

УДК 62-52

UDC 62-52

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МАЛОБЮДЖЕТНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЫ ПОСЕВНОГО ПОЛЯ

CIRCUIT SOLUTIONS FOR LOW-BUDGET IMPLEMENTATION OF A DISTRIBUTED SYSTEM OF CONTROL OF PARAMETERS OF SOIL SEED FIELDS

Щербань Игорь Васильевич
Докт. техн. наук, профессор кафедры «Информационных и измерительных технологий»
e-mail: shcheri@mail.ru
ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Shcherban Igor Vasilievich
Doctor of technical Sciences, Professor at the Department of Information and measuring technology
e-mail: shcheri@mail.ru
Southern Federal University (SFEDU), Rostov-on-Don, Russia

Иванов Станислав Валерьевич
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов»
SPIN-код: 6800-5524
e-mail: sta399@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Ivanov Stanislav Valerievich
Cand.Tech.Sci., associate Professor of the Department "Automation of production processes"
e-mail: sta399@yandex.ru
FSBEE HE «Don state technical University», Rostov-on-don, Russia

На основе анализа современных научных подходов к построению сложных информационно-измерительных систем сформулированы схемотехнические решения распределенной системы контроля параметров почвы, реализация которых позволит создавать системы в условиях малого предприятия

Based on the analysis of modern scientific approaches to the construction of complex information-measuring systems, we have formulated a circuit solutions model of a distributed system of control of parameters of soil, the implementation of which will allow to build systems in small businesses

Ключевые слова: РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЫ, НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ, СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МАССОВОЕ ВНЕДРЕНИЕ В СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВОВАНИЕ

Keywords: DISTRIBUTED SYSTEM OF CONTROL OF PARAMETERS OF SOIL, LOW COST, CIRCUIT ANALYSIS, MASS ADOPTION IN RURAL MANAGEMENT

Doi: 10.21515/1990-4665-133-024

Введение. Известно, что так называемое «интеллектуальное сельское хозяйство» позволяет существенно повышать эффективность использования посевных площадей. Например, регулярный мониторинг параметров почвы по всей площади посевного поля позволяет выполнять моделирование почвенного плодородия и способствует, в итоге, общему повышению урожайности [1]. С одной стороны, вследствие климатических особенностей нашей страны, внедрение подобных систем особенно актуально для кооперативных хозяйств России. С другой же стороны, сложные инновационные распределенные информационно-измерительные

системы отличаются достаточно высокой стоимостью, отсутствуют в настоящее время в свободной продаже и, как известно, выполняются единичными образцами индивидуально для каждого практического применения. Перечисленные проблемы затрудняют массовое внедрение подобных мониторинговых систем в кооперативное сельское хозяйство.

Предлагается малобюджетная типовая распределенная система контроля параметров почвы (РСКПП), разработанная на основе современных научных и методических подходов и реализованная на основе современных цифровых и аналоговых элементов, имеющих в свободном доступе. Для ее реализации не требуется проведение процедур лицензирования беспроводных радиоэлектронных средств передачи данных, предлагаемая система может быть реализована в условиях малого предприятия, например, фермерского хозяйства.

Формализация задачи реализации типовой малобюджетной РСКПП. В большинстве практических случаев аграрное поле имеет неоднородную почвенную структуру, поля делятся на участки, засеваемые различными сельскохозяйственными культурами. Поэтому любая РСКПП состоит из конечного множества n контрольно-измерительных модулей (КМ), разнесенных по площади аграрного поля, каждый из которых не зависит от остальных, но взаимодействует с ними для выполнения общей задачи – мониторинга параметров почвы. Ясно, что типовая РСКПП должна быть реализована на модульном принципе на открытых стандартах и протоколах, легко наращиваться, видоизменяться и обеспечивать легкую интеграцию своих ресурсов в технологические цепочки сельского хозяйства.

Обычно производится контроль параметров, напрямую влияющих на урожайность – влажности почвы на разных глубинах залегания, ее кислотности и температуры поверхностного слоя. Соответственно, для

измерения группы параметров каждая i -я КМ содержит m датчиков:

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Измеренные данные от m датчиков со всех n КМ передаются на центральное устройство сбора данных (ЦУСД). Подобные ЦУСД необходимы для высокоуровневой обработки данных – перевода их в реальные физические величины, отбраковки аномальных измерений и т.п. процедур, а также выдачи запросов на отдельные КМ для проведения повторных измерений, организацию временного разделения опроса всех КМ, временного хранения данных и передачи их на облачные серверы посредством любого средства связи. На WEB-сервере должно быть реализовано специальное программное обеспечение, позволяющее наглядно отображать показания каждого j -го датчика i -го КМ ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$) по запросу пользователя. Такое решение обладает кроссплатформенностью, так как любое оконечное устройство пользователя, обладающее возможностью выхода в интернет, способно войти в облачную базу данных, считать данные и отобразить их в необходимом виде.

КМ передают данные на ЦУСД посредством узкополосной беспроводной связи. Очевидно, что применение проводных средств связи в данном случае невозможно, так как кабельные линии не позволяют качественно обрабатывать аграрные поля, полноценно ухаживать за посевными культурами. Таким образом, структурная схема типовой РСКПП может быть представлена в виде, отраженном на рисунке 1.

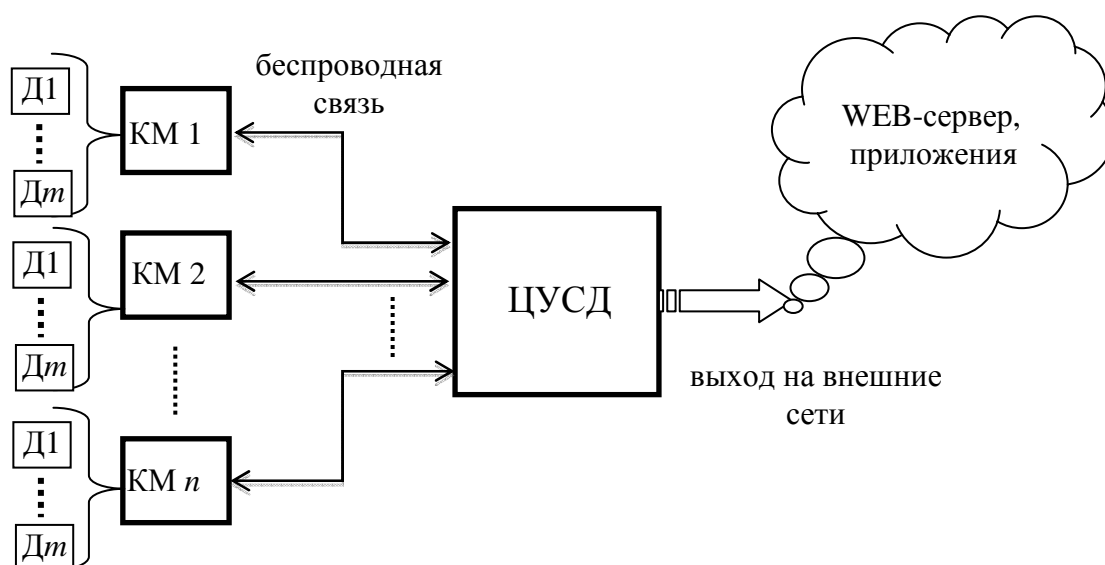


Рисунок 1 – Структурная схема РСКПП

Технология беспроводной связи для РСКПП. Для любой распределенной в пространстве системы одной из основных является проблема организации беспроводной связи при временных ограничениях на сроки ее использования в автономном режиме. Расстояния между КМ и ЦУСД рассматриваемой системы, в зависимости от расположения поля, количества КМ на нем могут составлять десятки километров, а сроки автономной работы без обслуживания определяются посевными циклами сельскохозяйственных культур и могут достигать 8 месяцев [1].

В промышленных применениях наибольшее распространение получили такие беспроводные технологии связи, использующие нелицензируемые диапазоны частот, как Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi на основе стандарта IEEE 802.11 и стандарт LPWAN [2-7]. Технологии Bluetooth и Wi-Fi характеризуются недостаточной для РСКПП или дальностью связи, или высоким энергопотреблением [2-4]. Сети на основе средств ZigBee довольно распространены в «интеллектуальном» сельском хозяйстве. Их основными особенностями являются низкое энергопотребление и поддержка ячеистых самоорганизуемых топологий

«mesh» [2,4], вследствие чего покрываемые ими зоны могут достигать нескольких гектар. Тем не менее, эта технология является неперспективной, на сегодняшний день устаревшей и, кроме того, до сих пор лишь очень небольшое число микроконтроллеров поддерживают директивную связь с модемами ZigBee, являются специфичным на сегодняшнем рынке продуктом, что обуславливает их высокую стоимость. Поэтому целесообразным является использование технологии LPWAN. Такие сети характеризуются низкой скоростью передачи данных – порядка 0,01 Мбит/с, сверхнизким энергопотреблением и дальностью связи на открытых пространствах до 50 км. Ясно, что скорость передачи данных для РСКПП не является критичным показателем.

На сегодняшний день существует несколько стандартов технологии LPWAN, из которых в России представлены LoRaWAN в диапазонах частот 433, 868 и 915 МГц, и «СТРИЖ», использующий полосу частот 868 МГц. Основным отличием этих стандартов является метод модуляции несущего сигнала – в «СТРИЖ» используется модуляция несущей по методу дифференциальной двоичной фазовой манипуляции DBPSK, а для стандарта LoRa за основу взят более сложный в техническом исполнении метод широкополосной модуляции DSSS [4,6,7]. Одним из недостатков DSSS является тот, что могут возникать пересечения сигналов от разных устройств. Этот недостаток легко преодолевается за счет временного разделения каналов при передаче данных от каждой i -й КМ на ЦУСД РСКПП, когда работа с каждым оконечным КМ осуществляется в отдельный time-frame (временной интервал). Таким образом исключается возможность одновременного обращения нескольких КМ к одному ЦУСД и, следовательно, исключаются сопутствующие помехи.

Передача сигналов стандарта «СТРИЖ» полнодуплексная, а в LoRa – полудуплексная. Этот факт нельзя отнести ни к достоинствам стандарта «СТРИЖ», ни к недостаткам стандарта LoRa, т.к. по обратному каналу

передаются только лишь сигналы управления. Для РСКПП к таким сигналам относятся сигналы "пробуждения" КМ, инициализации и начала измерений с последующей передачей измеренных данных на ЦУСД. Так как в составе КМ однозначно необходимо использование отдельного микроконтроллера, который возьмет на себя все управляющие функции процедурами измерений и передачи данных, то актуальность полnodуплексной связи пропадает.

Между тем, основным недостатком стандарта «СТРИЖ» называют его закрытость. Этот стандарт на аппаратном и программном уровне привязан к технологиям и решениям единственной отечественной компании-производителя, что не позволяет свободно использовать его аппаратную часть и реализовать, в итоге, малобюджетную РСКПП. Таким образом, для типовой РСКПП целесообразно выбрать открытый стандарт беспроводной передачи LoRaWAN.

Сети стандарта LoRaWAN могут содержать один из трех классов – А, В или С, оконечных устройств (End Node). В РСКПП, с точки зрения энергопотребления, целесообразно выбрать класс А, где реализуется передача данных посылками по заданному графику, оконечное устройство выступает инициатором обмена, но "пробуждается" внешней командой от микроконтроллера. Схема сети зависит, в первую очередь, от площадей засеваемых полей, необходимого количества n контрольно-измерительных модулей, расстояний от удаленных КМ до ЦУСД. Таким образом и выбирается или топология "звезда", или топология "звезда из нескольких звезд" и задействуются соответствующие устройства стандарта LoRa [6]. Структурная схема связи беспроводной сети топологии "звезда" будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

Шлюзы Gateway/Concentrator – многоканальные приёмо-передающие устройства для образования нескольких каналов связи с несколькими оконечными устройствами, обеспечивают прием данных от КМ 1.. n и

выдачу их в центральный сервер Network Server. Удаленное управление осуществляется посредством центрального сервера Application Server. В простейшем случае (рисунок 2) центральный сервер, сервер сети и шлюз в виде одноканального трансивера Concentrator представляют собой единое устройство.

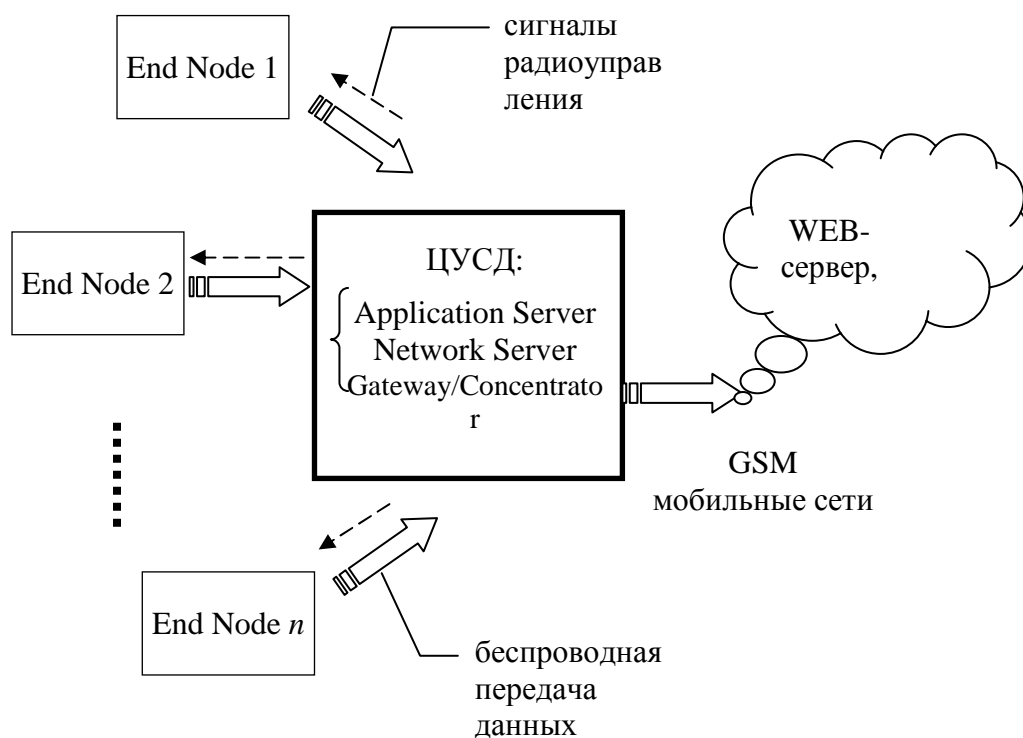


Рисунок 2 – Структурная схема сети беспроводной связи топологии "звезда"

Схмотехнические решения и испытания разработанного экспериментального образца малобюджетной РСКПП. Основными элементами РСКПП являются контрольно-измерительные модули (КМ), эксплуатируемые в полевых условиях. Подобные КМ, очевидно, представляют собой массив из датчиков $D_1..D_m$ (рисунок 1), расположенных на нужных глубинах относительно поверхности почвы, приемно-передающего модуля беспроводной связи и микроконтроллера для

управления процессами измерений и передачи данных.

Для измерения температуры почвы, с точки зрения стоимости, можно использовать термопары, но процессы их градуировки сложно воспроизвести в условиях малого предприятия [1]. Поэтому целесообразно воспользоваться имеющимися в свободной продаже калиброванными и готовыми к применению цифровыми терморезисторами. Металлические терморезисторы, как известно, имеют более стабильные характеристики в сравнении с полупроводниковыми [4]. При реализации экспериментального образца, исходя из необходимых характеристик по точности, питанию и температурам эксплуатации, использовался терморезистор в герметичном корпусе DS18B20. Здесь обеспечена возможность обмена данными с массивом терморезисторов через один порт микроконтроллера (МК) по шине 1-Wire, где данные передаются по цепи питания. Алгоритм взаимодействия МК и датчика DS18B20 включает типовые этапы инициализации шины и выбора нужного термодатчика из массива по 64-битному адресу, измерения температуры, передачи результата 16-битным словом на МК. При преобразовании кода в температуру необходимо учесть коэффициент масштабирования датчика, равный 0,0625.

Для измерения влажности, согласно вышеприведенным соображениям, выбраны емкостные цифровые датчики SHT15, реализованные в защитном корпусе класса IP67 и имеющие встроенный 12-битный стандартный АЦП. Здесь результаты измерений могут передаваться как 12-битным словом, где старший разряд – знаковый, так и усеченным 8-битным словом. Учитывая рабочий диапазон измерений влажности 0..100%, нетрудно определить погрешность оцифровки для каждого случая – 0,05% и 0,4% соответственно. Эти цифры, интерпретируемые как "разрешающая способность", подтверждаются и инструкцией к датчику. Погрешность же измерений для встроенного в

датчики SHT1х первичного измерительного преобразователя (ПИП) влажности составляет 2%.

Термин "разрешающая способность" не входит в систему основных понятий метрологии [8] и в данном случае лишь показывает, какое минимальное значение измеряемой величины соответствует 1 биту кодового слова. Точность же измерений характеризует степень отличия результата измерений от значения, связанного с эталоном единицы физической величины. Соответственно, из сравнения приведенных численных значений следует, что при измерениях влажности можно использовать усеченный 8-битный код без потери точности.

При преобразовании кода датчика SHT15 в величину влажности \tilde{R}_H также необходимо компенсировать нелинейность рабочей характеристики его ПИП следующим образом:

$$\tilde{R}_H = C_1 + C_2 \cdot R_H + C_3 \cdot R_H^2, \quad (1)$$

где R_H – результат измерений ПИП; $C_1 = -2,0468$; $C_2 = 0,5872$; $C_3 = -4,0845 \cdot 10^{-4}$.

На основе приведенных рассуждений о выборе измерительных датчиков окончательно становится ясным, что для каждого контрольно-измерительного модуля достаточным является использование 8-разрядного микроконтроллера. Так как производительность МК в рассматриваемом случае не является критичной, оценке подлежат требуемые объемы оперативной и постоянной памяти, а также стоимость МК, его энергопотребление, надежность, допустимые температурный и влажностный режимы эксплуатации.

Объемы постоянной и оперативной памяти МК определяются из уравнений [4]

$$V_{\text{ПЗУ}} = 1,4 r C + V_{\text{алг}}; \quad (2)$$

$$V_{\text{ОЗУ}} = 1,4 r (k_{d,t} k_t + k_{d,H} k_H + k_{d,pH} k_{pH} + L_{\text{пр}} + L_{\text{к}}), \quad (3)$$

где r – разрядность МК; C – общее количество констант для всех алгоритмов; $V_{\text{алг}}$ – общий объем программ всех алгоритмов; k_t, k_H, k_{pH} – количество датчиков, соответственно, температуры, влажности и кислотности в составе i -го КМ ($k_t + k_H + k_{pH} = m$); $k_{d,J} = 1, 2$ ($J = t, H, pH$) – коэффициент, учитывающий тот момент, одинарным ($k_{d,J} = 1$) или двойным кодовым словом ($k_{d,J} = 2$) для выбранной разрядности МК r осуществляется съём кодового слова измерений с соответствующего датчика (например, при выбранном выше значении разрядности МК $r=8$ для терморезистора DS18B20 $k_{d,t} = 2$, а для датчика влажности SHT15 при съеме измерений с него усеченным 8-битным кодовым словом – $k_{d,pH} = 1$); $L_{\text{пр}}$ – количество ячеек памяти под промежуточные результаты вычислений; $L_{\text{к}}$ – количество ячеек памяти под конечные результаты. Коэффициент 1,4 требуется при выборе МК с фиксированной точкой для учета памяти, необходимой при выполнении процедур перемасштабирования переменных.

Функциями микроконтроллера в составе i -го КМ являются управление датчиками и оконечным устройством End Node в каждом цикле "измерение - передача данных", преобразование измеренных значений в реальные физические величины, временное их хранение и последующее формирование структурированного кадра для передачи на ЦУСД, прием команд управления от ЦУСД, реализация системы единого времени для временного разделения каналов. Исходя из вышеназванного формируется общий перечень алгоритмов, реализуется программное обеспечение, определяется объем программ $V_{\text{алг}}$.

Энергопотребление в самом простом приближении может быть найдено из уравнения

$$I_{\Sigma} \cong N_{\text{э}} \left(K [T_{\text{МК}} i_{\text{МК}}^1 + T_{\text{Lora}} i_{\text{Lora}}^1] + i_{\text{МК}}^0 + i_{\text{Lora}}^0 + \sum_{J=t,H,pH} (K k_J T_J i_J^1 + k_J i_J^0) \right), \quad (4)$$

где I_{Σ} – ток, потребляемый за все время автономной эксплуатации; $N_{\text{э}}$ –

количество дней автономной эксплуатации; K – количество циклов измерений параметров почвы в день; T_j – время опроса одного датчика одного J -го типа ($J = t, H, pH$ – температуры, влажности или кислотности); $k_j = k_t, k_H, k_{pH}$ – количество датчиков соответствующего типа; i_j^1, i_j^0 – токи в режимах измерений и ожидания датчика J -го типа; $i_{МК}^1, i_{МК}^0$ – токи МК в режимах или управления циклами измерений, обработки и передачи данных, или ожидания; i_{Lora}^1, i_{Lora}^0 – токи модема LoRaWAN в режимах передачи данных и ожидания.

Исходя из перечисленных требований оказалось, что для экспериментального образца малобюджетной РСКПП экономически выгодным и достаточным является выбор 8-ми разрядного МК ATmega328P-MU, включающего все необходимые периферийные устройства. Данный МК имеет сравнительно большой объем оперативной памяти 2 Кб, энергонезависимую постоянную память 32 Кб, интегрированный аналого-цифровой преобразователь, снабжен портами ввода-вывода.

В качестве окончного устройства End Node канала связи "КМ - ЦУСД" выбран трансивер LoRa SX1272. В настоящее время существуют специальные библиотеки с открытым исходным кодом на языке "C++", обеспечивающие свободную интеграцию таких радиоустройств в цифровые системы Arduino, что существенно упрощает разработку и реализацию необходимого программного обеспечения [2,5,6].

Для выбранных устройств окончательно определили, что для питания одного контрольно-измерительного модуля в течение восьми месяцев автономной работы достаточно 4-х элементов типоразмера АА.

ЦУСД, кроме вышеперечисленных задач высокоуровневой обработки данных, ведения баз данных на энергонезависимом носителе и выдачи данных на облачные серверы, также выполняет функции серверов Network

и Application Server стандарта LoRa при координации работы всех КМ 1.. n – управляет скоростью передачи данных и временными слотами, выделенными под отправку информационных сообщений. Чаще всего в подобных DIY-проектах применяются такие одноплатные компьютеры, как Raspberry Pi или Arduino Mega на микроконтроллере ATmega2560. Для реализации ЦУСД типовой РСКПП выбрано второе устройство.

Реализовано ПО для передачи данных от всех n КМ на WEB-сервер и последующей их обработки данных с целью визуализации и выдачи пользователю в различных формах, документирования, выполнения процедур диагностики и прогнозирования параметров почвы.

Проводились полевые испытания разработанного экспериментального образца малобюджетной РСКПП, включавшей 2 КМ с двумя датчиками влажности на глубинах 50 и 100 см ниже поверхности почвы и с одним датчиком температуры у поверхностного слоя почвы. Испытания подтвердили правильность принятых схемотехнических решений.

Заключение. Представленные выше рекомендации сформулированы на основе тщательного анализа современных научных и методических подходов к построению распределенных в пространстве информационно-измерительных систем, а также анализа рынка цифровых и аналоговых элементов, имеющих в свободном доступе. Реализация предложенных схемотехнических решений на практике позволит создавать типовые РСКПП низкой стоимости даже в условиях малого предприятия, что обеспечит их массовое внедрение в сельское хозяйство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
2. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006. – 288с.

3. Гусева В.С. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом и оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608с.
5. Смольянинов И. Разработана новая технология связи для беспроводных АСКУЭ // Энергетика и промышленность России. – 2016, № 01-02 (285-286). – С. 28.
6. Протокол LoRaWAN, <http://lorawan.lace.io/>
7. СТРИЖ, <https://strij.tech/>
8. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ-2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.

References

1. Vadyunina A. F., Korchagina Z. A. Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochvy. – М.: Agropromizdat, 1986. – 416 s.
2. Shakhnovich I. V. Sovremennye tehnologii besprovodnoi svyazi. – М.: Technosphere, 2006. – 288s.
3. Guseva V. S. Osnovy postroeniya besprovodnyh lokalnyh setey standarta 802.11. – М.: Izd.dom "Williams", 2004. – 304 s.
4. Denisenko V. V. Computernoe upravlenie tehnologicheskim procesom, experimentom i oborudovaniem. – М.: Goryachyaya liniya – Telecom, 2009. – 608s.
5. Smolyaninov, I. Razrabotana novaya tehnologiya svyazi dlya besprovodnyh ASKUE// Energetika I promyshlenoost Rossii. – 2016, № 01-02 (285-286). – S. 28.
6. Protocol LoRaWAN, <http://lorawan.lace.io/>
7. Strizh, <https://strij.tech/>
8. Rekomendacii po mezhgosudarstvennoy standartizacii RMG-2013. – М.: Standartinform, 2014. – 56 s.