

П. А. Яловой¹✉, Е. А. Зиновьев¹, И. Д. Шатц¹, Н. С. Косарев¹, А. А. Шаранов¹

Прототип автономного бюджетного датчика мониторинга деформаций бортов и отвальных массивов

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pavelalovoj404@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается разработка прототипа малобюджетного датчика для геотехнического мониторинга отвальных массивов. Актуальность работы обусловлена высокой подвижностью техногенных отвалов и необходимостью своевременного выявления деформаций для предотвращения аварийных ситуаций. Цель исследования заключается в создании компактного измерительного комплекса, обеспечивающего непрерывный контроль углов наклона. Представлены результаты тестирования разработанного устройства, подтвердившие его работоспособность и точность измерений. Экспериментальная проверка показала стабильную работу системы передачи данных и возможность ее практического применения для мониторинга деформаций.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, отвальные массивы, датчик наклона

P. A. Yalovoi¹✉, E. A. Zinovev¹, I. D. Shatts¹, N. S. Kosarev¹, A. A. Sharapov¹

Prototype of a low-cost sensor for monitoring displacements of waste dumps

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pavelalovoj404@gmail.com

Abstract. The article presents the development of a low-cost sensor prototype for geotechnical monitoring of waste dumps. The relevance of the study is due to the high mobility of technogenic dumps and the critical need for timely deformation detection to prevent emergency situations. The purpose of the research is to design a compact measuring system that ensures continuous monitoring of surface tilt angles. The paper presents testing results of the developed device, confirming its operational reliability and measurement accuracy. Experimental verification demonstrated stable data transmission and confirmed the feasibility of practical implementation for continuous deformation monitoring.

Keywords: geotechnical monitoring, waste dumps, tilt sensor

Введение

Отвальные массивы горных пород характеризуются высокой подвижностью, склонностью к оползневым процессам и деформациям под воздействием атмосферных осадков, динамических нагрузок и изменения гидрогеологических условий [1]. Раннее выявление предвестниковых смещений позволяет своевременно принимать меры по обеспечению безопасности персонала и техники, предотвращая техногенные катастрофы [2]. Существующие на рынке коммерческие предложения обеспечивают высокую точность измерений, однако их стоимость часто делает невозможным организацию плотной сети распределенных

наблюдений [3]. В связи с этим актуальной задачей является разработка мало-бюджетных, но функционально достаточных средств мониторинга.

Целью данной работы является разработка автономного бюджетного датчика мониторинга деформаций бортов и отвальных массивов на базе недорогих решений, имеющих на рынке микроэлектроники.

Для решения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

- разработать прототип устройства и программное обеспечение для его управления;
- разработать web-приложение для визуализации результатов измерений;
- выполнить оценку точности, получаемых устройством измерений, а также провести оценку автономности его работы.

Методы и материалы

Разработанный прототип представляет собой измерительно-передающий комплекс, базовой платформой которого служит микроконтроллер Arduino Nano. Выбор данной платформы обусловлен ее компактными размерами, низким энергопотреблением и достаточной производительностью для решения поставленных задач. В качестве первичного преобразователя используется модуль MPU6050, объединяющий трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп, в котором обработка данных осуществляется встроенным цифровым процессором движения (Digital Motion Processor, DMP), позволяющим выполнять фильтрацию шумов, компенсацию дрейфа гироскопа и расчет углов крена и тангажа автоматически [4]. Передача данных на удаленный сервер реализована с помощью GSM-модуля SIM800L, поддерживающего стандарты GPRS.

Питание датчика осуществляется от блока литий-ионных аккумуляторов типа 18650 через понижающий преобразователь MP1584EN, формирующий стабилизированное напряжение 4 В для питания микроконтроллера и периферийных устройств. Применение аккумуляторов обеспечивает автономную работу устройства в полевых условиях без необходимости подключения к стационарной сети электроснабжения (рис. 1).

Все компоненты смонтированы на односторонней печатной плате размером 70×90 мм. Плата помещена в защитный корпус, изготовленный методом FDM 3D-печати из ударопрочного пластика (PETG), что обеспечивает механическую защиту электроники в условиях открытой карьерной площадки. Крепление датчика к контролируемой поверхности осуществляется через металлическую резьбовую шпильку диаметром 12 мм, интегрированную в нижнюю часть корпуса (рис. 2).

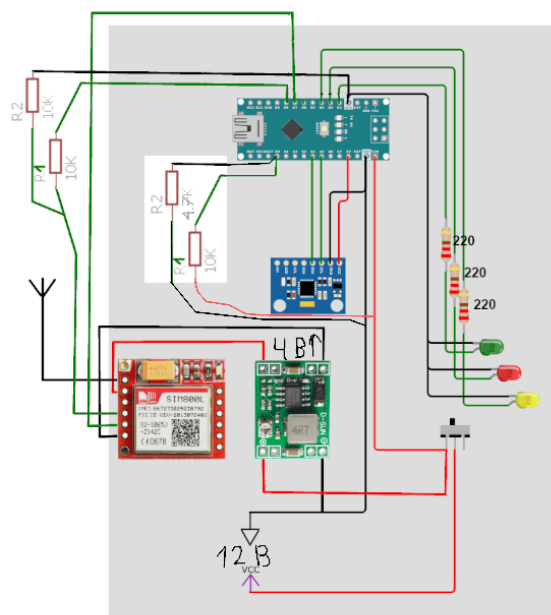


Рис. 1. Принципиальная схема автономного датчика



Рис. 2. Внешний вид корпуса

Сбор данных и их отправка происходят циклически. Микроконтроллер опрашивает MPU6050, формирует строку вида R: XX.XX, P: XX.XX (градусы с точностью до сотых), устанавливает GPRS-соединение и передает пакет методом GET на HTTP-сервер. После успешной передачи устройство переходит в режим ожидания для оптимизации сетевого трафика.

Для приема и визуализации данных развернуто веб-приложение, состоящее из технического сайта с HTTP протоколом и главного сайта, защищенного сертификатом. Сделано это из-за особенности GSM-модуля, который может сво-

бодно отправлять запросы на незащищенные шифрованием сервера. Прокси-домен состоит из двух файлов `proxy.php` и очереди `process\_queue.php`. Скрипт принимает HTTP-запросы, получает данные в виде строк с параметрами напряжения, углами крена и тангажа, а также температуры, и пересылает их на основной сайт. На главном сайте принимает сообщения с прокси файл `log.php`, сохраняя полученные значения в базе данных с временной меткой. Веб-интерфейс основного сайта отображает карту с местоположением датчиков и боковое меню с краткой сводкой по датчикам, закрепленных за организацией, в которой состоит пользователь. Просмотреть детально показатели датчика позволяет файл `sensor\_details.php` подгружая из базы данных текущие значения в виде карточек, строит интерактивные графики на базе библиотеки Chart.js и поддерживает фильтрацию по временным промежуткам (рис. 3, 4).

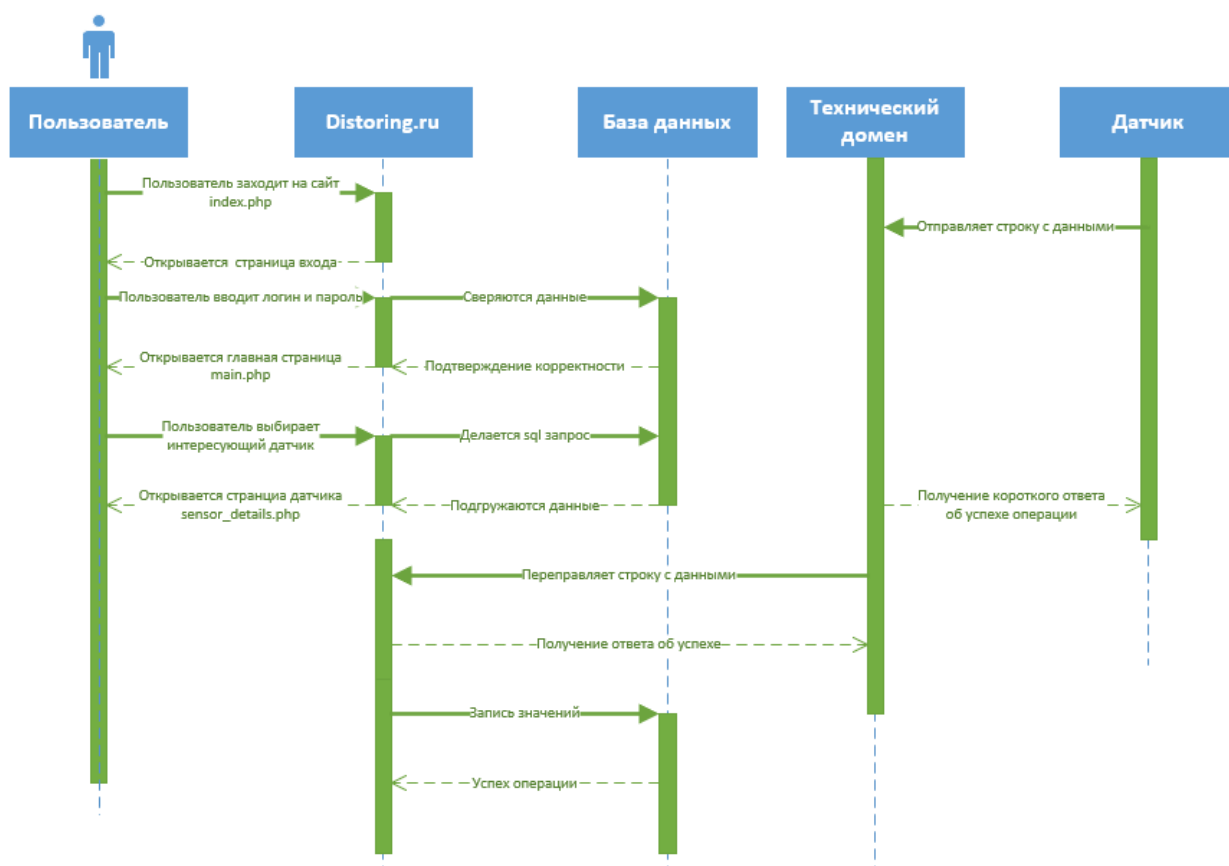


Рис. 3. Диаграмма последовательности системы

Приложение также поддерживает выбор часового пояса. Кроме этого реализована система аварийного оповещения: при отклонении измеренного угла от базового значения более чем на $1,5^\circ$ на дашборде автоматически появляется визуальное предупреждение, а точки на графике маркируются красным цветом. Архитектура приложения рассчитана на развертывание на бюджетных хостингах без использования тяжелых СУБД, что соответствует общей концепции экономической системы мониторинга.

На web-приложение для визуализации результатов мониторинга смещений отвальных массивов получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [5].



Рис. 4. Страница значений датчика в веб-приложении

Результаты

Для оценки работоспособности разработанного датчика была проведена серия экспериментов, включающая проверку точности измерений углов наклона и стабильности передачи данных.

Во время оценки точности измерений проводилась серия статических измерений в разных положениях корпуса и сравнением с эталонным инклинометром. Тестирование системы показало точность измерения углов наклона в пределах $\pm 0,5^\circ$ при статическом положении.

Для тестирования стабильности передачи данных измерения с датчика отправлялись в течение продолжительного периода для оценки количества потерь пакетов и падений связи. В результате тестирования стабильность передачи данных составляет более 97% успешных операций, при общем количестве наблюдений в сутках более 8000.

Веб-приложение обрабатывало и записывало в базу данных все успешно полученные значения. Наблюдения отображаются в виде графиков, позволяя контролировать состояние объекта.

Заключение

В результате работы создан прототип автономного бюджетного датчика мониторинга смещений отвальных массивов. Аппаратная часть базируется на мик-

роконтроллере Arduino Nano, MEMS-датчике MPU6050 и GSM-модуле SIM800L, размещенных на компактной печатной плате 70×90 мм и заключенных в 3D-печатный корпус.

Разработанное веб-приложение позволяет осуществлять удаленный мониторинг, визуализацию данных и оперативное аварийное оповещение при превышении критических значений наклона.

Результаты тестирования подтвердили работоспособность системы и ее соответствие заявленным характеристикам:

- точность измерений углов наклона: $\pm 0.5^\circ$;
- надежность передачи данных: 97%;
- время автономной работы: до 100 дней (при интервале передачи 1 раз в 2 минуты).

Система способна обеспечить контроль сети датчиков, что позволит контролировать протяженные объекты, а за счет того, что плотность их установки будет выше, а также выявить движения на локальных участках на ранней стадии мониторинга.

Экономическая эффективность и простота развертывания делают разработанную систему перспективным инструментом для организации геотехнического мониторинга на предприятиях горнодобывающей промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Низаметдинов Ф.К., Барышников В.Д., Оралбай А.О. Оценка устойчивости бортов карьера Кентобе на основе разработанной цифровой геолого-геомеханической модели месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 27-34. DOI: 10.15372/FTPRPI20220603.
2. Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С., Сатбергенова А.К., Ожигина С.Б. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 142-156. EDN OKPFFR.
3. Косарев Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга // Вестник СГУ-ГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 5–14. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14.
4. Буслаев А.Б., Кошелева Н.Н., Белокопытов С.С. Устройство управления модулями MPU6050 по шине I²C на основе микроконтроллера // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Т. 17. № 2. – 2021. – С. 65 – 69. DOI: 10.36622/VSTU.2021.17.2.010.
5. Шарапов А.А., Косарев Н.С., Яловой П.А., Шатц И.Д., Зиновьев Е.А. Web-приложение для визуализации результатов мониторинга смещений отвальных массивов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2026618472, 25.03.2026.

© П. А. Яловой, Е. А. Зиновьев, И. Д. Шатц, Н. С. Косарев, А. А. Шарапов, 2026