R3 = R4 \left(\frac{U_{OUT}}{0.79} - 1 \right).$$

Регулирование напряжения на выходе обеспечивается посредством широтно-импульсной модуляции с постоянной частотой, которая задается резистором, подключенным между контактом RT и землей.

3. Заключение

Обзор принципов построения интеллектуальных источников электропитания для беспроводных сенсорных сетей и современной элементной базы показал, что уровень технологий современных батарей допускает срок службы сенсорного узла порядка нескольких лет без их замены. Доступность новых технологий для накопителей, собирателей и преобразователей энергии, энергохарвестеров, управляемых интеллектуальных контроллеров заряда и перераспределения энергии позволяет на микросистемном уровне реализовать аппаратную часть электропитающих устройств узлов беспроводной связи. После анализа доступных специализированных микросхем и компонентов было принято решение о выборе десяти ступеней в умножителе напряжения, настройке входного контура на резонансную частоту и использовании микросхемы LT3980 для работы на частотах в единицы мегагерц. По сравнению с традиционными схемами источников повышение напряжения на выходе умножителя и замена повышающего DC-DC преобразователя на понижающий позволит избежать использования MOSFET-транзисторов, которые ограничивают частоту коммутации преобразователей. Микросхема LT3980 имеет встроенный биполярный транзистор, что позволяет сократить количество внешних навесных элементов и уменьшить токи утечки.

Приведенные поведенческие модели допускают использование любой программной среды по схемотехническому моделированию. Разработанная поведенческая модель схемы источника питания беспроводных сенсорных сетей на основе микросхемы LT3980 может быть использована при создании аналогичных электропитающих устройств. Моделирование позволят повысить достоверность выбора оптимального решения по структуре, повысить надёжность ещё на этапах проектирования, оптимизировать технические характеристики, конструкцию разрабатываемого устройства и снизить его стоимость.

Литература

- 1. Nguyen C. V., Quyen T. V., Le A. M., Truong L. H., Nguyen M. T. Advanced Hybrid Energy Harvesting Systems for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2020. V. 5, № 1. P. 34–39.
- 2. *Prawiro S. Y., Murti M. A.* Wireless power transfer solution for smart charger with RF energy harvesting in public area // Proc. IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore, 5–8 February 2018. P. 103–106.
- Tsenempis I., Filios G., Katsidimas I., Nikoletseas S. Energy Harvesting and Smart Management Platform for Low Power IoT Systems // Proc. 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Santorini Island, Greece, 29–31 May 2019. P. 339–346.
- 4. *Kumar S. S., Kaviyaraj R., Narayanan L.A.* Energy Harvesting by Piezoelectric Sensor Array in Road Using Internet of Things // Proc. 5th International Conference on Advanced Computing Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 5 March 2019. P. 482–484.
- 5. Zeng Z. et al. Design of sub-gigahertz reconfigurable RF energy harvester from 22 to 4 dBm with 99,8% peak MPPT power efficiency // IEEE J. Solid-State Circuits. Sep. 2019. V. 54, № 9. P. 2601-2613.
- El Badawe M., and Ramahi O. M. Efficient Meta Surface Rectenna for Electromagnetic Wireless Power Transfer and Energy Harvesting // Progress in Electromagnetics Research. 2018. 161. P. 35–40.
- Chong G. et al. A wide-PCE-dynamic-range CMOS cross-coupled differential-drive rectifier for ambient RF energy harvesting // IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs (Early Access). Sep. 2019. P. 1–5.
- 8. Jie A. M., Nasimuddin N., Karim M. F., and Chandrasekaran K. T. A dual-band efficient circularly polarized rectenna for RF energy harvesting systems // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2019. V. 29, № 1, article e21665.
- 9. *Mansour M. M., and Kanaya H.* Novel L-slot matching circuit integrated with circularly polarized rectenna for wireless energy harvesting // Electronics. 2019. V. 8, № 6. P. 651.
- 10. Multiple-Output Buck/Boost DC–DC Converter with Duty-Cycle and Control-Current Predictor // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. V. 35, № 11. P. 12022–12039.

11. *Miao S., and Gao J.* A Family of Inverting Buck-Boost // IEEE Access. 2019. V. 7, P. 130197–130205. DOI:10.1109/access.2019.2940235.

Сажнев Александр Михайлович

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), e-mail: epus201@sibsutis.ru, ORCID ID: 0000-0001-9834-9363.

Рогулина Лариса Геннадьевна

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических устройств и техносферной безопасности, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, e-mail: largenrogulina@sibsutis.ru, ORCID ID: 0000-0002-2886-3612.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводи-

мого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Radioharvester Research

Aleksandr M. Sazhnev, Larisa G. Rogulina

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The object of the research is an alternative energy source, energy control and distribution devices in relation to intelligent power sources of wireless sensor networks. The aim of the work is to develop a technical solution for an intelligent power supply to improve cybersecurity and energy efficiency in telecommunications. Results of the work: a schematic diagram of an intelligent power supply for wireless sensor networks in a virtual environment has been developed; simulation modeling of physical processes using a computer-aided design system, parameterization and optimization of the power supply source has been performed. The given behavioral models allow the use of any software environment for circuit modeling. The developed behavioral model of the power supply circuit of wireless sensor networks based on the LT3980 chip can be used to create similar devices. Modeling makes it possible to increase the reliability of choosing the optimal solution for the structure, increase reliability even at the design stages, optimize the technical characteristics, design of the device being developed and reduce its cost.

Keywords: harvester, electric power source, simulation, control, sensor.

For citation: Sazhnev A. M., Rogulina L. G. Radioharvester research (in Russisn). Vestnik Sib-GUTI, 2023, vol. 17, no. 1. pp. 66-75. https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-66-75.



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License © Sazhnev A. M., Rogulina L. G., 2023

The article was submitted: 28.03.2022; revised version: 14.12.2022; accepted for publication 17.01.2023.

References

- 1. Nguyen C. V., Quyen T. V., Le A. M., Truong L. H., Nguyen M. T. Advanced Hybrid Energy Harvesting Systems for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Advances in Science. *Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 1, 2020, pp. 34-39.
- Prawiro S.Y., Murti M.A. Wireless power transfer solution for smart charger with RF energy harvesting in public area. *Proceedings of the 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Singapore, 5-8 February 2018, pp. 103-106.
- 3. Tsenempis I., Filios G., Katsidimas I., Nikoletseas S. Energy Harvesting and Smart Management Platform for Low Power IoT Systems. *Proceedings of the 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Santorini Island, Greece, 29-31 May 2019, pp. 339-346.
- Kumar S.S., Kaviyaraj R., Narayanan L.A. Energy Harvesting by Piezoelectric Sensor Array in Road Using Internet of Things. *Proceedings of the 2019 5th International Conference on Advanced Computing Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India, 5 March 2019, pp. 482-484.
- 5. Zeng Z. et al. Design of sub-gigahertz reconfigurable RF energy harvester from 22 to 4 dBm with 99,8% peak MPPT power efficiency. *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 9, Sep. 2019, pp. 2601-2613.
- 6. El Badawe, M. and Ramahi, O.M. (2018) Efficient Meta Surface Rectenna for Electromagnetic Wireless Power Transfer and Energy Harvesting. *Progress in Electromagnetics Research*, 161. pp. 35–40.
- 7. Chong G. et al. A wide-PCE-dynamic-range CMOS cross-coupled differential-drive rectifier for ambient RF energy harvesting. *IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs (Early Access)*, Sep. 2019, pp. 1-5.
- 8. Jie A. M., Nasimuddin N., Karim M. F., and Chandrasekaran K. T. A dual-band efficient circularly polarized rectenna for RF energy harvesting systems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 1, article e21665, 2019.
- 9. Mansour M. M. and Kanaya H. Novel L-slot matching circuit integrated with circularly polarized rectenna for wireless energy harvesting. *Electronics*, vol. 8, no. 6, 2019, p. 651.
- 10. Multiple-Output Buck/Boost DC–DC Converter with Duty-Cycle and Control-Current Predictor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 11, Nov. 2020, pp. 12022-12039.
- 11. Miao S. and Gao J. A Family of Inverting Buck-Boost. *IEEE Access*, v. 7, 24 September 2019, pp. 130197-130205.

Alexander M. Sazhnev

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Technosphere Security, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: epus201@sibsutis.ru, ORCID ID: 0000-0001-9834-9363.

Larisa G. Rogulina

Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Technosphere Security Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: largen-rogulina@sibsutis.ru, ORCID ID: 0000-0002-2886-3612.