

К. В. ГОНЧАРОВ (ДИИТ)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

Введение: Одним из направлений повышения помехоустойчивости рельсовой цепи является использование более информативных форм сигнала контроля рельсовой линии. Применение в рельсовой цепи модулированных сигналов позволяет получить сразу несколько информативных селективных признаков при сравнительно узком спектре сигнала. Актуальным является исследование особенностей различных методов модуляции и демодуляции сигналов контроля рельсовой линии с учетом условий эксплуатации рельсовых цепей. **Цель:** поиск новых более информативных форм сигнального тока рельсовой цепи, поиск более совершенных методов обработки сигнала контроля рельсовой линии. **Методы:** Для проведения исследований использовался метод разложения сигналов в ряд Фурье, а также имитационное моделирование с применением метода статистических испытаний. **Результаты:** Спектр частотно-манипулированного сигнала шире, чем спектр амплитудно-манипулированного и фазо-манипулированного сигналов на величину, равную удвоенной девиации частоты. Проводились исследования корреляционных когерентных и некогерентных методов приема сигнала контроля рельсовой линии. При этом были использованы следующие модели помех: белый гауссовский шум, случайная импульсная последовательность и синусоидальные помехи. Было установлено, что переход от амплитудной к частотной манипуляции позволяет уменьшить отношение сигнал/шум на 2...4 дБ в зависимости от уровня сигнала и вида помехи. Проигрыш приемника амплитудно-манипулированного сигнала по сравнению с приемником фазо-манипулированного сигнала составляет 5...6 дБ. **Выводы:** Использование более совершенных методов модуляции и демодуляции сигнала контроля рельсовой линии позволяет улучшить помехоустойчивость рельсовой цепи. При использовании корреляционных методов приема фазовая манипуляция обеспечивает наилучшую помехоустойчивость, а амплитудная – наихудшую.

Ключевые слова: рельсовая цепь, сигнал контроля рельсовой линии, модуляция, помехи, демодуляция, корреляционная функция, когерентный приемник

Введение

Рельсовая цепь (РЦ) представляет собой путевой датчик непрерывного типа, выполняющий ответственные функции контроля свободности путевого участка и целостности рельсовых нитей. Кроме этого, РЦ применяется в качестве телемеханического канала для установления бесперебойной логической связи между смежными сигнальными точками автоматической блокировки (АБ), а также для передачи оперативной информации на локомотив в системах автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). От надежной работы рельсовых цепей во многом зависят надежность и эффективность автоматизированных систем управления движением поездов, а также безопасность движения поездов.

Рельсовые цепи функционируют в условиях воздействия различных помех, создаваемых тяговым током, сигналами АЛС, смежными рельсовыми цепями. Еще одним неблагоприятным фактором, влияющим на работу РЦ, являются флуктуации сопротивления изоляции (балласта), связанные с изменением климатических условий, загрязнением балласта и другими причинами. В результате этого на вход путевого приемника рельсовой цепи поступает адди-

тивная смесь различных помех и сигнала контроля рельсовой линии (КРЛ), уровень которого изменяется при изменении сопротивления балласта. Таким образом, путевой приемник решает задачу обнаружения квазидетерминированного сигнала КРЛ на фоне помех.

Можно выделить два направления повышения помехоустойчивости РЦ: 1) усовершенствование алгоритма обработки сигнала КРЛ; 2) поиск новых более информативных форм сигнала КРЛ [2, 7, 14]. Чем больше информативных селективных признаков у сигнала КРЛ, тем выше вероятность правильного обнаружения такого сигнала путевым приемником.

К настоящему времени разработано большое число различных типов РЦ, которые отличаются формой и частотой сигнального тока, схемными решениями, областью применения (перегонные участки, путевые или стрелочные участки станции, стрелочные или межстрелочные участки сортировочной горки) и используются при различных видах тяги [1, 6, 8, 13]. В каждом типе РЦ применяются различные селективные признаки сигнала КРЛ. Например, в РЦ числовой кодовой АБ в качестве селективных применяются временные параметры амплитудно-манипулированных сигналов, в РЦ частотной кодовой АБ – частоты передаваемых

колебаний [1, 8].

Применение в РЦ модулированных сигналов позволяет получить сразу несколько селективных признаков при сравнительно узком спектре сигнала КРЛ. Так в тональных рельсовых цепях (ТРЦ) используется амплитудная манипуляция (АМн) сигнала КРЛ с двумя признаками: частотой несущего и модулирующего колебания [6, 13].

В ТРЦ применяются периодические модулирующие сигналы. Еще одним направлением расширения числа селективных признаков сигнала КРЛ является использование в качестве модулирующих определенных кодовых сигналов. Например, в микроэлектронных системах автоблокировки АБ-Е1, АБ-Е2, АБ-УЕ для защиты от схода изостыков в РЦ передаются различные кодовые комбинации (синхрогруппы) [9]. В таких системах путевой приемник РЦ решает не только задачу обнаружения сигнала КРЛ, но и задачу различения передаваемых символов.

В существующих РЦ наиболее широко используется амплитудная манипуляция сигнального тока, что обусловлено, прежде всего, простотой применяемых в настоящее время аналоговых методов модуляции и демодуляции АМн [6, 8, 13].

Современный уровень развития цифровой техники (цифровых сигнальных процессоров, программируемых логических матриц) позволяет строить надежные цифровые устройства, выполняющие довольно сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, в том числе алгоритмы модуляции и демодуляции [10, 15, 16]. В цифровых устройствах при переходе от амплитудной манипуляции к более сложной частотной манипуляции (ЧМн) или фазовой манипуляции (ФМн) изменяется только программный алгоритм обработки сигналов, а схемы модулирующих и демодулирующих устройств практически не меняются. Таким образом, при выборе метода модуляции сигнала КРЛ в цифровых системах на первый план выходят не простота реализации модулятора и демодулятора, а другие факторы, такие как помехоустойчивость рельсовой цепи, ширина спектра модулированного сигнала и другие.

Манипулированные сигналы широко применяются в различных связевых устройствах [4, 11]. Однако, рельсовая цепь работает в специфических условиях, связанных с особенной электромагнитной обстановкой и специфическим изолятором (балластом) между рельсовыми нитями. В связи с этим, актуальным является исследование особенностей различных методов модуляции и демодуляции сигналов КРЛ

с учетом условий эксплуатации рельсовых цепях.

Целью данной работы является поиск новых более информативных форм сигнального тока рельсовых цепей, поиск более совершенных методов обработки сигнала контроля рельсовой линии.

Амплитудная манипуляция

Амплитудно-манипулированный сигнал контроля рельсовой линии описывается выражением:

$$S_{AMn}(t) = \frac{1}{2} A_0 \cdot (1 + \chi_m(t)) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда сигнала, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 – несущая частота, φ_0 – начальная фаза, $\chi_m(t)$ – нормированная функция, повторяющая закон изменения модулирующего сигнала и принимающая значения $+1$, -1 . В тональных рельсовых цепях модулирующий сигнал представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов со скважностью равной двум. В этом случае сигнал (1) можно разложить в ряд Фурье [11]

$$S_{AMn}(t) = \frac{A_0}{2} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \cos[(2\pi f_0 + 2\pi kF)t + \varphi_0] + \frac{A_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \cos[(2\pi f_0 - 2\pi kF)t + \varphi_0], \quad (2)$$

где F – частота модулирующего сигнала.

На рис. 1 изображен спектр амплитудно-манипулированного сигнала, построенный в соответствии с выражением (2). Как видно, такой спектр содержит несущую частоту амплитудой $0,5A_0$, а также верхнюю и нижнюю боковые полосы, содержащие нечетные гармоники модулирующего сигнала.

Таким образом, ширина спектра АМн сигнала равняется $\Delta F_{AMn} = 2kF$, где k – номер учитываемой гармоники. Так как основная энергия сигнала сосредоточена в главном лепестке спектра, то можно считать, что эффективная ширина спектра $\Delta F_{AMn} \approx 2F$ [4].

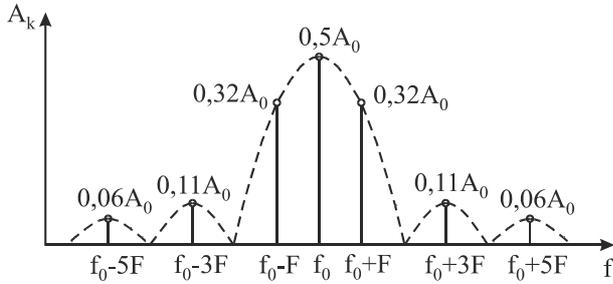


Рис. 1. Спектр амплитуд амплитудно-манипулированного сигнала

Частотная манипуляция

При частотной манипуляции частота несущего колебания изменяется в зависимости от значения модулирующего сигнала

$$S_{ЧМн}(t) = A_0 \cdot \cos(2\pi(f_0 + \chi_m(t)\Delta f_m)t + \varphi_0), \quad (3)$$

где Δf_m – девиация частоты. Такой сигнал можно представить в виде суммы двух чередующихся амплитудно-манипулированных сигналов с несущими частотами $f_1 = f_0 - \Delta f_m$ и $f_2 = f_0 + \Delta f_m$. Это позволяет представить спектр ЧМн колебания как результат наложения спектров двух АМн колебаний [11]. Такой спектр представлен на рис. 2.

Ширина спектра ЧМн сигнала равняется $\Delta F_{ЧМн} = 2kF + 2\Delta f_m$, где k – номер учитываемой гармоники. С учетом первых гармоник модулирующего сигнала эффективная ширина спектра равняется $\Delta F_{ЧМн} \approx 2F + 2\Delta f_m$ [4].

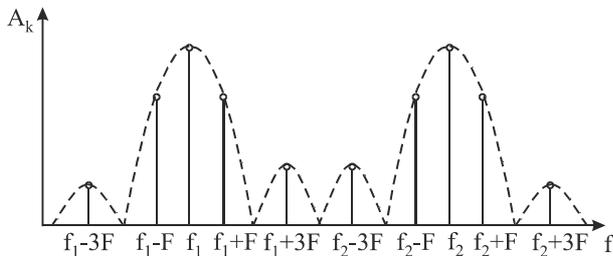


Рис. 2. Спектр амплитуд частотно-манипулированного сигнала

Фазовая и фазоразностная манипуляция

При фазовой манипуляции значение модулирующего сигнала влияет на начальную фазу несущего колебания

$$S_{ФМн}(t) = A_0 \cdot \cos(\omega_0 t + (\varphi_0 + \chi_m(t)\Delta\varphi_m)), \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_m$ – девиация фазы. В случае двухпозиционной (бинарной) манипуляции такой сигнал также можно представить в виде суммы двух АМн сигналов с различными начальными фазами. Для лучшего различения сигналов необ-

ходимо, чтобы они максимально отличались друг от друга по фазе, т.е. $\Delta\varphi_m = \pi/2$. Таким образом, спектр ФМн колебания также можно представить как результат наложения спектров двух АМн колебаний с одинаковыми несущими частотами и противоположными фазами [11]. На рис. 3 представлен спектр амплитуд ФМн сигнала при периодическом модулирующем сигнале со скважностью равной двум. Как видно, в спектре фазоманипулированного сигнала отсутствует составляющая на несущей частоте, а амплитуды боковых составляющих в два раза выше, чем у АМн сигнала. Ширина спектра ФМн колебания такая же, как и у АМн колебания $\Delta F_{ФМн} = 2kF$. С учетом первых гармоник эффективная ширина спектра равняется $\Delta F_{ФМн} \approx 2F$ [4].

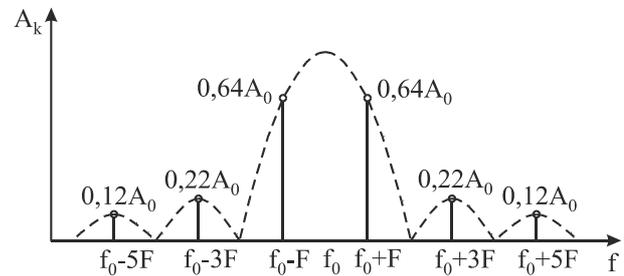


Рис. 3. Спектр амплитуд фазоманипулированного сигнала

При ФМн начальная фаза является информационным параметром, и в алгоритмах работы фазового демодулятора с целью получения сведений о начальной фазе должны формироваться и храниться образцы вариантов передаваемого сигнала, достаточно точно совпадающие с ним по частоте и начальной фазе. Но на приеме нет признаков, по которым можно точно установить однозначное соответствие между переданными двоичными символами и образцами сигнала на входе демодулятора.

Неоднозначность характерная для ФМн сигналов, устранена в системах фазоразностной манипуляции (ФРМн). У такого метода манипуляции информация заложена не в абсолютном значении начальной фазы, а в разности начальных фаз соседних посылок, которая остается неизменной и на приемной стороне. Процесс формирования сигнала с ФРМн можно свести к случаю формирования сигнала с ФМн путем перекодирования передаваемой двоичной последовательности.

Таким образом, АМн и ФМн сигналы имеют спектры практически одинаковой ширины. Спектр ЧМн сигнала шире, чем спектр АМн на величину $2\Delta f_m$, что усложняет входной

фильтр путевого приемника. Например, в ТРЦ с амплитудной манипуляцией, несущей частотой 480 Гц и модулирующей частотой 12 Гц входной фильтр путевого приемника имеет полосу пропускания 24 Гц (от 468 Гц до 492 Гц) [5]. При переходе от амплитудной манипуляции к частотной с девиацией частоты 12 Гц входной фильтр должен иметь полосу пропускания от 456 Гц до 504 Гц. Однако в данную полосу частот попадает гармоника тягового тока 500 Гц, что является недопустим. Поэтому необходимо уменьшать девиацию частоты и использовать входной фильтр более высокого порядка с большей крутизной переходного участка между полосами пропускания и заграждения.

Методы демодуляции

Рассмотрим корреляционные методы демодуляции, которые делятся на когерентные и некогерентные (квадратурные) [12]. Когерентный метод может использоваться, если известна начальная фаза принятого сигнала. Сущность такого метода состоит в вычислении взаимной корреляции между принимаемым сигналом и колебаниями-образцами (опорными сигналами), представляющими собой гармонические колебания с используемыми для манипуляции частотой и фазой. Взаимная корреляция сигнала с i -м опорным сигналом для n -го по времени символа рассчитывается следующим образом:

$$Q_i(n) = \frac{2}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} \xi(t) \cdot \cos(\omega_i t + \varphi_{0i}) dt, \quad (5)$$

где T – длительность одного символа, $\xi(t)$ – принятое колебание, ω_i – частоты опорных сигналов, φ_{0i} – начальные фазы опорных сигналов. Так как принятое колебание $\xi(t)$ представляет собой аддитивную смесь манипулированного сигнала и помехи, то

$$Q_i(n) = Q_{si}(n) + Q_{ni}(n), \quad (6)$$

где $Q_{si}(n)$ и $Q_{ni}(n)$ – сигнальная и шумовая составляющие взаимной корреляционной функции.

Определим сигнальную составляющую корреляционной функции для амплитудной манипуляции при передаче единичного символа ($\chi_m = +1$)

$$Q_s^{AMn} = \frac{2}{T} \int_0^T A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt.$$

Выполнив интегрирование, получим

$$Q_s^{AMn} = A_0 + \frac{A_0}{2\omega_0 T} [\sin(2\omega_0 T + 2\varphi_0) - \sin(2\varphi_0)].$$

Так как $\omega_0 T \gg 1$, то $Q_s^{AMn} \approx A_0$.

При передаче нулевого символа ($\chi_m = -1$) в АМн системах сигнальная составляющая равняется нулю. Решение о значении каждого символа принимается путем сравнения взаимной корреляции (5) с пороговым значением. При превышении порогового значения считается, что принят единичный символ, в противном случае – нулевой символ. Наличие шумовой составляющей может привести к ошибочному различению символов. В зависимости от фазовых соотношений между сигналом КРЛ и помехой возможны ошибки двух типов: ложная единица и ложный ноль. Для уменьшения вероятности общей ошибки пороговый уровень выбирается равным $0,5A_0$. Таким образом, при амплитудной манипуляции к ошибкам может привести шумовая составляющая корреляционной функции, уровень которой превышает $0,5A_0$.

Определим сигнальные составляющие корреляционной функции для частотной манипуляции при передаче нулевого символа ($\chi_m = -1$)

$$Q_{s1}^{FMn} = \frac{2}{T} \int_0^T A_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_0) dt \approx A_0,$$

$$Q_{s2}^{FMn} = \frac{2}{T} \int_0^T A_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_0) dt,$$

где $\omega_1 = 2\pi(f_0 - \Delta f_m)$, $\omega_2 = 2\pi(f_0 + \Delta f_m)$. Выполнив интегрирование, найдем Q_{s2}

$$Q_{s2}^{FMn} = \frac{A_0 \sin(\Delta\omega T)}{\Delta\omega T} + \frac{A_0}{(\omega_1 + \omega_2)T} [\sin((\omega_1 + \omega_2)T + 2\varphi_0) - \sin(2\varphi_0)],$$

где $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$. Так как, $\Delta\omega \ll \omega_1 + \omega_2$, то

$$Q_{s2}^{FMn} \approx \frac{A_0 \sin(\Delta\omega T)}{\Delta\omega T}.$$

Решение о значении каждого символа принимается путем сравнения взаимных корреляций Q_1^{FMn} и Q_2^{FMn} между собой. Так при девиации частоты 6 Гц и частоте модуляции 12 Гц (индекс частотной манипуляции – 0,5) при приеме нулевого символа $Q_{s1}^{FMn} \approx A_0$, $Q_{s2}^{FMn} = 0$. В этом случае к ошибкам может привести шумовая составляющая корреляцион-

ной функции, уровень которой превышает A_0 .

Найдем сигнальные составляющие корреляционной функции для фазовой манипуляции при передаче нулевого символа ($\chi_m = -1$) и девиации фазы $\Delta\varphi_m = \pi/2$

$$Q_{s1}^{\Phi M_n} = \frac{2}{T} \int_0^T A_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) dt,$$

$$Q_{s2}^{\Phi M_n} = \frac{2}{T} \int_0^T A_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) dt.$$

Для упрощения вычислений принято, что $\varphi_0 = 0$. Выполнив интегрирование, получим, что $Q_{s1}^{\Phi M_n} \approx A_0$, $Q_{s2}^{\Phi M_n} \approx -A_0$. Различение принятых символов проводится путем сравнения взаимных корреляций $Q_1^{\Phi M_n}$ и $Q_2^{\Phi M_n}$. При этом к ошибкам может привести шумовая составляющая корреляционной функции, уровень которой превышает $2A_0$.

Таким образом, при использовании когерентного корреляционного приема фазовая манипуляция обеспечивает наилучшую помехоустойчивость, а амплитудная манипуляция – наихудшую. Для более детального исследования помехоустойчивости различных методов манипуляции необходимо учитывать не только характеристики модулированных сигналов, но и характеристики помех.

Некогерентный (квадратурный) метод применяется в том случае, если неизвестна начальная фаза принятого сигнала. В таком методе взаимная корреляция сигнала с i -м опорным сигналом для n -го по времени символа рассчитывается следующим образом:

$$Q_i(n) = \frac{2}{T} \left| \int_{nT}^{(n+1)T} \xi(t) \cdot \exp(j\omega_i t) dt \right|. \quad (7)$$

При использовании цифровых методов обработки сигналов операция интегрирования в выражениях (5) и (7) заменяется операцией суммирования

$$Q_i = \frac{2}{M} \sum_{N=0}^{M-1} \xi(NT_s) \cdot \cos(\omega_i NT_s + \varphi_{0i}), \quad (8)$$

$$Q_i = \frac{2}{M} \left| \sum_{N=0}^{M-1} \xi(NT_s) \cdot \exp(j\omega_i NT_s) \right|. \quad (9)$$

где M – количество выборок на интервале, равном длительности одного символа, T_s – интервал дискретизации.



Рис. 4. Алгоритм исследования помехоустойчивости путевого приемника

Исследование помехоустойчивости путевого приемника

Для исследования помехоустойчивости путевого приемника рельсовой цепи при различных методах модуляции и демодуляции было проведено имитационное моделирование в среде Matlab. Исследования проводили с помощью метода статистических испытаний [3]. Алгоритм представлен на рис. 4. В качестве передаваемого сообщения использовалась случайная кодовая последовательность длительностью 20000 символов. При выполнении модуляции была выбрана несущая частота 480 Гц и частота модуляции 12 Гц, что соответствует параметрам сигнального тока ТРЦ. К полученному в результате модуляции сигналу КРЛ добавлялись помехи: белый гауссовский шум, импульсные помехи или синусоидальные помехи. Демодуляция сигнала выполнялась путем определения в соответствии с выражениями (7) или (9) взаимных корреляций принятого и опорных сигналов. В зависимости от величины взаимных корреляций определялось значение каждого символа. Полученная в результате демодуляции кодовая последовательность сравнивалась с исходным сообщением, и рассчитывался коэффициент ошибок

$$K_{ош} = \frac{N_{ош}}{N},$$

где N – общее количество символов в кодовой последовательности; $N_{ош}$ – количество ошибочных символов. Полученный коэффициент оши-

бок использовался для оценки помехоустойчивости путевого приемника.

На первом этапе исследовалась помехоустойчивость когерентного путевого приемника при воздействии белого гауссовского шума. На рис. 5 показана полученная зависимость коэффициента ошибок от отношения мощности сигнала к мощности шума. Как видно, переход от амплитудной к фазовой манипуляции позволяет уменьшить отношение сигнал/шум на 3...3,5 дБ. Взаимозависимость символов в ФРМн сигнале привела к увеличению числа ошибок и небольшому ухудшению помехоустойчивостью по сравнению с ФМн. Следует также отметить, что при амплитудной манипуляции применяются сигналы с пассивной паузой. Поэтому при одном и том же отношении сигнал/шум амплитуда АМн сигнала в $\sqrt{2}$ раз выше, чем амплитуда ЧМн и ФМн сигналов.

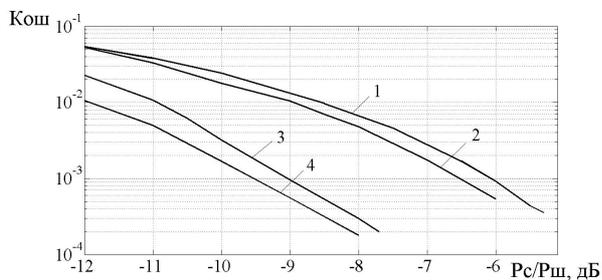


Рис. 5. Помехоустойчивость путевого приемника при воздействии белого гауссовского шума: 1 – АМн; 2 – ЧМн; 3 – ФРМн; 4 – ФМн

На рис. 6 показана зависимость коэффициента ошибок от отношения сигнал/шум при когерентной и некогерентной демодуляции аддитивной смеси ЧМн сигнала и белого гауссовского шума. Видно, что из-за игнорирования фазовой информации проигрыш некогерентного варианта когерентному составляет от 1 до 2 дБ.

В качестве модели импульсной помехи использовалась вероятностная модель, предложенная в работе [2]. Авторы данной работы проводили регистрацию импульсных помех на различных участках Куйбышевской и Московской железных дорог при различных режимах движения поезда (переключение схем управления тяговыми двигателями локомотива, в том числе – режим рекуперации; набор и сброс позиций контроллера машиниста, буксование локомотива, движение по стрелочным переводам и боковая качка локомотива, проезд изолирующих стыков и т.д.). После обработки экспериментальных данных авторами работы [2] было установлено, что длительность импульсов помехи подчиняется экспоненциальному за-

кону

$$w_u(n) = \lambda e^{-\lambda n} \quad (10)$$

с параметром $\lambda=284,057$, а длительность меж-импульсных интервалов подчиняется закону гамма-распределения

$$w_{int}(n) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} n^{a-1} e^{-bn}, \quad (11)$$

где $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} z^{x-1} e^{-z} dz$ – гамма-функция; $a = 0,0109$; $b = 1,216$.

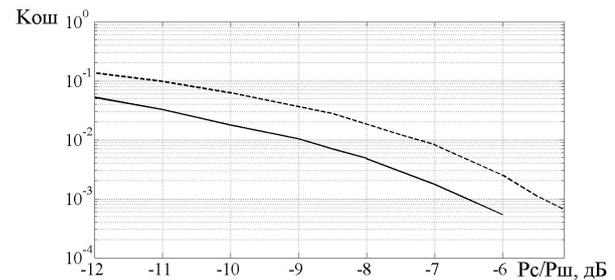


Рис. 6. Помехоустойчивость ЧМн приемника при когерентном (сплошная линия) и некогерентном (пунктир) методах демодуляции

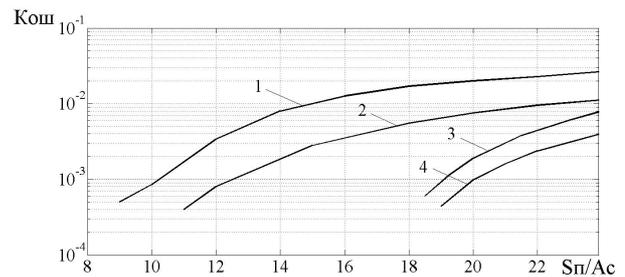


Рис. 7. Помехоустойчивость путевого приемника при воздействии импульсных помех: 1 – АМн; 2 – ЧМн; 3 – ФРМн; 4 – ФМн

Для исследования помехоустойчивости когерентных путевых приемников к сигналу КРЛ добавлялась случайная импульсная последовательность, временные параметры которой определялись в соответствии с выражениями (10), (11). При определении амплитуды импульсов помехи использовался равномерный закон распределения с нулевым математическим ожиданием. На рис. 7 показаны полученные в результате имитационного моделирования зависимости коэффициента ошибок от отношения среднеквадратичного отклонения амплитуды помехи к амплитуде сигнала КРЛ. Видно, что ЧМн приемник обеспечивает такой же коэффициент ошибок, как и АМн приемник, при увеличении амплитуды помехи на 20...40 %, а ФМн приемник – при увеличении амплитуды помехи на 90...100 %.

На следующем этапе исследований к сигналу КРЛ добавлялась синусоидальная помеха, попадающая в полосу пропускания путевого приемника РЦ. При определении частоты помехи использовался равномерный закон распределения на интервале от 465 Гц до 495 Гц, при определении фазы помехи – равномерный закон на интервале от $-\pi$ до $+\pi$. Для амплитуды помехи также применялся закон равномерной плотности с нулевым математическим ожиданием. На рис. 8 показаны полученные зависимости коэффициента ошибок от отношения мощности сигнала к дисперсии амплитуды помехи при различных когерентных методах демодуляции. Видно, что проигрыш АМн приемника по сравнению с ЧМн приемником составляет 3...4 дБ, а по сравнению с ФМн приемником – 5...6 дБ.

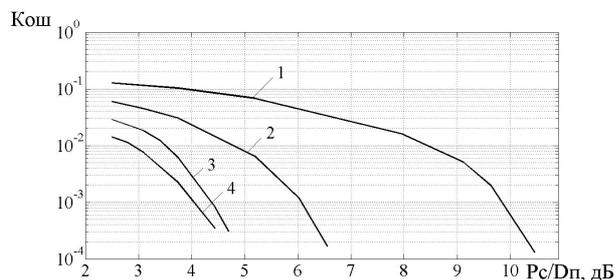


Рис. 8. Помехоустойчивость путевого приемника при воздействии синусоидальных помех: 1 – АМн; 2 – ЧМн; 3 – ФРМн; 4 – ФМн

Выводы

1. Одним из направлений повышения помехоустойчивости рельсовых цепей является поиск новых более информативных форм сигнала контроля рельсовой линии. При этом могут использоваться как более помехоустойчивые методы модуляции, так и дополнительные кодовые селективные признаки сигнала КРЛ.

2. Амплитудно-манипулированный и фазо-манипулированный сигналы имеют спектры практически одинаковой ширины. Спектр частотно-манипулированного сигнала шире, чем спектр амплитудно-манипулированного сигнала на величину $2\Delta f_m$, что приводит к увеличению мощности гармонических помех, попадающих в полосу пропускания приемника РЦ.

3. Результаты теоретических исследований, а также результаты имитационного моделирования показали, что при использовании корреляционного приема фазовая манипуляция обеспечивает наилучшую помехоустойчивость, а амплитудная манипуляция – наихудшую. При использовании некогерентных методов приема из-за игнорирования фазовой информации помехоустойчивость ухудшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст] / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – М. : Транспорт, 1992. – 384 с.
2. Блачев, К. Э. Имитационное моделирование цифрового приемника сигналов систем интервального регулирования движения поездов [Текст] / К. Э. Блачев // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2 (22). – С. 223-227.
3. Ермаков, С. М. Курс статистического моделирования [Текст] / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – М. : Наука, 1976. – 320 с.
4. Каллер, М. Я. Теоретические основы транспортной связи [Текст] / М. Я. Каллер, А. Ф. Фомин. – М. : Транспорт, 1989. – 383 с.
5. Кулик, П. Д. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл [Текст] : керівний нормативний документ «Укрзалізниці», ЦШ 0041 : Затв.: Наказ «Укрзалізниці» № 745-ЦЗ від 26.12.2005 / П. Д. Кулик, О. О. Удовіков, В. І. Басов. – К. : Мінтрансзв'язку України, 2006. – 236 с.
6. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности [Текст] / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – К. : Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
7. Лисенков, В. М. Методы повышения безопасности функционирования рельсовых цепей [Текст] / В. М. Лисенков, А. Е. Ваньшин, М. В. Катков // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 4. – С. 8-10.
8. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст] / Н. Ф. Котляренко [и др.]. – М. : Транспорт, 1983. – 408 с.
9. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах [Текст] / А. Б. Бойник [и др.]. – Харьков : УкрГАЗТ, 2005. – 256 с.
10. Сперанский, В. С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники [Текст] / В. С. Сперанский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2008. – 168 с.
11. Теория электрической связи [Текст] / под ред. К. К. Васильева. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 452 с.
12. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов [Текст] / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
13. Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями [Текст] / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2004. – 132 с.
14. Чепцов, М. М. Методи синтезу сигнально-процесорної централізації стрілок і сигналів [Текст]: монографія / М. М. Чепцов, А. Б. Бой-нік, Д. М. Кузьменко. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 181 с.

15. Iteachor, E. C. Digital signal processing. A practical approach [Text] / E. C. Iteachor, B. W. Jervis. – Pearson Education Limited, 2002. – 933 с.
16. Smith, S. W. Digital signal processing [Text] /

S. W. Smith. – California Technical Publishing, 1999. – 650 с.

Поступила в редколлегию 05.03.2012.
Принята к печати 07.03.2012.

Статья рекомендована к публикации зав. каф. АТС ДНУЖТ д-ром фіз.-мат. наук, проф. В. И. Гаврилюком

К. В. ГОНЧАРОВ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ ТА ДЕМОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ КОНТРОЛЮ РЕЙКОВОЇ ЛІНІЇ

Вступ: Одним із напрямків підвищення завадостійкості рейкового кола є використання більш інформативних форм сигналу контролю рейкової лінії. Використання в рейковому колі модульованих сигналів дозволяє отримати відразу декілька інформативних селективних ознак при відносно вузькому спектрі сигналу. Актуальним є дослідження особливостей різних методів модуляції та демодуляції сигналів контролю рейкової лінії з урахуванням умов експлуатації рейкових кіл. **Мета:** пошук нових більш інформативних форм сигнального струму рейкового кола, пошук більш досконалих методів обробки сигналу контролю рейкової лінії. **Методи:** Для проведення досліджень використовувався метод розкладу сигналів в ряд Фур'є, а також імітаційне моделювання з використанням метода статистичних випробувань. **Результати:** Спектр частотно-маніпульованого сигналу ширший ніж спектр амплітудно-маніпульованого та фазо-маніпульованого сигналів на величину, яка дорівнює подвоєній девіації частоти. Проводились дослідження кореляційних когерентних та некогерентних методів прийому сигналу контролю рейкової лінії. При цьому були використані наступні моделі завад: білий гауссовський шум, випадкова імпульсна послідовність та синусоїдальні завади. Було встановлено, що перехід від амплітудної до частотної маніпуляції дозволяє зменшити відношення сигнал/шум на 2...4 дБ в залежності від рівня сигналу та виду завади. Програш приймача амплітудно-маніпульованого сигналу у порівнянні з приймачем фазо-маніпульованого сигналу складає 5...6 дБ. **Висновки:** Використання більш досконалих методів модуляції та демодуляції сигналу контролю рейкової лінії дозволяє покращити завадостійкість рейкового кола. При використанні кореляційних методів прийому фазова маніпуляція забезпечує найкращу завадостійкість, а амплітудна – найгіршу.

Ключові слова: рейкове коло, сигнал контролю рейкової лінії, модуляція, завади, демодуляція, кореляційна функція, когерентний приймач

K. V. GONCHAROV

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODULATION AND DEMODULATION METHODS OF THE CONTROL SIGNALS OF RAIL LINE

Introduction: One of the ways of increasing the noise stability rail circuit is the use more informative waveform of control signal. Use in rail circuit modulated signals gives several informative selective traits in relatively narrow spectrum. The study of features of various modulation and demodulation methods with considering operating conditions of rail circuits is urgent. **Purpose:** the search for more informative forms of rail line control signal, the search for improved methods of signal processing of control current. **Methods:** For carrying out researches the method of signals decomposition in Fourier series and the simulation with the method of statistical tests have been used. **Results:** Spectrum of frequency shift signal is wider than the spectrum of amplitude shift and phase shift signals by an amount equal to twice the frequency deviation. The research of correlation coherent and incoherent reception methods of rail line control signal has been carried out. In this case, we used the following models of interferences: white Gaussian noise, random pulse sequence and sinusoidal interference. It has been found that the transition from amplitude to frequency shift keying reduces signal/noise ratio by 2...4 dB, depending from the signal level and the type of noise. Losing amplitude shift keying receiver compared with the phase shift keying receiver is 5...6 dB. **Conclusions:** The use of more advanced methods of modulation and demodulation improves noise stability of rail circuit. When using correlation methods reception phase shift keying provides the best noise stability, and amplitude – the worst.

Keywords: rail circuit, the control signal of rail line, modulation, noise, demodulation, correlation function, the coherent receiver