

Метод мониторинга и достоверного прогнозирования возникновения оползней дорог на основе цифрового устройства

А.Л. Кортиев✉, Б.Д. Хасцаев, А.А. Кортиев

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
г. Владикавказ, Российская Федерация
✉ kortiev73@mail.ru

Резюме: Разработка цифровых устройств для раннего выявления причин возникновения оползней является актуальной проблемой, так как подобные устройства обеспечивают оперативность в исключении отрицательных последствий, вызываемых оползнями. Эта проблема в работе решается путем разработки простого в реализации цифрового устройства, предусматривающего мониторинг процессов, происходящих в грунте, на основе систематического измерения параметров импеданса грунта и обработки результатов измерения с применением нейронной сети. Предлагаемому в работе устройству свойственны высокие метрологические и экономические показатели, составляющие основу для широкого применения устройства и достоверного прогнозирования начала возникновения оползня. В работе рассматриваются: вариант блок-схемы цифрового устройства для защиты дорог от оползней и структурная схема измерительной цепи устройства, в которой предусмотрена трехпроводная схема соединения объекта измерения и применены структурные изменения в исходной измерительной цепи. В синтезированной измерительной цепи исключена зависимость точности преобразования как от сопротивлений длинных соединительных проводов, так и от нелинейности выходной характеристики измерительной цепи.

Ключевые слова: цифровое устройство, блок-схема, структурная схема, измерительная цепь, измерительные электроды, длинные соединительные провода, параметры импеданса, измерение импеданса, датчики сопротивления, датчики температуры, датчики массы, датчики влажности, датчики осадков, искусственные нейронные сети

Благодарности: Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (Соглашение №23-17-20001).

Для цитирования: Кортиев А.Л., Хасцаев Б.Д., Кортиев А.А. Метод мониторинга и достоверного прогнозирования возникновения оползней дорог на основе цифрового устройства. *Горная промышленность*. 2025;(1S):47–54. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-47-54>

A method to monitor and reliably predict emergence of road landslides using a digital device

A.L. Kortiev✉, B.D. Khastsaev, A.A. Kortiev

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
✉ kortiev73@mail.ru

Abstract: Development of digital devices for early detection of landslide causes is a topical problem, because such devices ensure efficiency in eliminating the adverse effects caused by landslides. The research solves this problem by developing a simple-to-implement digital device for monitoring the processes that take place in the ground, based on systematic measurement of the ground impedance parameters and processing of the measured values using a neural network. The device proposed in the paper is characterised by high metrological and economic performance, which ensures a wide range of application and reliable prediction of landslide initiation. The paper discusses: a block diagram of the digital device to protect roads from landslides and a structural diagram of the device's measuring circuit, which provides a three-wire connection to the measured object and applied structural changes in the original measuring circuit. The synthesized measuring circuit eliminates the dependence of the conversion accuracy on both the resistance of the long connecting wires and the nonlinearity of the output characteristic of the measuring circuit.ining enterprises and makes it possible to define the tasks for practical implementation of mining business projects.

Keywords: digital device, block diagram, structural diagram, measuring circuit, measuring electrodes, long connecting wires, impedance parameters, impedance measurement, resistance sensors, temperature sensors, mass sensors, humidity sensors, precipitation sensors, artificial neural networks

Acknowledgments: This work was financially supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No.23-17-20001).

For citation: Kortiev A.L., Khastsaev B.D., Kortiev A.A. A method to monitor and reliably predict emergence of road landslides using a digital device. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):47–54. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-47-54>

Введение

Оползни на дороге приводят как к материальному ущербу, так и к гибели людей, поэтому защита от оползней, в первую очередь дорог, является важной задачей многих государственных служб. Для защиты от оползней дорог разработаны различные методы и разработаны технические средства. Однако их применение носит ограниченный характер из-за сложности и дороговизны технических средств. В связи с этим поиск новых, более простых в реализации и более удобных в эксплуатации методов и технических средств является актуальной проблемой, которой посвящена настоящая работа. Таким образом, цель работы заключается в разработке простого в реализации устройства, предназначенного для массового применения, прогнозирующего оползни с высокой достоверностью.

Методы исследования

В работе применены теоретические методы исследования, обеспечившие как проведение анализа существующих методов разработки технических средств мониторинга, прогнозирования и исследования оползней, так и определение наиболее перспективных путей построения технических средств, их систематизацию и выбор наиболее перспективного направления реализации технического средства с заданными свойствами, достоинствами и минимальными недостатками. Результаты этих исследований составили основу для разработки цифрового устройства с желаемыми свойствами и возможностями.

Результаты

На основе обзора литературных источников [1–7] авторами был сделан вывод, что раннее выявление схода оползня возможно на основе измерения хотя бы одного параметра комплексного сопротивления (импеданса) грунта склона. Динамика изменения этого физического параметра грунта может с высокой точностью характеризовать процессы, происходящие в нем (накопление влаги, смещение слоев, частичное сползание грунта и самое опасное явление – нарастание массы грунта склона и пр.), что следует из [5–7]. Поэтому справедливо то, что непрерывным измерением во времени параметра импеданса грунта склона возможен сбор информации о процессах, происходящих в грунте и приводящих в итоге к оползню.

Дополнительно важно отметить, что оползни на дорогах чаще всего возникают из-за обильных осадков и весной из-за бурного таяния снежных покровов, располагающихся на склонах вдоль дорог. Эти факторы существенно влияют на влажность грунта склона, которая, в свою очередь, является одной из главных причин возникновения оползней, и можно предположить, что уровень влажности определяет сход оползней и для каждого склона существует некоторый порог влажности, вызывающий сход оползней. Очевидно, что этот порог зависит от наклона и массы склона, а также от состава грунта. Поэтому, измеряя импеданс грунта на некотором участке между измерительными электродами, можно отслеживать влажность грунта, его порог влажности и прогнозировать сход оползней.

Для выполнения указанной процедуры достаточно разработать цифровое устройство для измерения хотя бы одного из параметров импеданса, к примеру, активного или емкостного сопротивления. С точки зрения обеспечения широких функциональных возможностей цифровое устройство должно обеспечивать дистанционную пере-

дачу результатов измерения, что существенно повышает уровень автоматизации мониторинга оползней.

Блок-схема разработанного устройства с отмеченными свойствами приведена на рис. 1. Важнейшей частью такого устройства является измерительная цепь (ИЦ). Она обеспечивает преобразование измеряемого импеданса в активную величину, пропорциональную величине измеряемого импеданса. Вариантов построения ИЦ, обладающих как достоинствами, так и недостатками, на практике много. В числе последних сложность в реализации, неинвариантность к сопротивлениям соединительных проводов, что приводит к снижению точности измерения параметра импеданса, а значит, к снижению достоверности результатов измерения. К числу недостатков ИЦ относятся и нелинейность выходной характеристики ИЦ, также снижающая точность измерения и т.д. Поэтому авторами была поставлена задача разработки ИЦ, лишенной указанных недостатков известных ИЦ. Такая ИЦ была разработана в виде структурной схемы и рассмотрена ниже.

Блок-схема цифрового устройства для защиты дорог от оползней, как видно из рис. 1, кроме ИЦ, включает в себя:

- Э – электроды, конструкция и материал которых во многом определяют свойства составляющих грунта и соединение которых с ИЦ возможно на основе длинных соединительных проводов;
- БПО – блок первичной обработки результатов измерения, выполняющий дополнительно функции: усиление аналогового сигнала, его фильтрацию и преобразование в цифровой сигнал и пр.;
- БДП – блок дистанционной передачи данных, обеспечивающий передачу информации по радиоканалу на большие расстояния и связь с центром сбора результатов измерений и прогнозирования оползней;
- БП – стандартный блок питания измерительной аппаратуры, питающий составляющие схемы устройства постоянным напряжением необходимого уровня.

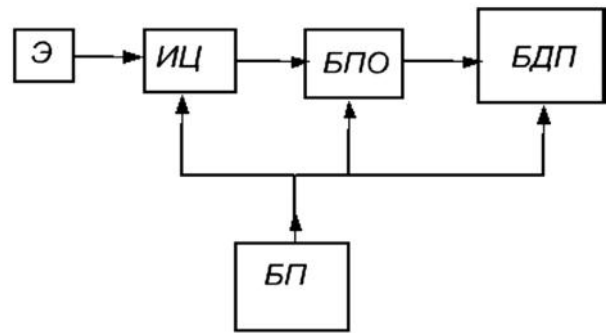


Рис. 1
 Блок-схема цифрового устройства для защиты дорог от оползней

Fig. 1
 A block diagram of the digital device to protect roads from landslides

Рассмотрим подробнее ИЦ разработанного устройства. От ее свойств во многом зависят метрологические характеристики всего устройства, так как она является первичным звеном в цепи преобразования исходной (измеряемой) информации. Для измерения параметров импеданса известно широкое применение четырехплечей мостовой измерительной цепи, известной также как мост Уитстона. Однако у этой ИЦ имеются недостатки, определяемые нелинейной выходной характеристикой и зависимостью

точности измерения от сопротивлений соединительных проводов. При этом, чем длиннее соединительные провода, тем больше их сопротивление и из-за этого меньше точность измерения. Для устранения этих недостатков в известной ИЦ (в мосте Уитстона) были выполнены структурные преобразования, в результате которых и были достигнуты желаемые изменения свойств и возможностей исходной ИЦ. Разработанная таким образом ИЦ представлена на рис. 2. Такой вариант ИЦ наиболее оптимальный по реализации и функциональным возможностям по сравнению с аналогами. Схема ИЦ устройства была разработана на основе ИЦ, рассмотренной в [8].

Как видно из рис. 2, структурная схема ИЦ состоит из верхней ветви ab с двумя плечами ac и cb . При этом плечо ac включает разъем P с тремя контактами, обозначенными как x_1, x_2, x_3 , и с которыми соединены 3 соединительных провода для связи ИЦ с измерительными электродами, устанавливаемыми на определенном участке склона для измерения параметра импеданса, к примеру, активного сопротивления R_x . При этом токовыми соединительными проводами являются R_{s1} и R_{s2} и они соединяются с контактами x_1, x_2 , а потенциальным соединительным проводом является R_{s3} и он соединяется одним концом с контактом x_3 , а вторым концом с нижним электродом (с началом второго соединительного провода R_{s2}). Второе плечо верхней ветви cb содержит образцовый элемент R_2 . ИЦ также включает в себя нижнюю ветвь $a'b'$ с двумя плечами $a'd$ и db' , в которые включены соответственно образцовые элементы R_4 и R_3 .

В состав ИЦ также входят: 3 пары повторителей напряжения – $\Pi 1$ и $\Pi 2$, $\Pi 3$ и $\Pi 4$, $\Pi 5$ и $\Pi 6$; дифференциальные усилители $ДУ1$ – $ДУ4$; сумматоры $C1$ и $C2$; генератор напряжения $ГН$; умножитель $У$ с коэффициентом умножения 2; блок сбора и обработки данных измерения $УСДИ$.

Дополнительно отметим, что разделение ИЦ устройства на верхнюю ab и нижнюю $a'b'$ ветви выполнено с целью питания их разными напряжениями и исключения влияния на точность измерения сопротивлений токовых соединительных проводов R_{s1} и R_{s2} , влияние которых на точность измерения существенно, особенно при дистанционных измерениях. Причем степень влияния во многом зависит от длины токовых соединительных проводов R_{s1} и R_{s2} . Исключение этого влияния и обеспечение высокой точности измерения сопротивления свойственны предлагаемому устройству. Это подтверждается математическими выражениями, приводимыми далее.

Как видно из рис. 2, верхняя ветвь ab питается суммой напряжений: от генератора $ГН$ напряжения и от первого плеча ac верхней ветви ИЦ устройства, включающего в себя сопротивление R_x объекта и сопротивления токовых соединительных проводов R_{s1} и R_{s2} и контактов разъема P – 2 и 4. Напряжение от первого плеча формируется на выходе дифференциального усилителя $ДУ2$ с использованием повторителей $\Pi 3$ и $\Pi 4$ напряжения. Таким образом, верхняя ветвь устройства, обозначенная как ab , питается напряжением, определяемым формулой:

$$U_{ab} = U_{\text{э}} + U_{ab} \frac{R_{s1} + R_x + R_{s2}}{R_{s1} + R_x + R_{s2} + R_2},$$

где $U_{\text{э}}$ – эталонное синусоидальное напряжение на выходе генератора $ГН$ напряжения; R_x – сопротивление грунта между электродами или сопротивление объекта измерения; R_{s1} и R_{s2} – сопротивления токовых соединительных

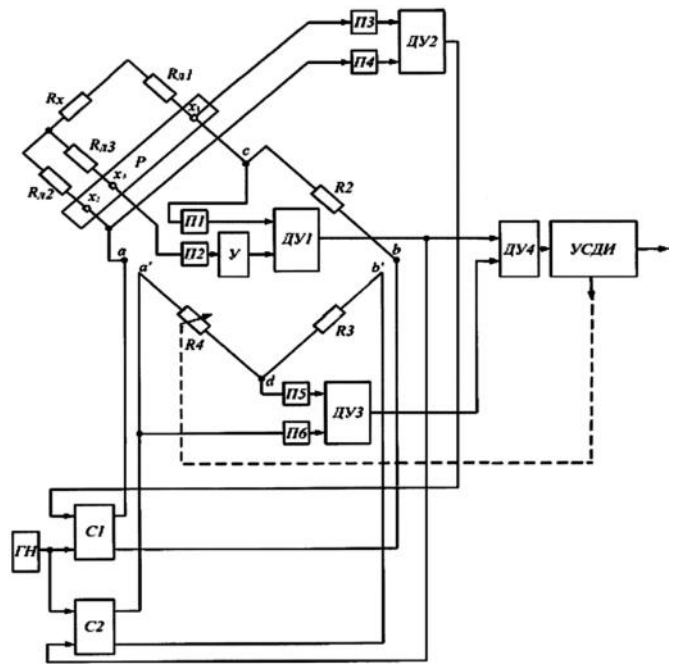


Рис. 2
Структурная схема измерительной цепи цифрового устройства для защиты дорог от оползней

Fig. 2
A structural diagram of the measuring circuit of the digital device to protect roads from landslides

проводов (линий) и контактов 2 и 4; R_2 – сопротивление образцового резистора второго плеча верхней ветви cb ИЦ. После преобразований вышеприведенного выражения формула напряжения питания верхней ветви примет следующий вид:

$$U_{ab} = U_{\text{э}} \frac{R_{s1} + R_x + R_{s2} + R_2}{R_2}$$

Исходя из этой формулы напряжение на выходе повторителя $\Pi 1$ напряжения будет соответствовать выражению:

$$U_{\Pi 1} = U_{ab}(R_{s1} + R_x + R_{s2}) / (R_{s1} + R_x + R_{s2} + R_2),$$

а напряжение на выходе повторителя $\Pi 2$ напряжения будет соответствовать следующему выражению:

$$U_{\Pi 2} = U_{ab} R_{s2} / (R_{s1} + R_x + R_{s2} + R_2).$$

В связи с этим напряжение на выходе умножителя $У$ будет соответствовать выражению:

$$U_y = -2U_{ab} R_{s2} / (R_{s1} + R_x + R_{s2} + R_2).$$

Если принять условие $R_{s1} = R_{s2}$, что легко выполнимо при длинных соединительных проводах, то напряжение на выходе дифференциального усилителя $ДУ1$ будет соответствовать выражению:

$$U_{ДУ1} = U_1 = U_{\text{э}} R_x / R_{s2}.$$

Выражение показывает инвариантность напряжения на выходе $ДУ1$ от сопротивлений токовых соединительных проводов. Поэтому это напряжение подается на сумматор $C2$ для суммирования его с выходным напряжением генератора $ГН$ напряжения с целью питания нижней ветви ИЦ устройства суммарным напряжением.

Так как нижняя ветвь ИЦ устройства питается напряжением, равным сумме напряжения от генератора напряжения $ГН$ и напряжения на выходе

дифференциального усилителя ДУ1, то формула напряжения питания нижней ветви устройства имеет вид

$$U_{a'b'} = U_3 + U_3 \frac{R_x}{R_2} = U_3 \frac{R_2 + R_x}{R_2}.$$

Тогда напряжение U_2 на выходе дифференциального усилителя ДУ3, равное падению напряжения на четвертом плече ИЦ устройства и формируемое с использованием повторителей П5 и П6 напряжения, будет соответствовать формуле:

$$U_2 = U_{a'b'} \frac{R_4}{R_3 + R_4} = U_3 \frac{R_2 + R_x}{R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4},$$

где R_3 и R_4 – соответственно сопротивления образцовых элементов, составляющих нижнюю ветвь ИЦ устройства.

Напряжения с выходов дифференциальных усилителей ДУ1 и ДУ3 подаются на входы дифференциального усилителя ДУ4, на выходе которого формируется напряжение, соответствующее формуле:

$$\begin{aligned} U_3 &= U_1 - U_2 = U_3 \frac{R_x}{R_2} - U_3 \frac{R_2 + R_x}{R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \\ &= U_3 \frac{R_x R_3 - R_2 R_4}{R_2 (R_3 + R_4)} = U_3 \frac{R_x G_2 - G_3 R_4}{1 + G_3 R_4} \end{aligned}$$

где $G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$.

Формула показывает линеаризованную выходную характеристику ИЦ устройства относительно измеряемого сопротивления объекта R_x и проводимости второго плеча G_2 ИЦ устройства. Одновременно формула показывает полную инвариантность выходной величины устройства к неинформативным параметрам, включая R_{i1} и R_{i2} , т.е. полную независимость результатов измерения от сопротивлений соединительных проводов. К числу неинформативных параметров также относятся и сопротивления контактов соединения соединительных проводов объекта с ИЦ устройства. В рассматриваемом случае ими являются контакты x_1 и x_2 разъема P .

Таким образом, показано, что ИЦ устройства обладает линейной выходной характеристикой и свойством инвариантности к сопротивлениям соединительных проводов объекта. Этим определяется достоинство устройства – возможность обеспечения высокой точности измерения одного параметра импеданса объекта, причем, что важно, при использовании лишь одного дополнительного длинного соединительного провода.

Практическое применение

Алгоритм практического применения устройства предусматривает выполнение комплекса процедур, обеспечивающих корректную работу устройства и исключение аварийных для устройства ситуаций.

1. Ознакомление с конструкцией электродов, которая главным образом зависима от состава грунта оползня.

2. Определение длины соединительных проводов электродов в зависимости от выбранного участка для проведения измерений импедансных характеристик оползня и месторасположения на оползне устройства.

3. Включение устройства и вывод его в рабочий режим.

4. Проведение четырех видов измерений импеданса при сухом состоянии грунта оползня и построение четырех

графиков зависимости импеданса от разных величин. Эти измерения следующие.

4.1. Проведение измерения импеданса Z на разных глубинах залегания электродов в грунте H при постоянном расстоянии между электродами L . Построение зависимости импеданса Z от глубины залегания электродов в грунте H , т.е. $Z = f(H)$ при $L = \text{const}$.

4.2. Проведение измерения импеданса Z в зависимости от расстояния между электродами по горизонтали при заданной глубине залегания электродов в грунте H . Построение зависимости импеданса от расстояния между электродами L при заданной глубине залегания электродов H в грунте, т.е. $Z = f(L)$ при $H = \text{const}$. Можно расстояния между электродами устанавливать от 10 см с шагом до 10 см. Максимальное расстояние между электродами выбрать равным 100 см. Измерения провести при залегании электродов от 5 см и с шагом от 10 до 30 см.

4.3. Проведение измерения импеданса Z в зависимости от расстояния между электродами по склону оползня при разных углах наклона грунта оползня при заданной глубине залегания электродов в грунте H . Построение зависимости импеданса от расстояния между электродами L при заданной глубине залегания электродов H в грунте и заданном угле наклона склона G , т.е. $Z = f(L)$ при $H = \text{const}$ и $G = \text{const}$. Можно расстояния между электродами устанавливать от 15 см с шагом до 15 см. Максимальное расстояние между электродами выбрать равным 100 см. Измерения провести при залегании электродов от 5 см и с шагом от 10 до 30 см.

4.4. Для оптимального выбора площади и конфигурации электродов рекомендуется подобрать несколько типов электродов, отличающихся как площадью S , так и конфигурацией K . К примеру, подобрать все электроды с прямоугольной площадью S , одинаковой формы, но разной величины по площади. Провести измерения импеданса для всех указанных случаев и построить зависимости $Z = f(S)$ при $L = \text{const}$, $H = \text{const}$; $Z = f(K)$ при $L = \text{const}$, $H = \text{const}$. Здесь также возможно построение зависимости импеданса от угла наклона склона и определение экспериментальным путем влияния наклона U на изменение величины импеданса – $Z = f(U)$, а также зависимости вероятности возникновения оползня от угла наклона склона.

4.5. По результатам измерений определение электрической схемы замещения грунта оползня, по которой могут быть выбраны наиболее оптимальные диапазоны измерительных частот, обеспечивающие наибольшую точность измерения при емкостном сопротивлении.

5. Проведение измерений импеданса и построение графиков зависимостей по пунктам 4.1–4.3 при разных величинах влажности B грунта оползня, достигаемой искусственным путем с целью определения критичного состояния грунта оползня и величины влажности, при которой возможно возникновение оползня. Для этого заданную площадь грунта поливать выбранным объемом воды при непрерывном измерении импеданса. Далее необходимо построить зависимости по: п. 5.1 – $Z_{вл} = f(H)$ при $L = \text{const}$, $B = \text{const}$; п. 5.2 – $Z_{вл} = f(L)$ при $H = \text{const}$, $B = \text{const}$; п. 5.3 – $Z_{вл} = f(L)$ при $H = \text{const}$ и $G = \text{const}$.

6. Путем сопоставления графиков зависимостей, построенных в пп. 4 и 5, зафиксировать уровни величин составляющей импеданса, при которых возможны с той или иной вероятностью сходы оползня.

7. Составить таблицу прогноза схода оползня на основе данных, полученных в п. 6.

Обсуждение результатов

Как показано выше, разработанному устройству свойственны применение трехпроводного способа соединения измерительных электродов (или же трехпроводное соединение объекта измерения с устройством для измерения параметра импеданса) и структурные изменения в ИЦ устройства. Такая ИЦ обеспечивает при минимальном числе дополнительных соединительных проводов инвариантность к сопротивлениям соединительных проводов. Кроме этого, структурные изменения в ИЦ обеспечивают линейризацию ее выходной характеристики и постоянство ее чувствительности на всем диапазоне измерения импеданса, а значит постоянную точность измерения.

Важно также дополнительно отметить то, что разработанное устройство реализуется просто при обеспечении высокой точности измерения информативного параметра объекта, к примеру, грунта. При этом ценным свойством устройства является возможность соединения электродов длинными соединительными проводами, что необходимо для расположения измерительного устройства в безопасном месте на склоне с возможным оползнем.

Разработанное устройство может в составе известных геоэлектрических средств исследования оползневых явлений служить основой развития перспективных путей мониторинга и прогнозирования оползней.

Перспективность разработки подтверждается многими современными научными работами, направленными на изучение сходов оползней на основе анализа электрических свойств почв, горных пород, грунтов и пр., к примеру, [9–16]. Нетрудно предположить, что для повышения эффективности этих работ, связанных с изучением электрических характеристик важных природных объектов, необходимы современные технические средства с улучшенными свойствами и возможностями. С этой целью и разработано устройство, предлагаемое авторами настоящей работы.

Также здесь важно отметить то, что в последние десятилетия достаточно перспективными становятся технические устройства мониторинга оползней с искусственным интеллектом, что следует из таких работ, как [17–20]. Так, в [20] отмечается, что наиболее эффективен для решения задач мониторинга и раннего выявления оползней многослойный (трехслойный) перцептрон (MLP). Подобная архитектура искусственной нейросети в последние годы наиболее применяется.

Краткое описание работы такой сети следующее. Каждый элемент данной сети строит взвешенную сумму своих входов с поправкой в виде слагаемого, а затем пропускает эту величину активации через передаточную функцию. Так формируется выходное значение этого элемента. Все элементы организованы в постоянную топологию с прямой передачей сигнала. Такую нейросеть можно интерпретировать как модель многополюсника, у которой как веса, так и пороговые значения (смещения) являются свободными параметрами модели.

Данный вариант трехслойного перцептрона может успешно применяться в составе предлагаемого устройства. Особенности подобного перцептрона видны из рис. 3, на котором показана модель многослойной искусственной нейронной сети (ИНС) с тремя слоями. Подробный анализ ИНС и принципы их построения с различными возможностями следуют из [21].

Существенная важность рассматриваемых ИНС в том, что они могут моделировать прогнозную функцию прак-

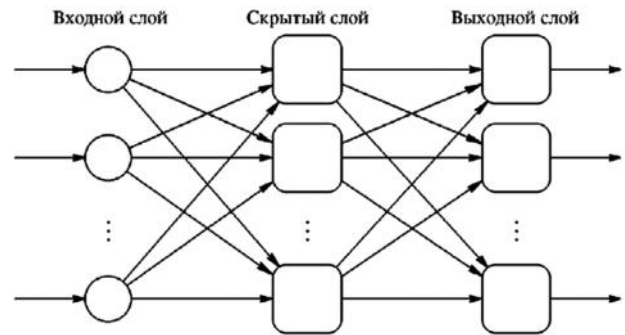


Рис. 3
Модель многослойной искусственной нейронной сети
Источник: [21]

Fig. 3
A model of a multilayer artificial neural network
Source: [21]

тически любой степени сложности, при этом число элементов в каждом слое определяет сложность функции, которая в общем случае является существенно нелинейной.

Хотя в настоящей работе подробно не рассматриваются возможности применения искусственного интеллекта для повышения эффективности мониторинга оползней, тем не менее следует отметить, что разработанное цифровое устройство может эффективно работать в составе автоматизированной системы мониторинга оползней с ИНС.

Разработанное цифровое устройство может и в автономном режиме работать с интеллектуальным блоком, построенном на основе многослойной ИНС. Поэтому дополнительно отметим то, что искусственный интеллект является перспективной основой развития существующих технических средств для мониторинга оползней, фундаментом для раннего обнаружения нежелательных процессов, происходящих в оползнях.

Таким образом, научные труды последних двух десятилетий [17–20] убеждают в том, что применение искусственного интеллекта в автоматизированных системах мониторинга оползней является важным направлением повышения их эффективности, новой базовой составляющей их развития. Сказанное важно для значительного снижения ущерба, вызываемого сходами оползней.

Перспективы применения

Цифровое устройство, разработанное с целью обеспечения измерения импеданса с высокой точностью, можно применять для измерения целого ряда физических параметров грунта, осадков и т.д., от которых зависят оползни. Это возможно с применением соответствующих датчиков физических величин, к примеру, датчиков давления, массы, веса, движения, перемещения. Общим показателем этих датчиков является то, что их выходной величиной является электрическое сопротивление или его изменение, поэтому они еще называются датчиками сопротивления (импеданса). Иначе, выходной величиной этих датчиков является активная или пассивная составляющая импеданса.

Краткий анализ датчиков, которые предлагаются на рынке и которые могут быть использованы для измерения параметров грунтов оползней или контроля происходящих в них процессов, показывает, что ими являются датчики температуры, массы, влажности, перемещения, плотности и т.д. Могут применяться и датчики скорости,

направления ветра, объема осадков и пр. Все эти датчики могут использоваться в комплекте с разработанным устройством или по отдельности с ИЦ этого устройства, поэтому рассмотрим кратко характеристики и свойства наиболее востребованных из этих датчиков. К ним относятся в первую очередь термопреобразователи сопротивления, в числе которых терморезисторы, резистивные термопреобразователи, термометры сопротивления. Известно, что принцип действия этих датчиков основан на зависимости электрического сопротивления металла или полупроводника от температуры. В качестве металла в них используются как медь, платина, так и никель.

Важным достоинством металлических датчиков является высокая линейность и взаимозаменяемость, т.е. возможность замены вышедшего из строя датчика на аналогичный датчик без повторной калибровки устройства, в котором он использовался.

Взаимозаменяемость достигается благодаря малому технологическому разбросу сопротивлений металлических датчиков, который составляет от $\pm 0,15$ °C при температуре 0 °C для медных датчиков класса «А» и до $\pm 0,5$ °C для датчиков класса «С» (см. ГОСТ 6651–94¹).

Основной характеристикой датчиков температуры является диапазон измеряемых температур. К примеру, медные датчики используются для измерения температуры в диапазоне от минус 200 °C до плюс 200 °C, платиновые – в диапазоне от минус 260 °C до плюс 850 °C, никелевые – от минус 60 °C до плюс 180 °C.

Датчики температуры различаются и по другим характеристикам. К примеру, никелевые датчики температуры имеют высокую чувствительность, платиновые – высокую стабильность, что означает неизменность показаний с течением времени, медные – низкую цену и наилучшую линейность зависимости сопротивления от температуры.

Другим важным классом датчиков для мониторинга оползней являются тензорезисторы, которые изготавливаются по ГОСТ 20420–75², ГОСТ 21616–91³ и в целом используются для измерения деформации в твердых телах. Однако, так как принцип работы тензорезисторов основан на явлении изменения электрического сопротивления твердого тела при его деформации под действием приложенной силы, то на их основе изготавливаются датчики: веса, давления, перемещения, ускорения, вибрации и т.д., которые могут успешно использоваться для исследования и непрерывного мониторинга оползней. Но при этом надо учитывать то, что с использованием тензодатчиков измерения происходят при регистрации очень малых изменений сопротивления. К примеру, относительное изменение сопротивления, вызываемое относительным растяжением 0,0005 при тензорезистивном коэффициенте, равном 2, составит 0,1%. Это для тензодатчика с сопротивлением 120 Ом эквивалентно сопротивлению всего лишь 0,12 Ом.

Для измерения столь малого изменения сопротивления и для компенсации температурной погрешности тензодатчик (тензодатчики) традиционно включают в четырехплечевую мостовую измерительную цепь Уитстона. Однако включение этих датчиков в разработанную авторами

ИЦ может повысить точность измерения в несколько раз, так как она построена на основе схемы Уитстона и ей характерны основные свойства моста Уитстона. Более того, разработанной ИЦ дополнительно свойственны как повышение и постоянство чувствительности, так и инвариантность к неинформативным параметрам.

Важно отметить, что установленного стандарта для питания схемы Уитстона нет, но при этом типовыми считаются напряжения 3 В и 10 В, при которых ток через тензодатчик чаще всего составляет от 2 до 30 мА, когда датчики имеют сопротивление от 1 кОм до 120 Ом. Как правило, напряжение питания мостовой схемы должно быть по возможности большим, чтобы увеличить отношение полезного сигнала к шуму, и одновременно достаточно малым с целью минимизации погрешности от саморазогрева датчика.

Датчики емкостные также могут применяться для измерения ряда физических величин, характеризующих грунт оползня и происходящие в нем процессы механического характера (небольшие движения грунта в оползне и пр.). Такими величинами могут быть и влажность грунта, что определяется объемом осадков, плотность грунта и др. К примеру, так как электрическая емкость между электродами зависит от влажности почвы (грунта), датчик емкостной может применяться для мониторинга влажности почвы.

Следует отметить также важность датчиков количества осадков для изучения процессов, происходящих в оползнях. Выпускаемые промышленностью датчики количества осадков имеют большое значение для достоверного учета осадков, ибо осадки наблюдаются круглогодично. Известны разные модели устройств с датчиками осадков, к примеру, осадкомеры (дождемер, пловиомер, пловиограф). Они обеспечивают измерение количества выпавших осадков – дождя, снега.

Современные пловиографы измеряют количество осадков за единицу времени, а также интенсивность осадков. Устройства протоколируют и дистанционно передают данные измерений. Большой интерес представляют пловиографы для измерения твердых осадков.

Более подробная информация о свойствах и о возможностях практического применения датчиков содержится в [22].

Таким образом, для значительного повышения эффективности мониторинга оползней необходимо в комплект разработанного цифрового устройства включить:

- разнообразные датчики для повышения числа точно измеряемых физических величин и природных факторов;

- блок с искусственным интеллектом и алгоритмическим обеспечением для эффективной обработки результатов измерения, с функциями самообучения нейронной сети, расширения базы знаний и т.д.

Заключение

Разработанное цифровое устройство предназначено для измерения одного из параметров импеданса грунта склона с высокой точностью при простой технической реализации. Такое устройство может массово применяться всеми дорожными службами с целью исключения оползней на дорогах, а также с целью прогнозирования сходов оползней на дорогах. Кроме того, его применение целесообразно крупномасштабными службами защиты природы как дополнительное высокоэффективное сред-

1 ГОСТ 6651–94 «Термопреобразователи сопротивления: общие технические требования и методы испытаний». Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/01a/4294823014.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).

2 ГОСТ 20420–75 «Тензорезисторы: термины и определения». Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/2d0/4294832947.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).

3 ГОСТ 21616–91 «Тензорезисторы: общие технические условия». Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/bfa/4294832051.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).

ство для мониторинга и достоверного прогнозирования возникновения оползней вдоль дорог, то есть для защиты дороги. Устройство может использоваться с различными датчиками сопротивления, что значительно повышает значимость устройства, а при дополнении его блоком с искусственным интеллектом возможности устройства существенно расширятся, что будет намного повышать

достоверность прогнозирования возникновения оползней и в целом эффективность процесса мониторинга оползней и снижения отрицательных последствий от оползней.

Устройство может найти широкое применение и в научных исследованиях по изучению причин возникновения оползней в целях развития методов и средств мониторинга, прогнозирования и раннего выявления оползней и пр.

Список литературы / References

1. Воробьев А.Е., Торобеков Б.Т. Выявление базовых особенностей передвижения оползней. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2022;(1):159–169.
Vorobyov A.E., Torobekov B.T. Revealing the basic features of landslide movement. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2022;(1):159–169. (In Russ.).
2. Карпик А.П., Хорошилов В.С., Комиссаров А.В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2021;26(6):17–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32>
Karpik A.P., Khoroshilov V.S., Komissarov A.V. Analysis of methods and tools for studying the dynamics of displacement of landslides. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2021;26(6):17–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32>
3. Адиева Г.М., Сатыбаев А.Д., Ташбаева Н. Исследование поведения оползня на основе программы Flow-R. *Universum: технические науки*. 2023;(12-1):19–22. Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16445> (дата обращения: 02.10.2024).
Adieva G., Satybaev A., Tashbaeva N. Study of landslide behavior based on the Flow-R program. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2023;(12-1):19–22. (In Russ.) Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16445> (accessed: 02.10.2024).
4. Safullin R.N., Reznichenko V.V., Gorlatov D.V. Modeling and optimization of processes of transportation of heavy cargoes based on the automation of monitoring systems for the motor vehicles movement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;378:012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012069>
5. Safullin R.N., Reznichenko V.V., Safullin R.R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012063>
6. Safullin R., Epishkin A., Safullin R., Naotian T. Method of forming an integrated automated control system for intelligent objects. In: *Ceur workshop proceedings: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems" (ITIDMS-II-2021)*. Aachen, Germany; 2021, pp. 17–26.
7. Safullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e18744478309909. <https://doi.org/10.2174/0118744478309909240807051315>
8. Safullin R., Arias Z.P. Comprehensive assessment of the effectiveness of passenger transportation processes using intelligent technologies. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e26671212320514. <https://doi.org/10.2174/0126671212320514240611100437>
9. Belikova D.D., Safullin R.N. The design and evaluation of a telematic automated system of weight control for heavy vehicles. *Infrastructures*. 2022;7(7):86. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7070086>
10. Гендлер С.Г., Братских А.С. Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах. *Горная промышленность*. 2024;(5S):71–77. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>
Gendler S.G., Bratskih A.S. Actual problems of coal accumulations ignition in rock dumps. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):71–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>
11. Левшин М.В. Взаимосвязь частоты электрического сигнала и удельного сопротивления при электрофизическом подходе оценки свойств почв гумидной зоны. *Вестник НГИЭИ*. 2020;(10):33–42.
Levshin M.V. The relationship between the frequency of the electric signal and resistivity in the electrophysical approach to assessing the properties of soils in the humid zone. *Bulletin NGIEI*. 2020;(10):33–42. (In Russ.)
12. Беликова Д.Д., Морозов Е.В., Хисамутдинова Э.Л. Оптимальное управление силовыми агрегатами горных машин в диапазоне эксплуатационных режимов при применении системы контроля качества моторного масла. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(6):95–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_95
Belikova D.D., Morozov E.V., Khisamutdinova E.L. Optimizing control of mining machine power-units within the normal power setting range by means of engine oil quality monitoring. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(6):95–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_95
13. Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза. *Записки Горного института*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>
Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotivesimulation model structure improvement. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>

14. Позднякова А.Д., Поздняков Л.А. Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020;(103):149–167. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-149-167>
 Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A. Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;(103):149–167. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-149-167>
15. Петраков Д.Г., Пеньков Г.М., Золотухин А.Б. Экспериментальное исследование влияния горного давления на проницаемость песчаника. *Записки Горного института*. 2022;254:244–251. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.24>
 Petrakov D.G., Penkov G.M., Zolotukhin A.B. Experimental study on the effect of rock pressure on sandstone permeability. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:244–251. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.24>
16. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. *Записки Горного института*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
 Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
17. Назарычев А.Н., Дяченко Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов. *Записки Горного института*. 2023;261:363–373. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (дата обращения: 15.11.2024).
 Nazarychev A.N., Dyachenok G.V., Sychev Y.A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:363–373. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (accessed: 15.11.2024).
18. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики. *Записки Горного института*. 2020;244:428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
 Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020;244:428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
19. Пашкевич Н.В., Хлопонина В.С., Поздняков Н.А., Аверичева А.А. Анализ проблем воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых. *Записки Горного института*. 2024;270:1004–1023. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16430> (дата обращения: 15.11.2024).
 Pashkevich N.V., Khloponina V.S., Pozdnyakov N.A., Avericheva A.A. Analysing the problems of reproducing the mineral resource base of scarce strategic minerals. *Journal of Mining Institute*. 2024;270:1004–1023. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16430> (accessed: 15.11.2024).
20. Авксентьев С.Ю., Махараткин П.Н., Александров В.И., Сафиуллин Р.Н. Определение удельных потерь напора при гидротранспорте хвостов Качканарского ГОКа. *Обогащение руд*. 2022;(3):45–50. <https://doi.org/10.17580/or.2022.03.08>
 Avksentyev S.Yu., Makharatkin P.N., Safiullin R.N., Aleksandrov V.I. Specific pressure loss calculations for tailings hydrotransport at the Kachkanar GOK. *Obogashchenie Rud*. 2022;(3):45–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2022.03.08>
21. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. *Искусственные нейронные сети и приложения*. Казань: Изд-во Казан. ун-та; 2018. 121 с.
22. Шарапов В.М., Полищук Е.С. (ред.) *Датчики: Справочное пособие*. М.: Техносфера; 2012. 624 с.

Информация об авторах

Кортиев Алан Леванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой безопасности дорожного движения, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8859-7099>; e-mail: kortiev73@mail.ru

Хасцаев Борис Дзамболатович – доктор технических наук, профессор кафедры промышленной электроники, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация

Кортиев Аслан Аланович – студент факультета информационных технологий и электронной техники, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.01.2025

Поступила после рецензирования: 24.01.2025

Принята к публикации: 27.01.2025

Information about the authors

Alan L. Kortiev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Road Traffic Safety, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8859-7099>; e-mail: kortiev73@mail.ru

Boris D. Khastsaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Industrial Electronics, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Aslan A. Kortiev – student, Faculty of Information Technologies and Electronic Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Article info

Received: 03.01.2025

Revised: 24.01.2025

Accepted: 27.01.2025