

# ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: 10.25586/RNU.V9I187.20.02.P.122

УДК 621.398

Р.А. Башмаков, Д.Н. Олейников

---

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РАЗРЯДА ИСТОЧНИКА ТОКА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УЗЛА БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

---

Рассматриваются проблемы автономного питания узлов беспроводной сенсорной сети. Выявлен и обоснован эффект, возникающий на окончательных сроках эксплуатации химических источников тока. Описан эксперимент, демонстрирующий значительное влияние глубины разряда источника питания на работу узла беспроводной сенсорной сети.

*Ключевые слова:* беспроводная сенсорная сеть, узел беспроводной сенсорной сети, автономное питание, LoRa.

R.A. Bashmakov, D.N. Olejnikov

---

## INFLUENCE OF THE DEGREE OF THE DISCHARGE OF THE SOURCE OF THE CURRENT ON OPERATION OF A WIRELESS SENSOR NETWORK ASSEMBLY

---

The article deals with the problems of Autonomous power supply of wireless sensor network nodes. The effect that occurs on the final life of chemical current sources is identified and justified. An experiment is described that demonstrates a significant effect of the power source discharge depth on the operation of a wireless sensor network node.

*Keywords:* wireless sensor network, wireless sensor network node, autonomous power supply, LoRa.

### *Введение*

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из пространственно распределенных автономных датчиков, которые служат для мониторинга физических или экологических условий, таких как температура, звук, давление и т.д., и совместно передают свои данные через сеть в пункт сбора информации. Более современные сети являются двунаправленными, что позволяет контролировать активность датчиков. Развитие беспроводных сенсорных сетей было мотивировано военными приложениями, такими как наблюдение за полем боя; сегодня такие сети используются во многих промышленных и потребительских приложениях, таких как мониторинг и управление производственными процессами, мониторинг работоспособности машин [6].

Типовой состав узлов БСС включает в себя сенсорные и исполнительные устройства, которые необходимо устанавливать в непосредственной близости к месту сбора данных или осуществления воздействия актуаторами. По этой причине топология и структура БСС в значительной степени обусловлены характеристиками окружающей среды [3; 10; 11].

Одной из наиболее существенных проблем, возникающих при работе БСС, является нестабильность радиоканала, что отражается на дальности приема и передачи. Это приво-

Башмаков Р.А., Олейников Д.Н. Влияние степени разряда источника тока...

дит к уменьшению связности сети, что служит основной причиной выхода из строя БСС, так как связность сети определяет возможность передачи информации от узла источника к получателю.

Несмотря на то что наиболее важными характеристиками БСС являются надежность и функционал, существует ряд ключевых вопросов, возникающих при разработке БСС, обусловленных необходимостью обеспечить приемлемые гравиметрические и объемные показатели, устойчивость к агрессивным воздействиям окружающей среды, диапазон рабочих температур, ресурс, безопасность, скорость разработки и т.д. При этом большое количество узлов БСС, теоретически достигающее миллионов единиц [15], определяет особенно строгие требования к стоимости конечного продукта. Это приводит к использованию комплектующих, имеющих компромиссные возможности, что значительно проявляется в выборе химических источников тока (ХИТ).

Цель настоящей работы состоит в изучении явлений, возникающих при изменении напряжения на выводах автономного источника питания, что соответствует постепенному разряду в ходе функционирования узла БСС.

#### Постановка проблемы

Работоспособность БСС зависит от состояния источников питания [1], поэтому на практике большое внимание уделяется расчетам, связанным со временем автономной работы. Такие расчеты часто основаны на законе Пейккерта [14]:

$$I^n t = c, \quad (1)$$

где  $I$  – ток, потребляемый нагрузкой;  $n$  – константа Пейккерта;  $t$  – время функционирования;  $c$  – емкость ХИТ.

При этом остается неучтенным тот факт, что потребляемый ток в узлах БСС не является постоянной величиной, как указано на рисунке 1 [5], и изменяется в широком динамическом диапазоне, характерное значение которого от 30 до 40 дБ. Также бывают длительные перерывы в работе аккумулятора, а константные значения емкости и экспоненты Пейккерта меняются в процессе работы [8].

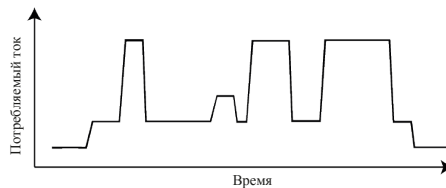


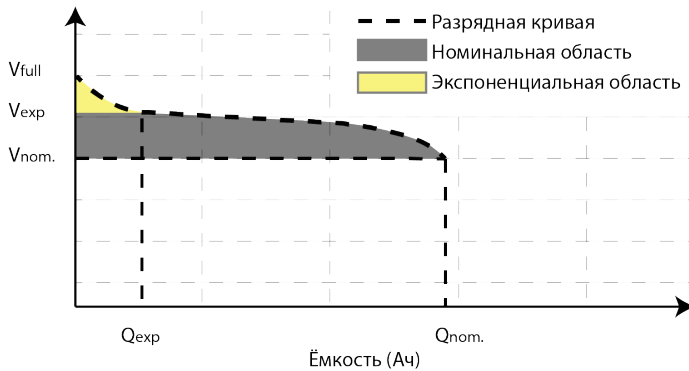
Рис. 1. Характерная циклограмма энергопотребления узла беспроводной сенсорной сети

Кроме того, электрофизические характеристики ХИТ изменяются в течение всего срока службы (рис. 2) [13].

Разрядное напряжение аккумулятора зависит также от внутреннего сопротивления, обусловленного электронными, а также ионными потоками в проводящих частях, включая электролит, токоприемники и активные массы [7]:

$$U_{\text{разрядное}} = U_{\text{разомкнутой цепи}} - I_{\text{разряда}} R_{\text{ХИТ при разряде}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{разрядное}}$  – напряжение на выводах ХИТ при подключении нагрузки;  $U_{\text{разомкнутой цепи}}$  – напряжение холостого хода;  $I_{\text{разряда}}$  – ток, потребляемый нагрузкой.



**Рис. 2.** Типовая разрядная характеристика ХИТ

С учетом падения напряжения на электродах, вызванных электрохимическими реакциями, называемыми поляризацией [13]

$$U_{\text{разрядное}} = U_{\text{разомкнутой цепи}} - V_{\text{ор+}} - V_{\text{ор-}} - I_{\text{разряда}} R_{\text{ХИТ при разряде}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{ор+}}$  и  $V_{\text{ор-}}$  — падение напряжения на положительном и отрицательном электродах соответственно.

Полный учет электрохимических явлений, протекающих в ХИТ, приводит к более сложным аналитическим зависимостям напряжения на выводах ХИТ, поэтому на практике пользуются разрядными кривыми (РК) и уравнениями РК [2; 13]. Экспериментально определено, что наиболее общее уравнение РК имеет вид [4]

$$U_{\text{разрядное}} = E_0 - R_{\text{ХИТ при разряде}} I_{\text{разряда}} - K_{f_2}(i, q) + Af_3q. \quad (4)$$

Четыре слагаемых в формуле (4) представляют собой соответственно идеальную ЭДС, омическое сопротивление, поляризацию и релаксационную поляризацию.

Таким образом, видно, что часть энергетических запасов может быть недоступна для отдельных компонентов узла БСС в связи с различием между выходными напряжениями на выводах ХИТ в разных режимах работы узла БСС, сменяющихся в соответствии с выполнением текущей задачи. Поскольку максимальная потребляемая сила тока в типовом узле БСС соответствует функционированию трансивера, то в течение приема и отправки данных возможны эффекты, препятствующие корректной работе БСС.

#### Экспериментальная часть

Для изучения влияния степени разряда ХИТ на приемопередающую способность была составлена схема (рис. 3), включающая модем [16] и отладочную плату [17].

Встроенное программное обеспечение [18] инициализирует периферийное оборудование и циклически отправляет пакет одинакового размера и содержания.

Согласно источнику [16], мощность передачи сигнала зависит от программной настройки, которая происходит путем выбора необходимого значения из фиксированного дискретного списка. Обнаруженное в ходе эксперимента противоречие состоит в том, что измерения указывают на плавное снижение мощности по мере уменьшения напряжения питания, независимо от заданных разработчиком настроек (рис. 4).

Башмаков Р.А., Олейников Д.Н. Влияние степени разряда источника тока...

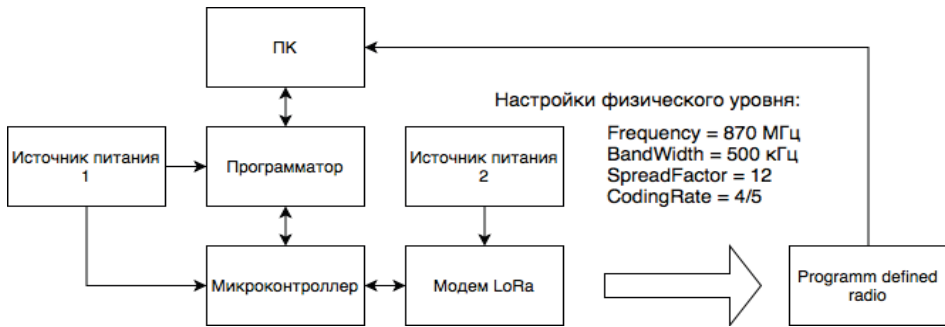


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

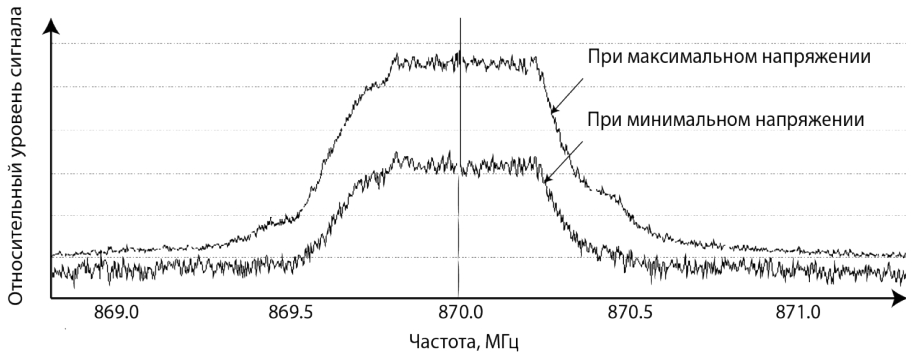


Рис. 4. Спектры зафиксированных сигналов при максимальном и минимальном напряжениях

Элементы схемы имеют гальваническую связь, но подключены к разным источникам питания, вследствие чего стало возможным определение влияния изменения напряжения на работу приемопередающей части.

Установленная разница в мощности сигналов при прочих равных условиях соответствует значительному уменьшению максимальной дальности передачи данных [9].

#### Заключение

В даташите от производителя [16] нет упоминания о том, что изменение напряжения в допустимом диапазоне значительно влияет на параметры приема или передачи. Отсутствие этой информации является характерным для недорогих и распространенных модемов, несмотря на то, что подобные явления наблюдаются в разнообразных исследованиях [12]. Пренебрежение изучаемым в настоящей работе фактором при расчете энергетических процессов в узлах БСС может стать причиной сложно уловимых неисправностей в работе БСС, возникающих на поздних этапах эксплуатации. Дальнейшее изучение этих неисправностей может быть направлено на возникающие вопросы о степени искажения сигнала, нарушения в связности БСС, увеличения вероятности битовой ошибки, ускорения разряда ХИТ.

## Литература

1. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2010. № 40.
2. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
3. Бузюков Л.Б., Окунева Д.В., Парамонов А.И. Исследование характеристик самоорганизующейся беспроводной сети при различных способах размещения узлов // Труды учебных заведений связи. 2016. № 2 (1). С. 28–32.
4. Галушкин Н.Е., Галушкина Н.Н. Анализ эмпирических зависимостей, описывающих разряд щелочных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2005. № 5 (1). С. 43–50.
5. Зеленин А.Н., Власова В.А. Анализ энергоциклов узлов беспроводных сенсорных сетей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 57. С. 13–17.
6. Интернет вещей: монография / А.В. Росляков [и др.]. Самара: ПГУТИ; Ас Гард, 2014. 342 с.
7. Коровин Н.В., Скундина А.М. Химические источники тока. М.: Изда-во МЭИ, 2003. 740 с.
8. Нечитайло Ю.А. Методика определения состояния аккумуляторной батареи гибридного автомобиля // Вестник СевНТУ. 2012. № 134. С. 139–142.
9. Шахнович И. Миф о загужении свободного пространства: чего не писал Г.Т. Фриис // Первая миля. 2014. № 2. С. 40–45.
10. Gian Q.A. Flexible Configuration of Wireless Sensor Network for Monitoring of Rainfall-Induced Landslide // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2018. No. 12 (3). P. 1030–1036.
11. Hicham O. MG-Leach: An Enhanced Leach Protocol for Wireless Sensor Network // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2019. № 9 (4). P. 3139–3145.
12. Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks / G. Zhou [et al.] // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services – MobiSYS '04. Oulu, 2004. P. 125–138.
13. Li S., Ke B. Study of Battery Modeling Using Mathematical and Circuit Oriented Approaches // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, 2011. P. 1–8.
14. Mehul O., Jason P., Zhao R. A Comparative Study of Lithium-Ion Batteries. University of Southern California. AME 578 Project, 2010. 31 s.
15. Mikhaylov K., Juha P., Haenninen T. Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology // In Proceedings of the 22<sup>th</sup> European Wireless Conference. Oulu, 2016. P. 1–6.
16. Semtech // SX1272, Long Range, Low Power RF Transceiver 860-1000 MHz with LoRa Technology. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1272> (date of the application: 18.03.2020).
17. STM32 Nucleo-64 Development Board with STM32L152RE MCU, Supports Arduino and ST Morpho Connectivity // St.com. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l152re.html> (date of the application: 22.03.2020).
18. SX1272 and STM32 Cyclic Sending // Github.com. URL: <https://github.com/Roman-Bashmakov/sx1272> (date of the application: 22.03.2020).

## Literatura

1. *Akimov E.V., Kuznetsov M.N.* Veroyatnostnye matematicheskie modeli dlya otsenki nadezhnosti besprovodnykh sensorykh setej // Trudy MAI. 2010. № 40.
2. *Bagotskij V.S.* Osnovy ehlektrokhimii. M.: Khimiya, 1988. 400 s.
3. *Buzyukov L.B., Okuneva D.V., Paramonov A.I.* Issledovanie kharakteristik samoorganizuyushheysya besprovodnoj seti pri razlichnykh sposobakh razmeshheniya uzlov // Trudy uchebnykh zavedenij svyazi. 2016. № 2 (1). S. 28–32.
4. *Galushkin N.E., Galushkina N.N.* Analiz ehmpiricheskikh zavisimostej, opisyyvayushhikh razryad shhelochnykh akkumulyatorov // Ehlektrokhimicheskaya ehnergetika. 2005. № 5 (1). S. 43–50.
5. *Zelenin A.N., Vlasova V.A.* Analiz ehnergotsiklov uzlov besprovodnykh sensorykh setej // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij. 2012. № 57. S. 13–17.
6. Internet veshhej: monografiya / A.V. Roslyakov. Samara: PGUTI; Asgard, 2014. 342 s.
7. *Korovin N.V., Skundina A.M.* Khimicheskie istochniki toka. M.: Izdatel'stvo MEI, 2003. 740 s.
8. *Nechitajlo Yu. A.* Metodika opredeleniya sostoyaniya akkumulyatornoj batarei gibridnogo avtomobilya // Vestnik SevNTU. 2012. № 134. S. 139–142.
9. *Shakhnovich I.* Mif o zatukhanii svobodnogo prostranstva: chego ne pisal G.T. Friis // Pervaya milya. 2014. № 2. S. 40–45.
10. *Gian Q.A.* Flexible Configuration of Wireless Sensor Network for Monitoring of Rainfall-Induced Landslide // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2018. No. 12 (3). P. 1030–1036.
11. *Hicham O.* MG-Leach: An Enhanced Leach Protocol for Wireless Sensor Network // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2019. № 9 (4). P. 3139–3145.
12. Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks / G. Zhou [et al.] // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services – MobiSYS '04. Oulu, 2004. P. 125–138.
13. *Li S., Ke B.* Study of Battery Modeling Using Mathematical and Circuit Oriented Approaches // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, 2011. P. 1–8.
14. *Mehul O., Jason P., Zhao R.* A Comparative Study of Lithium-Ion Batteries. University of Southern California. AME 578 Project, 2010. 31 s.
15. *Mikhaylov K., Juha P., Haenninen T.* Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology // In Proceedings of the 22<sup>th</sup> European Wireless Conference. Oulu, 2016. P. 1–6.
16. Semtech // SX1272, Long Range, Low Power RF Transceiver 860-1000 MHz with LoRa Technology. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1272> (date of the application: 18.03.2020).
17. STM32 Nucleo-64 Development Board with STM32L152RE MCU, Supports Arduino and ST Morpho Connectivity // St.com. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-1152re.html> (date of the application: 22.03.2020).
18. SX1272 and STM32 Cyclic Sending // Github.com. URL: <https://github.com/Roman-Bashmakov/sx1272> (date of the application: 22.03.2020).