



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья

УДК 621.391.8

EDN: <https://elibrary.ru/visozl>



О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин✉

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Помехи, действующие в канале автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа, искажают передаваемый сигнал и приводят к сбоям в работе сигнализации. Для снижения влияния помех на функционирование канала ранее был предложен приемник с квадратурными каналами и варианты его реализации с применением нелинейного преобразования сигналов в одном или двух сечениях приемника. Цель исследования — выявление наилучших вариантов реализации квадратурного приемника.

Материалы и методы. Основной метод исследования — имитационное моделирование на ЭВМ процесса функционирования исследуемых приемников в условиях воздействия гармонической помехи от линии электропередачи. Для этого в среде визуального программирования Simulink разработаны имитационные модели приемников, использована имитационная модель гармонической помехи и проведены эксперименты по оценке показателя помехоустойчивости, в качестве которого выбрана длительность временного интервала, на котором наблюдались ошибки в работе приемников.

Результаты. Определено влияние нелинейного преобразования сигналов на помехоустойчивость приемников в условиях воздействия гармонической помехи.

Обсуждение и заключение. Исследование показало, что среди всех рассмотренных вариантов реализации квадратурного приемника по критерию максимальной помехоустойчивости при воздействии гармонической помехи наиболее предпочтительным является приемник с зоной нечувствительности. Незначительно уступает ему приемник с комбинированным подавителем помех и зоной нечувствительности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: локомотивы, автоматическая локомотивная сигнализация, квадратурный приемник, помехоустойчивость, нелинейное преобразование сигналов, высоковольтная линия электропередачи, гармоническая помеха

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 70–80.

✉ a.hohrin@samgups.ru (А. С. Хохрин)

© Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., 2024

Original article

UDK 621.391.8

EDN: <https://elibrary.ru/visozl>



Reducing power line interference with the continuous automatic cab signalling channel

Ruslan R. Yusupov, Alexey S. Khokhrin✉

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Interference in the continuous automatic cab signalling channel distorts transmitted signals and causes signalling malfunctions. Reduction of interference in the channel involved a previously proposed receiver with quadrature channels and its implementations with non-linear signal transformation in one or two sections of the receiver. The research is intended to find the best implementations of the quadrature receiver.

Materials and methods. The research uses a computer simulation of the operation of the studied receivers under the influence of harmonic interference from a power line. For this purpose, the authors used Simulink visual programming environment and developed receiver simulations, applied the harmonic interference simulation model and conducted experiments to assess noise immunity expressed as a time interval showing receiver malfunction.

Results. The researchers determined the effect of non-linear signal transformation on the harmonic noise immunity of the receivers.

Discussion and conclusion. The research shows that the receiver with a deadband is the most preferable of all considered variants of quadrature receivers in terms of maximum harmonic noise immunity. The receiver with combined interference suppressor and deadband is slightly inferior.

KEYWORDS: locomotives, automatic cab signalling, quadrature receiver, noise immunity, non-linear signal transformation, high-voltage power line, harmonic interference

FOR CITATION: Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Reducing power line interference with the continuous automatic cab signalling channel. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):70-80. (In Russ.).

Введение. Высокая эффективность и безопасность перевозочного процесса на сети железных дорог Российской Федерации обеспечиваются системами интервального регулирования движения поездов (СИРДП). К таким системам относятся автоблокировка, автоматическая локомотивная сигнализация, диспетчерская централизация и др. Из 85,6 тыс. км эксплуатационной длины магистральных железных дорог около 63 тыс. км оборудовано автоблокировкой и системой автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН)¹.

В индуктивно-рельсовой линии связи, по которой осуществляется передача сигнала АЛСН на локомотив, действует комплекс разнообразных помех (импульсных, флуктуационных и гармонических), источниками которых являются тяговый ток, высоковольтные ЛЭП, намагниченность рельсов и др. Эти помехи искажают сигнал, передаваемый с пути на локомотив, что приводит к ошибкам в работе локомотивного приемника сигналов АЛСН [1]. В результате возникают сбои в работе системы АЛСН, которые выражаются в несоответствии сигнальных показаний локомотивного и напольного светофоров. При этом возможна выработка ложного приказа, разрешающего движение со скоростью выше допустимой по соображениям безопасности. Выработка приказа, который ограничивает скорость движения сильнее, чем этого требует текущая поездная ситуация, может привести к задержке поезда, нарушению графика движения, росту энергозатрат на ведение поездов и другим негативным последствиям. Кроме того, необходимость ответных действий локомотивной бригады на возникший сбой в работе АЛСН приводит к повышению психофизиологической нагрузки, утомляемости и снижению внимания, что негативно сказывается на безопасности движения поездов.

По данным Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре — филиала ОАО «РЖД» (ПКБИ РЖД), в 2022 г. на сети железных дорог Российской Федерации зафиксировано 47 774 сбоя в работе устройств АЛСН, из них 22 977 сбоев (48 %) — это сбои второй категории, т. е. одиночные сбои с неустановленной причиной при исправном состоянии локомотивных и путевых устройств². Одной из причин таких сбоев является воздействие помех. С 2017 г. доля сбоев второй категории в работе АЛСН увеличилась с 38,3 до 48,1 %. В отдельную (третью) категорию были отнесены

технологически обоснованные сбои, в том числе сбои в местах пересечения железнодорожной линии с ЛЭП и другими источниками помех. Доля последних в общем количестве сбоев третьей категории с 2015 по 2022 г. увеличилась с 36,2 до 38,9 %. Таким образом, более 68 % сбоев в работе АЛСН вызвано воздействием помех.

В современных локомотивных устройствах безопасности, таких как КЛУБ-У [2], БЛОК [3], ДКСВ-М [4] и др., реализована функция приема сигналов АЛСН. Для снижения влияния помех на достоверность приема сигналов АЛСН предлагаются различные способы и технические решения. Так, авторами патента³ был предложен способ повышения достоверности распознавания сигналов в условиях воздействия внешних аддитивных сосредоточенных помех путем выделения из модулированного сигнала АЛСН двух сигналов с частотами верхней и нижней боковых полос, средняя мощность которых сравнивается между собой. После этого выбирается сигнал с меньшей величиной средней мощности. Такой сигнал определяется как сигнал, не подверженный воздействию помех. В работе [5] авторами предпринята попытка применить в приемном устройстве АЛСН способ корреляционной дешифрации сигналов, потенциально обеспечивающий наибольшую достоверность различения амплитудноманипулированных сигналов АЛСН. Предложенный способ основан на методе вычисления коэффициента взаимной корреляции принимаемого сигнала и эталонных кодовых комбинаций и реализуется на универсальной микропроцессорной системе. Этот способ учитывает известные особенности принимаемого сигнала, что позволяет добиться более надежного приема. Эффективность предложенного способа дешифрирования числовых кодовых сигналов АЛСН была подтверждена во время лабораторных испытаний, однако сведений о результатах натурных испытаний в реальных условиях эксплуатации или о внедрении разработанного устройства на сети железных дорог России не найдено. Авторами статьи [6] разработаны метод и программно-алгоритмические средства цифровой узкополосной фильтрации сигнала числового кода для повышения эффективности работы АЛСН в условиях действия электромагнитных помех большой интенсивности. Результаты полунатурных испытаний с использованием имитационного моделирования на ЭВМ показали, что предложенное решение обеспечивает выделение полезного сигнала числового кода

¹ ОАО «РЖД» сегодня [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9360?redirected> (дата обращения: 04.10.2023).

² Положение о порядке служебного расследования, учета и анализа сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации и систем автоматического управления торможением поезда [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.05.2016 № 1011р. URL: https://base.garant.ru/71448318/#block_1000 (дата обращения: 29.09.2023).

³ Патент № 2629831 Российская Федерация, МПК B61L 25/00. Способ защиты устройств автоматической локомотивной сигнализации от аддитивных сосредоточенных помех: № 2016137520: заявл. 20.09.2016; опубл. 04.09.2017 / Архипов А. С., Горчаков А. А., Коляда В. А. [и др.]. 9 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/oyaloa>.

в условиях действия помех с уровнем отношения сигнал/помеха, достигающим значений 0,6 при действии стационарной гармонической помехи и 0,4 при действии случайной импульсной помехи. Результаты проверки эффективности работы устройства авторам не известны.

Одним из направлений повышения помехоустойчивости АЛСН является компенсация помех на входе локомотивного приемного устройства. Так, для компенсации помех в [7, 8] авторы предлагают использовать многоканальный адаптивный фильтр. Суть разработки заключается в разделении сигнала и помехи с последующей компенсацией последней. Отличительной особенностью предложенных для компенсации помех адаптивных фильтров, существенно расширяющей их функциональные возможности, является использование в алгоритмах интервалов адаптации априорной информации о наличии пауз в сигналах. Эффективность предлагаемого способа и достоверность полученных результатов подтверждена путем моделирования на ЭВМ.

Для снижения влияния помех на устойчивость функционирования канала АЛСН авторами настоящей работы ранее был предложен приемник сигналов с квадратурными каналами (квадратурный приемник) [9] как альтернатива приемнику сигналов АЛСН с линейным амплитудным детектированием и нелинейным устройством подавления гармонической помехи (далее — АДНП), применяемому в составе современных микропроцессорных локомотивных устройств безопасности.

Для борьбы с помехами было предложено использование блоков нелинейного преобразования сигнала (БНП) в двух сечениях квадратурного приемника: комбинированный подавитель импульсных и флуктуационных помех⁴ на входе приемника и блок с зоной нечувствительности [10] на выходе квадратурного коррелятора. Для независимой оценки эффективности каждого из предложенных решений ранее посредством имитационного моделирования на ЭВМ были проведены статистические эксперименты и получены количественные оценки помехоустойчивости при воздействии флуктуационных, импульсных и гармонических помех для АДНП и следующих вариантов реализации квадратурного приемника:

- 1) квадратурного приемника без БНП (далее — КП);
- 2) квадратурного приемника с блоком с зоной нечувствительности (далее — КПЗ);
- 3) квадратурного приемника с комбинированным подавителем помех, в состав которого входят схема ШОУ (широкополосный фильтр — ограничитель — узкополосный фильтр) и схема бланкирования (далее — КПП);

4) квадратурного приемника с комбинированным подавителем помех и блоком с зоной нечувствительности (далее — КППЗ).

Результаты вычислительного эксперимента при воздействии на перечисленные приемники импульсных помех от постоянного тягового тока представлены в работе [11].

Данная работа является продолжением цикла исследований, направленных на выявление наиболее помехоустойчивого и безопасного из перечисленных выше приемников сигналов АЛСН. В ней впервые представлены полученные экспериментально сведения о помехоустойчивости этих приемников при воздействии гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП. Целью исследования является выявление наилучших вариантов реализации квадратурного приемника.

Материалы и методы. Суть вычислительных экспериментов заключалась в подаче на вход имитационных моделей всех приемников одной и той же аддитивной смеси сигнала и гармонической помехи и определении длительности временного интервала, в течение которого наблюдались ошибки в приеме. В качестве модели гармонической помехи от ЛЭП использовалась имитационная модель такой помехи при следующих параметрах:

- расстояние между проекциями на горизонтальную плоскость фазных проводов ЛЭП принято равным 20 м;
- высота подвеса фазных проводов над горизонтальной плоскостью принята равной 15 м;
- амплитудное значение тока в фазных проводах принято равным 3000 А.

Приведенные значения соответствуют показателям высоковольтной ЛЭП с горизонтальным расположением проводов.

Методика проведения экспериментов повторяет методику, представленную в работе [12]. В качестве количественного показателя помехоустойчивости приемников используется длительность временного интервала $T_{\text{ош}}$, в течение которого наблюдались ошибки в приеме (рис. 1). Использование $T_{\text{ош}}$ как количественного показателя помехоустойчивости в эксперименте с гармонической помехой от высоковольтной линии электропередачи обусловлено характером проявления гармонической помехи от ЛЭП и алгоритмом дешифрации кодовых сигналов канала АЛСН, реализованным в аппаратуре КЛУБ-У. Гармоническая помеха воздействует на сигнал АЛСН в течение интервала времени, равного времени нахождения локомотива в зоне влияния ЛЭП. Протяженность этой зоны зависит от конструкции ЛЭП, угла ее пересечения с железнодорожной линией, силы тока в проводах и других

⁴ Патент № 218341 Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Приемник автоматической локомотивной сигнализации: № 2023110361: заявл. 22.04.2023; опубл. 23.05.2023 / Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. 13 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/ywdacj>.

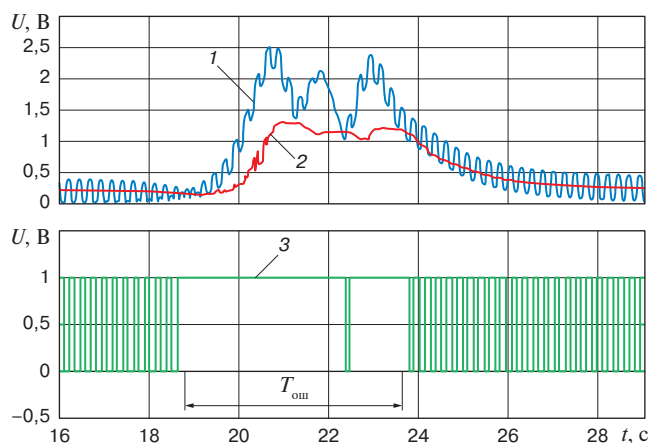


Рис. 1. Осциллограммы, поясняющие способ определения длительности временного интервала $T_{\text{ош}}$: 1 — огибающая принимаемого тестового сигнала; 2 — сигнал плавающего порога принятия решения; 3 — выходной сигнал приемника

Fig. 1. Oscillograms explaining the method of determining the duration of the time interval $T_{\text{ош}}$: 1 — received test signal envelope curve; 2 — floating decision threshold signal; 3 — receiver output signal

факторов. Время нахождения локомотива в зоне влияния ЛЭП обратно пропорционально скорости поезда. Согласно алгоритму дешифрации кодовых сигналов АЛСН в КЛУБ-У смена огней на локомотивном индикаторе осуществляется с задержкой времени 6 с⁵, необходимой для накопления трех кодовых комбинаций. Если значение $T_{\text{ош}}$ не превысит эту задержку, то появления ложного показания на локомотивном индикаторе (сбоя в работе АЛСН) в отсутствии других негативных факторов не будет; в случае превышения задержки произойдет сбой. Таким образом, величина $T_{\text{ош}}$ характеризует способность канала АЛСН функционировать в условиях воздействия гармонической помехи от ЛЭП и может использоваться в качестве косвенного показателя помехоустойчивости приемников.

В экспериментах с гармонической помехой от ЛЭП управляемыми факторами являются амплитуда сигнала на входе приемников U_c , коэффициент асимметрии приемного тракта K_a , скорость поезда v_n в зоне влияния ЛЭП и угол пересечения оси ЛЭП с железнодорожной линией $\varphi_{\text{л}}$.

В вычислительных экспериментах значение U_c было принято равным 280 мВ среднеквадратического значения, что соответствует номинальному значению

напряжения сигнала на входе локомотивного приемника при электрической тяге постоянного тока [13].

Значение K_a принято равным 40 %, что соответствует математическому ожиданию коэффициента асимметрии при движении локомотива⁶. Такое большое значение K_a обусловлено тем, что оно включает в себя не только и не столько продольную асимметрию рельсовой линии (нормируемую на уровне 4 % при электротяге переменного тока и 6 % при электротяге постоянного тока), сколько асимметрию индуктивной линии, значение которой определяется в статике асимметрией электрических параметров приемных катушек и асимметрией их подвеса на кузове локомотива относительно осей рельсов, а в динамике — неодинаковым смещением левой и правой катушек относительно осей рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях при движении в кривой, боковой качке и галоупировании кузова локомотива.

В качестве тестового сигнала, подаваемого на входы приемников, было использовано несущее гармоническое колебание с частотой 50 Гц, модулированное последовательностью прямоугольных импульсов со скважностью 2 и периодом колебания 0,24 с. Длительности импульсов и интервалов такого сигнала равны длительности короткого интервала сигнала кодовой комбинации «3». Это позволило уменьшить объем проводимых экспериментов и оценить $T_{\text{ош}}$ для всех исследуемых приемников с погрешностью, не превышающей длительность одного элемента сигнала (0,12 с).

Поскольку $T_{\text{ош}}$ зависит как от скорости v_n , так и от угла $\varphi_{\text{л}}$, то для оценки влияния каждого из этих факторов эксперименты необходимо провести так, чтобы получить зависимости $T_{\text{ош}}$ от одного из этих факторов при фиксированном значении другого фактора:

$$T_{\text{ош}} = f(\varphi_{\text{л}}) \Big|_{v_n = \text{const}}; \quad (1)$$

$$T_{\text{ош}} = f(v_n) \Big|_{\varphi_{\text{л}} = \text{const}}. \quad (2)$$

Для определения указанных зависимостей выбраны следующие значения аргументов: $v_n = 2,5; 5; \dots; 40$ м/с и $\varphi_{\text{л}} = 90; 85; \dots; 30^\circ$.

Значения $T_{\text{ош}}$ в экспериментах определялись по осциллограммам сигнала на выходе приемников. На рис. 1 для пояснения способа определения $T_{\text{ош}}$ представлены осциллограммы, на которых показаны

⁵ Инструкция по эксплуатации локомотивных устройств безопасности [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.02.2019 № 183/р. Доступ из АСПИЖТ.

⁶ Пыров А. Е. Исследование функционирования автоматической локомотивной сигнализации для управления движением поездов на железных дорогах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14. М., 1975. 253 с.

графики, полученные для квадратурного приемника при $v_n = 20$ м/с и $\varphi_L = 75^\circ$. На осциллограммах по горизонтальной оси отложено время t в секундах, по вертикальной — напряжение сигнала U в вольтах. Выходной сигнал приемника (нижняя осциллограмма на рис. 1) формируется входящим в его состав пороговым решающим устройством. Оно осуществляет логическое сравнение выделяемой на выходе квадратурного коррелятора огибающей принимаемого тестового сигнала (кривая 1 на верхней осциллограмме) с плавающим порогом принятия решения (кривая 2 на верхней осциллограмме). Порог принятия решения формируется на уровне 0,6 от амплитуды огибающей (что почти соответствует критерию максимального правдоподобия при обнаружении амплитудно-манипулированного сигнала), и с некоторой инерционностью отслеживаются изменения этой амплитуды.

Отсчет длительности временного интервала $T_{\text{ош}}$ начинается в момент возникновения первой ошибки в приеме элементарной посылки тестового сигнала (соответствует моменту времени 18,9 с на графиках), а заканчивается в момент восстановления правильного приема элементарной посылки (соответствует моменту времени 23,7 с на графиках). Таким образом, значение $T_{\text{ош}}$ на рис. 1 составит около 4,8 с.

Оценка помехоустойчивости приемников при изменении угла пересечения с ЛЭП и фиксированной скорости движения поезда. На рис. 2–5 представлены результаты первого эксперимента — графики зависимости (1), полученные для всех исследованных приемников при $v_n = 2,5; 7,5; 20; 30$ м/с соответственно, как наиболее показательные по характеру их изменения. Графики зависимости (1), полученные при скоростях поезда $v_n > 30$ м/с, имеют вид, аналогичный представленным на рис. 5.

В табл. 1 представлены значения выигрыша в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП, полученные по результатам эксперимента. Выигрыш в помехоустойчивости определим как отношение значения $T_{\text{ош}}$ для АДНП к $T_{\text{ош}}$ для исследуемого приемника:

$$B = \frac{T_{\text{ош АДНП}}}{T_{\text{ош КП (КПП, КПЗ, КППЗ)}}}.$$

Диапазон значений выигрыша (минимальное и максимальное значения) указан для исследованного диапазона значений φ_L . Наихудшие результаты по помехоустойчивости (наименьшие значения выигрыша) в таблице выделены желтым цветом, а наилучшие (наибольшие значения выигрыша) — зеленым.

Оценка помехоустойчивости приемников при изменении скорости движения поезда и фиксированном значении угла пересечения с ЛЭП. Наиболее часто встречающееся значение угла пересечения с ЛЭП на железных дорогах СССР составляло 60° . По данным

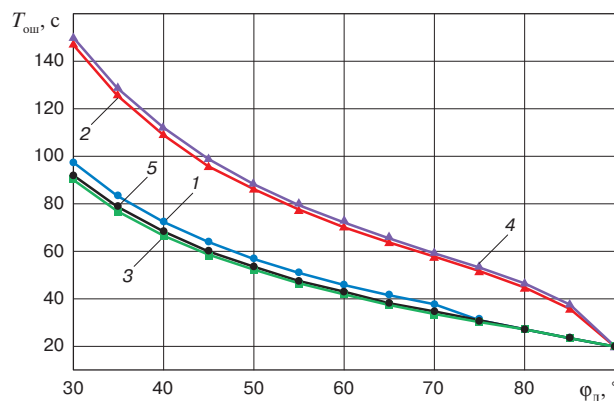


Рис. 2. Графики зависимости (1) при $v_n = 2,5$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 2. Dependence diagrams (1) at $v_n = 2.5$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN (broadband filter – limiter – narrowband filter) and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

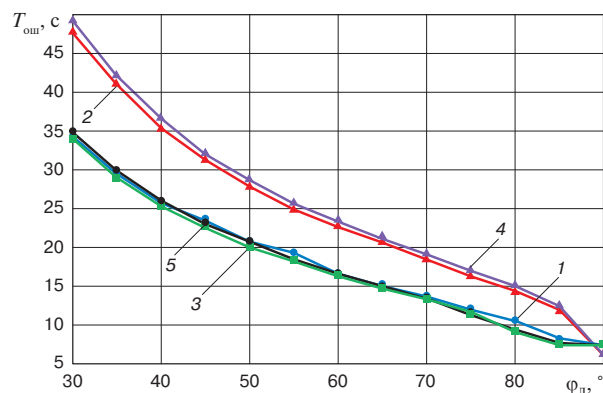


Рис. 3. Графики зависимости (1) при $v_n = 7,5$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 3. Dependence diagrams (1) at $v_n = 7.5$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

службы автоматики и телемеханики Куйбышевской железной дороги, в настоящее время наибольшее количество пересечений железнодорожных линий с ЛЭП проходит под углом 90° . Наиболее показательны по характеру их изменения зависимости (2), полученные в результате второго эксперимента при значениях $\varphi_L = 30; 60; 90^\circ$. Они представлены на рис. 6–8 соответственно.

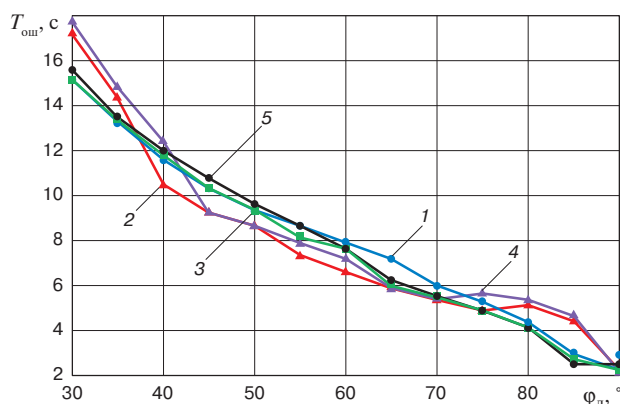


Рис. 4. Графики зависимости (1) при $v_n = 20$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 4. Dependence diagrams (1) at $v_n = 20$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

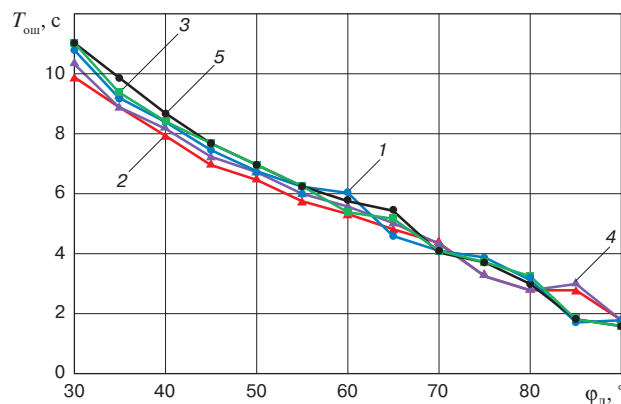


Рис. 5. Графики зависимости (1) при $v_n = 30$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 5. Dependence diagrams (1) at $v_n = 30$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

Таблица 1

Выигрыш в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП по результатам первого эксперимента

Table 1

Gain in noise immunity of the investigated receivers in relation to the receiver with linear amplitude detection and non-linear harmonic interference suppression at the end of the first experiment

Скорость поезда v_n , м/с	Выигрыш B в помехоустойчивости приемников			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
2,5	0,60–1,04	0,58–1,04	1,00–1,10	0,98–1,09
5	0,64–1,16	0,63–1,13	1,00–1,14	0,96–1,12
7,5	0,70–1,22	0,70–1,19	0,97–1,14	0,97–1,12
10	0,73–1,24	0,71–1,08	0,87–1,25	0,84–1,08
12,5	0,69–1,25	0,67–1,13	0,95–1,29	0,85–1,10
15	0,71–1,07	0,69–1,07	1,00–1,32	0,94–1,12
17,5	0,76–1,17	0,72–1,14	0,92–1,11	0,92–1,06
20	0,68–1,22	0,64–1,22	0,98–1,20	0,90–1,19
22,5	0,76–1,14	0,76–1,08	0,89–1,32	0,89–1,05
25	0,62–1,16	0,62–1,16	0,95–1,13	0,94–1,04
27,5	0,64–1,21	0,59–1,21	0,89–1,13	0,80–1,13
30	0,61–1,19	0,56–1,19	0,88–1,15	0,84–1,15
32,5	0,57–1,25	0,57–1,25	0,89–1,24	0,89–1,18
35	0,71–1,14	0,57–1,14	0,77–1,20	0,77–1,20
37,5	0,63–1,30	0,63–1,30	0,71–1,18	0,71–1,18
40	0,53–1,29	0,47–1,22	0,89–1,03	0,69–1,03

В табл. 2 представлены значения выигрыша в помехоустойчивости исследованных приемников в сравнении с АДНП для зависимости (2). Наихудшие результаты в таблице выделены желтым цветом, а наилучшие — зеленым.

Анализ результатов. Анализ графиков, представленных на рис. 2, показывает, что помехоустойчивость КПЗ и КППЗ в диапазоне значений ϕ_d от 30 до 70° выше, чем помехоустойчивость АДНП, а в диапазоне значений ϕ_d от 75 до 90° их помехоустойчивость

сопоставима. Добавление в КП блока с зоной нечувствительности в диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ от 30 до 85° значительно снижает $T_{\text{ош}}$, а при $\varphi_{\text{Л}} = 90^\circ$ (при перпендикулярном пересечении) помехоустойчивость КПЗ и КППЗ сравнима с помехоустойчивостью КП, КПП и АДНП. Это объясняется следующим. С уменьшением $\varphi_{\text{Л}}$ значительно увеличивается ЭДС прямого влияния гармонической помехи от ЛЭП, при этом ЭДС косвенного влияния уменьшается незначительно. Как следствие, увеличивается постоянная составляющая огибающей результирующей гармонической помехи на выходе амплитудного детектора (коррелятора) во всех исследованных приемниках. В АДНП влияние этой составляющей снижается за счет применения устройства нелинейного подавления гармонической помехи на выходе амплитудного детектора, в КПЗ и КППЗ — за счет блока с зоной нечувствительности на выходе коррелятора. В КП и КПП влияние этой составляющей не снижается, поскольку в данных приемниках отсутствует устройство подавления гармонической помехи. Поэтому в КП и КПП влияние этой составляющей приводит к увеличению $T_{\text{ош}}$ по сравнению с остальными приемниками.

Помехоустойчивость КПЗ и КППЗ во всем диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ сопоставима с помехоустойчивостью АДНП (рис. 3). Помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП в диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}} = 30^\circ \div 85^\circ$ значительно выше, чем КП и КПП, а при $\varphi_{\text{Л}} = 90^\circ$ их помехоустойчивость сопоставима. Помехоустойчивость всех вариантов КП с БНП практически во всем диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ сопоставима с помехоустойчивостью АДНП (рис. 4 и 5).

По рис. 2–4 видно, что графики зависимости $T_{\text{ош}}$ от скорости поезда (1) образуют две группы. В первую группу входят зависимости для КП и КПП, во вторую — для КПЗ, КППЗ и АДНП. С увеличением скорости поезда разница в помехоустойчивости между приемниками, входящими в первую и вторую группы, значительно уменьшается.

В данном эксперименте для всех устройств наименьшее влияние ЛЭП будет оказывать при перпендикулярном пересечении, что согласуется с результатами, полученными в работе Ю.М. Иваненко⁷.

Согласно данным в табл. 1, КП и КПП оказались наихудшими по критерию максимальной помехоустойчивости. Это объясняется тем, что в составе данных приемников отсутствуют устройства подавления гармонической помехи от ЛЭП. Наилучшим является КПЗ, незначительно хуже него — КППЗ. Исходя из этого, добавление в КП блока с зоной нечувствительности позволяет значительно снизить влияние гармонической помехи от ЛЭП, компенсируя

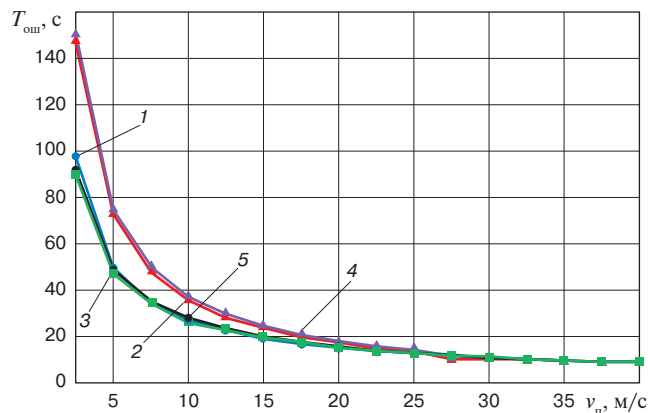


Рис. 6. Графики зависимости (2) при $\varphi_{\text{Л}} = 30^\circ$:

1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 6. Dependence diagrams (2) at $\varphi_{\text{Л}} = 30^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

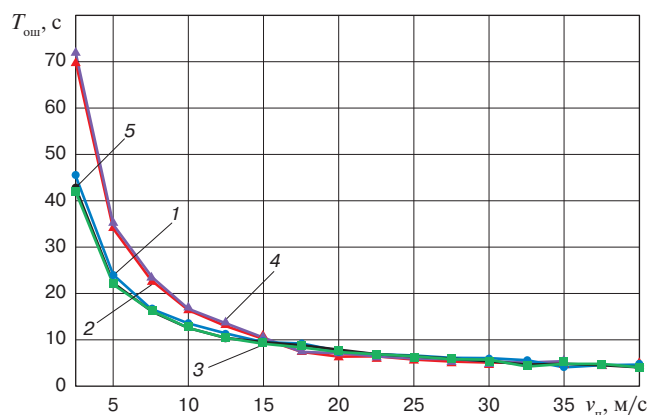


Рис. 7. Графики зависимости (2) при $\varphi_{\text{Л}} = 60^\circ$:

1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 7. Dependence diagrams (2) at $\varphi_{\text{Л}} = 60^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

снижение помехоустойчивости из-за добавления комбинированного подавителя помех.

Таким образом, по результатам первого эксперимента наиболее предпочтительным по помехоустойчивости является КПЗ, а наименее — КПП.

⁷ Иваненко Ю.М. Исследование влияния линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения на приемные устройства автоматической локомотивной сигнализации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14. Харьков, 1976. 210 с.

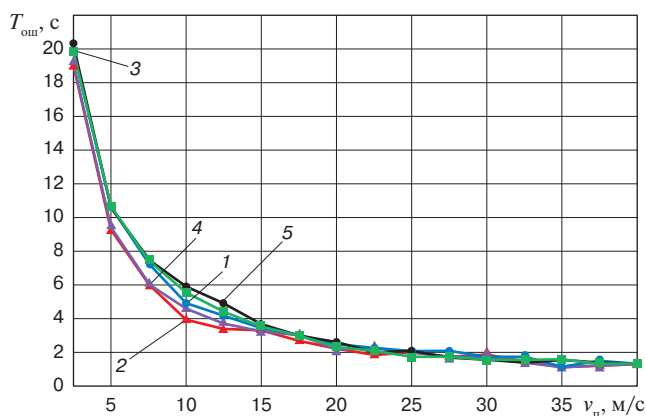
Таблица 2

Выигрыш в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП по результатам второго эксперимента

Table 2

Gain in noise immunity of the investigated receivers in relation to the receiver with linear amplitude detection and non-linear harmonic interference suppression at the end of the second experiment

Угол пересечения оси ЛЭП с железнодорожной линией ϕ_d , град.	Выигрыш B в помехоустойчивости приемников			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
30	0,67–1,11	0,65–1,09	0,97–1,08	0,95–1,06
35	0,66–1,10	0,65–1,10	0,96–1,09	0,94–1,07
40	0,67–1,10	0,65–1,05	0,97–1,09	0,95–1,07
45	0,66–1,12	0,65–1,12	0,96–1,09	0,94–1,07
50	0,66–1,14	0,64–1,11	0,97–1,10	0,95–1,07
55	0,66–1,18	0,64–1,13	1,00–1,10	0,95–1,20
60	0,65–1,20	0,64–1,14	0,84–1,24	0,84–1,18
65	0,65–1,22	0,63–1,22	0,82–1,20	0,78–1,15
70	0,65–1,14	0,63–1,11	0,90–1,14	0,90–1,12
75	0,60–1,20	0,59–1,20	0,96–1,07	0,90–1,12
80	0,60–1,29	0,58–1,22	0,96–1,32	0,89–1,16
85	0,53–0,76	0,47–0,76	0,71–1,20	0,69–1,19
90	1,04–1,30	0,89–1,30	0,87–1,18	0,77–1,18

Рис. 8. Графики зависимости (2) при $\phi_d = 90^\circ$:1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗFig. 8. Dependence diagrams (2) at $\phi_d = 90^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

В диапазоне значений скорости поезда v_n от 2,5 до 20 м/с помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП выше, чем помехоустойчивость КП и КПП, а в диапазоне v_n от 22,5 до 40 м/с их помехоустойчивость сопоставима. Согласно графикам, приведенным на рис. 7,

в диапазоне значений v_n от 2,5 до 12,5 м/с помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП выше, чем помехоустойчивость КП и КПП, а в диапазоне $v_n = 15 \div 40$ м/с они сопоставимы. Представленные на рис. 8 графики показывают, что во всем диапазоне значений v_n помехоустойчивость всех приемников сопоставима. По данным табл. 2 можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным по помехоустойчивости является КПЗ.

Таким образом, во втором эксперименте наибольшей помехоустойчивостью к воздействию гармонической помехи от ЛЭП обладают приемники, в составе которых присутствует блок с зоной нечувствительности (КПЗ, КППЗ) или нелинейное устройство подавления гармонической помехи (АДНП). Наименьшей помехоустойчивостью обладают КП и КПП.

Обсуждение и заключение. По совокупности полученных в результате исследования зависимостей (1) и (2), представленных графиками на рис. 2–8, а также других, полученных, но не представленных в данной работе, можно сделать вывод, что нелинейное преобразование сигнала в приемнике как метод борьбы с помехами от высоковольтных ЛЭП показывает эффект (уменьшение интервала T_{osh} , в течение которого наблюдались ошибки в приеме) на скоростях движения поезда менее 15 м/с и неперпендикулярном пересечении ЛЭП и железнодорожной линии, причем чем меньше скорость, тем больше эффект. При перпендикулярном

пересечении воздействие гармонической помехи от ЛЭП на приемники минимально, и эффект от нелинейного преобразования практически отсутствует. Это согласуется с наблюдаемым на практике эффектом снижения количества сбоев в работе АЛСН при переустройстве ЛЭП и организации ее перпендикулярного пересечения с железнодорожной линией.

Результаты исследования будут учтены при создании лабораторного макета квадратного приемника с нелинейным преобразованием сигналов АЛСН и оценки его помехоустойчивости в лабораторных условиях. Практическое внедрение квадратного приемника возможно в рамках НИОКР по модернизации существующих локомотивных устройств безопасности либо при разработке новых.

Дальнейшие исследования авторов направлены на определение наиболее помехоустойчивого и безопасного приемника сигналов АЛСН с учетом исследованных приемников и различных мешающих воздействий (импульсных, гармонических и флуктуационных помех) и последующую реализацию такого приемника в виде лабораторного макета. Также представляет практический интерес исследование помехоустойчивости и безопасности приемника в лабораторных условиях с использованием записей сигналов и помех, зарегистрированных в реальных поездках на локомотивах грузовых поездов.

Проведенное исследование показало, что среди всех рассмотренных типов приемников по помехоустойчивости при воздействии гармонической помехи от ЛЭП наиболее предпочтительным оказался квадратный приемник с блоком с зоной нечувствительности. Незначительно уступают ему приемник с комбинированным подавителем помех и блоком с зоной нечувствительности и приемник с амплитудным детектированием и нелинейным устройством подавления гармонической помехи. Наихудшую помехоустойчивость показал приемник с комбинированным подавителем помех. Поэтому для борьбы с гармонической помехой от ЛЭП в канале АЛСН целесообразно применение приемников, в составе которых присутствует блок с зоной нечувствительности.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Finding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 4. С. 14–19 [Shamanov V. I. Security of locomotive receivers automatic locomotive signaling from interference. *Automation, communication, informatics*. 2013;(4):14-19. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/qirkcl>.
2. Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К. Комплексные локомотивные системы безопасности // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 10. С. 2–4 [Rozenberg E. N., Shukhina E. E., Kiselgof G. K. Comprehensive locomotive safety systems. *Automation, communication, informatics*. 2014;(10):2-4. (In Russ.)] EDN: <https://www.elibrary.ru/snqsdv>.
3. Шухина Е. Е., Висков В. В., Гурьянов А. В. Безопасный локомотивный объединенный комплекс БЛОК // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 4. С. 18–19 [Shukhina E. E., Viskov V. V., Gur'yanov A. V. BLOK safe integrated locomotive unit. *Automation, communication, informatics*. 2011;(4):18-19. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/nwhahf>.
4. Гурьянов А. В., Сулоев А. В. Микропроцессорный дешифратор ДКСВ-М // Труды АО «НИИАС». М.: Т 8 Издательские Технологии, 2021. Т. 1, вып. 11. С. 278–282 [Gur'yanov A. V., Suloev A. V. DKSV-M microprocessor decoder. In: *Proceedings of the NIIS*. Moscow: Vol. 8 Izdatel'skie Tehnologii; 2021. Vol. 1, Issue 11. p. 278–282. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/boqcqa>.
5. Кравцов Ю. А., Чегуров А. Б. Корреляционный способ дешифрирования числовых кодовых сигналов АЛСН // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2009. № 2 (34). С. 34–39 [Kravtsov Yu. A., Chegurov A. B. Correlation method of cab signaling code identification. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2009;(2):34-39. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/kzmmgt>.
6. Оценка эффективности локомотивного цифрового фильтра АЛСН при помощи полунатурных измерений / М. Э. Скоробогатов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (81). С. 62–69 [Skorobogatov M. E., Pulyakov A. V., Demyanov V. V., Alekseenko V. A. Estimation efficiency of the ALSN locomotive digital filter using semi-in-line measurements. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2021;(1):62-69. (In Russ.)]. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_62.
7. Засов В. А. Компенсация помех в приемниках сигналов автоматической локомотивной сигнализации // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5, № 1. С. 32–44 [Zasov V. A. Compensation of noise in signal receivers automatic locomotive signaling. *Transport Automation Research*. 2019;5(1):32-44. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rliuxo>. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-32-44>.
8. Засов В. А., Ромкин М. В. Адаптивное подавление мощных коррелированных помех в прерывистых сигналах // Вестник СамГУПС. 2022. № 1 (55). С. 76–83 [Zasov V. A., Romkin M. V. Adaptive suppression of strong correlated interference in intermittent signals. *Vestnik SamGUPS*. 2022;(1):76-83. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/dolbst>.
9. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Корреляционный приемник с квадратными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 49–54 [Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Correlation receiver

with quadrature channels for continuously working automatic cab signaling. *Transport of the Urals*. 2022;(3):49-54. (In Russ.)). <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-3-49-54>.

10. Влияние гармонических помех от высоковольтных ЛЭП на помехоустойчивость приемника канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия / Р. Р. Юсупов [и др.] // Электротехника. 2023. № 10. С. 35–38 [Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Gordeev I. P., Blachev K. E. The influence of harmonic interference from high-voltage power lines on the noise immunity of the receiver of the continuous automatic locomotive signaling channel. *Russian Electrical Engineering*. 2023;(10):35-38. (In Russ.)). EDN: <https://elibrary.ru/reihms>. https://doi.org/10.53891/00135860_2023_10_35.

11. Хохрин А. С., Юсупов Р. Р., Плохов Е. М. Об эффективности корреляционного приема и нелинейной обработки в приемнике сигналов АЛСН // Электротехника. 2023. № 10. С. 50–54 [Khokhrin A. S., Yusupov R. R., Plokhov E. M. On the effectiveness of correlation reception and nonlinear processing in the receiver of CAALS signals. *Russian Electrical Engineering*. 2023;(10):50-54. (In Russ.)). EDN: <https://elibrary.ru/jllhyc>. https://doi.org/10.53891/00135860_2023_10_50.

12. Юсупов Р. Р., Леушин В. Б., Блачёв К. Э. Нелинейная обработка как способ борьбы с влиянием высоковольтных ЛЭП на работу локомотивного цифрового приемника канала АЛСН // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития. 2007. № 2007. С. 55–59 [Yusupov R. R., Leushin V. B., Blachev K. E. Non-linear processing as a way to counteract high-voltage power line interference with the locomotive digital receiver of CACS channel. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Spetsial'nyy vypusk: Problemy zhelezнодорожного транспорта na sovremennom etape razvitiya*. 2007;(2007):55-59. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/wijdyx>.

13. Сороко В. И., Фоткина Ж. В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справ.: в 5 кн. Кн. 4. 5-е изд. М.: Планета, 2020. 1020 с. [Soroko V. I., Fot'kina J. V. *Railway automation and telemechanics hardware: reference book: 5 books. Book 4*. 5th ed. Moscow: Planeta Publ.; 2020. 1020 p. (In Russ.)).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Руслан Рифович ЮСУПОВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы 2В), Author ID: 191442, <https://orcid.org/0000-0002-7572-3102>

Алексей Сергеевич ХОХРИН,

аспирант, преподаватель, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, Самарский

государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы 2В), Author ID: 1107392, <https://orcid.org/0000-0003-3113-8769>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan R. YUSUPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 191442, <https://orcid.org/0000-0002-7572-3102>

Alexey S. KHOKHRIN,

Postgraduate, Lecturer, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 1107392, <https://orcid.org/0000-0003-3113-8769>

ВКЛАД АВТОРОВ

Руслан Рифович ЮСУПОВ. Постановка цели и задач исследования, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Алексей Сергеевич ХОХРИН. Разработка методики проведения экспериментов, их проведение и обработка результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ruslan R. YUSUPOV. Setting goals and objectives of the research, editing and preparation of the text of the manuscript (50%).

Alexey S. KHOKHRIN. Development of methods of conducting experiments, their implementation and processing of results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023, рецензия от первого рецензента получена 26.11.2023, рецензия от второго рецензента получена 04.12.2023, принята к публикации 26.01.2024.

The article was submitted 26.10.2023, first review received 26.11.2023, second review received 04.12.2023, accepted for publication 26.01.2024.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.