



УДК 621.315.2

Разработка программно-аппаратного комплекса поиска мест повреждения кабелей систем электроснабжения железнодорожного транспорта

Н. Н. Илюхин

Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

Для цитирования: *Илюхин Н. Н.* Разработка программно-аппаратного комплекса поиска мест повреждения кабелей систем электроснабжения железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-7-16

Аннотация

Цель: реализовать метод диагностирования кабелей электроснабжения путем повышения точности определения составляющих электромагнитного поля на поверхности земли от тока в кабеле. Разработать структурную схему устройства; создать макетный образец устройства; провести испытания в лабораторных условиях; доработать образец устройства после испытаний. **Методы:** методология проведения работ включает в себя разработку структурной схемы, электрической принципиальной схемы, создание макета микропроцессорного устройства с комплексом алгоритмов и программ, лабораторные испытания полученного образца и получение метрологических характеристик. **Результаты:** выполнено проектирование электрической схемы и печатной платы; создан макетный образец прибора; разработано для него программное обеспечение; проведены лабораторные испытания, направленные на проверку его основных функций, в частности, определены метрологические характеристики прибора, от которых зависит эффективность применения разрабатываемого и исследуемого фазового метода. **Практическая значимость:** решается задача усовершенствования аппаратуры поиска мест повреждений кабеля с металлическими покровами на основе нового фазового метода за счет синхронизации генератора и приемника с использованием спутниковой системы ГЛОНАСС. Фазовый метод предоставляет возможность определить место повреждения кабеля с высокой точностью за счет резкого изменения фазы напряженности магнитного поля в окрестности повреждения кабеля, находящегося на глубине до нескольких метров. В результате проведенных работ получены результаты, подтверждающие возможность применения устройства для использования фазового метода диагностирования кабелей систем электроснабжения. Новизна заключается в применении нового фазового метода для решения задачи диагностирования, который позволяет работать в условиях сильных электромагнитных помех.

Ключевые слова: прибор, контроль повреждения изоляции кабеля, программное обеспечение, лабораторные испытания, фазовый метод

Согласно Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, повышение уровня безопасности функционирования железных дорог является важнейшим государственным приоритетом развития и модернизации отрасли, научных исследований и текущей эксплуатационной ра-

боты. Безопасность железнодорожного транспорта зависит от надежности работы системы электроснабжения, одним из основных элементов которой являются кабельные линии электроснабжения [1–3].

В настоящее время на сети железных дорог для поиска мест повреждения кабеля

применяются рефлектометры ИРК-ПРО, РИ-10М1, «Сова» и др. [4–6]. Рефлектометры относятся к дистанционным методам поиска повреждения кабеля. Дистанционные методы позволяют из доступной кабелю точки, то есть точки подключения аппаратуры поиска, определить район повреждения. Данные методы позволяют установить место повреждения с погрешностью 2–3 %. При длине кабеля несколько километров погрешность будет исчисляться десятками метров.

Поэтому для получения окончательного результата, то есть устранения повреждения кабеля, необходимо выполнить большой объем земляных работ, что затруднено, если кабель расположен под покрытием или работы необходимо выполнять в холодное время года. Когда грунт находится в мерзлом состоянии, затраты возрастают в несколько раз. Таким образом, главный недостаток таких методов — это значительные временные и трудовые затраты.

Поэтому после определения района повреждения с помощью рефлектометра используются трассовые методы, основанные на регистрации составляющих электромагнитного поля на поверхности земли от тока в кабеле. При этом чаще используются бесконтактные методы. В них используется эффект резкого изменения амплитуды или фазы напряженности магнитного поля от измерительного тока кабеля в месте повреждения.

Применяемые в настоящее время на сети железных дорог трассоискатели Ridgid SeekTech SR-20 (США), «Успех» АГ-428.20Н (РФ), «Сталкер», «Поиск» и др. [7–10] используют в качестве испытательного сигнала, подаваемого в кабель, синусоидальный или импульсный на различных частотах. При этом основная проблема применения таких приборов на сети ОАО «РЖД» — это влияние на них мощных электромагнитных помех, создаваемых элек-

трифицированным железнодорожным транспортом. Причем эти помехи имеют не только значительные амплитуды, но и сложный гармонический состав. Таким образом, аппаратура, которая отлично работает в других условиях, снижает заявленную производителем точность или становится абсолютно бесполезной для поиска повреждения кабеля, проложенного вблизи электрифицированной железной дороги. Использование просто полосовых фильтров также не является эффективным решением, поскольку, во-первых, обеспечить в условиях сложного спектрального состава необходимую крутизну их амплитудно-частотной характеристики достаточно сложно при применении пассивных компонентов; во-вторых, при применении активных компонентов амплитуда помехи загоняет транзисторы в насыщение, и фильтр перестает работать.

Таким образом, существующие средства не позволяют с достаточной точностью определять места повреждения изоляции и трассу кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей в условиях функционирования электрифицированного железнодорожного транспорта, поэтому задача совершенствования методов и разработки помехозащищенной аппаратуры поиска мест повреждения кабеля актуальна.

Задача совершенствования аппаратуры поиска мест повреждений кабеля с металлическими покровами решается на основе нового фазового метода за счет синхронизации генератора и приемника с использованием спутниковой системы ГЛОНАСС. Фазовый метод предоставляет возможность определить место повреждения кабеля с высокой точностью за счет резкого изменения фазы напряженности магнитного поля в окрестности повреждения кабеля, находящегося на глубине до нескольких метров.

Для реализации фазового метода с помощью цифровых устройств разработан программно-аппаратный комплекс (устройство), который осуществляет измерение напряженности магнитного поля с помощью подключенного датчика с индукционным принципом или другим типом магнетометра и сравнение начальной фазы измеренного сигнала с начальной фазой удаленного генератора, подключенного к диагностируемой линии. Для точной синхронизации необходимы опорный импульсный сигнал, получаемый со спутниковой системы ГЛОНАСС, и взаимодействие с удаленным генератором по низкоскоростной радиолинии малой мощности. Вспомогательными функциями прибора являются операции нормализации и преобразования сигнала: деление или усиление, фильтрация от гармоник промышленной частоты, усиление до динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя, преобразование сигнала в цифровой вид. В цифровом устройстве реализованы функции цифровой обработки сигнала, сохранения информации на носитель данных, взаимодействие с компьютером, функции ввода-вывода.

Структурная схема разрабатываемого устройства определения места повреждения изоляции кабеля и дополнительные компоненты, необходимые для проведения его лабораторных испытаний, показаны на рис. 1.

Разрабатываемое устройство показано в нижней части приведенной схемы и включает в себя следующие компоненты:

- систему питания, включая аккумуляторные батареи с устройством контроля заряда и подсистему питания со стабилизацией необходимых уровней напряжения;
- основной измерительный канал преобразования сигнала, снимаемого с датчика магнитного поля (канал должен состоять из опционально предусмотренного аналогово-

го пассивного фильтра, делителя/усилителя напряжения и буфера, активного фильтра, усилителя с программируемым коэффициентом и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), при этом комплектность перечисленных устройств может впоследствии изменяться в зависимости от результатов лабораторных и полевых испытаний);

- вспомогательный канал, выполненный аналогично основному, который при проведении лабораторных испытаний будет использоваться для подключения опорного сигнала, а при полевых испытаниях и при последующей эксплуатации может быть использован для подключения второго датчика магнитного поля, разнесенного по высоте с основным датчиком для определения глубины диагностируемой линии;

- микроконтроллерное устройство, выполняющее цифровую обработку сигналов с целью детектирования фазового сдвига между ними, а также другие функции программного обеспечения;

- периферийные устройства, подключаемые к микроконтроллеру (клавиатура, дисплей, интерфейс USB для соединения с компьютером, интерфейс подключения карты памяти SD);

- модуль GPS/ГЛОНАСС;

- опционально подключаемый модуль радиосвязи для обеспечения беспроводной передачи данных (например, работающий по технологии LoRa).

В число вспомогательных компонентов для проведения лабораторных испытаний входят:

- лабораторный генератор сигналов, который впоследствии будет заменяться на переносной генератор;
- макет диагностируемой линии, который в лабораторных испытаниях заменяется фазовращателем.

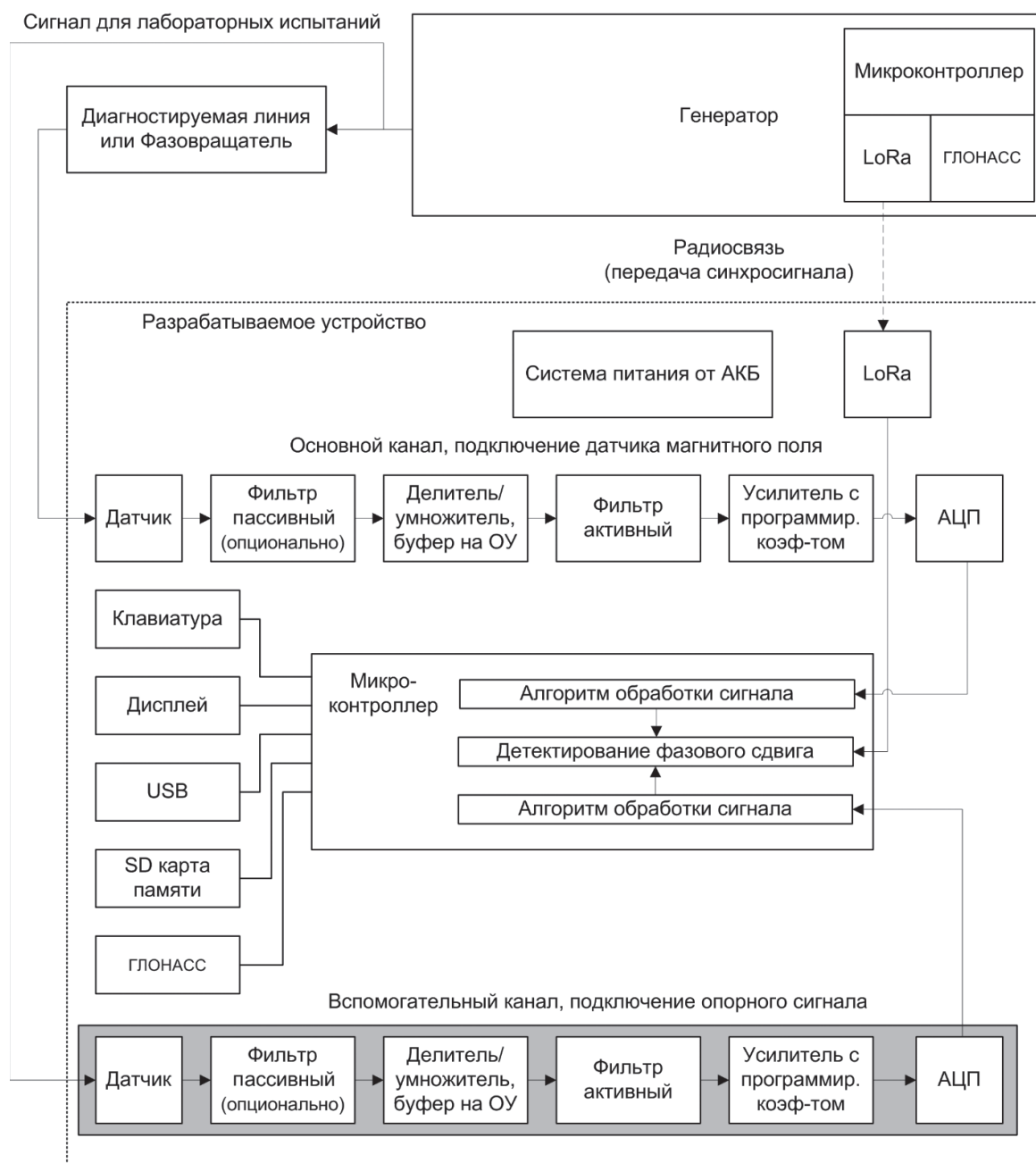


Рис. 1. Структурная схема устройства и компоненты для лабораторных испытаний

Генератор, который может использоваться совместно с разрабатываемым устройством, должен включать в себя микропроцессорный модуль, беспроводной модуль (например, LoRa) и приемник GPS/ГЛОНАСС. Это позволит определять начальную фазу генерируемого сигнала относительно точного миро-

вого времени, передавать это значение в виде информационного сообщения с генератора на разрабатываемое устройство.

При проведении лабораторных испытаний для проверки принципиальной работоспособности устройства может применяться непосредственная передача сигнала с генератора

на вход вспомогательного измерительного канала.

На основе электрической принципиальной схемы разработана печатная плата для лабораторного образца устройства. При создании печатной платы принимались во внимание корпуса микросхем и дискретных элементов. Большинство резисторов и конденсаторов для удобства ручного монтажа, но также и для сохранения достаточной компактности опытного образца изделия (так, чтобы при необходимости можно было выполнить тиражирование и последующую эксплуатацию) имеют корпус SMD 1206 или SMD 0805. Печатная плата имеет четыре электрических слоя, где выполнена соответствующая трассировка схемы. Трехмерная модель печатной платы показана на рис. 2 и 3 (с лицевой и обратной сторон).

Разработано программное обеспечение для микроконтроллера, основные компоненты которого показаны на рис. 4. После всех инициализаций начинают работать основные задачи, часть из которых имеют наивысший приоритет и выполняются в реальном времени (получение отсчетов сигнала). Следующий приоритет

имеют задачи цифровой обработки и обмена по интерфейсам с внешними устройствами. Механизм управления задачами — по прерываниям таймеров и по отложенным внешним прерываниям.

Проведены испытания в лабораторных условиях. Для этого с помощью цифрового генератора Rigol DG4102 задавались два синхронных сигнала, имеющие гармонику с частотой 35 Гц. Задавались различные амплитуды сигналов, их начальные фазы (относительный фазовый сдвиг) и различные постоянные составляющие. Такая модель имитирует сигнал, который создается генератором, подключенным к диагностируемой линии, и сигнал, измеренный посредством индукционного датчика, который измеряет наведенное поле в месте поиска повреждения кабеля.

Примерный вид спектра сигнала, который был снят в лабораторных условиях при следующих заданных параметрах: частота 35 Гц, амплитуда 40 мВ, постоянная составляющая 75 мВ, показан на рис. 5. Спектр получен непосредственно из памяти микроконтроллера посредством отладочных средств. Как видно, на

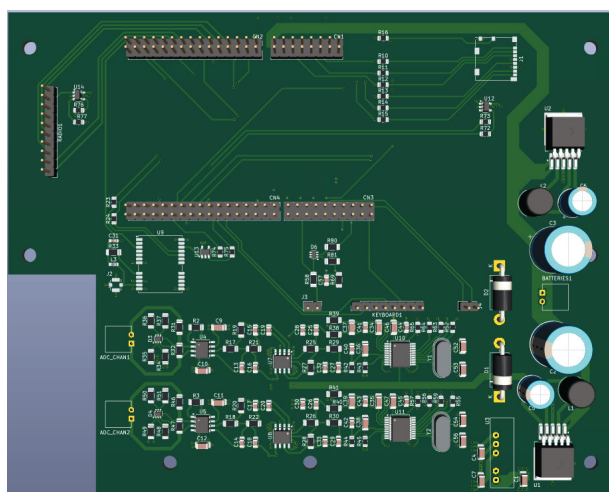


Рис. 2. Лицевая сторона печатной платы (модель)

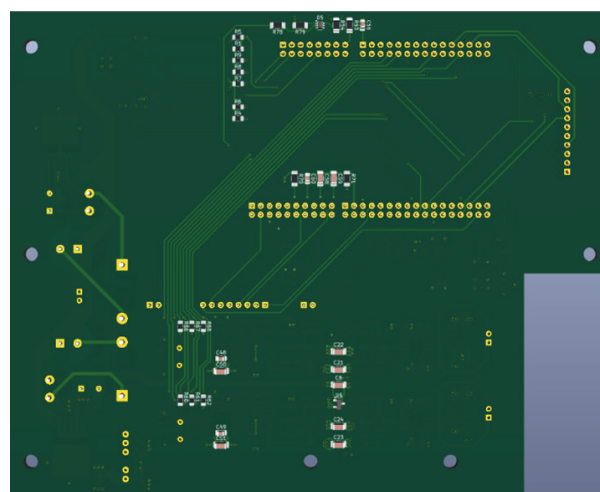


Рис. 3. Обратная сторона печатной платы (модель)

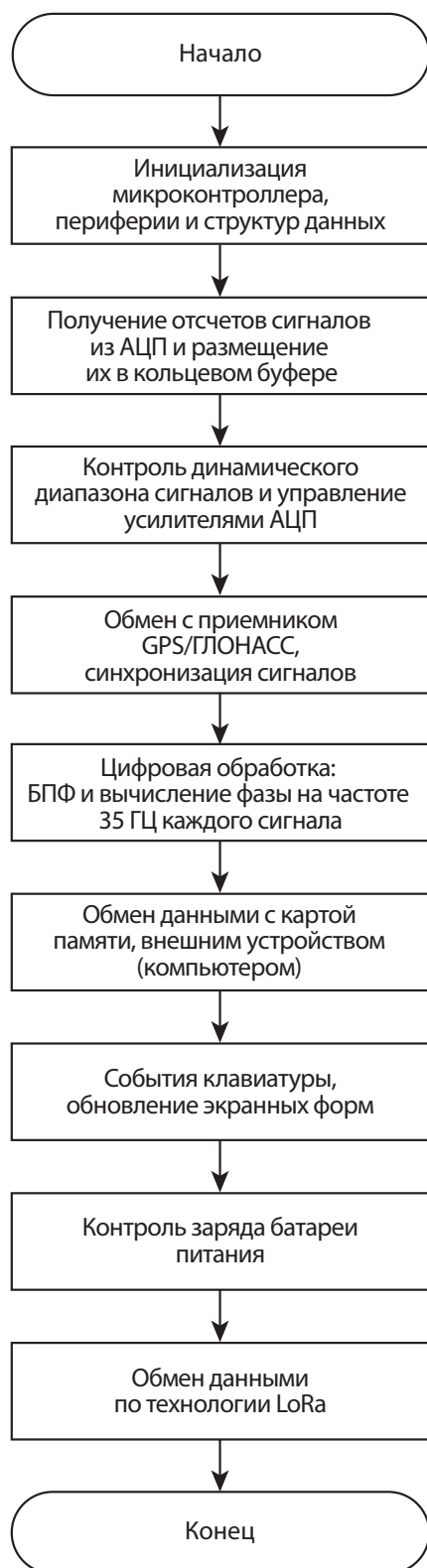


Рис. 4. Основные компоненты программы для микроконтроллера

частоте 35 Гц имеется максимум, в этой точке вычисляется значение аргумента (абсолютная фаза гармоники).

Первая серия измерений была выполнена при фиксированной амплитуде двух сигналов 30 и 100 мВ соответственно и различных фазовых сдвигах.

Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов рассчитывалась по формуле:

$$\Delta\varphi_i - \varphi_0, \quad (1)$$

где φ_i — измеренный с помощью устройства фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.;

φ_0 — заданный фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.

Среднеквадратическое отклонение измеренных значений от их среднего значения определялось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}, \quad (2)$$

где φ_i — измеренный с помощью устройства фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.;

$\bar{\varphi}$ — среднеарифметическое значение результатов фазового сдвига для n параллельных измерений, град.;

n — количество параллельных измерений.

При каждом значении фазового сдвига измерения выполнялись в течение 20 с для сбора статистики, по которой определялись измеренная разность фаз и среднеквадратическое отклонение измеренных значений от их среднего значения. В результате были найдены значения абсолютной погрешности измерения разности фаз. Результаты приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что при любых возможных фазовых сдвигах между опорным и диагностирующим сигналами абсолютная погрешность имеет значение в пределах 1° (она



Рис. 5. Амплитудный спектр измеренного сигнала с максимумом на частоте 35 Гц

ТАБЛИЦА 1. Измерения при различных фазовых сдвигах

Заданная разность фаз, градусы	Измеренная разность фаз, градусы	Среднеквадратическое отклонение результата, градусы	Абсолютная погрешность измерения, градусы
0	-1,0	0,21	1,0
5	4,1	0,33	0,9
10	9,0	0,22	1,0
15	14,1	0,22	0,9
20	19,2	0,23	0,8
25	24,2	0,15	0,8
30	29,1	0,11	0,9
35	34,2	0,23	0,8
40	39,5	0,17	0,5
45	44,3	0,08	0,7
50	49,2	0,07	0,8
55	54,4	0,08	0,6
60	59,1	0,04	0,9
65	64,2	0,05	0,8
70	69,3	0,06	0,7
75	74,3	0,15	0,7
80	79,3	0,10	0,7
85	84,2	0,12	0,8
90	89,1	0,06	0,9

имеет всегда положительный знак, следовательно, имеет место систематический фактор, который можно будет попытаться устранить),

а малое среднеквадратическое отклонение результата измерения свидетельствует о хорошей повторяемости. Можно считать, что

абсолютная погрешность измерения разности фаз не зависит от значения разности фаз.

Следующая серия измерений была выполнена при различных амплитудах первого и второго сигналов и заданном фазовом сдвиге между ними, равном 30° . Результаты приведены в табл. 2.

Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов рассчитывалась по формуле (1). Абсолютные погрешности, полученные по этим результатам, приведены в табл. 3.

По итогам эксперимента получено, что значения абсолютных погрешностей не превышают 2° . Ошибка всегда имеет один знак, что говорит о наличии систематической погрешности.

Для проверки того, что устройство будет успешно обрабатывать сигнал, в котором присутствуют помехи, кратные 50 Гц (высшие гармоники), причем превышающие по амплитуде диагностирующую частоту 35 Гц, был

проведен эксперимент с полигармоническим сигналом. Первый сигнал имел, кроме основной частоты 35 Гц, дополнительные кратные гармоники: 3, 5 и 7, имеющие большее значение амплитуды. Второй сигнал имел в своем составе 2, 4 и 6 гармоники.

Данный эксперимент также показал эффективное определение разности фаз требуемой гармоники 35 Гц. При заданной генератором разности фаз 30° измеренная составила $29,2^\circ$. При заданной разности фаз 60° измеренная составила $58,5^\circ$. Абсолютные погрешности, соответственно, равны $0,8^\circ$ и $1,5^\circ$, что также находится в пределах 2° . Таким образом, наличие высших гармоник не оказывает существенного влияния на точность получаемого результата, что позволит использовать устройство при наличии помех промышленной частоты и кратных частот.

Результаты испытаний показали, что существенная доработка устройства не требуется. Дополнительное повышение точности было выпол-

ТАБЛИЦА 2. Измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов, градусы

Амплитуда измеренного сигнала, мВ	Амплитуда опорного сигнала, мВ					
	2	4	10	30	100	300
2	29,4	29,2	29,1	29,0	29,4	29,5
4	29,0	29,4	29,2	29,0	29,6	29,5
10	29,0	28,8	28,7	28,8	28,9	29,4
30	29,3	28,5	28,9	28,4	28,9	29,4
100	29,4	28,7	28,6	28,3	28,9	28,9
300	27,9	28,1	28,5	28,1	28,2	28,4

ТАБЛИЦА 3. Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов, градусы

Амплитуда измеренного сигнала, мВ	Амплитуда опорного сигнала, мВ					
	2	4	10	30	100	300
2	0,6	0,8	0,9	1,0	0,6	0,5
4	1,0	0,6	0,8	1,0	0,4	0,5
10	1,0	1,2	1,3	1,2	1,1	0,6
30	0,7	1,5	1,1	1,6	1,1	0,6
100	0,6	1,3	1,4	1,7	1,1	1,1
300	2,1	1,9	1,5	1,9	1,8	1,6

нено путем добавления поправки к измерению фазового сдвига, которая была принята равной 1° .

Выводы

Выполнены проектирование и разработка устройства, выполняющего функцию приемной и обрабатывающей части программно-аппаратного комплекса для определения места повреждения изоляции кабеля фазовым методом. Устройство выполняет измерение сигнала с помощью индукционного датчика, при этом сигнал преобразуется в аналоговом тракте, дискретизируется и сравнивается методами цифровой обработки по фазе с опорным сигналом, сформированным генератором, подключенным к диагностируемому кабелю.

Разработанное устройство в виде лабораторного образца прошло испытания при различных параметрах сигнала: с разным значением амплитуды, сдвига фаз между опорным и диагностирующим сигналами, при наличии в сигнале шумов и высокочастотных гармонических помех. По итогам испытаний выполнены незначительные доработки. Устройство позволяет определять фазовый сдвиг с точностью порядка 1° , что вполне достаточно для уверенного применения метода.

Список источников

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 310 с.

2. Дементьев В.С. Как определить место повреждения в силовом кабеле. М.: Энергия, 1966. 54 с.

3. Елизарова Ю.М. Совершенствование методов и аппаратных средств поиска мест повреждения кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей: дисс. ... канд. техн. наук / Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2009. 156 с.

4. ИРК-ПРО. Инструкция по эксплуатации прибора.

5. РИ-10М1. Инструкция по эксплуатации прибора.

6. «Сова». Инструкция по эксплуатации прибора.

7. Ridgid SeekTech SR-20. Инструкция по эксплуатации прибора.

8. «Успех АГ-428.20Н». Инструкция по эксплуатации прибора.

9. Илюхин Н.Н., Кузовкин А.С. Сравнительная характеристика устройств, используемых для идентификации мест повреждения кабельных линий // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. Омск, 2024. С. 168–173.

10. «Поиск». Инструкция по эксплуатации прибора.

Дата поступления: 21.10.2025

Решение о публикации: 12.01.2026

Контактная информация:

ИЛЮХИН Никита Николаевич — аспирант;
nekit-exe@mail.ru

The hardware and software approach to identify damaged cables in railway power supply systems

N. N. Ilyukhin

Omsk State University of Railway Transport, 35 Marx pr., Omsk, 644046, Russia

For citation: *Ilyukhin N. N.* The hardware and software approach to identify damaged cables in railway power supply systems // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-7-16. (In Russian)

Abstract

Objective: to implement a diagnostic method for power-supply cables by improving the accuracy of detecting the electromagnetic field components on the ground surface generated by cable currents. The project tasks included developing the device schematic, creating a prototype, conducting laboratory tests, and refining the prototype based on the test outcomes. **Methods:** the approach involved creating a structural diagram and electrical schematic, developing of a microprocessor-based prototype incorporating multiple algorithms and associated software, conducting laboratory experiments on the prototype, and assessing its metrological characteristics. **Results:** an electrical schematic and printed circuit board were developed; a prototype device was constructed and the accompanying software implemented; laboratory tests validated the device's primary functions, in particular and qualified its metrological characteristics, which are critical to the effectiveness of the phase-based method under development depends. **Practical significance:** this research advances equipment for detecting faults in cables with metallic sheaths by synchronizing the signal generator and receiver via the GLONASS satellite system. The proposed phase-based method enables accurate localization of cable faults by abrupt perturbations in the magnetic field associated with discontinuities in buried cables at depths of several meters. Experimental studies corroborate the device's applicability for implementing the phase-based diagnostic technique on power-supply system cables. The novelty lies in the introduction of a phase-based method that maintains reliable fault detection performance even in environments with substantial electromagnetic interference.

Keywords: device, cable insulation breakdown monitoring, software, laboratory testing, phase-based method

References

1. Shalyt G.M. Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh. M.: Energoizdat, 1982. 309 s. (In Russian)
2. Dement'ev B.C. Kak opredelit' mesto povrezhdeniya v silovom kabele. M.: Energiya, 1966. 54 s. (In Russian)
3. Elizarova Yu.M. Covershenstvovanie metodov i apparatnykh sredstv poiska mest povrezhdeniya kabelej elektrosnabzheniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebitelej: diss. ... kand. tekhn. nauk / Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. Omsk, 2009. 156 s. (In Russian)
4. IRK-PRO. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
5. RI-10M1. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
6. "Sova". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
7. Ridgid SeekTech SR-20. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
8. "Uspekh AG-428.20N". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
9. Ilyukhin N.N., Kuzovkin A.S. Sravnitel'naya kharakteristika ustrojstv, ispol'zuemykh dlya identifikatsii mest povrezhdeniya kabel'nykh linij // Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferentsii, posvyashchennoj Dnyu rossijskoj nauki. Omsk, 2024. S. 168–173. (In Russian)
10. "Poisk". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)

Received: 21.10.2025

Accepted: 12.01.2026

Author's information:

Nikita N. ILYUKHIN — Postgraduate Student;
nekit-exe@mail.ru