

**VII. Автоматизированные системы измерений**

УДК 504.064

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ БАЗЫ  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА  
КОНЦЕНТРАТОРА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ****Е.А. Волкова, Е.А. Севрюкова, А.Е. Баскаков**

*НИУ МИЭТ, Зеленоград, Россия,  
eavolkova2015@mail.ru,  
melaly@mail.ru,  
9999924816@ya.ru*

*Аннотация. В настоящее время актуальность проблемы мониторинга, поддержания и восстановления окружающей среды не вызывает сомнений. С ростом нагрузки на окружающую среду, вызванной в основном антропогенными факторами, значение проблемы и необходимость современных технологических решений в этой отрасли растут. Одним из таких решений сегодня являются автоматизированные системы мониторинга окружающей среды.*

*Для достижения максимальной эффективности в зависимости от условий работы и требований к проведению измерений, в работе предложены три алгоритма концентратора данных (базовый, адаптивный и комбинированный), отличающиеся между собой подходом к опросу сенсоров и отправке данных.*

*Разработаны базовый, адаптивный и комбинированный алгоритмы работы концентратора данных, которые позволят повысить эффективность работы системы в зависимости от назначения и использования. В работе представлена разработанная функциональная и электрическая схемы устройства концентратора данных.*

*В статье также описаны разработанные платы для концентратора данных: устройства сбора, обработки и передачи данных и его макета. Приведены рекомендации по практическому применению разработанного устройства.*

*Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга окружающей среды, концентратор данных, мониторинг окружающей среды.*

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMIC BASE  
OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX  
OF DATA CONCENTRATOR IN AUTOMATED  
ENVIRONMENT MONITORING SYSTEM****E.A. Volkova, E.A. Sevryukova, A.E. Baskakov**

*National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Russia,  
eavolkova2015@mail.ru,  
melaly@mail.ru,  
9999924816@ya.ru*

*Annotation. At present, the urgency of the problem of monitoring, maintaining and restoring the environment is beyond doubt. With the growing pressure on the environment caused mainly by anthropogenic factors, the importance of the problem and the need for modern technological solutions in this industry are growing. One of such solutions today are automated environmental monitoring systems.*

*To achieve maximum efficiency, depending on the operating conditions and the requirements for measurements, the work proposes three data concentrator algorithms (basic, adaptive or combined), which differ in their approach to polling sensors and sending data.*

*The basic, adaptive and combined algorithms for the data concentrator have been developed, which will improve the efficiency of the system depending on the purpose and use. The paper presents the developed functional and electrical circuits of the data concentrator device.*

*The article also describes the developed boards for the data concentrator: devices for collecting, processing and transmitting data and its layout. Recommendations for the practical application of the developed device are given.*

*Key words: automated environmental monitoring system, data concentrator, environmental monitoring.*

## **Введение**

В настоящее время актуальность проблемы мониторинга, поддержания и восстановления окружающей среды не вызывает сомнений. С ростом нагрузки на окружающую среду, вызванной в основном антропогенными факторами, значение проблемы и необходимость современных технологических решений в этой отрасли растут. Одним из таких решений сегодня являются автоматизированные системы мониторинга окружающей среды (АСМОС). Современные АСМОС имеют в составе следующие ключевые компоненты: датчики, концентраторы данных, базовые станции, сервер и пульт управления.

Основным автономным устройством таких систем, как правило, является концентратор данных. Большинство существующих концентраторов данных выполняют минимальный спектр задач: сбор данных с сенсоров, хранение и передача данных со статическим периодом выполнения основного цикла устройства, что приводит к возможной проблеме отправки данных без их фактического наличия.

Указанную проблему возможно решить путём разработки программно-алгоритмического обеспечения, которое будет отвечать требованиям наблюдений за окружающей средой и снизит нагрузку на сетевую инфраструктуру.

## **Алгоритмы работы концентратора данных**

Простейшим исполнением алгоритмической составляющей программно-аппаратного комплекса концентратора данных является алгоритм, описывающий выполнение функций опроса сенсоров, хранения полученных данных и их передачи через модуль передатчика. Такой алгоритм в работе будем считать базовым.

В рамках работы по базовому алгоритму (рис. 1) концентратор данных производит опрос датчиков с целью хранения во временные переменные моментальных значений измеренных величин и их отправку через фиксированный малый промежуток времени.



Рис. 1. Базовый алгоритм работы концентратора данных

Первым запускается алгоритм начальной настройки: производится включение питания, инициализация микроконтроллера и всех подключённых устройств и компонентов концентратора данных, а также применяются базовые настройки.

Далее следует алгоритм опроса сенсоров (рис. 2). В ходе данного алгоритма опрашиваются датчики, время опроса которых уже наступило. Если устройство включилось в первый раз, то опрашиваются все подключённые датчики. Период следующего опроса для них устанавливается в соответствии с базовыми настройками до тех пор, пока с базовой станции не будут получены другие настройки конфигурации опроса. После опроса сенсоров производится проверка получения ответа. Если ответ от какого-либо датчика не получен, время следующего опроса этого датчика не устанавливается и датчик будет опрошен при следующем цикле. Для минимизации критических моментов в работе сенсоров в алгоритме ниже предложено не отключать подачу питания датчикам, если следующий опрос запланирован через 30 и менее секунд. Если же время до следующего опроса составляет больше 30 секунд, питание отключается.

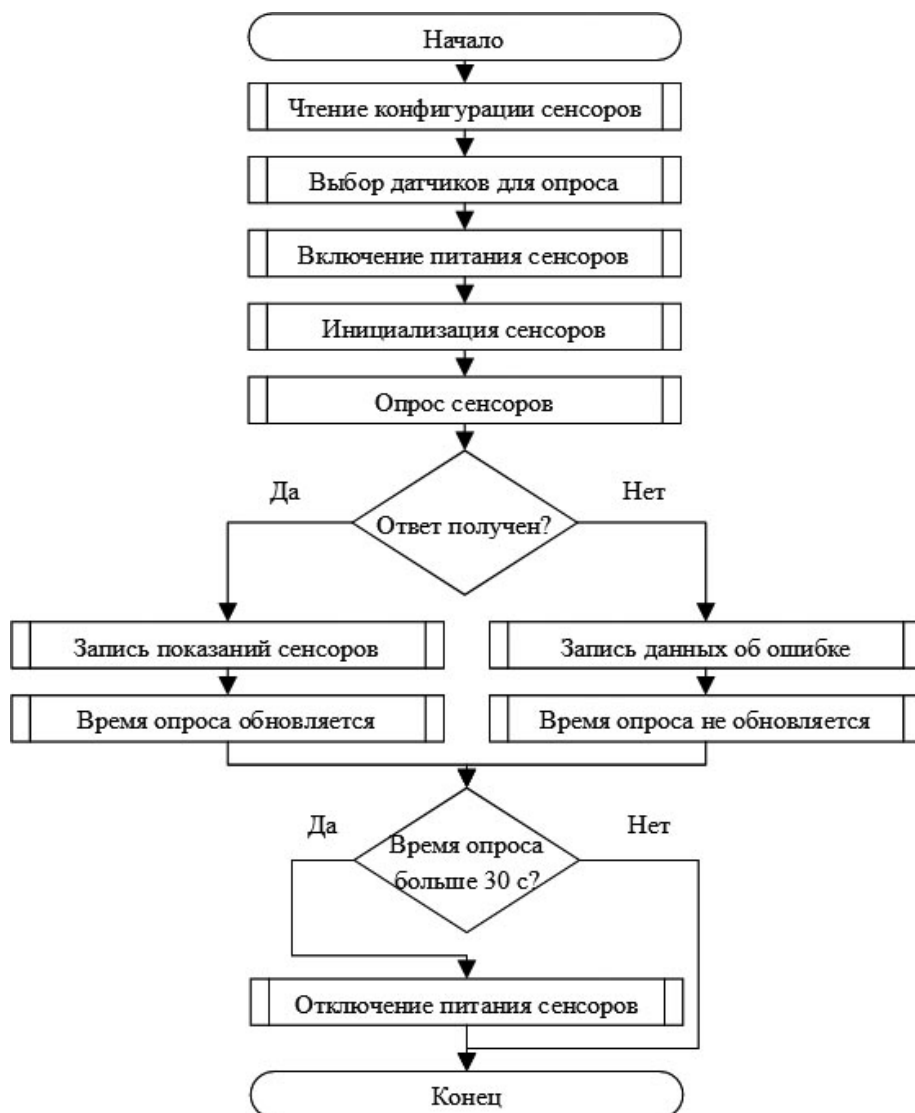


Рис. 2. Алгоритм опроса сенсоров

После завершения алгоритма опроса датчиков концентратор данных переходит к алгоритму записи данных (рис. 3), в котором отражены аспекты записи измеренных значений в постоянную память устройства, проверка возможности записи данных, циклическое стирание данных, при отсутствии свободного места на запоминающем устройстве, и запись отладочной информации при невозможности записи данных.

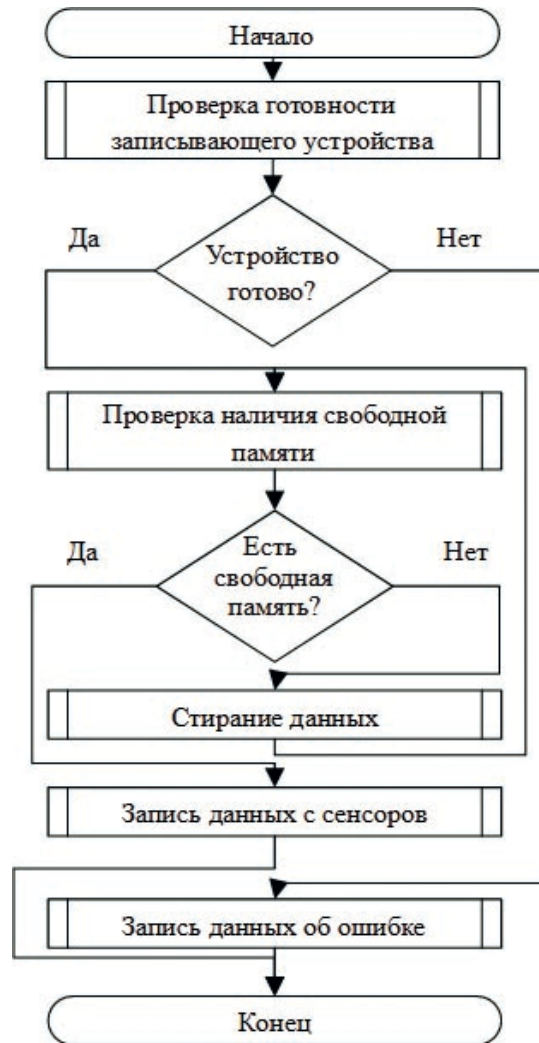


Рис. 3. Алгоритм записи данных

После выполнения алгоритма записи данных с сенсоров запускается алгоритм передачи данных (рис. 4). Первым шагом является формирование пакета данных, представляющего собой структурный элемент, состоящий из текущих величин показаний опрошенных сенсоров и данных об ошибках, собранных в пройденных циклах. Данные отправляются после проверки доступности полудуплексного канала передачи данных для минимизации возможности возникновения коллизий при передаче. После передачи данных ожидается подтверждение получения данных путём приёма служебного сообщения установленного образца.

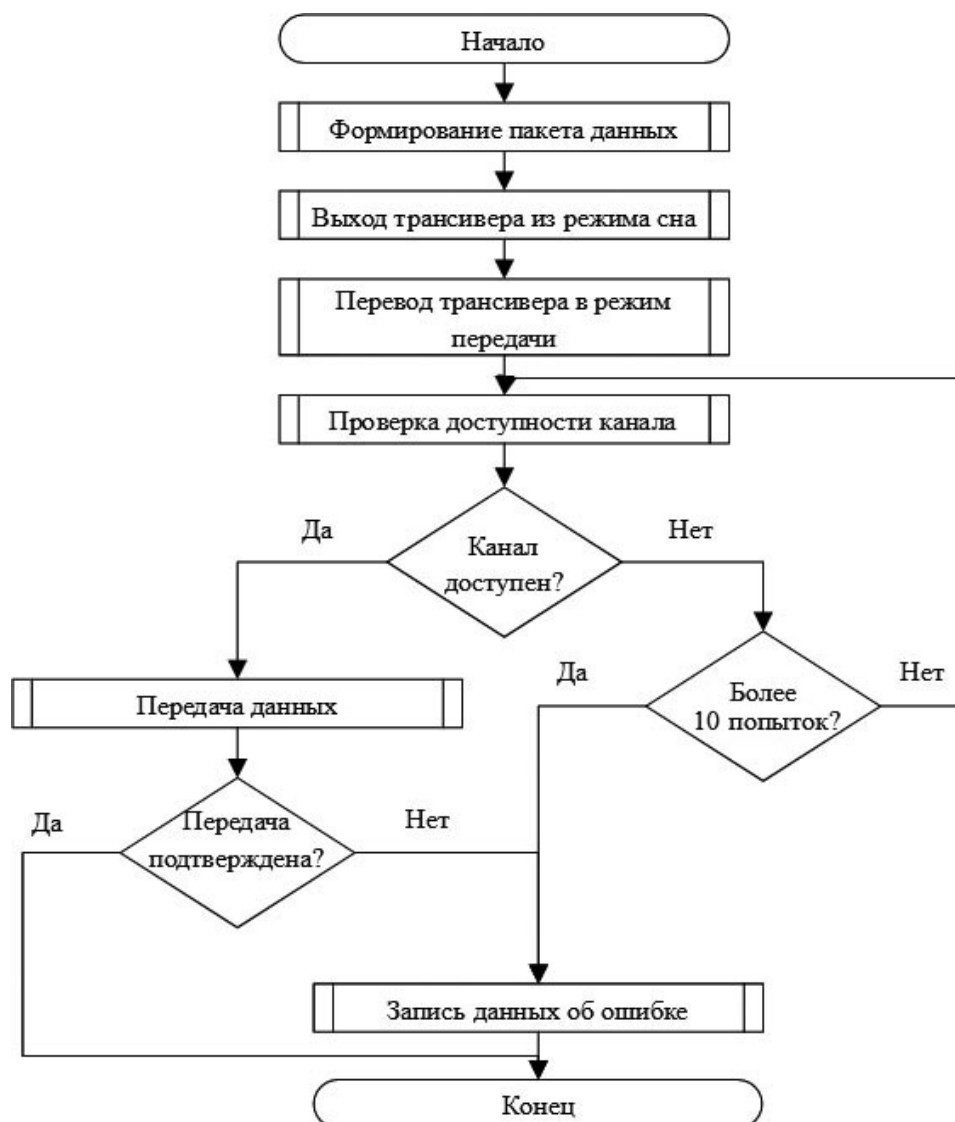


Рис. 4. Алгоритм передачи данных

После выполнения алгоритма передачи следует алгоритм режима сна (рис. 5). Во время сна приёмо-передающий модуль находится в режиме приёма. Для остальных компонентов микроконтроллера устанавливается таймер сна согласно минимальному времени опроса сенсоров. При поступлении данных об изменении конфигурации работы системы микроконтроллер выводится из сна, обрабатывает информацию и применяет новые настройки конфигурации.

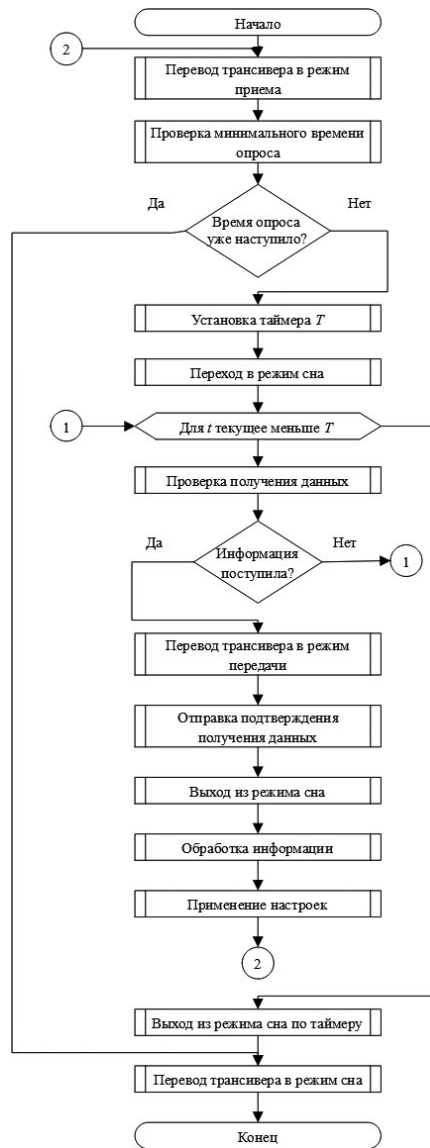


Рис. 5. Алгоритм режима сна

Для снижения нагрузки сети передачи данных и повышения ресурса автономной работы устройства, а также снижения энергопотребления концентратором данных разработан и предложен адаптивный алгоритм работы концентратора данных (рис. 6). В ходе работы этого алгоритма данные с сенсоров будут посылаться на базовую станцию только при условии значимой разницы показаний предыдущего и нынешнего замеров, но не позже чем раз в  $\Delta_{\text{передачи}}$ .

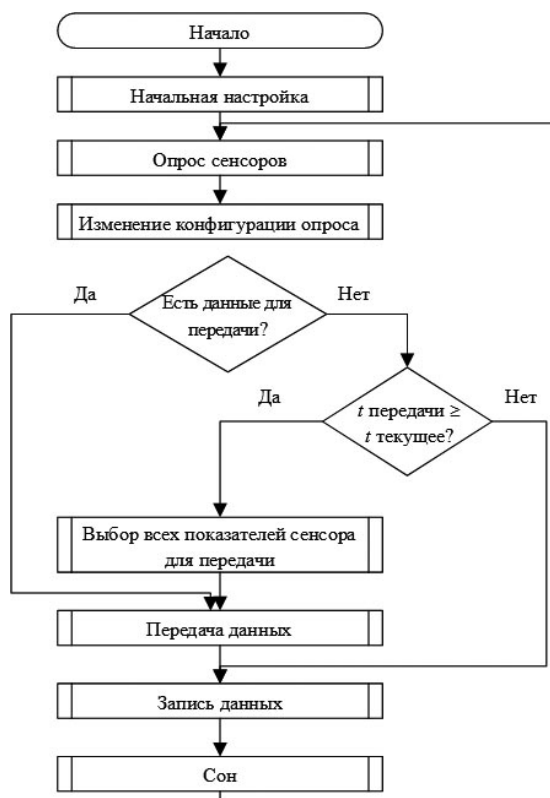


Рис. 6. Адаптивный алгоритм работы концентратора данных

Первым выполняется алгоритм начальной настройки. Во время этого алгоритма производится включение питания, инициализация всех подключённых устройств и компонентов концентратора данных, а также применяются базовые настройки. К настраиваемым параметрам добавляются:  $\Delta_{\max}$  — максимальный период опроса для каждого сенсора;  $\Delta_{\min}$  — минимальный период опроса для каждого сенсора.

Максимальное время для следующей передачи приравнивается к текущему для того, чтобы концентратор данных в первый же цикл отправил информацию на базовую станцию,  $t_{\text{передачи}} = t_{\text{текущее}}$ .  $t_{\text{передачи}}$  — это переменная, указывающая время, в которое данные должны быть отправлены на базовую станцию даже при условии отсутствия различия в показаниях. Также задаётся параметр  $x$  — добавочное время к периоду опроса, он будет фигурировать при изменении конфигурации и будет прибавляться или отниматься от базового периода опроса. Далее следует алгоритм опроса сенсоров (рис. 7). Опрашиваются датчики, время опроса которых уже настало, согласно текущей конфигурации.



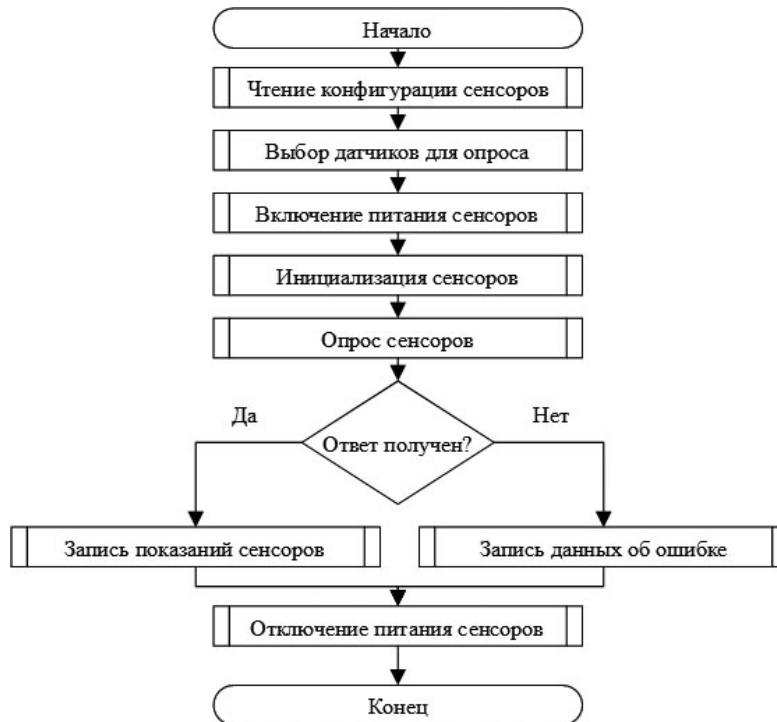


Рис. 7. Алгоритм опроса сенсоров

Далее следует алгоритм изменения конфигурации опроса (рис. 8). В ходе данного алгоритма происходит сравнение показателей сенсора с показателями, отправленными на базовую станцию на предыдущей итерации цикла. Если разница этих показателей будет превышать триггерное значение, то снятые показатели будут выбраны к передаче на базовую станцию, а также сократится период опроса, если это возможно. Если разница показателей будет меньше триггерного значения, то данные не будут выбраны к отправке, и период опроса увеличится, если он ещё не достиг максимального. По окончании алгоритма для каждого сенсора будет установлено новое значение  $t_{\text{опроса}}$ .

Затем проверяется, есть ли данные, выбранные для передачи на базовую станцию. Если такие данные есть, то алгоритм развивается по левой ветке и переходит к передаче. Если данных к передаче нет, то алгоритм развивается по правой ветке и приступает к следующей проверке. Проверяется, как давно происходила прошлая отправка показателей. Если  $t_{\text{передачи}} \geq t_{\text{текущее}}$ , то последние записанные показатели всех сенсоров выбираются для передачи. Если это условие не выполняется, алгоритм переходит сразу к записи данных.

Далее следует алгоритм передачи информации на базовую станцию. Существенно этот алгоритм не отличается от аналогичного в базовом алгоритме. Из отличий можно отметить только то, что в него добавлен шаг, в котором фиксируется время следующей обязательной передачи  $t_{\text{передачи}}$ , а также вносятся новые значения  $F_0$  — это только переданные значения для каждого из сенсоров.

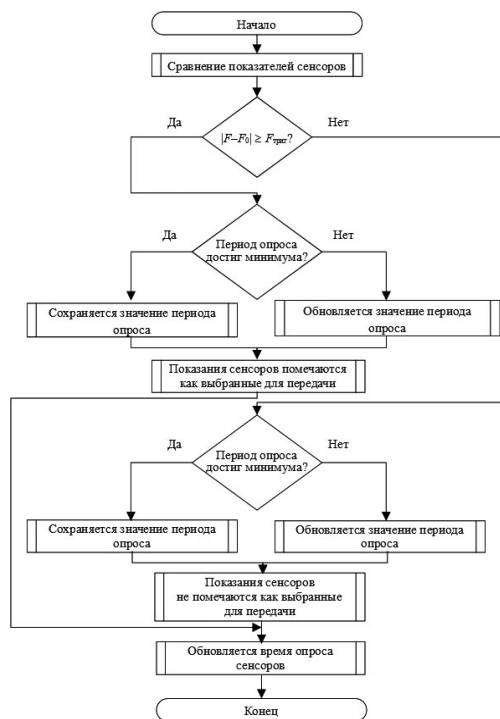


Рис. 8. Алгоритм конфигурации опроса сенсоров

Далее следует алгоритм записи данных, аналогичный базовому алгоритму. После устройство переходит к алгоритму режима сна, особенностью которого является добавление проверки минимального времени передачи данных к уже существующей проверке минимального времени опроса. Время обязательной передачи  $t_{\text{передачи}}$  может наступить раньше минимального времени следующего опроса, поэтому важно добавить и его к сравнению. Таким образом, в ходе проверки проверяются время опроса всех датчиков и время следующей передачи, среди них выявляется минимальное. Это минимальное значение и становится временем  $T$ , до которого устанавливается таймер режима сна компонентов микроконтроллера (рис. 9).

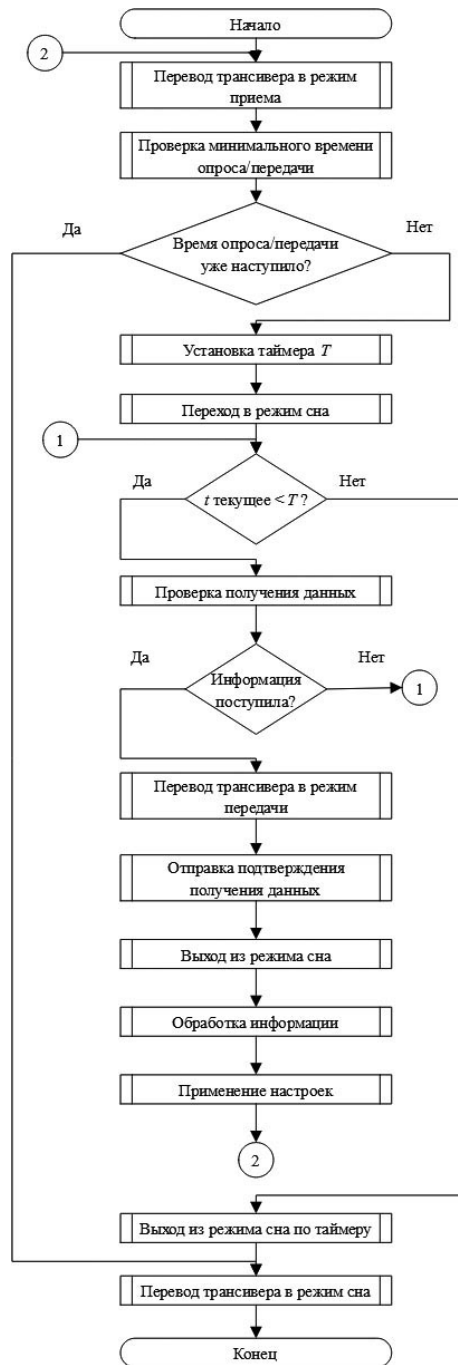


Рис. 9. Алгоритм режима сна

Комбинированный алгоритм (рис. 10) представляет собой гибрид адаптивного и базового алгоритмов. К концентратору данных подключены два типа датчиков: подлежащие ( $a$  — adaptive) и не подлежащие ( $b$  — basic) автоматизированной конфигурации. Тип датчиков указывается в конфигурации и может быть изменён пользователем.

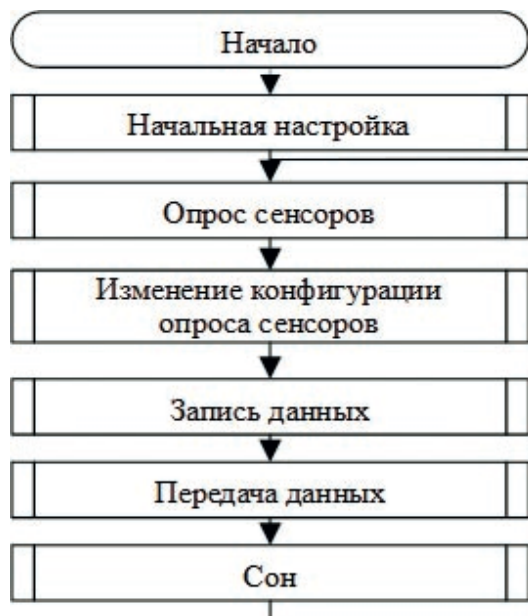


Рис. 10. Комбинированный алгоритм концентратора данных

Первым прорабатывается алгоритм начальной настройки: производится включение питания, инициализация всех подключённых устройств и компонентов концентратора данных, а также применяются базовые настройки. Помимо начальных значений периодов опроса,  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\min}$  и  $x$ , к настраиваемым параметрам добавляется параметр, характеризующий тип датчика ( $a$  — адаптивный или  $b$  — базовый).

Далее следует алгоритм опроса сенсоров. Опрашиваются датчики, время опроса которых уже настало, согласно текущей конфигурации. При первом запуске опрашиваются все доступные датчики.

После опроса наступает алгоритм изменения конфигурации опроса. Данный алгоритм схож с адаптивным алгоритмом, однако существует разница в некоторых шагах. Добавлен шаг с чтением конфигурации сенсоров: извлекается информация по типам датчиков из конфигурации, затем происходит выбор датчиков для дальнейшей конфигурации. Конфигурироваться будут только датчики типа  $a$  (adaptive).

Далее следует алгоритм записи данных. После записи данных устройство переходит к алгоритму передачи данных. В отличие от адаптивного, в комбинированном алгоритме передача данных производится в каждом цикле, а также в последнем шаге фиксируются  $F_0$  переданные значения для каждого из сенсоров, и не фиксируются значения времени передачи. Далее следует алгоритм режима сна.

### **Функциональная схема программно-аппаратного комплекса концентратора данных**

Разрабатываемое устройство представляет собой модульное решение, состоящее из трёх основных логических частей: подсистемы сенсоров сбора данных, подсистемы обработки и хранения данных, подсистемы передачи данных.

Предлагаемое решение функциональной схемы состоит из пяти взаимосвязанных функциональных групп: модуль электропитания, вычислительный модуль, интерфейсный модуль, модуль хранения данных, модуль приёмопередатчика. Вычислительный модуль содержит в себе блоки микроконтроллера (МК) и постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) программ. В качестве основного вычислительного компонента устройства был выбран микроконтроллер Atmega328P. Данный микроконтроллер может обеспечить необходимую производительность, требуемый функционал при низком энергопотреблении, позволяет расширить функционал устройства при необходимости добавления интерфейсных портов или реализации стороннего интерфейса передачи данных [1–4].

В качестве энергонезависимого устройства хранения данных и программного кода в составе элементной базы выбранного микроконтроллера присутствует флеш-память на 1 Кб.

Интерфейсный модуль состоит из шины данных и интерфейсного блока, в свою очередь включающего в себя аналоговый интерфейс передачи данных, аналого-цифровой преобразователь, аналоговые порты ввода–вывода, цифровой интерфейс передачи данных.

В качестве основного передатчика выбран радиомодуль LoRa RFM95, но возможно применение отличного от него модуля приёмопередачи данных, в том числе с проводным соединением [5–9].

Общая функциональная схема программно-аппаратного комплекса концентратора данных представлена на рис. 11.

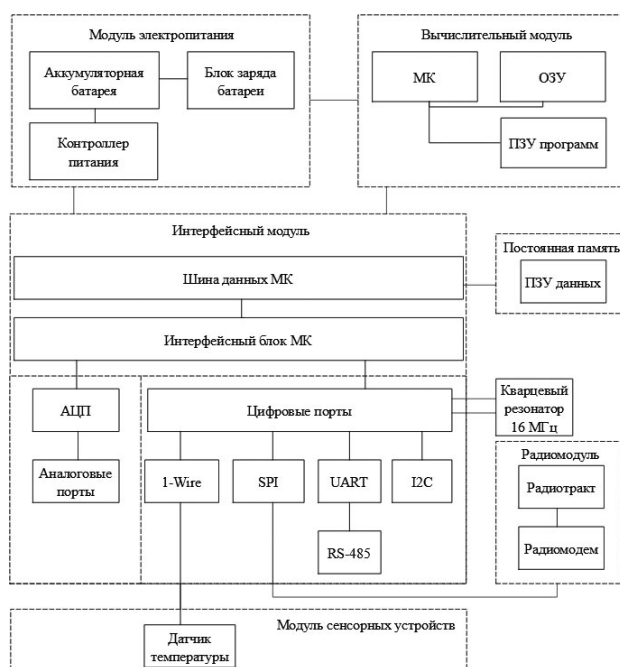


Рис. 11. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса концентратора данных в АСМОС

### Разработка решений по реализации программно-аппаратного комплекса концентратора данных

Для корректной работы выбранных вычислительного и приёмопередающего модулей в электрической схеме концентратора данных необходимо обеспечить наличие источников питания на 3,3 и 5 В. Описанное выше требование можно решить без использования множества источников электропитания, то есть без усложнения эксплуатационных характеристик концентратора данных. Так, разработанная плата имеет встроенные преобразователи напряжения на 3,3 и 5 В. Согласно технической документации к применяемым преобразователям, входное напряжение может варьироваться в диапазоне от 3 до 15 В, что позволяет использовать как аккумуляторные батареи, так и стационарные источники электропитания [10–12].

Все незадействованные выводы микроконтроллера вынесены в отдельный блок портов для возможности подключения сторонних устройств через интерфейсный блок, без необходимости прямого подключения к выводам микроконтроллера или изменения печатной платы. Используемый микроконтроллер имеет несколько портов входа электропитания: VCC (PIN7) и AVCC (PIN20) — порты входного напряжения с допустимым значением

принимаемого напряжения в интервале 1,8–5 В; GND (PIN22, PIN8) — выводы заземления; AREF (PIN21) — порт, служащий для подключения внешнего опорного напряжения АЦП, относительно которого происходят измерения аналогового типа.

Порты PIN9 и PIN10 микроконтроллера предназначены для подключения внешнего кварцевого резонатора, предназначенного для повышения частоты работы микроконтроллера до 16 МГц, он присутствует на электрической схеме и печатной плате концентратора данных.

Для обеспечения возможности подключения различных наборов сенсоров или периферийных устройств, микроконтроллер и разрабатываемая печатная плата имеют цифровые и аналоговые интерфейсы подключения, в том числе отдельно вынесенные UART, TWI/I<sup>2</sup>C, SPI интерфейсы [13–20].

Количество аналоговых и цифровых входов ограничено используемым вычислительным модулем — микроконтроллером Atmel Atmega328p. Проблему можно избежать путём использования разнообразных внешних модулей расширения, предусмотренных на функциональной и электрической схемах. При необходимости можно задействовать встроенный датчик температуры DS18B20 для сбора технической информации о температуре непосредственно с печатной платы концентратора данных.

Разработанная электрическая схема устройства концентратора данных представлена на рис. 12.

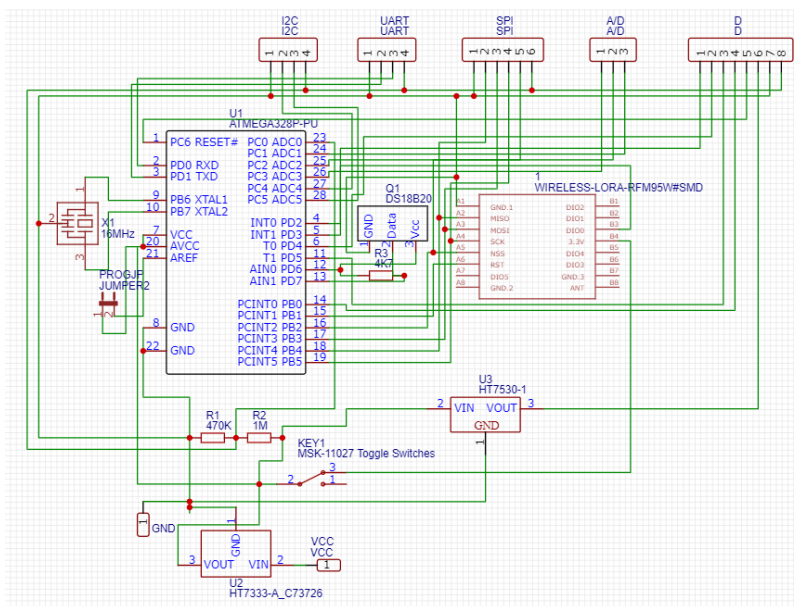


Рис. 12. Электрическая схема концентратора данных

На её основе была выполнена разработка топологии печатной платы для последующей реализации макета концентратора данных системы автоматизированного мониторинга окружающей среды. Макет был создан для апробации разработанных алгоритмов работы устройств с целью проверки их работоспособности и проведения экспериментальных исследований потребления энергии концентратором данных. По предварительной оценке, использование адаптивного алгоритма, при аналогичной конфигурации набора сенсоров, позволяет получить выигрыш в среднем энергопотреблении устройства до 35 % в сравнении с базовым, гибридного алгоритма — до 23 %, что позволило подтвердить актуальность разработки алгоритмов работы устройств системы автоматизированного мониторинга окружающей среды.

### **Заключение**

В статье представлена разработка программно-алгоритмической базы концентратора данных автоматизированной системы мониторинга окружающей среды, а именно трёх различных алгоритмов: базового, адаптивного, комбинированного.

Базовый алгоритм работы описывает минимальный функционал, предъявляемый к аналогичным устройствами сбора, хранения и передачи данных. Адаптивный алгоритм позволяет динамически конфигурировать период опроса для каждого из сенсоров концентратора данных на основе сравнения разницы текущего и предыдущего значений измерений, а также динамически формировать набор данных для отправки. Комбинированный алгоритм позволяет сочетать достоинства базового и адаптивного алгоритмов и частично их применять для каждого из сенсоров концентратора данных.

Представлены функциональная и электрическая схемы концентратора данных, на основе которых разработан макет устройства, позволяющий проводить экспериментальные исследования, в том числе разработанных алгоритмов.

По предварительной оценке, использование адаптивного алгоритма, при аналогичной конфигурации набора сенсоров, позволяет получить выигрыш в среднем энергопотреблении устройства до 35 % в сравнении с базовым, гибридного алгоритма — до 23 %, что позволило подтвердить актуальность разработки алгоритмов работы устройств системы автоматизированного мониторинга окружающей среды.

Работа была выполнена при финансовой поддержке центра НТИ «Сенсорика» в НОЦ РЦСС НИУ МИЭТ в рамках проекта «Создание автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации».



**Список литературы**

1. Карпов Е., Кузнецова Е. Программно-аппаратная реализация преобразователя управляющих воздействий на базе микроконтроллера Atmega328p // Интеллектуальные системы в производстве. — 2018. — Т. 16. — № 6. — С. 95–102.
2. Nogueira L.C. et al. Data acquisition system and irrigation controller based on CR10X datalogger and TDR sensor // Proceedings-Soil and Crop Science Society of Florida. — 2003. — V. 62. — P. 38–46.
3. Ibrahim D. Design of a GPS data logger device with street-level map interface // Advances in Engineering Software. — 2010. — V. 41. — No. 6. — P. 859–864.
4. Goulao V. et al. A new monitoring and data logger system for industrial cooling equipment applications // IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool. — 2011. — P. 1–3.
5. Oviatt S. Multimodal system processing in mobile environments // Proceedings of the 13<sup>th</sup> annual ACM symposium on User interface software and technology. — 2000. — P. 21–30.
6. Luharuka R., Gao R.X., Krishnamurty S. Design and realization of a portable data logger for physiological sensing [GSR] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2003. — V. 52. — No. 4. — P. 1289–1295.
7. Mahendra O. et al. Design and implementation of data storage system using USB flash drive in a microcontroller based data logger // International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT). — IEEE, 2015. — P. 58–62.
8. Akposionu K.N., Nwokoye A.O.C. Design and fabrication of a low-cost data logger for solar energy parameters // Journal of Energy Technologies and Policy. — 2012. — V. 2. — No. 6. — P. 12–17.
9. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. On the limits of LoRaWAN channel access // International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). — IEEE, 2016. — P. 10–14.
10. Татуйко А.Г., Федяева Г.А. Применение энергоэффективных преобразователей напряжения в системах электрооборудования транспорта // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. — 2018. — С. 233–234.
11. Волков И.В., Подольный С.В. Импульсный резонансный преобразователь постоянного напряжения с дозированным отбором и передачей энергии // Технічна електродинаміка. — 2020. — № 1. — С. 10–16.
12. Потапов А.А. Управляемый преобразователь напряжения // Проблемы и перспективы современной науки. — 2019. — С. 20–23.

13. Nanda U., Pattnaik S.K. Universal asynchronous receiver and transmitter (uart) // 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). — IEEE, 2016. — V. 1. — P. 1–5.
14. Kumar K. et al. Low Power UART Design Using Different Nanometer Technology Based FPGA // 8<sup>th</sup> International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). — IEEE, 2018. — P. 1–3.
15. Schinagl P., Sharp A. Algorithmic analysis and hardware implementation of a two-wire-interface communication analyser // Internet Technologies and Applications (ITA). — IEEE, 2017. — P. 189–193.
16. Raees M. et al. Interfacing of digital TPH sensors with FPGA using I2C interface // IEEE Bombay Section Symposium (IBSS). — 2016. — P. 1–5.
17. Ali I. et al. A design of ultra low power I2C synchronous slave controller with interface voltage level independency in 180 nm CMOS technology // International SoC Design Conference (ISOCC). — IEEE, 2017. — P. 262–263.
18. Dhaker P. Introduction to SPI Interface // Analog Dialogue. — 2018. — V. 52.
19. Hafeez M., Saparon A. IP Core of Serial Peripheral Interface (SPI) with AMBA APB Interface // IEEE 9<sup>th</sup> Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE). — 2019. — P. 55–59.
20. Zhang Q., Yang Y., Chai C. A high EMS daisy-chain SPI interface for battery monitor system // Journal of Semiconductors. — 2017. — V. 38. — No. 3. — P. 035002.

*Статья поступила в редакцию: 16.06.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 25.06.2021 г.*

*Статья принята в работу: 01.07.2021 г.*