

Информационно-измерительная система для исследования почвенного гальванического элемента

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Руслан Сергеевич Жилин

E-mail: Zhilinuslan228@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Жилин Р.С., Вострухин А.В.

Информационно-измерительная система для исследования почвенного гальванического элемента. *Global Agricultural Research*. 2026;1:7.

Р.С. Жилин ✉, А.В. Вострухин

Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

АННОТАЦИЯ

На базе платформы Arduino разработана информационно-измерительная система, предназначенная для выполнения экспериментальных исследований почвенного гальванического элемента (ПГЭ). ПГЭ предназначен для построения энергохарвестеров – источников питания беспроводных подземных датчиков климата почвы. Экспериментальная информационно-измерительная система построена с использованием микроконтроллерного устройства Arduino nano и дополнительного оборудования с целью исследования зависимости выходных электрических характеристик ПГЭ от изменяющихся во времени физических величин, температуры и влажности различных типов почв. Разработана электронная схема, включающая: гальваническую пару Cu-Zn, нагрузочный резистор, датчик влажности почвы LM393 и температурный датчик DS18B20. Информационно-измерительная система позволяет осуществлять измерение напряжения, тока и расчёт внутреннего сопротивления ПГЭ в динамике. Полученные результаты могут быть использованы при разработке автономных систем экологического мониторинга и климата почвы для повышения эффективности систем управления орошением и плодородия почв в сельском хозяйстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроконтроллер, программное обеспечение, почвенный гальванический элемент, влажность почвы, внутреннее сопротивление, Arduino nano, беспроводной датчик

Information-measurement system for the study of a soil galvanic element

CORRESPONDENCE:**Ruslan S. Zhilin**

E-mail: Zhilinuslan228@gmail.com

FOR CITATION:

Zhilin R.S., Vostrukhin A.V.

Information-measurement system for the study of a soil galvanic element. *Global Agricultural Research*. 2026;1:7

Ruslan S. Zhilin ✉, Alexander V. Vostrukhin

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

ABSTRACT

An information and measurement system based on the Arduino platform has been developed for conducting experimental studies of a soil galvanic cell (SGC). The SGC is intended for building energy harvesters – power sources for wireless underground soil climate sensors. The experimental information and measurement system is built using the Arduino nano microcontroller device and additional equipment to study the dependence of the output electrical characteristics of the SGC on time-varying physical quantities, temperature and humidity of different soil types. An electronic circuit has been developed, including: a Cu-Zn galvanic pair, a load resistor, an LM393 soil moisture sensor and a DS18B20 temperature sensor. The information and measurement system allows for the measurement of voltage, current and calculation of the internal resistance of the SGC in real-time. The obtained results can be used in the development of autonomous environmental and soil climate monitoring systems to improve the efficiency of irrigation management and soil fertility systems in agriculture.

KEYWORDS: microcontroller, software, soil galvanic cell, soil moisture, internal resistance, Arduino nano, wireless sensor

ВВЕДЕНИЕ

Интернет подземных вещей (IoUT) и беспроводные подземные сенсорные сети (WUSN) – это новые технологии, особенно актуальные в сельском хозяйстве для измерения и передачи данных об окружающей среде, что позволяет оптимизировать как рост сельскохозяйственных культур, так и управление водными ресурсами [1]. Сенсорные узлы могут быть закопаны в любом месте, в том числе при проезде транспортных средств, не мешая надземной сельскохозяйственной деятельности [2]. Одной из научно-технических проблем является обеспечение сенсорных систем автономными источниками питания, работающими под пахотным слоем земли. В настоящей работе предлагается решение – использовать почвенный гальванический элемент (ПГЭ), представляющий собой автономный источник низкого напряжения, формируемого за счет электрохимического взаимодействия пары разнородных металлов, помещенных в почву, играющую роль естественного электролита. Аналогичные принципы получения электрической энергии из почвенной среды широко рассматриваются в исследованиях по микробным и почвенным гальваническим элементам, где почва выступает электролитом, а разнородные электроды формируют устойчивую электрохимическую пару [3]. Значение внутреннего сопротивления ПГЭ, а также ток, который элемент способен отдавать в нагрузку, зависят от параметров среды – прежде всего от влажности и температуры почвы [4]. При увеличении влажности концентрация свободных ионов возрастает, улучшается электрическая проводимость грунта и, соответственно, снижается внутреннее сопротивление ПГЭ [5]. Электропроводность почвы и, как следствие, электрические характеристики почвенных гальванических элементов существенно зависят от влажности, температуры и ионного состава порового раствора, что подтверждено в фундаментальных исследованиях почвенной электропроводности [6]. Исследование этой зависимости представляет интерес для разработки автономных низкопотребляющих систем мониторинга состояния почвы, датчиков влажности, экологических систем питания и других устройств, работающих без внешнего источника энергии [7].

Целью работы является создание информационно-измерительной системы для измерения и регистрации электрических величин ПГЭ – напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, а также влажности и температуры почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппаратное обеспечение информационно-измерительной системы

Для реализации информационно-измерительной системы использовалась микроконтроллерная платформа Arduino nano, позволяющая одновременно измерять несколько параметров, фильтровать сигнал и осуществлять запись данных через последовательный интерфейс. Платформа Arduino широко применяется при создании экспериментальных информационно-измерительных систем благодаря открытой архитектуре, наличию встроенного АЦП и большому количеству готовых библиотек, что делает ее удобным инструментом для научных исследований и прототипирования [8]. На рисунке 1 представлена принципиальная электрическая схема информационно-измерительной системы, предназначенной для исследования электрических характеристик почвенного гальванического элемента (ПГЭ). Схема разработана в среде EasyEDA и включает в себя микроконтроллер Arduino Nano, гальваническую пару электродов Cu-Zn, нагрузочный резистор R1, цифровой температурный датчик DS18B20, датчик влажности почвы типа LM393, а также цепи фильтрации питания.

Гальванический элемент и измерение его параметров

В качестве ПГЭ используется пара разнородных электродов – медный электрод Cu⁺ (P1) и цинковый электрод Zn⁻ (P2). Цинковый электрод соединен с шиной общей земли (GND), которая является опорным потенциалом для всех измерений. Медный электрод подключен к узлу измерения напряжения, который подводится на аналоговый вход A0 микроконтроллера Arduino Nano. Для возможности измерения как ЭДС холостого хода, так и напряжения под нагрузкой в схеме применяется нагрузочный резистор R1 сопротивлением 100 Ом. Один его вывод подключен к узлу измерения (между Cu и A0),

а второй – к цифровому выходу D3 Arduino Nano. Такой способ подключения позволяет программно подключать и отключать нагрузку: при переводе вывода D3 в режим INPUT резистор отключен (режим холостого хода); при установке вывода D3 в состояние OUTPUT LOW нагрузка подключается к земле. Такой метод исключает необходимость использования дополнительных транзисторов и обеспечивает безопасный ток (менее 5 мА), при этом позволяя реализовать оба режима измерения электрических величин ПГЭ [9].

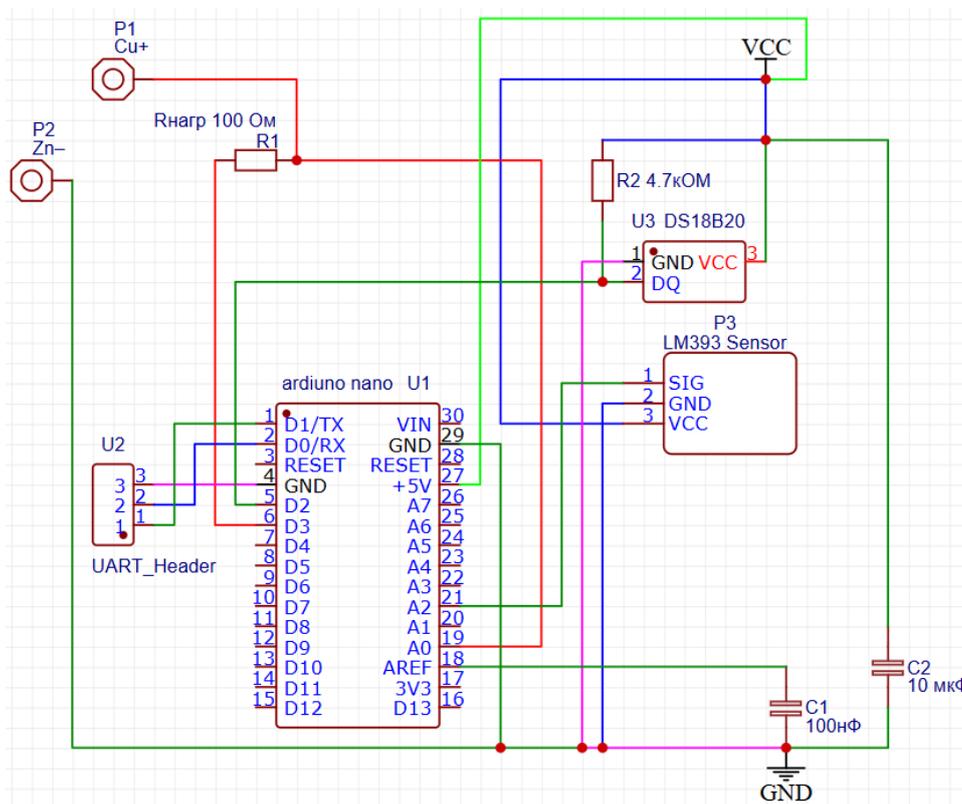


Рисунок 1

Принципиальная схема информационно-измерительной системы для исследования почвенного гальванического элемента

Figure 1

Schematic diagram of the information and measurement system for studying a soil galvanic cell

Измерение температуры почвы

В схему, представленную на Рисунке 1, включен цифровой температурный датчик DS18B20, работающий по интерфейсу 1-Wire. Вывод DQ соединен с цифровым пином D2 Arduino Nano. Линия данных подтянута к шине питания VCC через резистор 4,7 кОм (R2), что является обязательным условием корректной работы по интерфейсу OneWire.

Измерение влажности почвы

Для измерения влажности используется датчик из платы усилителя LM393 (Рисунок 2). Конструктивно датчик состоит из платы усилителя сигнала на LM393 и выносного датчика с двумя токопроводящими длинными контактами, которые погружаются в почву. Принцип работы датчика основан на измерении электрического сопротивления между погруженными в почву контактами, которое изменяется при увлажнении почвы. Сигнальный вывод датчика SIG подключен к аналоговому входу A2, что позволяет регистрировать уровень влажности почвы в диапазоне 0...100 %. Питание модуля осуществляется от шины +5 В (VCC), общая земля датчика связана с землей схемы.



Рисунок 2
Датчик влажности почвы

Figure 2
Soil moisture sensor

Элементы фильтрации

Для снижения цифровых и коммутационных помех на линии питания установлены: керамический конденсатор $C1 = 100$ нФ, электролитический конденсатор $C2 = 10$ мкФ. Они обеспечивают локальную фильтрацию высокого и среднего диапазона частот, что улучшает точность измерений аналоговых сигналов.

Микроконтроллерная система Arduino Nano выполняет следующие функции:

- измерение напряжения ПГЭ, аналоговый вход (A0);
- измерение влажности, аналоговый вход (A2);
- управление нагрузкой ПГЭ, цифровой выход (D3);
- обмен с датчиком DS18B20 (D2);
- передача данных через UART-интерфейс.

Программное обеспечение информационно-измерительной системы

Для реализации работы информационно-измерительной системы разработана программа на языке C/C++ для микроконтроллерной платформы Arduino Nano. В начале программы осуществляются подключения необходимых библиотек, объявление используемых пинов микроконтроллера, а также инициализация датчиков. В данном фрагменте задаются основные параметры системы: номера входов и выходов Arduino, сопротивление нагрузочного резистора, количество усреднений для уменьшения шумов АЦП и опорное напряжение для пересчета значений АЦП в физические величины. Ниже представлен фрагмент исходного кода (Рисунок 3), определяющий структуру программы и базовые параметры информационно-измерительной системы.

```
1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3
4  // --- Конфигурация пинов ---
5  const int PIN_PGE = A0;      // Узел Cu
6  const int PIN_LOAD = 3;     // Нагрузочный резистор R1
7  const int PIN_SOIL = A2;    // Датчик влажности почвы
8  const int PIN_TEMP = 4;    // DS18B20 data line
9
10 // --- Инициализация датчиков ---
11 OneWire oneWire(PIN_TEMP);
12 DallasTemperature sensors(&oneWire);
13
14 // --- Калибровочные константы ---
15 const float R_LOAD = 100.0; // Сопротивление нагрузочного резистора (Ом)
16 const float V_REF = 5.0;   // Опорное напряжение АЦП (В)
17 const int NUM_SAMPLES = 10; // Количество усредняемых samples
```

Рисунок 3
Модуль сбора данных о влажности и температуре почвы

Figure 3
Module for collecting data on soil moisture and temperature

На Рисунке 4 функция выполняет несколько последовательных измерений с аналогового входа, что позволяет уменьшить шум и получить более стабильное значение напряжения.

При отключенной нагрузке пин D3 переводится в режим высокоимпедансного входа, что соответствует холостому ходу ПГЭ (Рисунок 5).

При подключении нагрузочного резистора ($R1 = 100 \text{ Ом}$) клемма D3 замыкает резистор на землю, и система измеряет напряжение под нагрузкой (Рисунок 6).

```
19 float readADCavg(int pin) {
20     const int samples = 10;
21     long sum = 0;
22     for (int i = 0; i < samples; i++) {
23         sum += analogRead(pin);
24         delay(5);
25     }
26     return (float)sum / samples;
27 }
```

Рисунок 4

Модуль кода усредненного измерения напряжения

Figure 4

Average voltage measurement code module

```
29 float measureE(int pinPGE, int pinLoad, float Vref) {
30     pinMode(pinLoad, INPUT); // нагрузка отключена
31     delay(50);
32     float adcVal = readADCavg(pinPGE);
33     return adcVal * (Vref / 1023.0);
34 }
```

Рисунок 5

Модуль кода измерения ЭДС почвенного гальванического элемента

Figure 5

Module of the EMF measurement code of a soil galvanic cell

```
36 float measureVload(int pinPGE, int pinLoad, float Vref) {
37     pinMode(pinLoad, OUTPUT);
38     digitalWrite(pinLoad, LOW); // подключение R1 к земле
39     delay(50);
40     float adcVal = readADCavg(pinPGE);
41     pinMode(pinLoad, INPUT); // возвращаем холостой ход
42     return adcVal * (Vref / 1023.0);
43 }
```

Рисунок 6

Модуль кода измерения напряжения под нагрузкой

Figure 6

Voltage measurement code module under load

На основе закона Ома вычисляются:

- ток через нагрузку;
- внутреннее сопротивление гальванического элемента (Рисунок 7).

```
45 void calculateParameters(float E, float V, float Rload, float &I, float &Rint) {
46     I = V / Rload;
47     if (I > 0.000001) {
48         Rint = (E - V) / I;
49     } else {
50         Rint = 0;
51     }
52 }
```

Рисунок 7

Модуль кода расчета тока и внутреннего сопротивления

Figure 7

Current and internal resistance calculation code module

Основной цикл последовательно вызывает все модули: считывает ЭДС, напряжение под нагрузкой, влажность, температуру и выводит результаты в последовательный порт (Рисунок 8).

Программная часть модели выполняет несколько ключевых функций: считывание параметров влажности, измерение напряжения на нагрузочном резисторе, преобразование показаний АЦП в электрические величины и вычисление тока по закону Ома. Влажность почвы определяется на основе функции `map()`, переводящей диапазон АЦП 0–1023 в проценты влажности 0–100 %. Для измерения напряжения ПГЭ выполняется чтение входа А0, а значение АЦП переводится в милливольты через коэффициент 4,88 (чувствительность одного шага преобразования при опорном напряжении 5 В). Зная напряжение и сопротивление резистора R1, ток вычисляется по формуле $I = V / R1$.

Полученные данные выводятся в последовательный порт, что позволяет фиксировать зависимость тока от влажности почвы. На основе этих данных в дальнейшем можно рассчитать внутреннее сопротивление ПГЭ по выражению $R_{внутр} = (E - V) / I$ где E – ЭДС гальванического элемента, определяемая в отдельном измерении без нагрузки.

```
54 void loop() {
55     float E = measureE(A0, 3, 5.0); // ЭДС
56     float Vload = measureVload(A0, 3, 5.0); // Напряжение под нагрузкой
57
58     float I, Rint;
59     calculateParameters(E, Vload, 1000.0, I, Rint);
60
61     // Датчик DS18B20
62     sensors.requestTemperatures();
63     float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
64
65     // Влажность почвы
66     int soilRaw = analogRead(A2);
67     int soilPercent = map(soilRaw, 0, 1023, 0, 100);
68
69     // Вывод
70     Serial.println("=====");
71     Serial.print("E (мВ): ");
72     Serial.println(E * 1000);
73     Serial.print("V (мВ): ");
74     Serial.println(Vload * 1000);
75     Serial.print("I (мА): ");
76     Serial.println(I * 1000);
77     Serial.print("Rвнутр (Ом): ");
78     Serial.println(Rint);
79     Serial.print("Влажность (%): ");
80     Serial.println(soilPercent);
81     Serial.print("Температура (°C): ");
82     Serial.println(tempC);
83     Serial.println();
84
85     delay(1000);
86 }
```

Рисунок 8

Модуль кода основного цикла информационно-измерительной системы

Figure 8

Module of the main cycle code of the information-measuring system

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, совмещенная электронная схема и программный модуль образуют полнофункциональную модель измерения почвенного гальванического элемента. Они позволяют изучать изменение его электрических характеристик в зависимости от влажности среды, что является основой для построения теоретической зависимости внутреннего сопротивления ПГЭ от влажности, а также оценки возможности практического применения таких элементов в автономных системах мониторинга состояния почвы.

Разработанная электронная схема и программный модуль Arduino Nano позволяют осуществлять комплексное измерение параметров почвенного гальванического элемента, включая напряжение, влажность почвы и ток через нагрузку. Модель обеспечивает возможность наблюдения за изменением электрических характеристик ПГЭ в условиях изменяющейся влажности, что делает ее подходящим инструментом для учебных и исследовательских задач. Полученные данные позволяют оценить поведение гальванического элемента в реальных условиях эксплуатации и подтверждают возможность использования подобных систем в автономных датчиках и экологических мониторинговых установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жилин Р.С. Современные технологии энергохарвестинга для систем питания подземных беспроводных датчиков климата почвы. *Современные проблемы АПК: сборник научных статей Института механики и энергетики 90-й научно-практической конференции «Аграрная наука – Северо-Кавказскому федеральному округу», г. Ставрополь, 6 мая 2025 г.* Ставрополь. 2025:383.
Zhilin R.S. Modern energy harvesting technologies for power supply systems for underground wireless soil climate sensors. *Modern Problems of agriculture: collection of scientific articles of the Institute of Mechanics and Power Engineering, dedicated to the 90th scientific and practical conference «Agrarian Science to the North Caucasus Federal District», Stavropol, May 6, 2025.* Stavropol. 2025:383. (In Russ.).
2. Cariou C., Moiroux-Arvis L., Pinet F., Chanet J.P. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors*. 2023;23:40-58. <https://doi.org/10.3390/s23084058>
3. Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R. et al. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science and Technology*. 2006;40(17):5181-5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
4. Тимофеев Н.Н., Абакумов Е.В. *Лабораторные работы по почвоведению : метод. указания для студентов 2 курса по направлению подготовки 35.03.03 «Агрохимия и агропочвоведение» / Министерство сельского хозяйства РФ, Ивановская ГСХА. Иваново. 2018;51.*
Timofeev N.N., Abakumov E.V. *Laboratory work on soil science : method. instructions for 2nd year students in the field of training 03.35.03 «Agrochemistry and agro soil science» / Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Ivanovo Agricultural Academy. Ivanovo. 2018;51.* (In Russ.).
5. Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф., Егорова Г.С. и др. *Применение гидрогеля в почвах.* Волгоградский государственный аграрный университет. 2016;104.
Okolelova A.A., Zheltobryukhov V.F., Egorova G.S. et al. *The use of hydrogel in soils.* Volgograd State Agrarian University. 2016;104. (In Russ.).
6. Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*. 1989; 53(2):433-439.
7. Paradiso J.A., Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Computing*. 2005;4(1):18-27. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2005.9>
8. Banzi M., Shiloh M. *Getting Started with Arduino*. 3rd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014;130 p.
9. Arduino Nano: на базе микроконтроллера «ATmega328PB» [iarduino.ru.]. Iarduino; 2024. URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/arduino-nano-atmega328pb/>

Arduino Nano: based on the «ATmega328PB» microcontroller [iarduino.ru.]. Iarduino; 2024. (In Russ.). URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/arduino-nano-atmega328pb/>

10. Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Вахтина Е.А. Энергосберегающий асинхронный интерфейс для беспроводных датчиков. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2023;63:92-102. <https://doi.org/10.17223/19988605/63/11>

Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vakhtina E.A. Energy-saving asynchronous interface for wireless sensors. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Computer Science*. 2023;63:92-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988605/63/11>

Сведения об авторах

Жилин Руслан Сергеевич –

студент, 2 курс, направление «Электроэнергетика и электротехника», Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

<https://orcid.org/0009-0001-4496-0914>

zhilinruslan228@gmail.com

Вострухин Александр Витальевич

научный руководитель, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры электротехники, автоматизации и метрологии Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>

SPIN-код: 7414-7478

avostrukhin@yandex.ru

About the authors

Ruslan S. Zhilin –

2nd year student, Power Engineering and Electrical Engineering, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

<https://orcid.org/0009-0001-4496-0914>

zhilinruslan228@gmail.com

Alexander V. Vostrukhin –

Scientific Supervisor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher at the Department of Electrical Engineering, Automation and Metrology, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-2310-2339>

avostrukhin@yandex.ru