

И.В. ПРИСУХИНА, Д.В. БОРИСЕНКО, С.А. ЛУНЁВ
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОДОВОГО СИГНАЛА В РОССИЙСКИХ СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Присухина И.В., Борисенко Д.В., Лунёв С.А. Имитационная модель электрического кодового сигнала в российских системах интервального регулирования движения поездов на основе рельсовых цепей.

Аннотация. Системы интервального регулирования движения поездов на российских железных дорогах используют электрическую рельсовую цепь в качестве канала передачи информации о показании светофора на локомотив. Кодовые сигналы в таком канале подвержены влиянию помех, что часто приводит к нарушению движения поездов.

Существенного повышения помехоустойчивости можно достичь, если формализовать прием и дешифрацию сигналов электрической цепи в виде задачи классификации изображений. Для построения классификатора кодовых сигналов электрической рельсовой цепи с применением методов машинного обучения требуется обучающая выборка. Предлагается имитационная модель электрического кодового сигнала, позволяющая синтезировать такую выборку.

Имитационная модель структурирована в соответствии с основными этапами формирования и передачи кодового сигнала в рельсовой цепи: генератор кодового сигнала, рельсовая линия, приемное оборудование локомотива.

По результатам анализа осциллограмм и схем генераторов предложен алгоритм генерации кодового сигнала в начале рельсовой цепи. На этом этапе учтены временные характеристики кодовых сигналов, определяемые спецификацией, а также их случайные отклонения, обусловленные различными факторами.

Анализ схем замещения рельсовой линии, по которой передается кодовый сигнал, показал, что она представляет собой фильтр нижних частот. Для имитации влияния рельсовой линии на кодовый сигнал предложено использовать алгоритм цифрового фильтра Баттерворта. Параметры фильтра определены на основе электрических параметров рельсовой линии. Дополнительно на этом этапе учтено влияние случайных внешних помех.

Для имитации приемного оборудования локомотива, которое содержит полосовой фильтр, также предложено использовать алгоритм цифрового фильтра Баттерворта.

Таким образом, предложенная имитационная модель представляет собой совокупность последовательных алгоритмов. Изменяемые в заданных диапазонах параметры модели позволяют синтезировать осциллограммы кодовых сигналов с учетом различных условий работы компонентов электрической рельсовой цепи.

Ключевые слова: кодовый сигнал, автоматическая локомотивная сигнализация, машинное обучение, цифровой фильтр Баттерворта, рельсовая линия, нормальное распределение случайной величины, Octave.

1. Введение. Наиболее распространенными на сети железных дорог системами обеспечения безопасности движения поездов на переездах являются автоматическая блокировка числового кода (АБЧК) в совокупности с автоматической локомотивной сигнализацией непрерывного действия (АЛСН). Базовый принцип, лежащий в основе этих

систем, состоит в передаче информации о показании проходного светофора по рельсам посредством электрического сигнала, амплитудно-модулированного числовым кодом [1].

Накопленный опыт эксплуатации АБЧК и АЛСН показал, что серьезной проблемой является возникновение регулярных сбоев при дешифрации на локомотиве принятых из рельсов сигналов и, как следствие, нарушение бесперебойного движения поездов по перегону [2, 3]. Причины данных сбоев различны: влияние тягового тока и его гармоник; изменения в магнитном поле тягового тока; неравномерная намагниченность рельсов; пересечение рельсового пути линиями электропередач; искажения на этапах генерации сигналов (в приборах) и передачи по рельсовому тракту (в линии); электромагнитное влияние контактной подвески; разность высот локомотивных катушек над уровнем головки рельса и другие [2, 4-6].

Несмотря на широкое применение по всей сети железных дорог (порядка 67 тыс. километров), АБЧК и АЛСН морально устарели и уступают по ряду эксплуатационных показателей более совершенным своим модификациям (например, АБТЦ в сочетании с АЛС-ЕН и др. [2, 4]).

Однако, ввиду того что модернизация действующих участков сети дорог является целесообразной и экономически оправданной лишь при соответствующих объемах движения, скоростях и массах поездов, исследования, направленные на повышение устойчивости работы и качества функционирования АЛСН, являются по-прежнему актуальными [2].

Снизить число сбоев при дешифрации принятых на локомотиве сигналов в системе АЛСН, с сохранением принципа их формирования и рельсовой цепи как канала передачи можно за счет построения более совершенного дешифратора.

Как показано в [7-11], повышение качества дешифрации сигналов на локомотиве возможно за счет интеграции новых компонентов в состав его бортового оборудования, замены некоторых из них на более совершенные аналоги, использования методик цифровой обработки сигналов (например, корреляции сигналов).

Однако, с учетом возможностей и доступности современной вычислительной техники перспективным представляется подход, основанный на алгоритмах машинного обучения, в частности классификации изображений [12-16]. Преимуществом данного подхода на фоне, например, использования корреляции сигналов, является существенное уменьшение объема вычислительных операций при обработке очередного сигнала [17].

Так, например, больше нет необходимости в реализации процедур итеративного сравнения анализируемого сигнала с образцовыми, вычислении значений корреляционных функций, а также поиске максимального среди последних. В алгоритмах классификации изображений указанные мероприятия заменяются однократным расчетом используемой модели (например, искусственной нейронной сетью), что позволяет напрямую сформировать результат классификации на выходе системы без промежуточных вычислений.

Таким образом, предлагаемый подход обеспечивает увеличение скорости обработки сигналов на локомотиве, что, в свою очередь, способствует повышению безопасности движения поездов.

Алгоритм классификации сигналов, подлежащих распознаванию на локомотиве, строится на основе минимизации функции ошибки выбранной универсальной модели [18]. Минимизация функции ошибки подразумевает наличие некоторой совокупности сигналов, для которых заранее известен тип передаваемого ими числового кода. Данный процесс называется обучением, сигналы, для которых заранее известен тип числового кода, — обучающими примерами, а их совокупность — обучающей выборкой. Наличие обучающей выборки является необходимым условием построения алгоритма классификации.

Получение указанной выборки осциллограмм электрических сигналов, передающих числовой код, возможно двумя способами: с помощью регистрации осциллограмм на борту локомотива или их синтеза по имитационной модели электрических сигналов.

Императивным условием при обеспечении железнодорожных перевозок является безопасность следования поездов по участкам сети дорог. Строгое соблюдение данного требования в деятельности инфраструктурного и локомотивного комплексов ОАО «РЖД» исключает возможность проведения продолжительной регистрации таких осциллограмм, сопровождающейся подключением стороннего оборудования на борту локомотива. Таким образом, данный подход является бесперспективным для формирования обучающей выборки, так как лимитирует, во-первых, аудиторию ученых, имеющих доступ к зарегистрированным данным, а во-вторых, объем полученной выборки.

Альтернативным вариантом получения обучающей выборки может быть ее синтез по имитационной модели сигнала, передающего числовой код. Существенным преимуществом данного подхода по сравнению с предыдущим является его доступность для широкого академического сообщества, занятого вопросами машинной классификации электрических сигналов. Немаловажным достоинством выступает и легкостраи-

ваемый размер обучающей выборки, который регулируется при помощи выбора диапазонов изменения параметров имитационной модели.

Целью настоящей статьи выбрано рассмотрение вопросов, связанных с построением имитационной модели электрических сигналов, передающих числовой код.

Отметим, что вид обучающей выборки не зависит от выбранного алгоритма классификации (искусственная нейронная сеть, машина опорных векторов, LSTM-классификация и др. [13]), то есть он универсален. Это обстоятельство делает возможным разработку различных типов классификаторов на одной и той же обучающей выборке с последующим анализом их эффективности по критерию качества дешифрации сигналов на борту локомотива.

2. Структурная схема тракта передачи кодового сигнала. Электрические сигналы, передаваемые по рельсам на локомотив, в системе АЛСН для трехзначной системы АБЧК бывают трех видов: З (зеленый), Ж (желтый) и КЖ (красно-желтый). Данные сигналы предназначены для информирования машиниста о показании светофора, к которому приближается локомотив. При этом сигнал З соответствует зеленому огню на светофоре, Ж — желтому, а КЖ — красному. Эти сигналы на железнодорожном транспорте получили название «кодовые».

Тракт передачи кодовых сигналов З, Ж и КЖ на локомотив показан на рисунке 1 в виде укрупненных блоков (более детально тракт рассмотрен в [2]).

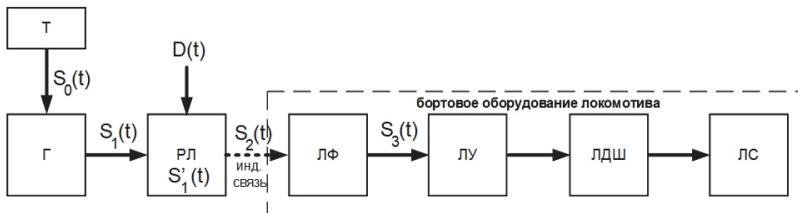


Рис. 1. Структурная схема тракта передачи кодовых сигналов З, Ж и КЖ на локомотив (Т – трансмиттер, Г – генератор, РЛ – рельсовая линия, ЛФ – локомотивный фильтр, ЛУ – локомотивный усилитель, ЛДШ – локомотивный дешифратор, ЛС – локомотивный светофор)

Кодовый сигнал $S_1(t)$ формируется генератором на основе сигнала числового кода $S_0(t)$, который поступает из трансмиттера (Т). При распространении по рельсовой линии (РЛ) с учетом ее влияния сигнал $S_1(t)$ преобразуется в сигнал $S'_1(t)$. В рельсовой линии на сигнал $S'_1(t)$ воздействует сигнал помехи $D(t)$, и на локомотив в месте нахождения его первой колесной пары посредством индуктивного взаимодействия

передается сигнал $S_2(t)$. Бортовое оборудование локомотива содержит локомотивный фильтр (ЛФ), локомотивный усилитель (ЛУ), локомотивный дешифратор (ЛДШ) и локомотивный светофор (ЛС). Сигнал $S_2(t)$ за счет влияния локомотивного фильтра преобразуется в $S_3(t)$.

Осциллограмма реального сигнала 3 $S_3^P(t)$, зафиксированного на выходе локомотивного фильтра на борту локомотива, показана на рисунке 2.

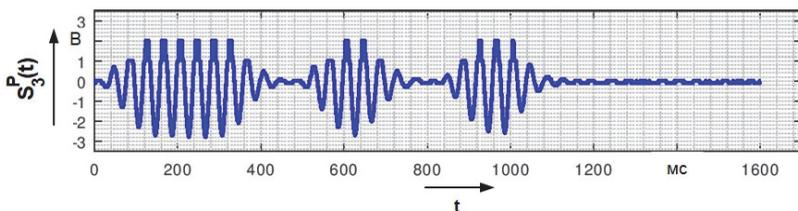


Рис. 2. Осциллограмма реального сигнала 3 на выходе локомотивного фильтра

По внешнему виду сигнала на рисунке 2 можно заключить, что он является амплитудно-модулированным синусоидальным. Также отчетливо видно, что сигнал имеет искажения формы.

В структуре имитационной модели кодовых сигналов предлагается выделить и отдельно рассмотреть три части:

- модулирующий сигнал;
- несущий сигнал;
- искажения формы кодового сигнала.

Средой моделирования авторами выбрана вычислительная платформа Octave 4.4.1.

3. Моделирование модулирующего сигнала. В качестве правила для амплитудной модуляции передаваемых по рельсам сигналов используется числовой код [5]. Сигналы числового кода (модулирующие сигналы) представляют собой циклические последовательности прямоугольных импульсов и интервалов. Число импульсов и их длительность определяются содержанием передаваемого информационного сообщения о показании светофора. Таким образом, для каждого показания светофора предусмотрена конкретная последовательность прямоугольных импульсов и интервалов [4].

Время цикла сигнала числового кода определяется типом кодового путевого трансмиттера (КПТШ), формирующего последовательность импульсов и интервалов заданной длительности [5]. В качестве примера выбраны КПТШ типов «5», «515», «8», «815», цикл кода которых составляет 1,6 с. Спецификация (номинальные длительности) генерируемых ими сигналов числового кода приведена в таблице 1.

Таблица 1. Номинальные длительности сигналов числового года, генерируемых КПТШ-5, КПТШ-515, КПТШ-8, КПТШ-815 [18]

Вид кодового сигнала	Длительность, мс					
	1 импульс	1 интервал	2 импульс	2 интервал	3 импульс	3 интервал
З	350	120	220	120	220	570
Ж	380	120	380	720	–	–
КЖ	230	570	230	570	–	–

Графики сигналов числового кода $S_0^3(t)$, $S_0^Ж(t)$, $S_0^{КЖ}(t)$, полученные в результате моделирования, согласно их спецификации (таблица 1) в среде Octave, представлены на рисунке 3. Частота дискретизации F_d выбрана равной 1000 Гц, а амплитуда — 1 В.

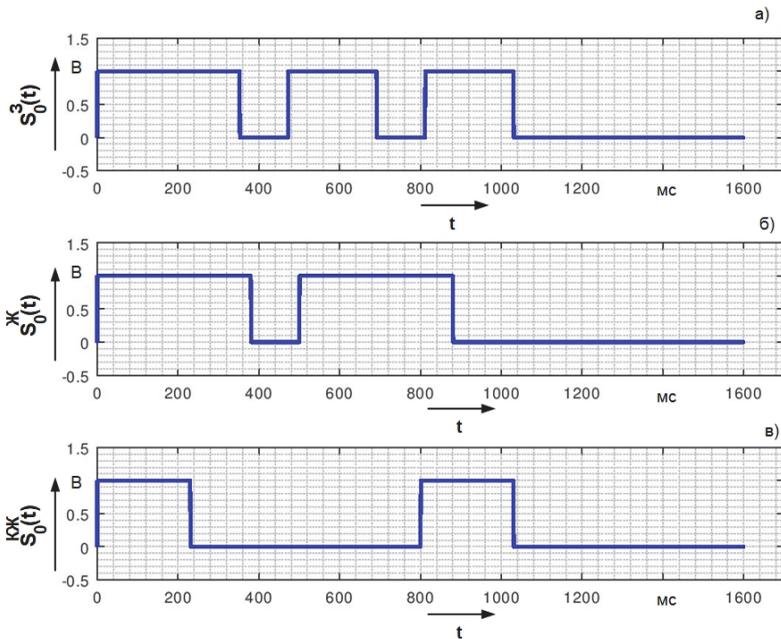


Рис. 3. Графики сигналов числового кода (а – код З, б – код Ж, в – код КЖ)

В реальных условиях временные параметры импульсов и интервалов сигналов числового кода имеют отклонения от номинальных значений. Это обусловлено воздействием ряда факторов [2, 4]. К наиболее существенным из них можно отнести следующие: разброс параметров и износ вращающихся деталей КПТШ, колебания напряжения его питания, инерционность работы и разброс параметров

транзиттерного реле, влияние аппаратуры рельсовой цепи, переходные процессы в локомотивном приёмнике.

Колебания напряжения питания КППШ оказывают негативное влияние на работу расположенного внутри асинхронного электродвигателя, что может стать причиной отклонения частоты его вращения от номинальной. Помимо этого, в КППШ с течением временем происходит постепенная деформация расположенных на валу кулачковых шайб асинхронного электродвигателя, которая протекает в зоне их взаимодействия с подвижным контактом.

Транзиттерное реле, отвечающее за коммутацию кодового сигнала в рельсовую цепь, в зависимости от условий эксплуатации имеет различную скорость переброса фронтового и тылового контактов, что приводит к инерционности его работы.

Поскольку на сети железных дорог применяются рельсовые цепи различных видов, состав аппаратуры их питающих и релейных концов не является однотипным. Как следствие, если аппаратура рельсовой цепи содержит устройства, которые имеют резонансную частоту, равную частоте несущего сигнала (например, защитный блок-фильтр, цепи дроссель-трансформаторов и др.), то нарастание тока в рельсах происходит медленнее, чем это предусмотрено номинальными характеристиками кодовых сигналов.

Нестабильность сопротивления балласта рельсовой цепи вследствие зависимости от погодных условий изменяет скорость распространения кодового сигнала по рельсам.

Негативное влияние при приеме кодового сигнала на борту локомотива оказывают значительные изменения его амплитуды под приемными катушками в пределах одной рельсовой цепи. При этом отношение крайних амплитуд (максимальной и минимальной) кодового сигнала может достигать значений 10 – 15. При несвоевременной регулировке чувствительности бортового приемника локомотива, указанные изменения амплитуды приводят к его некорректной работе и сбоям при дешифрации кодового сигнала.

Также, очевидно, что изменениям длительности импульсов соответствуют противоположные по длительности изменения интервалов.

Для имитации отклонений параметров сигналов числового кода от номинальных предлагается рассматривать положение границ импульсов и интервалов внутри их циклов как случайные величины, имеющие нормальное распределение. Так для сигнала З таких границ в цикле будет шесть, для Ж и КЖ — четыре.

Случайное положение границ импульсов и интервалов внутри цикла сигнала задается функциями f_i согласно (1) для кода З и (2) — для Ж и КЖ:

$$\{f_i \sim N(\mu_i, \sigma^2) | i \in [1, 6] \wedge i \in \mathbb{N}\}; \quad (1)$$

$$\{f_i \sim N(\mu_i, \sigma^2) | i \in [1, 4] \wedge i \in \mathbb{N}\}, \quad (2)$$

где i — номер границы внутри сигнала; $N(\mu_i, \sigma^2)$ — обозначение нормального распределения случайной величины; μ_i — математическое ожидание для i -й границы; σ^2 — дисперсия.

Для каждой функции f_i в качестве μ_i используются соответствующие номинальные значения из таблицы 2, отражающие положение границ импульсов и интервалов внутри цикла сигнала числового кода. Дисперсия σ^2 является изменяемым параметром имитационной модели.

Таблица 2. Номинальное положение границ импульсов и интервалов внутри циклов сигналов числового кода

μ_i	Положение границы внутри сигнала, мс		
	З	Ж	КЖ
1	350	380	230
2	470	500	800
3	690	880	1030
4	810	1600	1600
5	1030	—	—
6	1600	—	—

Данные рассуждения могут быть проиллюстрированы рисунком 4 на примере сигнала числового кода 3 ($S_0^3(t)$) единичной амплитуды. Функции $f_1 - f_6$ получены согласно (1).

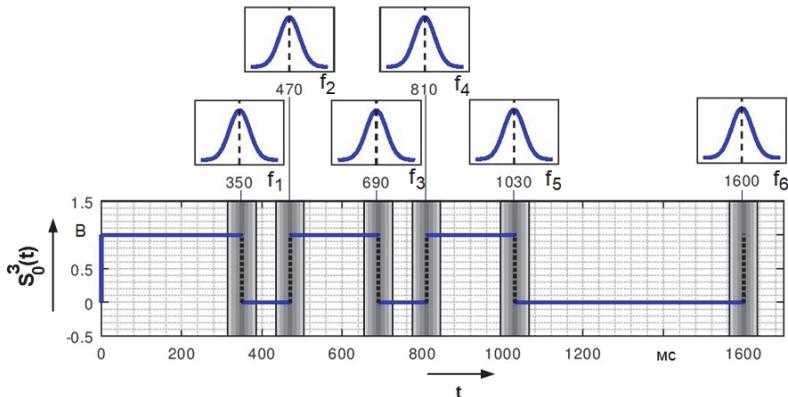


Рис. 4. Случайное положение границ импульсов и интервалов внутри сигнала числового кода 3

Графическая схема алгоритма (ГСА) генерации сигнала числового кода 3 показана на рисунке 5. Алгоритмы генерации сигналов числовых кодов Ж и КЖ описываются аналогичными блок-схемами.

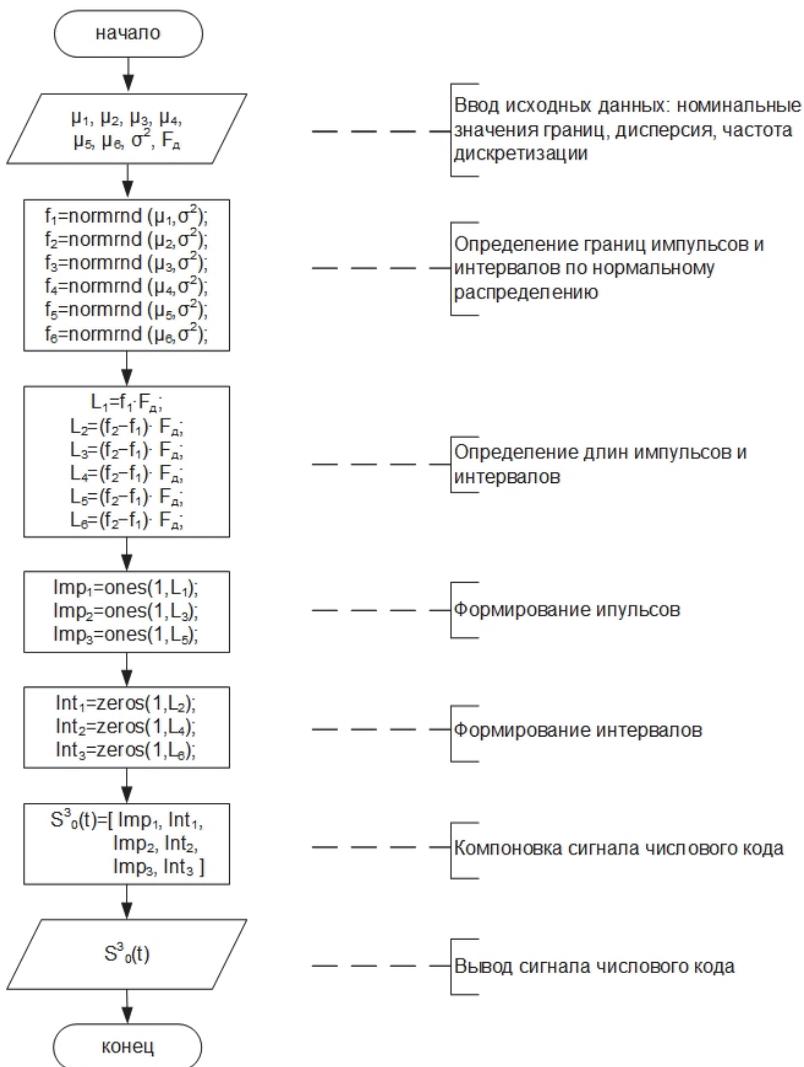


Рис. 5. ГСА генерации сигнала числового кода 3

4. Моделирование несущего сигнала. В качестве несущих в системе АЛСН используются синусоидальные сигналы частотой 25

или 50 Гц. Эти сигналы формируются специальными трансформаторами или статическими преобразователями частоты [19]. Фактические параметры несущих сигналов на выходе этих устройств зависят от ряда факторов, характерных для любой электротехнической системы: колебания питающего напряжения, его несинусоидальность, наличие в спектре напряжения высших гармонических составляющих, девиация частоты и другие. Однако данные отклонения в большинстве случаев являются несущественными на фоне помех, возникающих при передаче кодовых сигналов на локомотив. По этой причине данные отклонения предлагается отнести к допущениям имитационной модели, а несущий синусоидальный сигнал принять идеальным.

На рисунке 6 в качестве примера изображен амплитудно-модулированный числовым кодом 3 синусоидальный сигнал $S_1^3(t)$ единичной амплитуды с частотой несущего сигнала 25 Гц, полученный по формуле (3). Для унификации формул (здесь и далее) верхние индексы их принадлежности к конкретному числовому коду опущены.

$$S_1(t) = S_0(t) \cdot \sin(2\pi F_N t), \quad (3)$$

где F_N — частота несущего сигнала.

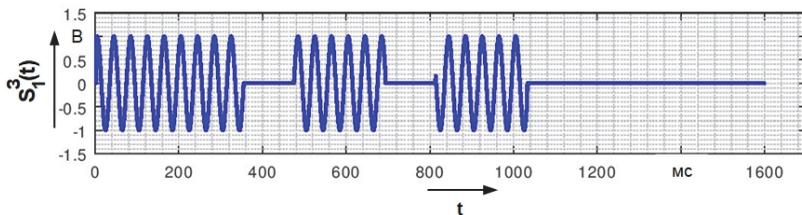


Рис. 6. График кодового сигнала 3

5. Моделирование искажений формы кодового сигнала.

Для моделирования искажений формы кодового сигнала примем, что они обусловлены: свойствами рельсовой линии, случайными внешними помехами, а также свойствами принимающей аппаратуры локомотива.

Согласно [20, 21] участок рельсовой линии заданной длины в электрических расчетах может быть представлен в виде четырехполюсника, схема замещения которого показана на рисунке 7а.

При этом экспериментальные исследования позволили установить, что емкостной составляющей $C_{из}$ при расчетах в случаях низко-

частотного несущего сигнала в рельсах (до 100 Гц) [20] можно пренебречь. Сопротивление рельсов R_p вносит пропорциональное своей величине затухание сигнала [22], что дает возможность им пренебречь при моделировании. Таким образом, схема на рисунке 7а может быть преобразована в схему, показанную на рисунке 7б. Схемы на рисунке 7 представляют собой фильтры нижних частот [23].

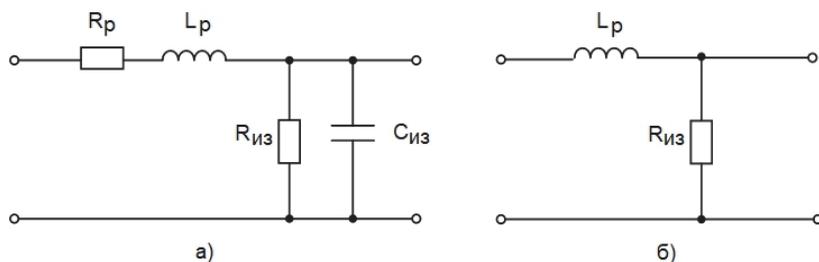


Рис. 7. Схема замещения четырехполюсника рельсовой линии: а – до преобразования, б – после преобразования (R_p – сопротивление рельсов (Ом/км), L_p – индуктивность рельсов (Гн/км), $R_{из}$ – сопротивление изоляции рельсовой линии (Ом·км), $C_{из}$ – емкость между рельсами (Ф/км))

Таким образом, в качестве модели рельсовой линии предлагается выбрать электрический фильтр нижних частот, частоту среза F_c которого можно определить по стандартной формуле (4) [24]:

$$F_c = \frac{R_{из}}{2\pi L_p}. \quad (4)$$

Сопротивление изоляции рельсовой линии $R_{из}$ и индуктивность рельсов L_p являются изменяемыми параметрами имитационной модели. При моделировании в качестве значений параметров $R_{из}$ и L_p приняты такие, согласно [21], при которых влияние рельсовой линии на кодовый сигнал максимально. Они составили 1 Ом·км и 2,3 мГн/км соответственно. Таким образом, частота среза F_c составила 68,9 Гц.

Для моделирования фильтра нижних частот в среде Octave использован цифровой фильтр Баттерворта нижних частот [23]. Выбор данного типа фильтра обусловлен «гладкостью» его амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания [23].

Передаточная функция цифрового фильтра описывается отношением (5) [25]:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}, \quad (5)$$

где M, N — количество нулей и полюсов цифрового фильтра соответственно; b_i, a_k — коэффициенты полиномов в числителе и знаменателе передаточной функции соответственно; z — оператор z -преобразования.

Коэффициенты передаточной функции цифрового фильтра Баттерворта нижних частот могут быть определены при помощи встроенной функции «butter» в среде Octave (6):

$$[b_{\text{пл}}, a_{\text{пл}}] = \text{butter}(n_{\text{пл}}, F_c), \quad (6)$$

где $b_{\text{пл}}, a_{\text{пл}}$ — коэффициенты передаточной функции цифрового фильтра Баттерворта нижних частот; $n_{\text{пл}}$ — порядок фильтра нижних частот, являющийся изменяемым параметром имитационной модели.

В результате расчета коэффициентов $b_{\text{пл}}$ и $a_{\text{пл}}$ согласно (6) передаточные функции выбранного цифрового фильтра имеют вид (7)-(10):

$$H(z)|_{n_{\text{пл}}=1} = \frac{0,18 + 0,18z^{-1}}{1 - 0,64z^{-1}}, \quad (7)$$

$$H(z)|_{n_{\text{пл}}=2} = \frac{0,04 + 0,07z^{-1} + 0,04z^{-2}}{1 - 1,40z^{-1} + 0,54z^{-2}}, \quad (8)$$

$$H(z)|_{n_{\text{пл}}=3} = \frac{10^{-1} \cdot (0,07 + 0,21z^{-1} + 0,21z^{-2} + 0,07z^{-3})}{1 - 2,14z^{-1} + 1,61z^{-2} - 0,42z^{-3}} \quad (9)$$

$$H(z)|_{n_{\text{пл}}=4} = \frac{10^{-2} \cdot (0,13 + 0,53z^{-1} + 0,79z^{-2} + 0,53z^{-3} + 0,13z^{-4})}{1 - 2,87z^{-1} + 3,21z^{-2} - 1,63z^{-3} + 0,31z^{-4}}. \quad (10)$$

Влияние рельсовой линии на кодовый сигнал может быть описано формулой (11):

$$S_1'(t) = \text{filter}(b_{\text{пл}}, a_{\text{пл}}, S_1(t)), \quad (11)$$

где «filter» — обозначение функции, моделирующей воздействие цифрового фильтра с заданными параметрами на сигнал в среде Octave.

Поскольку наибольшая вероятность возникновения внешних помех, приводящих к искажению формы кодового сигнала, наблюдается в рельсовой линии [2, 26], их моделирование предлагается реализовать в этом компоненте тракта. Воздействие помех на сигнал в рельсовой линии $S_1'(t)$ может быть записано в виде формулы (12):

$$S_2(t) = S_1'(t) + D(t). \quad (12)$$

Для моделирования данного воздействия на кодовый сигнал предлагается использовать Гауссовый «белый шум» (функция «awgn» в Octave). С учетом этого формула (12) будет иметь вид (13):

$$S_2(t) = \text{awgn}(S_1'(t), r), \quad (13)$$

где r — отношение «сигнал/шум», дБ.

Число r принято изменяемым параметром имитационной модели.

На рисунке 8 представлен график кодового сигнала $S_2^3(t)$ на выходе рельсовой линии с частотой несущего сигнала F_N , равной 25 Гц, с учетом внесенных в кодовый сигнал $S_1^3(t)$ искажений в виде «белого шума» по формуле (13). В качестве примера значение отношения «сигнал/шум» r принято равным 20 дБ.

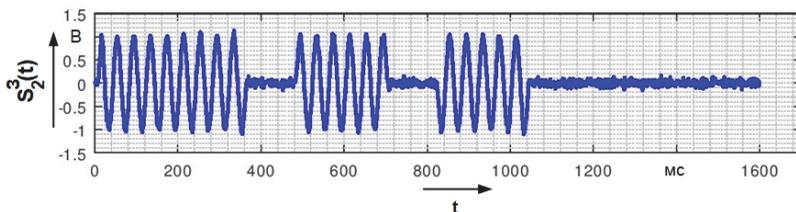


Рис. 8. График кодового сигнала 3 на выходе рельсовой линии

Локомотивный фильтр, входящий в состав бортового оборудования локомотива, предназначен для подавления внешних помех в принимаемом из рельсов кодовом сигнале [4]. Однако дополнительно он вносит и собственные искажения формы сигнала, что видно на осциллограмме реального сигнала на рисунке 2.

Согласно [5] локомотивный фильтр является полосовым. Для частот несущего сигнала 25 Гц и 50 Гц ширина полосы пропускания фильтра составляет 14 Гц. Номинальные значения граничных частот локомо-

тивного фильтра F_L (нижняя граница) и F_H (верхняя граница) при частотах несущего сигнала 25 Гц и 50 Гц представлены в таблице 3.

В качестве модели локомотивного фильтра выбран цифровой полосовой фильтр Баттерворта. При этом изменяемыми параметрами имитационной модели кодовых сигналов также будут:

- порядок полосового фильтра $n_{лф}$;
- ширина полосы пропускания полосового фильтра ΔF . Величину отклонения значений F_L и F_H от номинальных (таблица 3) предлагается варьировать опосредованно за счет изменения ширины полосы пропускания фильтра ΔF согласно формулам (14), (15).

Таблица 3. Номинальные значения граничных частот локомотивного фильтра при частотах несущего сигнала 25 Гц и 50 Гц

Частота несущего сигнала, Гц	F_L , Гц	F_H , Гц
25	18	32
50	43	57

В качестве модели локомотивного фильтра выбран цифровой полосовой фильтр Баттерворта. При этом изменяемыми параметрами имитационной модели кодовых сигналов также будут:

- порядок полосового фильтра $n_{лф}$;
- ширина полосы пропускания полосового фильтра ΔF . Величину отклонения значений F_L и F_H от номинальных (таблица 3) предлагается варьировать опосредованно за счет изменения ширины полосы пропускания фильтра ΔF согласно формулам (14), (15).

$$F_L = F_N - \Delta F/2, \quad (14)$$

$$F_H = F_N + \Delta F/2. \quad (15)$$

Таким образом, по аналогии с моделью рельсовой линии воздействие локомотивного фильтра на кодовый сигнал может быть описано формулами (16), (17):

$$[b_{лф}, a_{лф}] = \text{butter}(n_{лф}, [F_L, F_H]); \quad (16)$$

$$S_3(t) = \text{filter}(b_{лф}, a_{лф}, S_2(t)), \quad (17)$$

где $b_{лф}$, $a_{лф}$ — коэффициенты передаточной функции цифрового полосового фильтра Баттерворта.

Отметим, что в данном случае аргументами функции «butter» являются две частоты.

Передаточные функции данного цифрового фильтра, согласно (6), представлены соотношениями (18)-(21):

$$H(z)|_{n_{\text{лф}}=1} = \frac{0,04 - 0,04z^{-2}}{1 - 1,89z^{-1} + 0,92z^{-2}}; \quad (18)$$

$$H(z)|_{n_{\text{лф}}=2} = \frac{10^{-2} \cdot (0,18 + 0,36z^{-2} + 0,18z^{-4})}{1 - 3,83z^{-1} + 5,54z^{-2} - 3,60z^{-3} + 0,88z^{-4}}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} H(z)|_{n_{\text{лф}}=3} &= \\ &= \frac{10^{-3} \cdot (0,08 - 0,23z^{-2} + 0,23z^{-4} - 0,08z^{-6})}{1 - 5,75z^{-1} + 13,88z^{-2} - 17,93z^{-3} + 13,09z^{-4} - 5,12z^{-5} + 0,84z^{-6}}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} H(z)|_{n_{\text{лф}}=4} &= \\ &= \frac{10^{-4} \cdot (0,03 - 0,13z^{-2} + 0,21z^{-4} - 0,13z^{-6} + 0,03z^{-8})}{1 - 7,68z^{-1} + 25,91z^{-2} - 50,09z^{-3} + 60,74z^{-4} - \\ &\quad - 47,29z^{-5} + 23,09z^{-6} - 6,47z^{-7} + 0,79z^{-8}}. \end{aligned} \quad (21)$$

В качестве примера на рисунке 9 представлен график сигнала $S_3^3(t)$ с F_N , равной 25 Гц, который получен по формулам (16), (17) при номинальных значениях F_L и F_H .

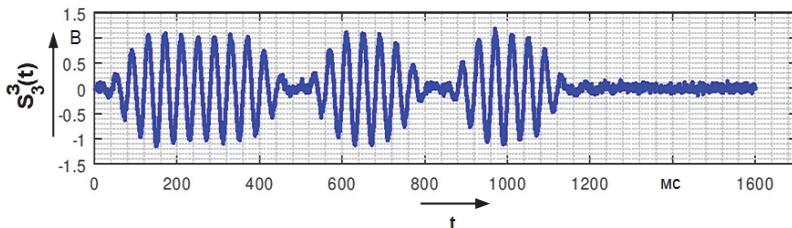


Рис. 9. График кодового сигнала 3 на выходе локомотивного фильтра

ГСА генерации сигнала $S_3^3(t)$, присутствующего на выходе локомотивного фильтра, представлена на рисунке 10. Для сигналов Ж и КЖ ГСА выглядит аналогично.

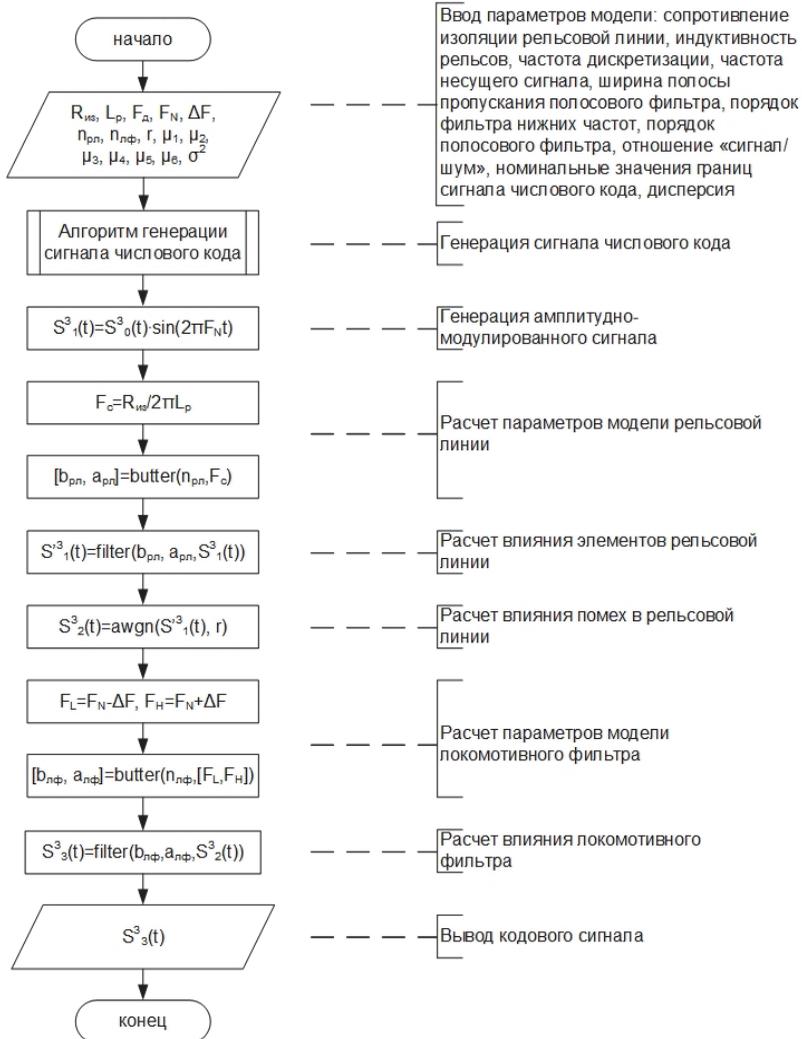


Рис. 10. ГСА генерации кодового сигнала $S^3_3(t)$, присутствующего на выходе локомотивного фильтра

6. Демонстрация имитационной модели. Таким образом, изменяемыми параметрами имитационной модели кодовых сигналов являются: сопротивление изоляции рельсовой линии; индуктивность рельсов; дисперсия для формирования случайного положения границы импульса или интервала внутри цикла сигнала числового кода;

порядок фильтра нижних частот для моделирования влияния рельсовой линии; отношение «сигнал/шум» при добавлении в кодовый сигнал «белого шума»; порядок полосового фильтра для моделирования влияния локомотивного фильтра; ширина полосы пропускания полосового фильтра, а также частота несущего сигнала. Диапазоны изменения указанных параметров имитационной модели приведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры имитационной модели и диапазоны их изменения

Параметр	Обозначение	Мин. значение	Макс. значение	Шаг
Сопrotивление изоляции рельсовой линии, Ом·км	$R_{из}$	1	—	—
Индуктивность рельсов, мГн/км	L_p	2,3	—	—
Дисперсия, ед.	σ^2	0,001	0,01	0,001
Порядок фильтра нижних частот, ед.	$n_{рл}$	1	4	1
Отношение «сигнал/шум», дБ	r	1	20	1
Порядок полосового фильтра, ед.	$n_{лф}$	1	4	1
Ширина полосы пропускания полосового фильтра, Гц	ΔF	10	14	1
Частота несущего сигнала, Гц	F_N	25	50	—

В результате генерации осциллограмм кодовых сигналов по представленной имитационной модели на всех возможных сочетаниях значений параметров (согласно таблице 4) получен массив данных размерности 96000×1600, соответствующий 96000 осциллограммам с 1600 отсчетами сигнала в каждой. Данный массив может быть использован для формирования обучающей выборки при обучении классификатора кодовых сигналов.

На рисунке 11 приведены девять демонстрационных осциллограмм кодовых сигналов, которые сгенерированы с помощью разрабо-

танной имитационной модели при различных сочетаниях значений ее параметров (таблица 5). Для наглядности на всех графиках частота несущего сигнала F_N равна 25 Гц.

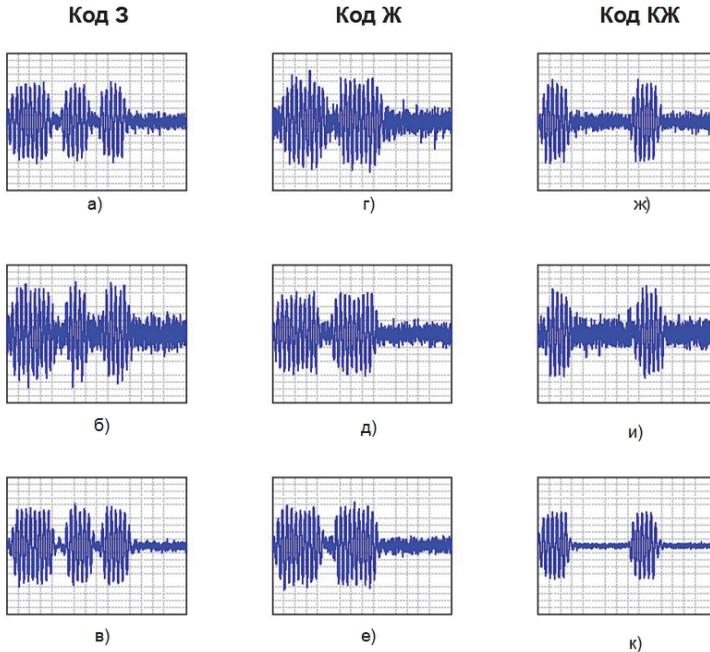


Рис. 11. Осциллограммы кодовых сигналов, сгенерированные при различных сочетаниях значений изменяемых параметров имитационной модели (а – в – код 3, г – е – код Ж, ж – к – код КЖ)

Таблица 5. Значения параметров имитационной модели для генерации демонстрационных осциллограмм кодовых сигналов

Обуч. пример	Кодовый сигнал	σ^2	$\mu_{рл}$	τ	$\mu_{лф}$	ΔF
а)	3	0,001	2	12	1	13
б)	3	0,008	1	6	2	12
в)	3	0,01	4	18	3	14
г)	Ж	0,001	3	8	4	10
д)	Ж	0,005	2	10	1	11
е)	Ж	0,01	3	13	2	13
ж)	КЖ	0,001	1	10	2	14
и)	КЖ	0,01	4	5	3	10
к)	КЖ	0,006	2	20	1	12

7. Оценка адекватности разработанной имитационной модели кодового сигнала. Для оценки адекватности разработанной имитационной модели кодового сигнала определим коэффициент корреляции реального сигнала, зафиксированного на борту локомотива (рисунок 1), $S_3^P(t)$ и смоделированного (рисунок 9) — $S_3^3(t)$ по формуле (22) согласно [17]:

$$K(S_3^P, S_3^3) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{3i}^P - \mu_1}{\sigma_1} \right) \cdot \left(\frac{S_{3i}^3 - \mu_2}{\sigma_2} \right), \quad (22)$$

где $K(S_3^P(t), S_3^3(t))$ — коэффициент корреляции сигналов $S_3^P(t)$ и $S_3^3(t)$; N — число отсчетов (наблюдений) в сигналах $S_3^P(t)$ и $S_3^3(t)$ — равно 1600; μ_1, μ_2 — средние значения для $S_3^P(t)$ и $S_3^3(t)$ соответственно; σ_1, σ_2 — средние квадратические отклонения для $S_3^P(t)$ и $S_3^3(t)$ соответственно.

Коэффициент корреляции реального и синтезированного кодовых сигналов, полученный по формуле (22), составил 0,91. Таким образом, предлагаемую имитационную модель можно считать достаточно адекватной и пригодной для генерации обучающей выборки при построении классификатора кодовых сигналов.

8. Применение имитационной модели кодового сигнала для синтеза обучающей выборки. Для построения классификатора кодовых сигналов необходимо произвести предварительную обработку синтезированных имитационной моделью осциллограмм — сформировать обучающую выборку. Данная процедура сочетает в себе последовательное выполнение двух этапов:

- амплитудная демодуляция кодового сигнала;
- нормализация амплитудно-демодулированного сигнала.

Амплитудная демодуляция кодового сигнала позволяет выделить в его составе модулирующий сигнал, содержащий числовой код, по которому, в свою очередь, удобно выполнить классификацию.

Одним из вариантов реализации амплитудной демодуляции сигнала является синхронное детектирование [27]. Суть данного метода заключается в предварительном умножении исходного сигнала (в данном случае — кодового) на некоторый опорный сигнал, после чего в результате фильтрации происходит выделение модулирующего сигнала.

С учетом ранее введенных обозначений умножение синтезированного моделью кодового сигнала, в котором несущим, согласно (3), является сигнал $\sin(2\pi F_N t)$, на опорный сигнал может быть описано при помощи (23):

$$\begin{aligned}
 S_{\text{сд}}(t) &= S_3(t) \cdot \sin(2\pi F_N t) = S_{3A}(t) \cdot \sin^2(2\pi F_N t) = \\
 &= \frac{1}{2} S_{3A}(t) - \frac{1}{2} S_{3A}(t) \cdot \sin(4\pi F_N t),
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

где $S_{\text{сд}}(t)$ — сигнал, полученный в результате умножения кодового сигнала $S_3(t)$ на несущий сигнал $\sin(2\pi F_N t)$; $S_{3A}(t)$ — изменяющаяся во времени амплитуда кодового сигнала $S_3(t)$.

Как следует из формулы (23), умножение кодового сигнала на опорный приводит к появлению суммы двух слагаемых. При этом первое слагаемое является искомым низкочастотным модулирующим сигналом. Для его выделения из $S_{\text{сд}}(t)$ в синхронном детектировании предусмотрена низкочастотная фильтрация, результатом которой является удаление из $S_{\text{сд}}(t)$ высокочастотной составляющей, то есть второго слагаемого. Низкочастотная фильтрация реализована путем применения к $S_{\text{сд}}(t)$ цифрового фильтра Баттерворта нижних частот, который уже был использован ранее. Порядок фильтра в данном случае, согласно [27], выбирается равным 5.

Результирующая амплитуда выделенного модулирующего сигнала по отношению к исходному, как следует из (23), уменьшается в два раза, что необходимо компенсировать. Такая компенсация реализована на этапе нормализации амплитудно-демодулированного сигнала.

Отметим, что выбор синусоидального сигнала с нулевой начальной фазой в качестве опорного обусловлен тем, что такой же сигнал использован в модели в качестве несущего на этапе модуляции (3). Это позволило обеспечить отсутствие фазовой ошибки, что необходимо при синхронном детектировании [27], поскольку ее наличие приводит к потере мощности сигнала.

Вторым этапом предварительной обработки кодового сигнала является нормализация выделенного на предыдущем этапе модулирующего сигнала. Под нормализацией в терминологии машинного обучения понимается представление значений обучающих примеров в унифицированном диапазоне, например от 0 до 1. Это способствует существенному повышению эффективности процедуры обучения классификатора за счет увеличения скорости обработки обучающих примеров [12].

Нормализация выделенного модулирующего сигнала в диапазоне от 0 до 1 может быть выполнена на основе (24):

$$x_i^{\text{норм}} = \frac{x_i - \min(\mathbf{x})}{\max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x})},
 \tag{24}$$

где \mathbf{x} — вектор, соответствующий кодовому сигналу после его амплитудной демодуляции (обучающий пример); i — число отсчетов в векторе \mathbf{x} (равно 1600); $x_i^{\text{норм}}$ — нормализованное значение отсчета в векторе \mathbf{x} ; $\min(\mathbf{x})$, $\max(\mathbf{x})$ — минимальное и максимальные значения отсчетов для вектора \mathbf{x} .

ГСА, поясняющая процесс предварительной обработки кодового сигнала, показана на рисунке 12.

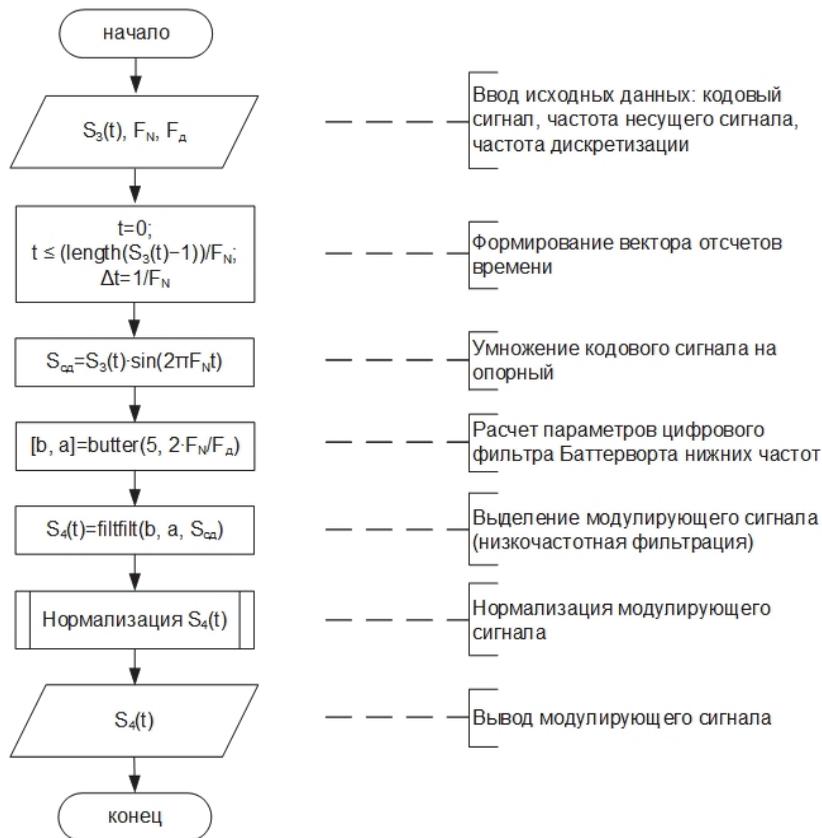


Рис. 12. ГСА предварительной обработки кодового сигнала

На рисунке 13 в качестве демонстрационных приведены обучающие примеры, полученные путем предварительной обработки осциллограмм кодовых сигналов на рисунке 11 а, д и к.

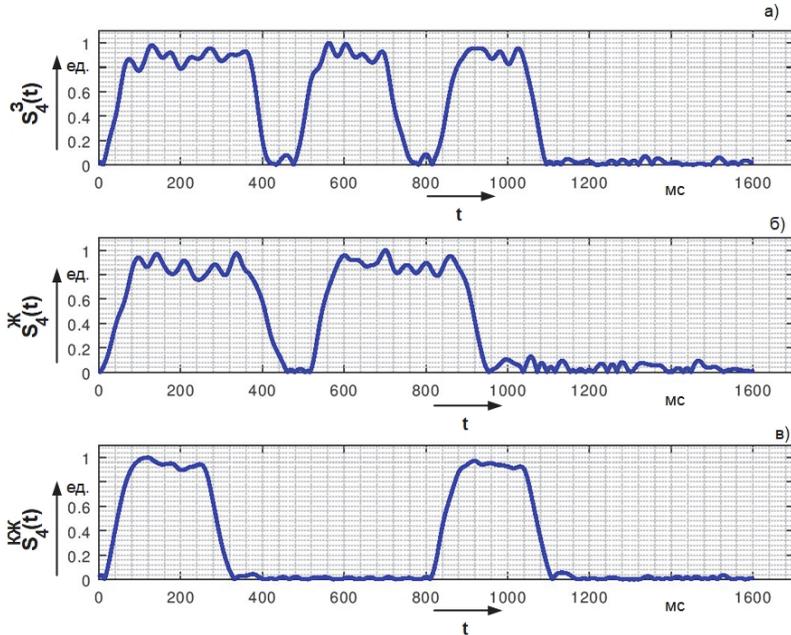


Рис. 13 Обучающие примеры, прошедшие предварительную обработку (а – для рисунка 11 а, б – для рисунка 11 д, в – для рисунка 11 к)

9. Заключение. Разработанная имитационная модель позволяет синтезировать выборку кодовых сигналов любого размера. Модель представляет собой алгоритм, описывающий основные этапы формирования кодовых сигналов. Благодаря модульному построению она может быть легко уточнена для учета процессов, свойств и явлений, которые не были приняты во внимание при разработке настоящего варианта модели.

Синтезированная выборка кодовых сигналов открывает возможность для разработки классификаторов на основе алгоритмов машинного обучения. Следует отметить, что наличие синтетической обучающей выборки не устраняет необходимости получения выборки реальных кодовых сигналов, а лишь позволяет без значительных экономических затрат проверить концепцию машинной классификации кодовых сигналов АЛСН. Очевидно, что оценить адекватность разработанной модели как источника обучающей выборки, можно путем разработки классификатора и проверки его работы на реальных кодовых сигналах.

Литература

1. *Сапожников В.В. и др.* Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики // М.: Маршрут. 2006. 247 с.
2. *Леушин В.Б., Юсупов Р.Р.* Особенности каналов автоматической локомотивной сигнализации магистральных железных дорог // Самара: СамГУПС. 2007. 115 с.
3. *Табуищikov А.К., Горенбейн Е.В., Стрякин Л.И.* Сбои АЛСН. Проблемы и пути их решения // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 8. С. 21–22.
4. *Брылеев А.М. и др.* Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка // М.: Транспорт. 1981. 320 с.
5. *Леонов А.А.* Техническое обслуживание автоматической локомотивной сигнализации // М.: Транспорт. 1982. 255 с.
6. *Шаманов В.И.* Магнитные свойства рельсовых линий и уровень помех на аппаратуру автоматики и телемеханики // Электротехника. 2015. № 9. С. 50–54.
7. *Лочехин В.С.* Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации // Патент на изобретение № 2517631 РФ. Оpubл. 27.05.2014. Бюл. № 15.
8. *Аргунов И.А. и др.* Устройство подавления импульсных помех на входе локомотивного приемника АЛС // Патент на изобретение № 2618616 РФ. Оpubл. 04.05.2017. Бюл. № 13.
9. *Леушин В.Б., Юсупов Р.Р., Блачев К.Э.* Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации // Патент на полезную модель № 165420 РФ. Оpubл. 20.10.2016. Бюл. № 29.
10. *Засов В.А., Железнов Д.В., Митрофанов А.Н., Белоногов А.С.* Адаптивное подавление помех в приемных устройствах автоматической локомотивной сигнализации // Электротехника. 2017. № 3. С. 18–22.
11. *Розенберг Е.Н.* Цифровая железная дорога – ближайшее будущее // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 10. С. 4–7.
12. *Bishop C.M.* Pattern recognition and machine learning // Springer. 2011. 738 p.
13. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning // MIT Press. 2016. 775 p.
14. *Murphy K.P.* Machine learning: a probabilistic perspective // MIT Press. 2012. 1104 p.
15. *Harrington P.* Machine Learning in Action // Manning Publications. 2012. 384 p.
16. *Brink H., Richards J., Fetherolf M.* Real-world machine learning // Manning Publications. 2016. 264 p.
17. *Smith S.W.* Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists // Newnes. 2013. 650 p.
18. *Shai S. S., Shai B. D.* Understanding machine learning: from theory to algorithms // Cambridge University Press. 2014. 410 p.
19. *Сороко В.И., Фоткина Ж.В.* Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики // М.: НПФ «Планета». 2013. 1048 с.
20. *Брылеев А.М., Крацов Ю.А., Шишляков А.В.* Теория, устройство и работа рельсовых цепей // М.: Транспорт. 1978. 344 с.
21. *Аркатов В.С., Аркатов Ю.В., Казеев С.В., Ободовский Ю.В.* Рельсовые цепи магистральных железных дорог // ООО «Миссия-М». 2006. 496 с.
22. *Alexander C.K., Sadiku M.* Fundamentals of electric circuits // McGraw-Hill Education. 2016. 992 p.
23. *Schubert T.F., Kim E.M.* Fundamentals of electronics: book 3: active filters and amplifier frequency response // Morgan & Claypool Publishers. 2016. 294 p.
24. *Bishop O.* Understand Electronic Filters // Newnes. 1996. 180 p.
25. *Lam H.Y-F.* Analog and digital filters: design and realization // Prentice Hall. 1979. 632 p.
26. *Пультяков А.В., Скоробогатов М.Э.* Системный анализ устойчивости работы систем автоматической локомотивной сигнализации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1. С. 79–89.
27. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов // БХВ-Петербург. 2011. 768 с.

Присухина Илона Вадимовна — аспирант, кафедра автоматике и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС). Область научных интересов: теория и устройство рельсовых цепей, применение методов машинного обучения в системах железнодорожной автоматике и телемеханики. Число научных публикаций — 17. prisukhinaiv@omgups.ru; пр. Маркса, 35, 644046, Омск, Российская Федерация; р.т.: +7 (3812) 31-18-72.

Борисенко Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматике и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС). Область научных интересов: машинное обучение, встраиваемые микропроцессорные системы, программное обеспечение микропроцессорных систем, моделирование микропроцессорных систем, безопасность систем железнодорожной автоматике и телемеханики. Число научных публикаций — 41. borisenkodv@yandex.ru; пр. Маркса, 35, 644046, Омск, Российская Федерация; р.т.: +7 (3812) 31-18-72.

Лунёв Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматике и телемеханики, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС). Область научных интересов: разработка средств измерения, контроля, технической диагностики устройств железнодорожной автоматике и телемеханики, безопасность систем железно-дорожной автоматике и телемеханики. Число научных публикаций — 116. lunevsa@omgups.ru; пр. Маркса, 35, 644046, Омск, Российская Федерация; р.т.: +7 (3812) 31-18-72.

I.V. PRISUKHINA, D.V. BORISENKO, S.A. LUNEV
**SIMULATION MODEL OF ELECTRIC CODE-MODULATED
SIGNAL IN RUSSIAN SYSTEMS OF INTERVAL CONTROL OF
TRAIN MOVEMENT BASED ON TRACK CIRCUIT**

Prisukhina I.V., Borisenko D.V., Lunev S.A. Simulation Model of Electric Code-Modulated Signal in Russian Systems of Interval Control of Train Movement Based on Track Circuit.

Abstract. Systems of interval control of train movement Signaling systems, which are currently in service in Russian railways, use the electric track circuit as the main data channel between signals and locomotives. Code-modulated electric signals transferred through that channel are frequently get corrupted which leads to railway traffic delays.

Decoding of the electric signal received from a track circuit can be represented as an image classification problem, and thus the stability of the data channel could be significantly improved.

However, to build such a classifier based on some machine learning algorithm, one needs a large dataset. In this article, a simulation model to synthesize this dataset is proposed.

The structure of the computer model matches the main stages of the electric code-modulated signal generation in a track circuit: code signal generator, rails, locomotive receiver.

Based on code signal generator schematic and waveform diagrams, a generator algorithm is developed. At this stage, we modeled timings of electric code signals according to the specification as well as their random deviations caused by various factors.

The analysis of substitution circuits of the rail line revealed that it has the properties of a low-pass filter. So, the rail line using the Butterworth digital filter with corresponding parameters is modeled. Additionally, at this stage, random noise during transmission was taken into account.

A similar technique is applied for modeling of a locomotive receiver which has a band-pass filter as the first signal processing block.

Thus, the proposed simulation model consists of a set of algorithms which run in series. By varying the parameters of the model, one can synthesize waveform diagrams of the electric code-modulated signal received by the locomotive equipment from a track circuit working in various modes and conditions.

Keywords: Code-Modulated Signal, Automatic Locomotive Signaling, Machine Learning, Butterworth Digital Filter, Rail Line, Normal Distributed Random Variable, Octave.

Prisukhina Iona Vadimovna — Ph.D. Student, Signaling and Interlocking Department, Omsk State Transport University (OSTU). Research interests: track circuits basics and design, machine learning algorithms applications in signaling and interlocking systems. The number of publications — 17. prisukhinaiv@omgups.ru; 35, Marx pr., 644046, Omsk, Russian Federation; office phone: +7 (3812) 31-18-72.

Borisenko Dmitry Vladimirovich — Ph.D., Associate Professor, Signaling and Interlocking Department, Omsk State Transport University (OSTU). Research interests: machine learning, embedded microprocessor systems, microprocessor systems soft-ware, microprocessor systems modeling, signaling and interlocking systems safety. The number of publications — 41. borisenkodv@yandex.ru; 35, Marx pr., 644046, Omsk, Russian Federation; office phone: +7 (3812) 31-18-72.

Lunev Sergey Aleksandrovich — Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Signaling and Interlocking Department, Omsk State Transport University (OSTU). Research interests: signaling and interlocking systems measurement, control and diagnostics tool design, signaling and interlocking systems safety. The number of publications — 116. lunevsa@omgups.ru; 35, Marx pr., 644046, Omsk, Russian Federation; office phone: +7 (3812) 31-18-72.

References

1. Sapozhnikov V.V. et al. *Ehkspluatatsionnye osnovy avtomatiki i telemekhaniki* [Operational basics of automation and remote control]. M.: Marshrut Publ. 2006. 247 p. (In Russ).
2. Leushin V.B., Yusupov R.R. *Osobennosti kanalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii magistral'nykh zheleznnykh dorog* [Features of channels of automatic locomotive signaling of main railways]. Samara State Transport University. 2007. 115 p. (In Russ).
3. Tabunshchikov AK, Gorenbeyn E.V., Stryapkin L.I. [Failures of automatic locomotive signaling. Problems and solutions]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communication and Informatics*. 2015. vol. 8. pp. 21–22. (In Russ).
4. Bryleev A.M., Pope O., Dmitriev V.S., Kravtsov Y.A., Stepensky B.M. *Avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizatsiya i avtoregulirovka* [Automatic locomotive signaling and auto-adjustment]. M.: Transport Publ. 1981. 320 p. (In Russ).
5. Leonov A.A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii* [Maintenance of automatic locomotive signaling]. M.: Transport Publ. 1982. 255 p. (In Russ).
6. Shamanov V.I. [The magnetic properties of rail lines and level of interferences for the apparatus of automatic control and telemechanics]. *Elektrotekhnikha – Russian Electrical Engineering*. 2015. vol. 9. pp. 50–54. (In Russ).
7. Lochehin V.S. [Receiving device for automatic cab signalling]. *Invention № 2517631 RU*. Publ. 27.05.2014. Paper № 15. (In Russ).
8. Argunov I.A. et al. [Device for suppressing impulse noise in input of locomotive receiver ALS]. *Invention № 2618616 RU*. Publ. 04.05.2017. Paper № 13. (In Russ).
9. Leushin V.B., Yusupov R.R., Blachev K.E. [Receiving device for automatic cab signalling]. *Utility model № 165420 RU*. Publ. 20.10.2016. Paper № 29. (In Russ).
10. Zasov V.A., Zheleznov D.V., Mitrofanov A.N., Belonogov A.S. [Adaptive noise abatement in automatic cab signaling receivers]. *Elektrotekhnikha – Russian Electrical Engineering*. 2017. vol. 3. pp. 18–22. (In Russ).
11. Rosenberg E.N. [Digital Railway - Nearest Future]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communication and Informatics*. 2016. vol. 10. pp. 4–7. (In Russ).
12. Bishop C.M. *Pattern recognition and machine learning*. Springer. 2011. 738 p.
13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press. 2016. 775 p.
14. Murphy K.P. *Machine learning: a probabilistic perspective*. MIT Press. 2012. 1104 p.
15. Harrington P. *Machine Learning in Action*. Manning Publications. 2012. 384 p.
16. Brink H., Richards J., Fetherolf M. *Real-world machine learning*. Manning Publications. 2016. 264 p.
17. Smith S.W. *Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists*. Newnes. 2013. 650 p.
18. Shai S.S., Shai B.D. *Understanding machine learning: from theory to algorithms*. Cambridge University Press. 2014. 410 p.
19. Soroko VI, Fotkina Z.V. *Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Railway automatics and remote control equipment]. Planeta Publ. 2013. 1048 p. (In Russ).
20. Bryleev A.M., Kravtsov Y.A., Shishlyakov A.V. *Teoriya, ustrojstvo i rabota rel'sovykh cepej* [Theory, design and operation of track circuits]. M.: Transport Publ. 1978. 344 p. (In Russ).
21. Arkatov V.S., Arkatov Y.V., Kazeev S.V., Obodovskiy Y.V. *Rel'sovye cepi magistral'nykh zheleznnykh dorog* [Track circuits of main railways]. M.: Missia-M Publ. 2006. 496 p. (In Russ).

22. Alexander C.K., Sadiku M. Fundamentals of electric circuits. McGraw-Hill Education. 2016. 992 p.
23. Schubert T.F., Kim E.M. Fundamentals of electronics: book 3: active filters and amplifier frequency response. Morgan & Claypool Publishers. 2016. 294 p.
24. Bishop O. Understand Electronic Filters. Newnes. 1996. 180 p.
25. Lam H.Y-F. Analog and digital filters: design and realization. Prentice Hall. 1979. 632 p.
26. Pulyakov A.V, Skorobogatov M.E. [System analysis of sustainability of automatic locomotive signaling systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2018. vol. 1. pp. 79–89. (In Russ).
27. Sergienko A.B. *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. BHV-Petersburg Publ. 2011. 768 p. (In Russ).