

## ПРОТОКОЛ БЕСПРОВОДНОГО СБОРА ЭНЕРГОДАНЫХ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*А.В. Кычкин*

Разработка новых протоколов беспроводного сбора и передачи энергоданных для систем мониторинга состояния электроэнергетических сетей (ЭЭС) в реальном времени выглядит перспективным и актуальным направлением исследований в связи с возрастающим противоречием между потребностями в информатизации отечественной энергетики и состоянием доступных информационно-измерительных систем. В статье рассматривается подход к организации протокола беспроводного сбора данных в системе мониторинга электроэнергетической сети. Рассмотрены основные режимы мониторинга компонентов ЭЭС, в том числе мониторинг состояния генератора, находящегося в автономном режиме, мониторинг запуска генератора, характеризующиеся высокой скоростью получения и обработки энергоданных. Приведена типовая реализация подключения модулей сбора данных в систему мониторинга сегмента ЭЭС. На основании схемы подключения модулей сбора данных в систему мониторинга ЭЭС разработан алгоритм беспроводного сбора данных, реализованный временной диаграммой работы локально синхронизированных беспроводных сетей с доступом узлов в сети к радиоканалу, синхронизированному по времени. Синхронный доступ к радиоканалу позволяет сократить потребление энергии, продлевая срок автономной работы модулей сбора данных. Предлагаемый способ разделения множеством модулей сбора данных системы мониторинга одного измерительного канала связи по времени подразумевает, что разные модули, находясь в одном частотном интервале, используют разные временные интервалы для передачи информации. Протокол предоставляет каждому модулю полный доступ к интервалу частоты в течение короткого периода времени. Такой подход к организации распределенной системы мониторинга является эффективным в построении логики взаимодействия фиксированного числа элементов удаленного сбора данных, обеспечивая адекватную оценку состояния сети. Проведена оптимизация протокола сбора данных и его исследование в части определения максимального числа подключаемых модулей. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук, МК-5279.2014.8 «Синтез эффективных технологий удаленного мониторинга и управления состоянием интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью».

*Ключевые слова:* электроэнергетическая сеть, беспроводная связь, мониторинг, режим реального времени, сетевой протокол.

### **Введение**

Современная электроэнергетическая сеть (ЭЭС) представляет собой сложную техническую систему, характеризующуюся различными форматами измерительных и расчетных данных, атрибутивными параметрами объектов генерации и потребления, их свойствами [1]. ЭЭС содержит измерительные, управляющие и защитные микропроцессорные средства, функционирующие в режиме реального времени. Для корректной, своевременной и точной работы всех информационно-измерительных и управляющих компонент ЭЭС необходимо наличие единой информационной телекоммуникационной структуры, предоставляющей возможности удаленной передачи данных о состоянии энергетических объектов и процессов (энергоданных) в режиме реального времени. Современные протоколы связи для ЭЭС, как правило, основаны на механизмах случайного доступа к среде передачи, что не может гарантировать синхронное управление узлами сети при беспроводной связи. Кроме этого, беспроводные технологии связи построения сенсорных сетей также редко применяются в ЭЭС из-за ограниченного радиуса действия и скорости передачи данных [2]. Проводная связь часто требует развития инфраструктуры сети, что затруднительно в силу ряда факторов: организационных, экономических, технических и т. п. В связи с этим разработка новых протоколов беспроводного сбора и передачи энергоданных для систем мониторинга состояния ЭЭС в реальном времени выглядит перспективным и актуальным направлением исследований.

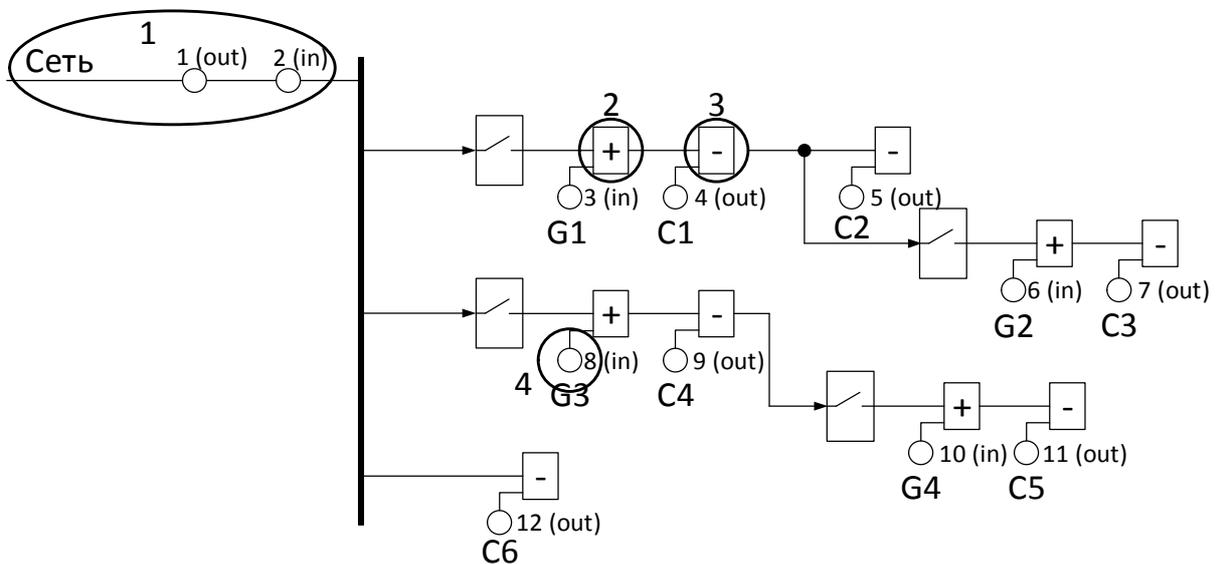
## 1. Организация системы мониторинга ЭЭС

Рассмотрим основные режимы мониторинга компонентов ЭЭС.

Мониторинг состояния генератора, находящегося в автономном режиме. В этом случае генератор информационно подключен к потребителю и отключен от внешней сети.

Мониторинг запуска генератора. С помощью локального или дистанционного задания входных параметров генератора (скорость вращения, вращающий момент и т. д.) система управления ЭЭС фиксирует изменение параметров (частота, амплитуда и т. д.) выходного напряжения в темпе, соответствующем протекающим в сети процессам для переходного режима. После фиксации установившегося режима генератора происходит синхронизация измерений и параллельная работа со всеми остальными группами оборудования и сетью. В этом случае возможны две ситуации:

Энергоэффективное управление объектами ЭЭС осуществляется на основании энергоданных, получаемых системой мониторинга с каждого объекта в режиме реального времени [3]. Типовая реализация подключения модулей сбора данных в систему мониторинга сегмента ЭЭС схематично показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема подключения модулей сбора данных в систему мониторинга ЭЭС**

Выделенный блок 1 содержит два модуля сбора данных (1 (out) и 2 (in)), выполняющих функции контроля подключения внешней ЭЭС, этот блок выполняет функции сервера сети. Для регистрации параметров генераторов G1–G4 используются модули сбора данных 3 (in), 6 (in), 8 (in), 10 (in). На потребителях C1–C6 установлены модули 4 (out), 5 (out), 7 (out), 9 (out), 11 (out), 12 (out). Модули сбора данных, обозначенные (in), осуществляют регистрацию и передачу измерительной и командной информации о блоках генерации электроэнергии в ЭЭС, а обозначенные (out) – о потреблении энергии.

## 2. Построение протокола беспроводного сбора данных для системы мониторинга ЭЭС в режиме реального времени

ЭЭС является сложным объектом, распределенным в пространстве, и сетевое обеспечение системы мониторинга на основе беспроводного сбора данных должно учитывать этот фактор [4]. Важнейшей задачей моделирования протокола является оценка возможности работы системы беспроводного сбора данных в реальном времени. Известно, что основным параметром такой оценки выступает своевременность, включающая в себя параметры актуальности и временной предсказуемости [5].

С позиций теории систем реального времени будем понимать под эффективностью работы системы мониторинга ЭЭС, что любые данные, поступающие с первичных модулей сбора, в текущий момент времени должны быть последними и соответствовать текущему состоянию генератора или потребителя. Тогда временная предсказуемость при сборе данных заключается в том,

что в каждый последующий момент времени система мониторинга должна знать, какие операции по передаче/приему данных будет выполнять на следующем этапе, за какое время осуществляется передача/прием данных между узлами системы.

На основании схемы подключения модулей сбора данных в систему мониторинга ЭЭС разработан алгоритм беспроводного сбора данных, реализованный временной диаграммой работы локально синхронизированных беспроводных сетей с доступом узлов в сети к радиоканалу, синхронизированному по времени. Синхронный доступ к радиоканалу позволяет сократить потребление энергии, продлевая срок автономной работы модулей сбора данных. При этом вводятся следующие ограничения: рассматривается взаимодействие элементов сети только на канальном уровне; некоторые параметры сети не берутся во внимание в связи с их малой значимостью.

Рассмотрим алгоритм сбора данных более подробно. Как было показано выше, система мониторинга ЭЭС состоит из нескольких модулей сбора. Кроме этого необходим центральный узел [6], осуществляющий синхронизацию измерений и формирование управляющих сигналов для контроллеров генераторов, потребителей и защитной автоматики. Модули сбора данных должны выполнять следующие функции: обработка сигнала напряжения/тока, поступающего на вход путём аналого-цифрового преобразования (АЦП); сохранение данных от АЦП в памяти модуля; отправка накопленных данных в блок синхронизации и управления; сброс таймера модуля для синхронизации с системой мониторинга [7].

Выделим количественные характеристики модуля сбора данных: время отправки архива измерительной информации, отсчитываемое от момента синхронизации системы; уникальный идентификатор модуля, который добавляется в сообщение; время АЦП. Выделим функции блока синхронизации и управления: приём сообщений от модулей сбора и последующая отправка данных на сервер ЭЭС; отправка синхронизирующего сообщения модулям сбора, которое приводит к сбросу внутренних таймеров. Сброс таймеров необходим для предотвращения накопления ошибки рассогласования времени измерений несколькими модулями.

С учетом территориальных особенностей локальных ЭЭС примем в качестве достаточных следующие характеристики аппаратного обеспечения связи: скорость беспроводной передачи сообщений в системе мониторинга – 1 Мбит/с; расстояние между узлами системы до 10 км; частота дискретизации – 1 кГц. Временные характеристики компонентов аппаратного обеспечения в аспекте сетевого взаимодействия приведены в таблице.

При передаче данных в системе мониторинга используются сообщения двух типов. Сообщение первого типа содержит данные АЦП и отправляется модулем сбора в блок синхронизации. Данное сообщение содержит следующие поля: заголовок сообщения (7 байт), размер сообщения в байтах (1 байт), сетевой адрес модуля сбора данных (1 байт), инкрементальный индекс сообщения (1 байт), данные АЦП ( $n$  байт, где  $n = [\text{Количество АЦП между отправками сообщений}] \cdot V_{\text{АЦП}}$ ), контрольная сумма (2 байта).

**Временные характеристики беспроводных узлов системы мониторинга ЭЭС**

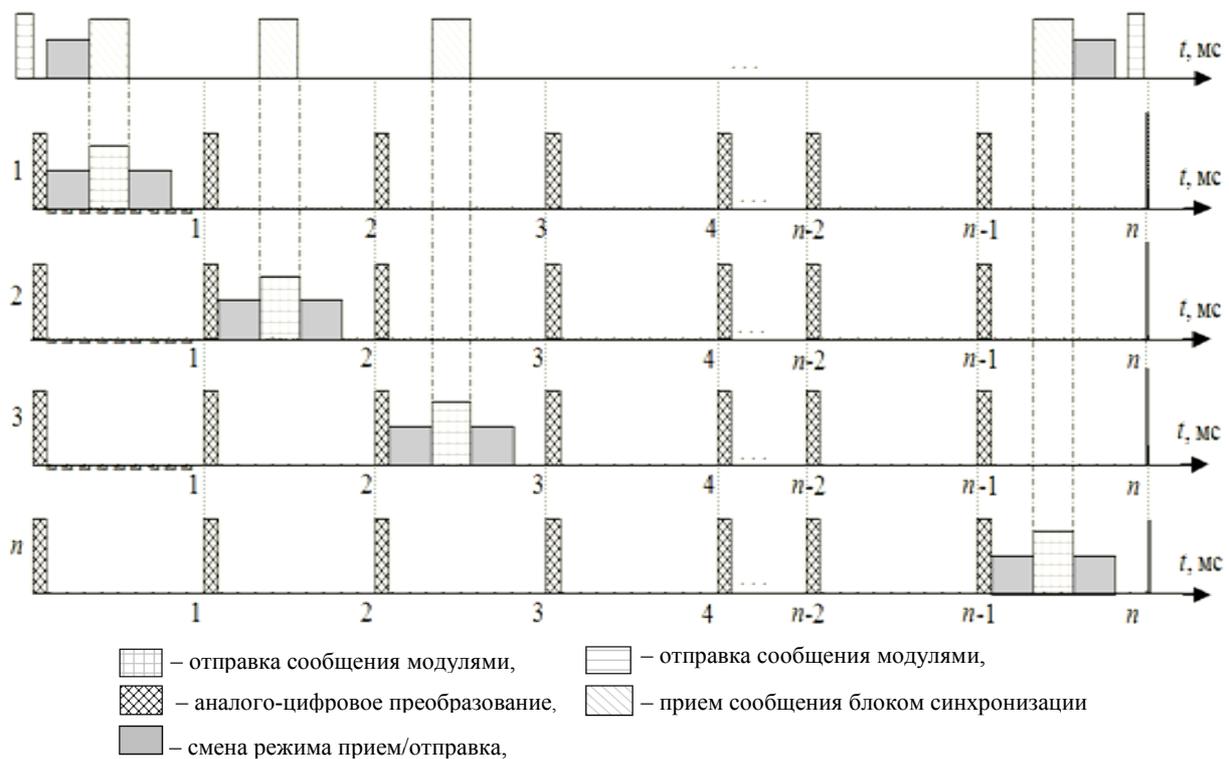
Наименование	Обозначение	Значение
Время перехода беспроводного модуля сбора данных из состояния чтения сообщения в состояние отправки и наоборот	$T_{Tx} = T_{Rx}$	250 мкс
Время АЦП	$T_{\text{АЦП}}$	80 мкс
Время сброса таймеров модулей после получения ими синхронизирующего пакета	$T_{\text{reset}}$	7 мкс
Время отправки синхронизирующего пакета фиксированного размера	$T_{\text{sync}}$	104 мкс
Объём данных результата одного АЦП, кодирующего значение полной (активной/реактивной) мощности	$V_{\text{АЦП}}$	1 байт
Частота микроконтроллеров модулей, используемых для АЦП	$F_{\text{CPU}}$	16 МГц
Максимальный разброс частот микроконтроллеров модулей сбора данных	$E_{\text{CPU}}$	1,25 %

Сообщение второго типа используется для синхронизации измерений и отправки сообщений модулями сбора данных и передается блоком синхронизации в широкополосном режиме. Содержит следующие поля: заголовок сообщения (7 байт), содержимое пакета (команда синхронизации – 4 байта), контрольная сумма (2 байта).

Процессы внутри модулей протекают в соответствии со следующими возможными задачами: переход из состояния отправки в состояние приёма сообщений; переход из состояния приёма в состояние отправки сообщений; АЦП напряжения/тока; сброс таймеров микроконтроллеров.

Предлагаемый способ разделения множеством модулей сбора данных системы мониторинга одного измерительного канала связи по времени подразумевает, что разные модули, находясь в одном частотном интервале, используют разные временные интервалы для передачи информации. Протокол предоставляет каждому модулю полный доступ к интервалу частоты в течение короткого периода времени. Такой подход к организации распределенной системы мониторинга является достаточно эффективным в построении логики взаимодействия фиксированного числа элементов удаленного сбора данных, обеспечивая адекватную оценку состояния сети.

Временная диаграмма, иллюстрирующая работу предложенного протокола передачи данных от модулей к блоку синхронизации, приведена на рис. 2. На рисунке сверху показана ось времени с обозначением режимов работы блока синхронизации. Временные оси 1... $n$  иллюстрируют работу модулей сбора данных. Отсчеты на осях времени 1... $n$  являются разделенными временными интервалами.



**Рис. 2. Временная диаграмма протокола сбора данных**

Выделим следующие достоинства данной архитектуры:

- полная занятость всех интервалов для отправки данных с измерениями;
- низкая вероятность возникновения ошибки при отправке пакетов измерений, так как переход модуля беспроводной передачи из режима приема в режим передачи и обратно осуществляется в одном временном интервале. Время смены режима до и после отправки занимает 50 % интервала, что гарантирует защиту от одновременной отправки сообщений несколькими модулями.

Однако имеются недостатки: малый объем измерительной информации, отправляемый в сообщении; малое возможное количество модулей в сети, так как значительно ограничено время передачи измерений одним модулем в соответствующем временном интервале.

### 3. Оптимизация и исследование протокола сбора данных для мониторинга локального сегмента ЭЭС

Оптимизация протокола подразумевает, что модули выполняют переход из одного состояния в другое в отдельном временном интервале, а не в интервале с отправкой сообщения. В этом случае достигается следующее улучшение характеристик:

- увеличение объема измерительной информации, отправляемой модулем;
- увеличение количества модулей в системе мониторинга.

Однако существуют и недостатки: при большом количестве модулей в системе мониторинга ЭЭС повышается вероятность появления ошибки, так как отправка сообщения занимает почти весь интервал времени, что приводит к наложению друг на друга смежных процессов отправки сообщений от различных модулей при опережении счетчика таймера одного из микроконтроллеров [6]. Данное явление вызывает коллизию, что требует ограничения числа модулей сбора; использование нескольких временных интервалов для дополнительных согласующих действий, не связанных с отправкой измерений. Временная диаграмма оптимизированного протокола сбора данных приведена на рис. 3.

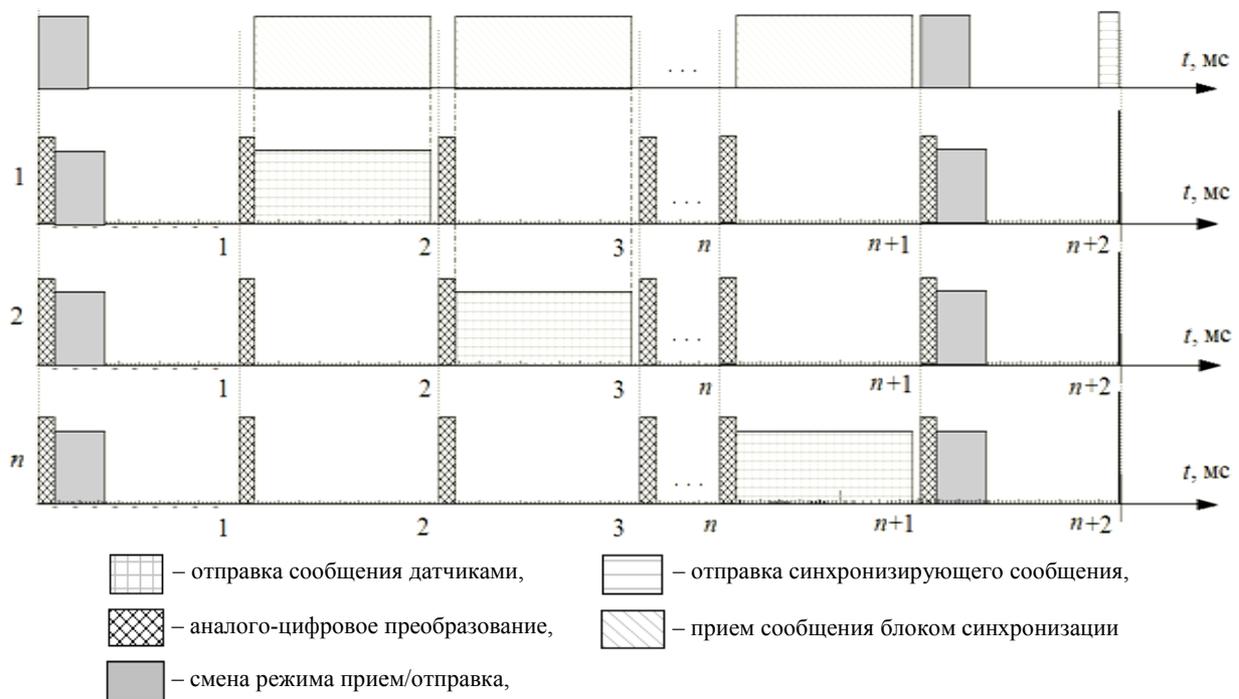


Рис. 3. Временная диаграмма оптимизированного протокола сбора данных системы мониторинга

Расчёт характеристик сети и поиск оптимального количества синхронизаций между отправками сообщений на основе предложенного протокола сбора данных проведем на основании следующих характеристик: объем данных, передаваемых от модулей согласно формату пакета, и 2 байта, накопленных модулем до и после синхронизации:

$$V_{\text{send}} = 8(9 + 3 + n + 2) \text{ [бит]}; \tag{1}$$

период отправки данных:

$$T = n + 2 \text{ [мс]}, \tag{2}$$

где  $n$  – количество модулей сбора данных.

Инкремент времени в модулях происходит каждый 16 000-й такт ( $K = 16\ 000$ ) микроконтроллера. Максимальное отклонение микроконтроллеров модулей от средней частоты  $E_{\text{CPU}} = 1,25\ %$  при частоте МК  $F_{\text{CPU}}$ . Тогда максимальное время, на которое могут отклониться таймеры микроконтроллеров за одну секунду:

$$T_E = [((F_{\text{CPU}} + (F_{\text{CPU}} \cdot E_{\text{CPU}})) / K) - (F_{\text{CPU}} / K)] \cdot [K(1 / F_{\text{CPU}})] = 0,0125 \text{ с}, \tag{3}$$

при этом  $(F_{\text{CPU}} + (F_{\text{CPU}} \cdot E_{\text{CPU}})) / K$  – количество итераций инкремента таймера микроконтроллера

при ошибке счётчика за 1 с;  $F_{CPU}/K$  – количество итераций инкремента таймера без ошибки счётчика за 1 с;  $K(1/F_{CPU})$  – время между итерациями, с.

Определим максимальное количество модулей в сети, работающей без накопления времени отклонения таймеров. Данные от одного модуля отправляются только в одном временном интервале, что накладывает ограничения на расчёт максимального количества модулей. Время отправки, мкс, определим согласно выражению:  $T_{send} \leq 1000 - T_{АЦП}$ . Из приведенного выше выражения получим:  $n \leq 101$ . Следовательно, в беспроводной сети с предложенной организацией протокола сбора данных можно использовать максимум до 101 модуля.

Для того чтобы исключить ошибку одновременной передачи измерительной информации, которая обусловлена разбросом времени счётчиков таймера микроконтроллеров, рассчитаем максимально допустимое время, на которое могут отклониться модули, не теряя работоспособности. Это время определим согласно

$$T_{E_{max}} = T_{АЦП} + (1000 - T_{send} - T_{АЦП}); \quad (4)$$

$$T_{E_{max}} = 1000 - (14 + n)8. \quad (5)$$

При максимальном количестве модулей получим  $T_{E_{max}} = 80$  мкс.

Далее определим максимальное количество временных интервалов между синхронизациями:

$$N_{TS} = n + 2 \text{ при ограничении } T_{E_{max}} \geq T_E n.$$

Из ограничения следует, что  $n \leq 43,31$ . Примем  $N_{TS} = 45$ .

Если ошибка  $E_{CPU}$  является переменной, то последнее выражение имеет следующий вид:

$$N_{TS} \leq 888/(8 + E_{CPU} \cdot 1000) + 2. \quad (6)$$

### **Заключение**

Предложенный протокол беспроводного сбора данных обеспечивает эффективную работу системы мониторинга локальной ЭЭС. Это достигается за счет беспроводной передачи измерительной информации от генераторов и потребителей сети в режиме реального времени. Обеспечение гарантированной доставки данных с модулей сбора на центральный блок системы мониторинга сети осуществляется за счет локально синхронизированных беспроводных сетей с доступом узлов к радиоканалу, синхронизированному по времени. Полученные оценки максимального количества временных интервалов между синхронизациями в сети и максимальное число модулей сбора позволяют судить о целесообразности построения на основе предложенного протокола локальных сегментов, объединение которых в дальнейшем позволит реализовать эффективную информационно-телекоммуникационную инфраструктуру территориально распределенных ЭЭС.

### **Литература**

1. Ледин, С.С. *Интеллектуальные сети SmartGrid – будущее российской энергетики* / С.С. Ледин // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. – 2010. – № 11 (16). – С. 4–8.
2. Savarese, C. *Location in distributed ad-hoc wireless sensor networks* / C. Savarese, J.M. Rabaey, J. Beutel // *Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 2001. – Vol. 4. – P. 2037–2040.
3. Новиков, В.В. *Интеллектуальные измерения на службе энергосбережения* / В.В. Новиков // *Энергоэксперт*. – 2011. – № 3. – С. 68–70.
4. Рошан, П. *Основы построения беспроводных локальных сетей: пер. с англ.* / П. Рошан, Д. Лиэри. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.
5. Гома Х. *Проектирование систем реального времени, распределенных и параллельных приложений: пер. с англ.* / Х. Гома. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 704 с.
6. Rappaport, T. *Wireless Communications – Principles & Practice* / T. Rappaport // *IEEE Press*. – 1996. – P. 130–131.
7. Уилмхерст Т. *Разработка встроенных систем с помощью микроконтроллеров PIC. Принципы и практические примеры: пер. с англ.* / Т. Уилмхерст – СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2008. – 544 с.

**Кычкин Алексей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; aleksey.kychkin@gmail.com.

*Поступила в редакцию 15 сентября 2014 г.*

## WIRELESS ENERGY DATA ACQUISITION PROTOCOL FOR THE REAL-TIME MONITORING SYSTEMS

**A.V. Kychkin**, Perm National Research Polytechnic University, Perm', Russian Federation,  
aleksey.kychkin@gmail.com

Development of new protocols wireless energy data collection and transmission for monitoring systems of the electricity networks (EN) in real time looks promising and relevant area of research with regard to the growing contradiction needs informatization of domestic power and the state of available information-measuring systems. The article considers the approach to protocol wireless data collection system for monitoring the power grid. The main modes of monitoring components of EN, including the monitoring of the generator is in stand-alone mode, monitoring the generator start, characterized by a high rate of receiving and processing energy data. A typical implementation of the connection data acquisition modules in a system of monitoring segment EN is shown. Algorithm of wireless data collection implemented a timing chart of the locally synchronized wireless access nodes in the network to the radio channel synchronized in time is developed on the basis of wiring diagram data acquisition modules in a system for monitoring the EN. Simultaneous access to the radio channel allows to reduce power consumption, extending the battery life data acquisition modules. The method for separating a plurality of data acquisition modules of the system for monitoring the communications channel measurement time implies that the different modules use different time slots for information transmission being in the same frequency range. The protocol provides each module access to the full range of frequencies for a short period of time. Such a distributed approach to monitoring system is effective in constructing interaction logic of a fixed number of elements of the remote acquisition of data by providing an adequate assessment of the network. The optimization of the data collection protocol and its investigation in terms of determining the maximum number of plug-ins is performed. The work was performed as part of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - candidates, MK-5279.2014.8 “Synthesis of efficient technologies for remote monitoring and managing of intellectual power system with active-adaptive network”.

*Keywords: electricity network, wireless communication, monitoring, real time, network protocol.*

### References

1. Ledin S.S. [Intelligent Networks SmartGrid - the Future of Russian Energy]. *Automation and IT in the energy sector*, 2010, no. 11 (16), pp. 4–8. (in Russ.)
2. Savarese C. Location in Distributed Ad-hoc Wireless Sensor Networks. *Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Salt Lake City, 2001, vol. 4, pp. 2037–2040.
3. Novikov V.V. [Intelligent Power-saving Measure in the Service]. *Energyexpert*, 2011, no. 3, pp. 68–70. (in Russ.)
4. Roshan P., Lijeri D. *Osnovy postroeniya besprovodnykh lokal'nykh setey* [Fundamentals of Building Wireless LANs]. Moscow, Williams Publ., 2004. 304 p.
5. Goma H. *Proektirovanie sistem real'nogo vremeni, raspredelennykh i parallel'nykh prilozheniy* [Design of Real-Time Systems, Distributed and Parallel Applications]. Moscow. DMK Press, 2002. 704 p.
6. Rappaport T. Wireless Communications – Principles & Practice. *IEEE Press*, 1996, pp. 130–131.
7. Wilmshurst T. *Razrabotka vstroennykh sistem s pomoshch'yu mikrokontrollerov PIC. Principy i prakticheskie primery* [Development of Embedded Systems Using Microcontrollers PIC. Principles and Practical Examples]. Saint-Petersburg. KORONA-VEK Publ., 2008. 544 p.

*Received 15 September 2014*