



УДК 656.259.2

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОДОВЫХ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**ЛУНЁВ Сергей Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры<sup>1</sup>; e-mail: slunev@mail.ru

**БОРИСЕНКО Дмитрий Владимирович** — канд. техн. наук, доцент, инженер-программист<sup>2</sup>;  
e-mail: borisenkodv@yandex.ru

**ПРИСУХИНА Илона Вадимовна** — канд. техн. наук, старший преподаватель<sup>3</sup>; e-mail: prisukhinaiv@mail.ru

**КЛЮЧНИКОВ Максим Владимирович** — ассистент кафедры<sup>3</sup>; e-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой», Москва

<sup>2</sup> ООО «Тамтэк», Омск

<sup>3</sup> Омский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика», Омск

Устойчивость систем железнодорожной автоматики, использующих автоматическую локомотивную сигнализацию как средство интервального регулирования движения поездов, может быть повышена за счет применения алгоритмов машинного обучения. Известный алгоритм идентификации кодовых сигналов локомотивной сигнализации имеет ряд недостатков, которые обусловлены циклическим характером идентифицируемых сигналов и необходимостью цикловой синхронизации перед процедурой идентификации. Это существенно усложняет техническую реализацию, а также требования к вычислительным ресурсам известного алгоритма. В этой статье предлагается усовершенствованный алгоритм идентификации кодовых сигналов, передаваемых по рельсовым цепям в процессе движения поездов, не требующий цикловой синхронизации. Для решения проблемы цикловой синхронизации предложено идентификацию кодового сигнала выполнять по амплитудному спектру Фурье его предварительно выделенной огибающей. Такое решение стало возможно за счет инвариантности амплитудного спектра Фурье огибающей кодового сигнала относительно сдвига кодового сигнала во временной области на произвольное количество цифровых отсчетов. В качестве метода машинного обучения в статье рассмотрена искусственная нейронная сеть с упрощенной, по сравнению с предыдущими аналогами, архитектурой. При идентификации задействована трехслойная нейронная сеть с полными соединениями между слоями. Также в работе исследованы ограничения предложенного метода машинной идентификации, обусловленные отказом от фазового спектра огибающей обрабатываемого кодового сигнала. В статье продемонстрировано действие усовершенствованного метода машинной идентификации на реальных сигналах, зафиксированных в эксплуатируемых рельсовых линиях. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной методики идентификации сигналов автоматической локомотивной сигнализации систем интервального регулирования движения поездов.

**Ключевые слова:** машинное обучение; преобразование Фурье; автоматическая локомотивная сигнализация; корреляционный анализ; импульсные помехи; рельсовая линия; рельсовая цепь.

**DOI:** 10.20295/2412-9186-2022-8-01-36-47

## Введение

На сети железных дорог РФ для предупреждения проезда светофора с запрещающим сигнальным показанием, а также для информирования машиниста о сигнальном показании впереди стоящего светофора используется система автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН). На некоторых участках железных дорог применяется

система многозначной частотной автоматической локомотивной сигнализации (АЛС-ЕН), которая позволяет существенно увеличить объем передаваемой информации [1].

Определение сигнального показания на впереди стоящем путевом светофоре производится на основании принимаемого из рельсовой линии кодового сигнала — комбинаций импульсов переменного тока и интервалов [2].

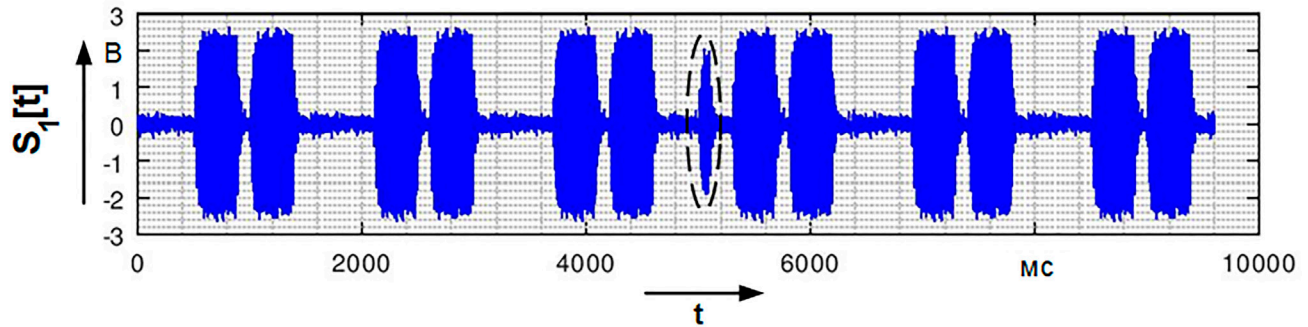


Рис. 1. Осциллограмма сигнала  $S_1[t]$

При трехзначной сигнализации используются следующие кодовые сигналы:

«З» — информирует машиниста о приближении к светофору с зеленым огнем, содержит три импульса в цикле;

«Ж» — информирует машиниста о приближении к светофору с желтым огнем, содержит два импульса в цикле;

«КЖ» — информирует машиниста о приближении к светофору с красным огнем, содержит один импульс в цикле.

Источником кодов является кодовый путевой трансмиттер, размещаемый в релейном шкафу сигнальной установки автоблокировки. Из рельсовой линии кодовый сигнал воспринимается с помощью приемных катушек и расшифровывается релейным дешифратором.

Известной проблемой эксплуатируемых систем автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) являются частые ошибки при идентификации кодовых сигналов [3]. Это, в свою очередь, приводит к нарушению функциональной безопасности таких систем, а также снижает эффективность перевозочного процесса в отношении расхода тяговых ресурсов и выполнения графика движения поездов.

К ошибкам при идентификации кодовых сигналов преимущественно приводят импульсные помехи, возникающие в рельсовой линии. На рис. 1 приведена осциллограмма сигнала  $S_1[t]$ , представляющего собой несколько циклов кодового сигнала «Ж» с наличием указанной помехи, обведенной пунктирной линией.

К настоящему времени разработаны различные методы, позволяющие добиться снижения числа ошибок при идентификации кодовых сигналов автоматической локомотивной сигнализации [4–9]. Некоторые из них

направлены на совершенствование традиционного способа идентификации кодовых сигналов (на основе локомотивного релейного дешифратора).

Так, например, в [4] разработан подход, реализующий нелинейную обработку кодовых сигналов с применением схемы «широкая полоса — ограничитель — узкая полоса» (схема ШОУ), позволяющий компенсировать синусоидальные помехи при идентификации. В работе [5] авторами предложен метод, исключаящий бланкирование кодового сигнала при наличии в нем искажений, что способствует снижению числа отказов в работе систем АЛС. Подавление импульсных помех на входе приемного устройства локомотива, как показано в [7], обеспечивает существенное снижение ложных регистраций кодовых сигналов. В [8] уделено внимание расширению функциональных возможностей приемного устройства локомотива в отношении электромагнитных катушек, воспринимающих кодовые сигналы с рельсового пути, что также способствует повышению достоверности работы системы при идентификации кодовых сигналов.

Известны разработки, предлагающие кардинальные изменения способа идентификации кодовых сигналов. Они подразумевают переход от релейной дешифрации на локомотиве к более совершенным и быстродействующим алгоритмам. Так, например, в [6] с целью повышения помехоустойчивости локомотивной аппаратуры авторами рассматривается идентификация кодовых сигналов на основе корреляционного анализа. В [9] предлагается подход, позволяющий повысить устойчивость приемной аппаратуры локомотива к импульсным помехам в интервальной части кодовых

сигналов, за счет обработки их осциллограмм алгоритмами распознавания изображений.

С учетом современного уровня развития вычислительной техники и аппаратной части локомотивов [10], разработанный в [9] способ идентификации кодовых сигналов АЛС представляется наиболее перспективным [11–13]. Однако данный подход имеет ряд недостатков, к которым можно отнести:

- необходимость в синхронизации очередного цикла кодового сигнала;
- существенные затраты памяти вычислительной системы и связанная с этим потребность в буферизации большого количества входных данных;
- применение сложного алгоритма управления внутри приемного устройства локомотива, подразумевающего обращение к более ранним стадиям обработки кодового сигнала.

Таким образом, задачей данного исследования является повышение устойчивости приемной аппаратуры АЛСН к импульсным помехам в интервальной части кодовых сигналов. Поставленную задачу предлагается решить путем совершенствования системы, представленной в [9], с целью исключения указанных выше недостатков.

Системы АЛС получили широкое распространение не только на сети железных дорог РФ, но и в других странах мира. Однако применение дешифрации осциллограмм кодовых сигналов является особенностью отечественной системы АЛС, в то время как в зарубежных системах используются другие принципы работы. В связи с этим авторами принято решение не рассматривать в данной статье зарубежный опыт в области распознавания сигналов на железнодорожном транспорте.

### **1. Машинное обучение в задачах идентификации кодовых сигналов локомотивной сигнализации**

Разработка алгоритмов распознавания изображений является одной из ключевых задач машинного обучения. Решение подобной задачи может быть выполнено с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [12]. ИНС является одним из алгоритмов машинной классификации, то есть решает задачу

отнесения данных на ее входе к одному из существующих классов на выходе.

Применение в [9] для идентификации кодовых сигналов ИНС, в отличие от [4–8], существенно упрощает процедуру обработки кодовых сигналов на локомотиве. При этом нет необходимости выдерживать в установленных диапазонах значения временных параметров компонентов релейного дешифратора, искажения которых ведут к сбою в работе системы АЛС, а также устанавливать на борту локомотива дополнительные устройства, предназначенные для борьбы с искажениями, возникающими в рельсовой линии. Гибкость архитектуры ИНС позволяет адаптировать ее параметры под условия конкретной задачи. Процедура идентификации кодового сигнала на основе ИНС заключается лишь в однократном расчете значений функций активации ее нейронов, в отличие от [6], где необходимо определить значения сразу трех корреляционных функций.

Таким образом, результатом работы ИНС является итоговый идентификатор «З», «Ж» или «КЖ» на ее выходе, соответствующий одному из трех типов кодовых сигналов («З», «Ж» или «КЖ»). На основании этой информации система АЛС выбирает оптимальный режим ведения поезда, соответствующий показанию впереди стоящего светофора.

### **2. Система машинной идентификации кодовых сигналов с конвейерной обработкой**

Несмотря на указанный положительный эффект, подход, предложенный в [9], имеет ряд недостатков, которые можно исключить за счет совершенствования системы. Для этого машинную идентификацию с применением ИНС предлагается выполнять не по временным, а по частотным характеристикам кодового сигнала. Схема предлагаемой системы машинной идентификации (СМИ) кодовых сигналов с конвейерной обработкой представлена на рис. 2.

Кодовый сигнал из рельсовой линии воспринимается приемными катушками локомотива и поступает на вход блока аналого-цифрового преобразователя (БАЦП). Оцифрованная осциллограмма кодового сигнала хранится

в блоке буферизации данных (ББД). Блок амплитудной демодуляции (БАДМ) выделяет огибающую кодового сигнала (ОКС). Значения отсчетов ОКС передаются на вход блока преобразования Фурье (БПФ), выполняющего расчет спектра ОКС. Блок усечения спектра (БУС) удаляет неинформативные составляющие спектра ОКС, тем самым сокращая его длину до заданной. Блок вычисления модулей (БВМ) производит расчет амплитудной составляющей усеченного спектра ОКС. Значения усеченного амплитудного спектра поступают в блок нормализации (БН), в котором осуществляется их приведение к интервалу от 0 до 1. В блоке искусственной нейронной сети (БИНС) по нормализованному усеченному амплитудному спектру ОКС выполняется итоговая идентификация кодового сигнала с выдачей одного из трех ответов («З», «Ж» или «КЖ»).

В качестве средства компьютерного моделирования предлагаемой системы машинной идентификации выбрана программная среда Octave 4.4.1.

В системе алгоритмом, осуществляющим предварительную обработку ОКС (блок БПФ), является быстрое преобразование Фурье [14, 15]. Выбор данного алгоритма обусловлен длиной обрабатываемого сигнала — огибающей, содержащей 1600 цифровых отсчетов. Исходя из рекомендаций, приведенных в [14], сигналы, длина которых превышает 32 цифровых отсчета, следует обрабатывать с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье ввиду значительного сокращения временных затрат на выполнение вычислительных операций.

Для целей настоящего исследования воспользуемся уже разработанными программными функциями из библиотеки «Fastest Fourier Transform in the West» [16]. В синтаксисе языка программирования Octave функция, реализующая выбранный алгоритм, имеет запись «fft()».

Быстрое преобразование Фурье кодового сигнала позволяет более не использовать разработанный в [9] алгоритм поиска начала очередного цикла кода в составе последовательности. Это становится возможным за счет отказа от фазового спектра кодового сигнала (исследования на эту тему представлены, например,

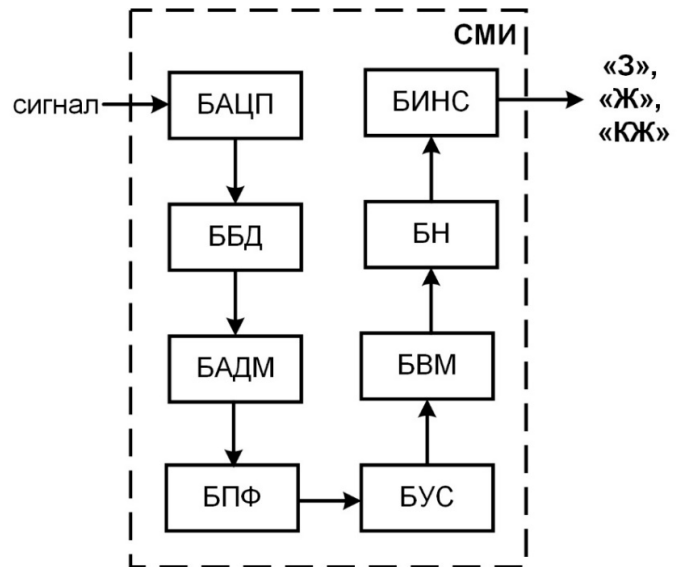


Рис. 2. Система машинной идентификации кодовых сигналов с конвейерной обработкой

в [6]) и инвариантности его амплитудного спектра к сдвигу во временной области [14, 15]. Последнее может быть продемонстрировано применительно к рассматриваемой задаче при помощи алгоритма, графическая схема которого показана на рис. 3 (синтаксис языка программирования Octave).

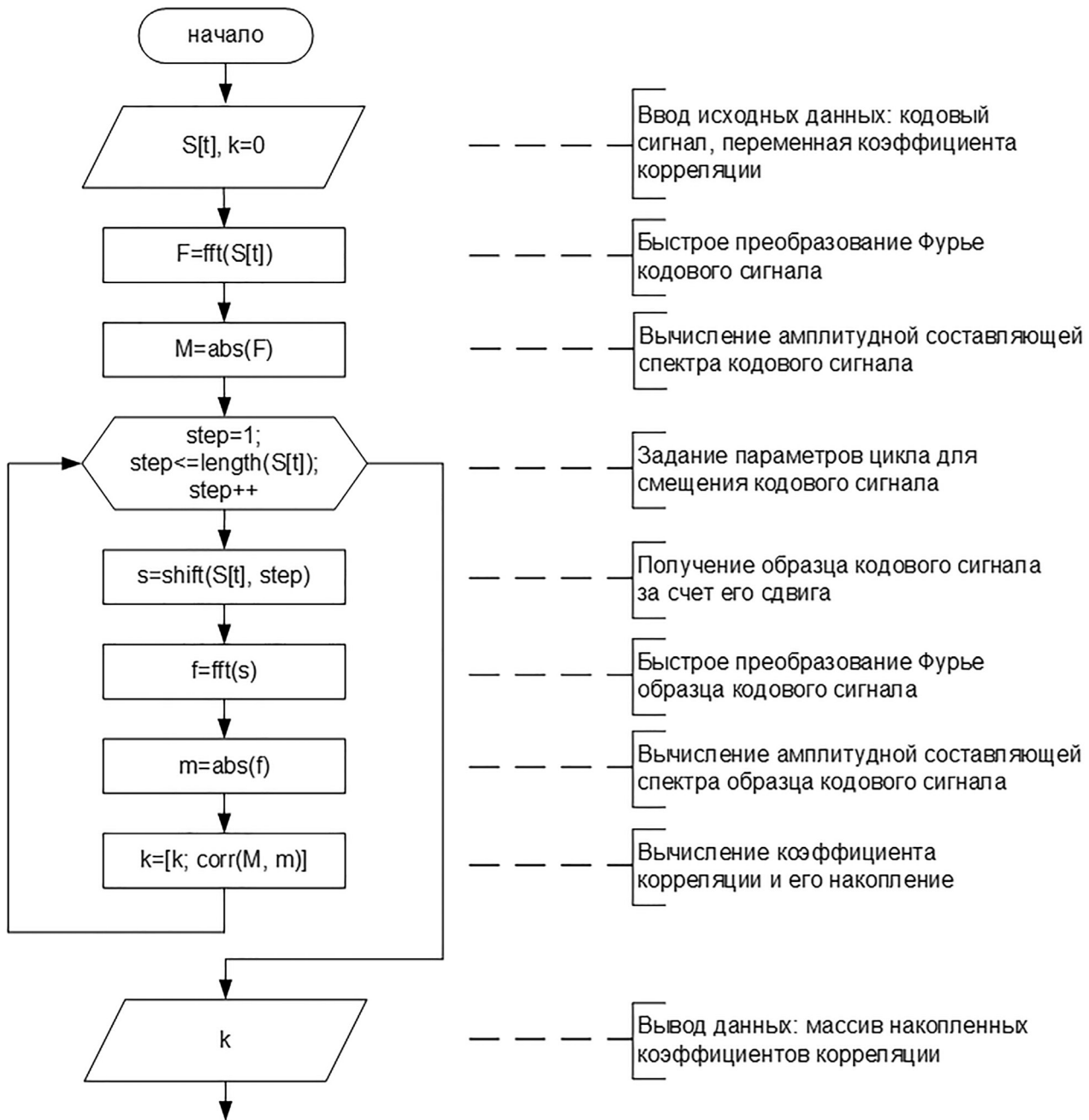
Алгоритм (см. рис. 3) основан на расчете коэффициента корреляции амплитудных спектров сигнала  $S[t]$  и его копий, сдвинутых во времени на различное число отсчетов.

При этом расчет очередного коэффициента корреляции  $k$  с учетом обозначений на рис. 3 осуществляется согласно формуле (1):

$$k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{M_i - \mu_1}{\sigma_1} \cdot \frac{m_i - \mu_2}{\sigma_2}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент корреляции амплитудных спектров кодового сигнала  $M$  и его копии, сдвинутой на некоторое количество отсчетов,  $m$ ;  $N$  — число отсчетов (наблюдений) в  $M$  и  $m$ , равное 1600;  $\mu_1, \mu_2$  — средние значения для  $M$  и  $m$  соответственно;  $\sigma_1, \sigma_2$  — среднеквадратические отклонения для  $M$  и  $m$  соответственно.

Произведенный согласно алгоритму на рис. 3 расчет коэффициентов корреляции амплитудных спектров показал, что все их значения оказались равны единице. Это подтверждает инвариантность амплитудного спектра ОКС к сдвигу во временной области.



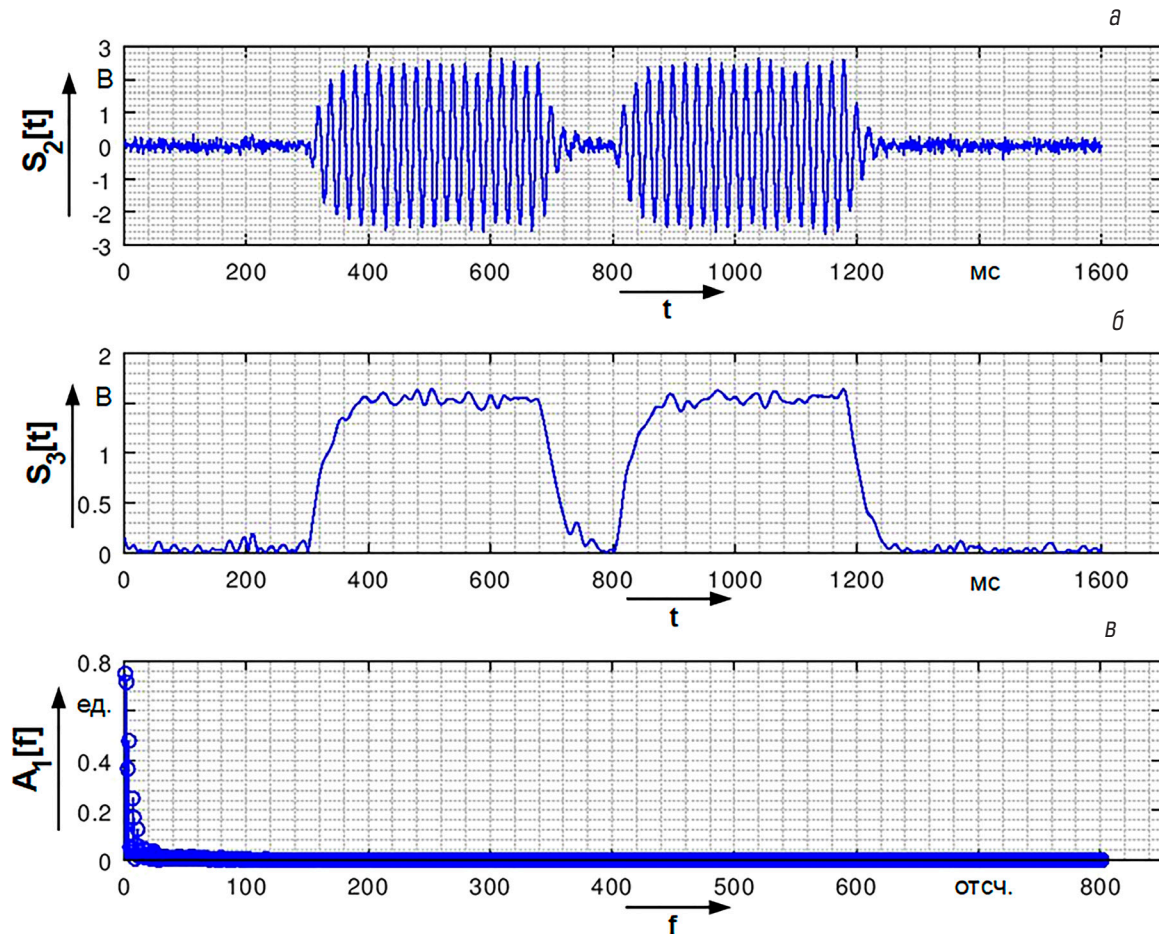
**Рис. 3.** Графическая схема алгоритма верификации инвариантности амплитудного спектра кодового сигнала к его сдвигу во временной области

Таким образом, для дальнейшей машинной идентификации будем использовать только амплитудные спектры ОКС, рис. 4.

На рис. 4, а показан первый цикл сигнала  $S_1[t]$ , который обозначим как  $S_2[t]$ . На рис. 4, б приведена его огибающая — сигнал  $S_3[t]$ . На рис. 4, в приведен амплитудный спектр огибающей  $S_3[t]$  — сигнал  $A_1[f]$ , вычисленный при помощи быстрого преобразования Фурье. Переменная  $f$  обозначает порядковые номера гармонических составляющих спектра сигнала  $S_3[t]$ . Так как амплитудный

спектр сигнала симметричен относительно центрального отсчета [15], то его информативная часть составляет половину от длины сигнала во временной области, то есть 800 отсчетов.

В результате анализа гистограмм амплитудных спектров, огибающих различных кодовых сигналов (в том числе и показанного на рис. 4) выявлено, что спектральные составляющие с номерами более 160 имеют амплитуды, незначительно отличающиеся от 0, и не несут информации о сигнале.



**Рис. 4.** Графики сигналов: кодового сигнала «Ж»  $S_2[t]$  (а), его огибающей  $S_3[t]$  (б) и гистограмма амплитудного спектра  $A_1[f]$  (в)

Это обстоятельство позволяет отказаться от неинформативных отсчетов амплитудного спектра и снизить требования к вычислительным ресурсам предлагаемой системы машинной идентификации. Таким образом, дальнейшая обработка кодового сигнала производится по усеченному до 160 отсчетов амплитудному спектру ОКС (выход блока БУС).

Блок БН приводит значения отсчетов усеченного амплитудного спектра ОКС к интервалу от 0 до 1, то есть выполняет нормализацию [12]. Данная процедура необходима для повышения эффективности подбора параметров блока БИНС на этапе его настройки [17]. Нормализация усеченного амплитудного спектра ОКС выполняется согласно формуле (2):

$$x_i^{\text{норм}} = \frac{x_i - \min(A[f])}{\max(A[f]) - \min(A[f])}, \quad (2)$$

где  $i$  — число отсчетов в усеченном амплитудном спектре  $A[f]$ , равное 160;  $x_i$  — исходное значение отсчета в  $A[f]$ ;  $x_i^{\text{норм}}$  — нормализованное значение отсчета в  $A[f]$ ;  $\min(A[f])$ ,  $\max(A[f])$  — минимальное и максимальные значения отсчетов в  $A[f]$ .

Для рис. 4, в гистограмма нормализованного усеченного спектра  $A_2[f]$  будет иметь вид, представленный на рис. 5.

### 3. Архитектура и параметры искусственной нейронной сети

Идентификация кодовых сигналов выполняется в блоке БИНС и сводится к анализу нормализованного усеченного амплитудного спектра ОКС на основе ИНС.

Для рассматриваемой задачи архитектура ИНС прямого распространения (рис. 6) изменяется незначительно по сравнению с архитектурой, применяемой в [9]. Теперь размерность

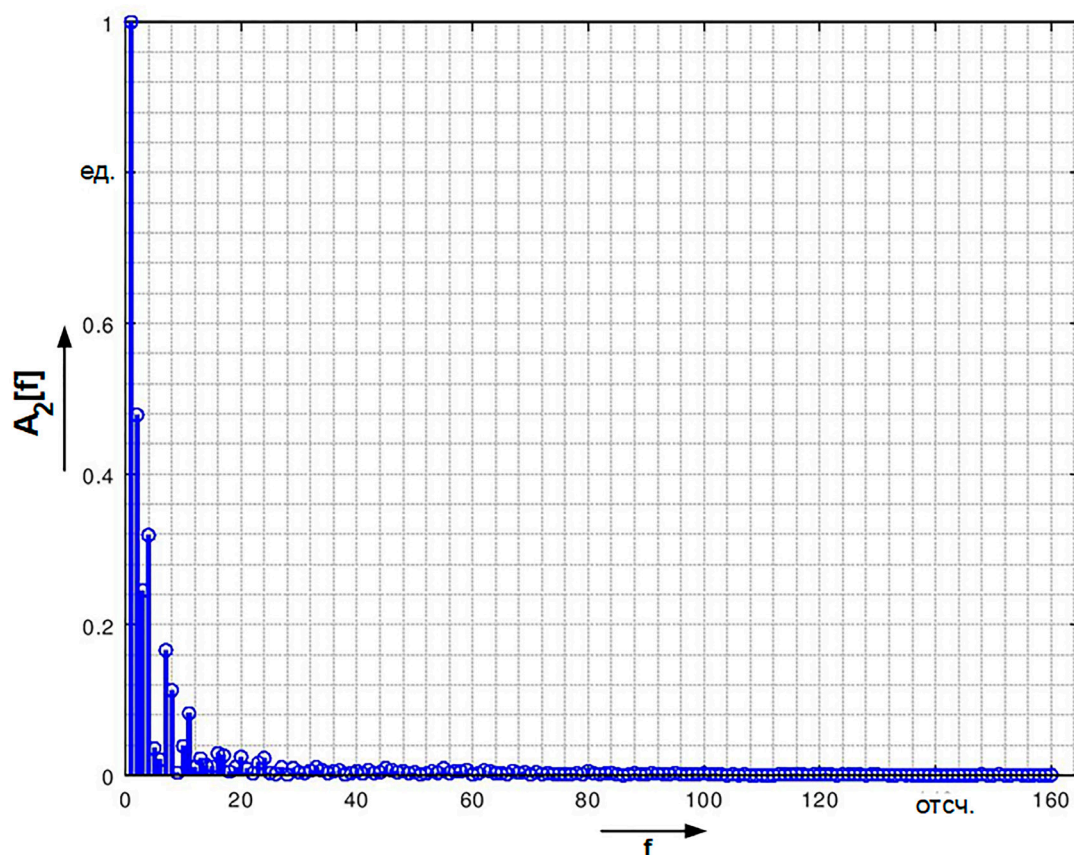


Рис. 5. Амплитудный спектр  $A_2[f]$  ОКС  $S_3[t]$

входного слоя сети определяется числом отсчетов в усеченном амплитудном спектре ОКС, то есть равно 160. Число нейронов, находящихся в скрытом слое, остается прежним и составляет 10 нейронов. Выходной слой содержит 3 нейрона, что определяется количеством возможных состояний системы АЛС («З», «Ж» и «КЖ»).

На рис. 6 как  $W^{[1]}$  и  $W^{[2]}$  показаны матрицы параметров ИНС, ассоциированные с линиями переходов между ее слоями. Согласно выбранной архитектуре сети, размерности указанных матриц составляют  $10 \times 161$  и  $3 \times 11$  соответственно. Во входном и скрытом слоях в окрестностях с пунктирными линиями показаны базовые нейроны, значение на выходе которых приравнивается к единице. Такие нейроны используются для удобства программной реализации расчетов в ИНС [12, 13, 17].

Необходимым этапом настройки блока БИНС является определение значений параметров ИНС  $W^{[1]}$  и  $W^{[2]}$ . Расчет указанных значений производится при помощи алгоритма обратного распространения [12, 17, 18],

который применительно к данной архитектуре ИНС подробно представлен в [9].

Универсальность формул, составляющих алгоритм обратного распространения, для разных конфигураций входного слоя ИНС обусловлена матричным представлением данных, используемых в расчетах. Помимо этого, такой прием позволяет применить в программных вычислениях средства линейной алгебры и существенно повысить скорость их выполнения.

Идентификация кодового сигнала производится при помощи однократного расчета ИНС согласно ее архитектуре в прямом направлении (от входного слоя к выходному) на основании значений  $W^{[1]}$  и  $W^{[2]}$  по следующим выражениям/векторам:

$$\begin{aligned}
 a^{[1]} &= A[f], \\
 z^{[2]} &= W^{[1]} \cdot a^{[1]}, \\
 a^{[2]} &= g(z^{[2]}), \\
 z^{[3]} &= W^{[2]} \cdot a^{[2]}, \\
 a^{[3]} &= g(z^{[3]}),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

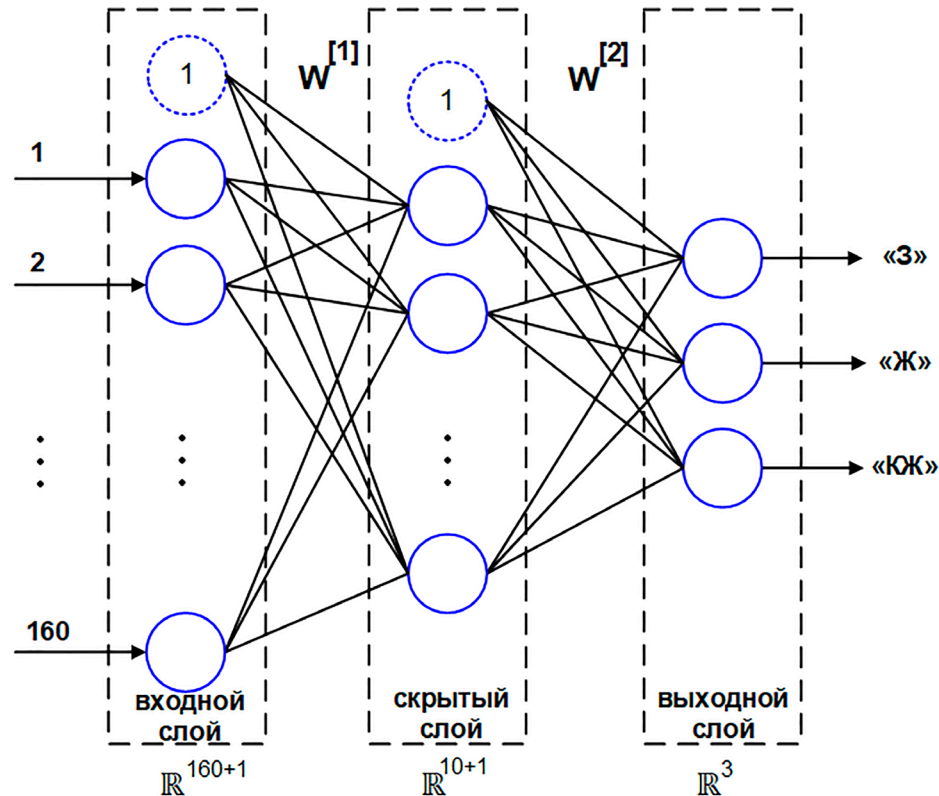


Рис. 6. Архитектура искусственной нейронной сети

где  $a^{[1]}$  — вектор входного сигнала (нормализованный усеченный амплитудный спектр ОКС  $A[f]$ , дополненный базовым нейроном);  $a^{[2]}$ ,  $a^{[3]}$  — векторы значений функций активаций нейронов скрытого и выходного слоев сети соответственно;  $z^{[2]}$ ,  $z^{[3]}$  — векторы произведений параметров  $W^{[1]}$  и  $W^{[2]}$  с  $a^{[1]}$  и  $a^{[2]}$  соответственно;  $g(z)$  — функция активации нейронов, согласно [12] в расчетах использована функция  $g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ .

Отметим, что вектор выходного слоя  $a^{[3]}$  содержит три элемента. Значения этих элементов могут быть интерпретированы как степень уверенности ИНС в принадлежности данных на ее входе к одному из трех кодовых сигналов. Таким образом, идентификация производится путем определения номера элемента  $a^{[3]}$ , имеющего наибольшее значение.

В целях повышения безопасности предлагаемой системы машинной идентификации предлагается ввести порог уверенности ИНС в ответе — не ниже 95 %.

Результат идентификации с выхода блока БИНС передается в систему индикации АЛС.

#### 4. Ограничения системы машинной идентификации кодовых сигналов

Проанализируем амплитудные спектры огибающих кодовых сигналов, показанных на рис. 1, при трансформациях вследствие влияния однократных помех. К таким трансформациям относятся: «Ж» — «З», «КЖ» — «Ж» и «КЖ» — «З».

Для этого определим согласно формуле (1) значение коэффициентов корреляции амплитудных спектров огибающих каждого искаженного кодового сигнала и образцового, в который трансформируется искаженный. На примере трансформации «Ж» — «З» искаженным кодовым сигналом является сигнал «Ж» с однократной помехой в интервальной части, а образцовым — кодовый сигнал «З».

Для удобства анализа результатов расчета усредним полученные значения. Результаты расчета показаны в таблице.

Одним из объяснений высокой уверенности искусственной нейронной сети при неправильном ответе может быть высокое значение (выше 0,80) коэффициента корреляции амплитудных спектров образцового кодового сигнала и кодового сигнала с однократной импульсной помехой.



**Средние значения коэффициентов корреляции амплитудных спектров огибающих образцового кодового сигнала и кодового сигнала с однократной помехой**

Частота несущего сигнала, Гц	Тип трансформации		
	«Ж» → «З»	«КЖ» → «Ж»	«КЖ» → «З»
25	0,87	0,81	0,88
50	0,90	0,80	0,89

Таким образом, в ходе анализа стало очевидным, что однократная помеха в интервальной части кодового сигнала изменяет амплитудный спектр его огибающей так, что исчезает разделимость классов. Это обусловлено отказом от фазового спектра ОКС.

Следовательно, с целью повышения функциональной безопасности предлагаемая система машинной идентификации (см. рис. 2) требует доработки в части принятия решения о типе кодового сигнала. Принятие решений предлагается реализовывать при помощи блока БПР (блок принятия решения) и трех вспомогательных к нему блоков хранения идентификаторов «Т», «Т-1», «Т-2» настоящего такта и двух предыдущих соответственно по мажоритарному принципу «2 из 3» [19], как показано на рис. 7.

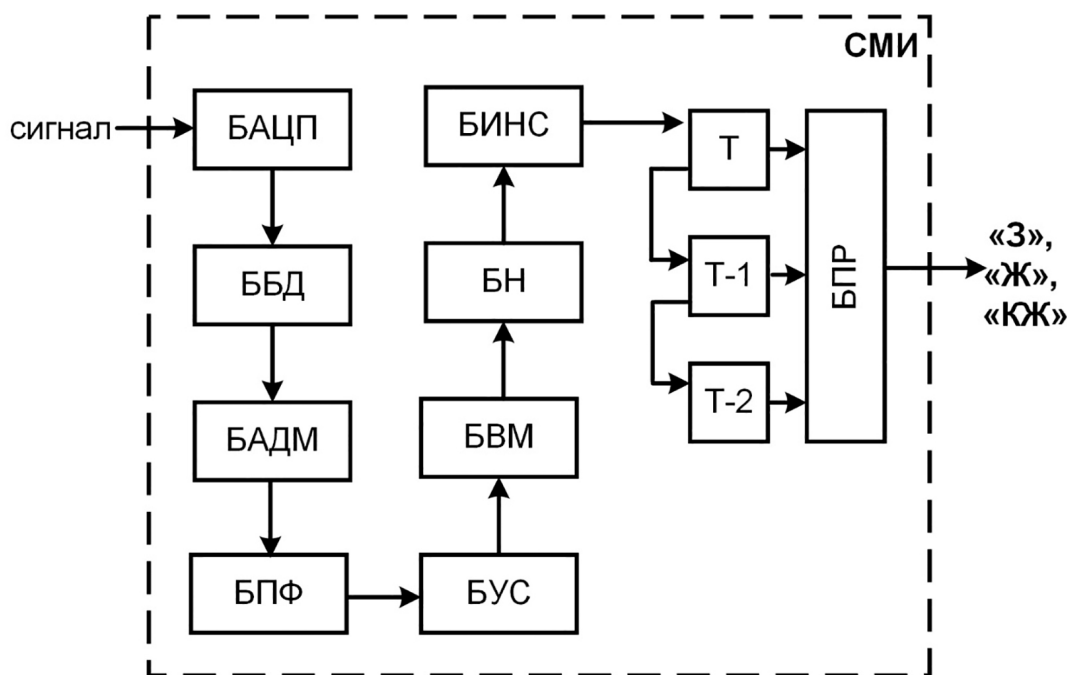
**5. Демонстрация результатов работы системы машинной идентификации кодовых сигналов**

В качестве демонстрации на рис. 8 приведена размеченная осциллограмма показанного на рис. 1 сигнала  $S_1[t]$ , которая формируется на выходе блока БИНС приемного устройства локомотива. Границы обнаруженных циклов сигнала  $S_1[t]$  показаны вертикальными линиями.

Результат идентификации очередного цикла кодового сигнала отображается под соответствующим обозначением в виде латинской буквы «G», «Y» или «R» (сигнал «З», сигнал «Ж» или сигнал «КЖ» соответственно). Для сигнала  $S_1[t]$  под каждой осциллограммой изображена буква «Y».

Альтернативным примером, демонстрирующим работу системы машинной идентификации, является обработка последовательности кодовых сигналов различных типов, осциллограмма которой показана на рис. 9, а (сигнал  $S_4[t]$ ). На рис. 9, б показан результат идентификации последовательности  $S_4[t]$ .

Из рис. 8 и 9 видно, что наличие однократных помех в интервальных частях циклов кодовых сигналов не приводит к ошибкам в работе приемного устройства, что повышает стабильность его работы при эксплуатации в составе АЛС.



**Рис. 7.** Усовершенствованная система машинной идентификации кодовых сигналов с конвейерной обработкой

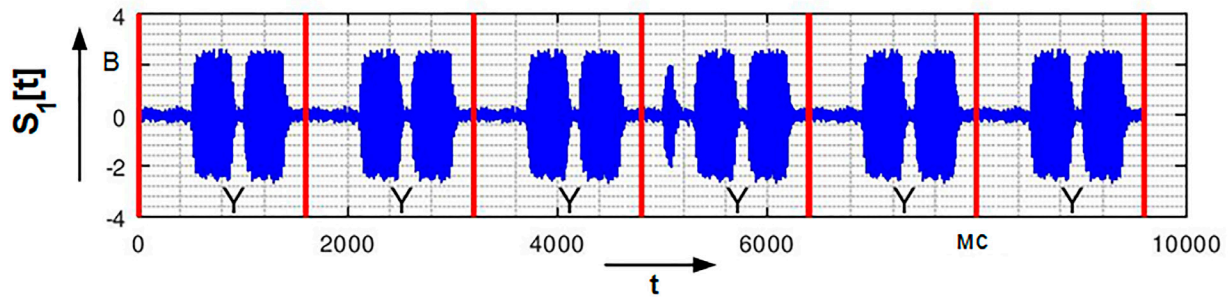


Рис. 8. Размеченная осциллограмма сигнала  $S_1[t]$

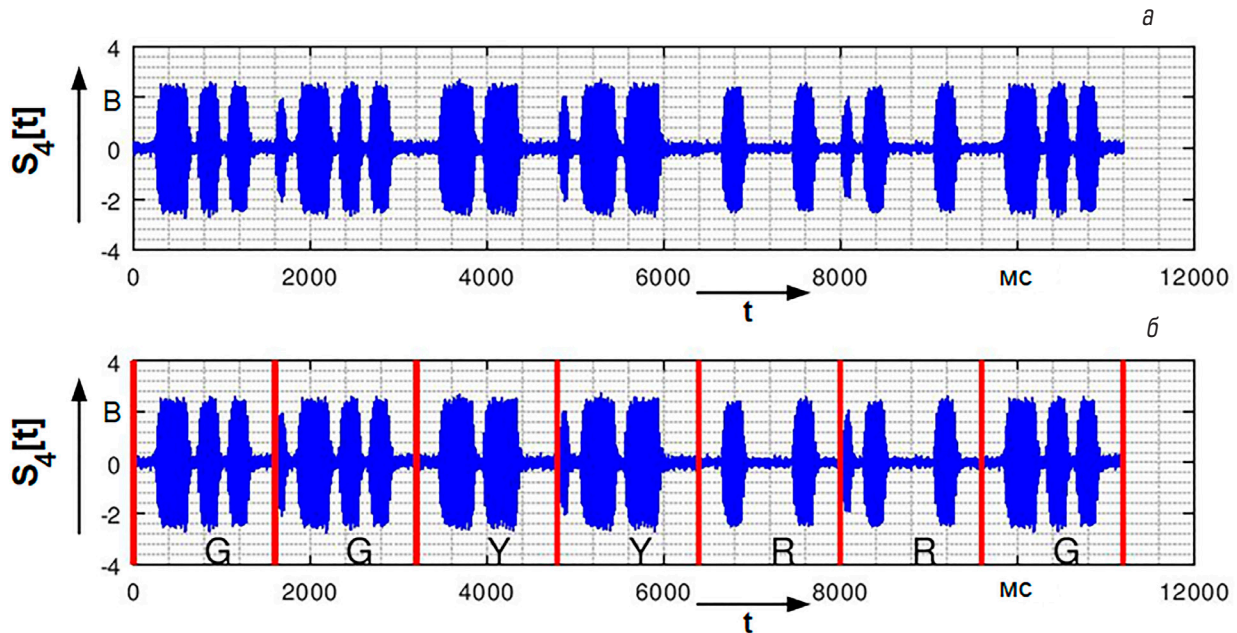


Рис. 9. Осциллограмма кодового сигнала  $S_4[t]$  до (а) и после (б) машинной идентификации

### Заключение

Эксплуатация систем автоматической локомотивной сигнализации на железнодорожном транспорте обозначила проблему сохранения устойчивости дешифрации кодовых сигналов при существенном дестабилизирующем влиянии помех различной природы в рельсовых линиях. Проведенный анализ существующих методов идентификации кодовых сигналов автоматической локомотивной сигнализации показал, что некоторые из них направлены на совершенствование традиционного способа идентификации этих сигналов, а другие предлагают кардинальные изменения способа идентификации кодовых сигналов, заключающиеся в переходе от релейной дешифрации на локомотиве к более совершенным и

быстродействующим алгоритмам, устойчивым к искажениям кодовых сигналов, передаваемых по рельсам.

С учетом современного уровня развития систем автоматизации и вычислительной техники на железнодорожном транспорте в статье предложен метод цифровой обработки кодовых сигналов локомотивной сигнализации с применением аппарата машинного обучения.

В качестве алгоритма для обработки и идентификации принятого искаженного кодового сигнала использована трехслойная нейронная сеть прямого распространения с полными связями.

Применение быстрого преобразования Фурье на этапе предварительной обработки кодового сигнала и идентификация по амплитудному спектру огибающей снимают требование син-

хронизации каждого цикла кодового сигнала. Это обеспечивается за счет инвариантности амплитудного спектра к сдвигам кодового сигнала во временной области.

Отказ от синхронизации существенно упрощает построение идентифицирующего алгоритма: позволяет реализовать его в виде конвейера, в котором каждая поступающая осциллограмма кодового сигнала обрабатывается единообразно, независимо от сдвига относительно начала кодового цикла.

Выявлена чувствительность предложенной системы машинной идентификации к помехам в длинном интервале кодового цикла. Это обусловлено нарушением разделимости кодовых сигналов, определяемых по амплитудному спектру огибающей, при действии таких помех. Для обеспечения функциональной безопасности системы машинной идентификации решение о виде кодового сигнала следует принимать по мажоритарному принципу при обработке нечетного числа осциллограмм кодового сигнала, полученных последовательно. ✂

### Библиографический список

1. Розенберг Е. Н. Интервальное регулирование движения поездов / Е. Н. Розенберг, А. А. Абрамов, В. В. Батраев // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 9. — С. 19–24.
2. Гумаров А. Г. Способы модуляции и их применение на железнодорожном транспорте. / А. Г. Гумаров // Теория и практика современной науки — 2020. — № 5. — С. 143–154.
3. Пультяков А. В. Системный анализ устойчивости работы систем автоматической локомотивной сигнализации / А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — № 1. — С. 79–89.
4. Юсупов Р. Р. О корреляционной дешифрации кодовых комбинаций сигнала АЛСН / Р. Р. Юсупов // Наука и образование транспорта. — 2020. — № 1. — С. 143–154.
5. Пат. 165420 (РФ). Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев, 2016.

6. Пат. 2314223 (РФ). Способ дешифрирования сигналов автоматической локомотивной сигнализации и устройство для его реализации / М. Д. Рабинович, Б. Д. Никифоров, А. Н. Соколов, А. Э. Правдолюбов, Ю. А. Кравцов, 2005.
7. Пат. 2618616 (РФ). Устройство подавления импульсных помех на входе локомотивного приемника АЛС / И. А. Аргунов, Н. Ю. Вихрова, Е. В. Горенбейн, Е. Н. Розенберг, 2017.
8. Пат. 2517631 (РФ). Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации / В. С. Лочехин, 2014.
9. Присухина И. В., Борисенко Д. В. Машинная классификация сигналов числового кода в электротехнических системах локомотивной сигнализации / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко // Омский научный вестник. — 2019. — № 4(166). — С. 39–47.
10. Демьянов В. В. Методика определения порогового значения отношения сигнал/помеха для систем автоматической локомотивной сигнализации / В. В. Демьянов, А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. А. Алексеев // Автоматика на транспорте. — 2020. — № 2. — С. 149–164.
11. Присухина И. В. Имитационная модель электрического кодового сигнала в российских системах интервального регулирования движения поездов на основе рельсовых цепей / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко, С. А. Лунев // Труды СПИИРАН. — 2019. — Т. 18. — № 5. — С. 1212–1238.
12. Smith S. W. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists / S. W. Smith. — London, England: Newnes, 2013. — 650 p.
13. Oppenheim A. Discrete-time signal processing / A. Oppenheim, R. Schaffer. — London, England: Pearson, 2009. — 1144 p.
14. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2016. — 775 p.
15. Hastie T. The elements of statistical learning / T. Hastie. — NY: Springer, 2009. — 745 p.
16. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. — New York, USA: Springer, 2011. — 738 p.
17. A library for computing the discrete Fourier transform. Available at: <http://www.fftw.org> (accessed: 06.09.2021) (In English).
18. Mitchel T. M. Machine learning / T. M. Mitchel. — NY: McGraw-Hill Science, 1997. — 432 p.
19. Тюрин С. В. Резервированный мажоритарный элемент / С. В. Тюрин // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления — 2018. — № 27. — С. 139–152.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 36–47  
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-36-47

#### Identification of Automatic Locomotive Signaling Code Signals Based on Machine Learning

#### Information about authors

Lunev S. A., PhD in Technical Sciences, Assistant Professor<sup>1</sup>.  
E-mail: slunev@mail.ru

Borisenko D. V., PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Programmer<sup>2</sup>.  
E-mail: borisenkodv@yandex.ru

Prisukhina I. V., PhD in Technical Sciences, Senior Teacher<sup>3</sup>.  
E-mail: prisukhinaiv@mail.ru

Klyuchnikov M. V., Assistant<sup>3</sup>. E-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru

<sup>1</sup> Russian University of Transport (MIIT),  
Department of Management Systems of Transport Infrastructure, Moscow

<sup>2</sup> "Tamtek" Ltd, Omsk

<sup>3</sup> Omsk State Transport University,  
Department of Automation and Telemechanics, Omsk

**Abstract:** Stability of railway automation systems, utilizing automatic locomotive signaling as a mean for interval regulation of train traffic, can be risen by the means of application of machinal training algorithms. Known algorithm for code signal identification of locomotive signaling has a row of drawbacks which are conditioned by the cyclic character of being identified signals and the necessity of cyclic synchronization before the identification procedure. This complicates technical realization essentially as well as does requirements to computational resources of known algorithm. This article offers improved algorithm for identification of code signals transferred via rail chains in the process of train traffic which doesn't demand cycle synchronization. For to solve cycle synchronization problem it's been offered to accomplish code signal identification by Fourier amplitude spectrum of its preselected envelope. Such settlement has become possible on account of invariance of Fourier amplitude spectrum of code signal envelope relatively code signal shift in the time domain on random number of digital readings. As a machinal training method, the article considers artificial neural network with simplified, compared with the previous analogues, architecture. While identification, three-layer neural network with full connections between layers is engaged. Also, the work investigates limitations of suggested method of machinal identification which are conditioned by refuse from phase spectrum of envelope of being processed code signal. It's been demonstrated in the article the act of improved method of machinal identification on real signals fixed in being exploited rail lines. The obtained results testify the adequacy of the suggested methodology for the identification of signals of automatic locomotive signaling of systems for train traffic interval regulation.

**Key words:** machinal training; Fourie transform; automatic locomotive signaling; correlation analysis; impulse interferences; rail line; rail chain.

#### References

1. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. Interval'noe regulirovanie dvizheniya poezdov [Interval regulation of train traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Zheleznodorozhny transport]. 2017, I. 9, pp. 19–24.
2. Gumarov A. G. Sposoby modulyatsii i ikh primeneniye na zheleznodorozhnom transporte [Methods of modulation and their application in railway transport]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science]. 2020, I. 5, pp. 143–154.
3. Pul'tyakov A. V., Skorobogatov M. E. Sistemnyy analiz ustoychivosti raboty sistem avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii [System analysis of the stability of the operation of automatic locomotive signaling systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2018, I. 1, pp. 79–89.
4. Yusupov R. R. O korrelyatsionnoy deshifratsii kodovykh kombinatsiy signala ALSN [About correlation decoding of code combinations of signal ALSN]. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education for transport]. 2020, I. 1, pp. 143–154.
5. Pat. 165420 (RF). *Priemnoye ustroystvo avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii* [Pat. 165420 (RF). Receiving device for automatic locomotive signaling]. 2016.
6. Pat. 2314223 (RF). *Sposob deshifirovaniya signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Pat. 2314223 (RF). A method for decoding signals of automatic locomotive signaling and a device for its implementation]. 2005.
7. Pat. 2618616 (RF). *Ustroystvo podavleniya impul'snykh pomekh na vkhode lokomotivno-go priemnika* [Pat. 2618616 (RF). The device for suppressing impulse noise at the input of the locomotive receiver ALS]. 2017.
8. Pat. 2517631 (RF). *Priemnoye ustroystvo avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii* [Pat. 2517631 (RF). Receiving device for automatic locomotive signaling]. 2014.
9. Priskhina I. V., Borisenko D. V. Mashinnaya klassifikatsiya signalov chislovogo koda v elektrotekhnicheskikh sistemakh lokomotivnoy signalizatsii [Machine classification of numerical code signals in electrical systems of locomotive signaling]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2019, I. 4 (166), pp. 39–47.
10. Dem'yanov V. V., Pul'tyakov A. V., Skorobogatov M. E., Alekseenko V. A. Metodika opredeleniya porogovogo znacheniya otnosheniya signal/pomekha dlya sistem avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii [Method for determining the threshold value of the signal-to-interference ratio for automatic locomotive signaling systems]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2020, I. 2, pp. 149–164.
11. Priskhina I. V., Borisenko D. V., Lunev S. A. Imitatsionnaya model' elektricheskogo kodovogo signala v rossiyskikh sistemakh interval'nogo regulirovaniya dvizheniya po-ezdov na osnove rel'sovykh tsepey [Simulation model of an electric code signal in Russian systems of interval regulation of train traffic based on rail circuits]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS]. 2019, V. 18, I. 5, pp. 1212–1238.
12. Smith S. W. *Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists*. London, England: Newnes, 2013. 650 p.
13. Oppenheim A., Schaffer R. *Discrete-time signal processing*. London, England: Pearson, 2009. 1144 p.
14. A library for computing the discrete Fourier transform. Available at: <http://www.fftw.org> (accessed: 06.09.202021) (In English)
15. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2016. 775 p.
16. Hastie T. *The elements of statistical learning*. NY: Springer, 2009. 745 p.
17. Bishop C. M. *Pattern recognition and machine learning*. New York, USA: Springer, 2011. 738 p.
18. Mitchel T. M. *Machine learning*. NY: McGraw-Hill Science, 1997. 432 p.
19. Tyurin S. V. Rezervirovannyi mazhoritarnyy element [Reserved majority element]. *Vestnik Permskogo natsio-nal'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research University. Electrical engineering, information technology, control systems]. 2018, I. 27, pp. 139–152.