

К. В. ГОНЧАРОВ (ДИИТ)

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ОТ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

В работе проведен анализ различных методов подавления импульсных помех, исследованы особенности их применения в путевых приемниках тональных рельсовых цепей. Результаты имитационного моделирования показали высокую помехозащищенность системы «широкополосный фильтр – ограничитель – коррелятор».

Ключевые слова: тональные рельсовые цепи, путевой приемник, импульсные помехи, полосовой фильтр, полоса пропускания фильтра, коррелятор, амплитудный ограничитель

Введение

Рельсовые цепи являются одними из наиболее ответственных элементов автоматизированных систем управления движением поездов (АСУДП). Они выполняют функции путевых датчиков, обеспечивающих контроль свободности путевых участков и целостности рельсовых нитей, а также используются в качестве телемеханических каналов для передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации. В последнее время все чаще применяются тональные рельсовые цепи (ТРС), в которых несущие частоты сигналов контроля рельсовой линии (КРЛ) находятся в диапазоне от 420 Гц до 5 555 Гц. Использование сигнального тока тонального диапазона позволяет ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, использовать централизованное размещение аппаратуры, исключить изолирующие стыки. Благодаря последнему появляется возможность применения цельносварных рельсовых плетей, обеспечивается электрическая непрерывность цепи возврата тягового тока, сокращается число используемых дроссель-трансформаторов [1, 2].

Рельсовые цепи эксплуатируются в условиях воздействия различных электромагнитных помех, источниками которых являются система тягового электроснабжения, подвижной состав, устройства автоматической локомотивной сигнализации, соседние рельсовые линии. Для подавления помех в путевых приемниках ТРС применяются узкополосные фильтры, настроенные на несущую частоту сигнала. Полоса пропускания таких фильтров выбирается из условия максимального подавления возможных сосредоточенных по спектру гармонических помех (гармоник тягового тока, сигналов соседних рельсовых цепей). В тоже время узкополосные фильтры не позволяют подавить импульсные помехи, которые возникают в результате различных коммутационных процессов в контактной сети, изменения режима ведения

электровоза, грозовых разрядов и других причин. Импульсные помехи приводят к появлению на выходе узкополосного фильтра свободных затухающих колебаний на несущей частоте сигнала КРЛ, что может привести к сбою в работе рельсовой цепи.

К настоящему времени разработаны различные методы подавления импульсных помех: использование амплитудных ограничителей, компенсация помех, прерывание тракта приемника на время действия импульсной помехи, применение схемы «широкополосный фильтр – ограничитель – узкополосный фильтр» и другие [3,4].

Целью данной работы является исследование особенностей применения различных методов подавления импульсных помех в путевых приемниках тональных рельсовых цепей, усовершенствование алгоритма обработки сигнала контроля рельсовой линии.

Особенности применения ограничителей для подавления импульсных помех

Наиболее часто для подавления импульсных помех используются амплитудные ограничители. Рассмотрим, как влияет ограничитель на спектральный состав гармонических помех, уровень которых превышает пороговый уровень ограничителя.

Для построения амплитудных ограничителей широко применяются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), такие как варисторы, полупроводниковые диоды и стабилитроны. Известно [5], что ВАХ полупроводникового диода описывается экспоненциальной функцией вида

$$I = I_0 (e^{U/\varphi_m} - 1), \quad (1)$$

где I_0 – обратный ток насыщения диода;

φ_m – температурный потенциал.

Можно показать, что характеристика огра-

нителя на основе полупроводниковых диодов описывается логарифмической функцией

$$U_{\text{вых}} = B \ln(AU_{\text{вх}} + 1), \quad (2)$$

где A и B – параметры ограничителя; $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ – напряжение на входе и выходе ограничителя.

Разложим логарифмическую функцию (2) в ряд [6]. С учетом первых двух членов ряда получим

$$U_{\text{вых}} = B \left(AU_{\text{вх}} - \frac{A^2 U_{\text{вх}}^2}{2} \right). \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда на вход амплитудного ограничителя поступает аддитивная смесь двух гармонических помех

$$U_{\text{вх}} = U_1 \cos(\omega_1 t) + U_2 \cos(\omega_2 t), \quad (4)$$

где U_1 и U_2 – амплитуды помех; ω_1 и ω_2 – частоты помех. Для упрощения анализа считаем, что фазы помех одинаковы. Подставив выражение (4) в (3), получим

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}} = & -\frac{BA^2}{4}(U_1^2 + U_2^2) + BAU_1 \cos(\omega_1 t) + \\ & + BAU_2 \cos(\omega_2 t) - \frac{BA^2 U_1^2}{4} \cos(2\omega_1 t) - \\ & - \frac{BA^2 U_2^2}{4} \cos(2\omega_2 t) - \frac{BA^2 U_1 U_2}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2)t) - \\ & - \frac{BA^2 U_1 U_2}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t). \end{aligned}$$

Таким образом, в спектре сигнала на выходе диодного ограничителя кроме гармонических составляющих с частотами помех ω_1 и ω_2 появляются их гармоники $2\omega_1$ и $2\omega_2$, а также гармонические составляющие с комбинационными частотами $(\omega_1 + \omega_2)$ и $(\omega_1 - \omega_2)$. Подобное изменение спектра гармонических помех происходит также в ограничителях на основе варисторов, полупроводниковых стабилитронов и других нелинейных элементов.

Полоса пропускания путевого приемника тональных рельсовых цепей выбирается из условия максимального подавления возможных сосредоточенных по спектру помех (гармоник тягового тока, сигналов соседних рельсовых цепей). Применение амплитудных ограничителей на входе приемника приводит к появлению комбинационных частот, которые могут попасть в полосу пропускания приемника и при-

вести к сбою в работе рельсовой цепи. Покажем это на примере.

Рассмотрим приемник ТРЦ с несущей частотой 480 Гц, который имеет полосу пропускания от 468 Гц до 492 Гц [2]. Предположим, что соседняя рельсовая цепь работает на несущей частоте 420 Гц при частоте модуляции 12 Гц. В спектре сигнала соседней ТРЦ будут присутствовать несущая частота 420 Гц и первые гармоники нижней и верхней боковых полос 408 Гц и 432 Гц. Сигнал соседней рельсовой цепи вместе с помехой от тягового тока 50 Гц могут создать комбинационные частоты 458 Гц, 470 Гц и 482 Гц. Последние две частоты являются «опасными», т.к. попадают в полосу пропускания приемника с несущей частотой 480 Гц, что может привести к ложному срабатыванию приемника.

Рассмотренные особенности применения амплитудных ограничителей необходимо учитывать при разработке методов защиты путевых приемников рельсовых цепей от импульсных помех.

Система «широкополосный фильтр – ограничитель – узкополосный фильтр»

Эффективным методом подавления импульсных помех является применение системы «широкополосный фильтр – ограничитель – узкополосный фильтр» (ШОУ) [3, 4], схема которой представлена на рис. 1. Каждая импульсная помеха приводит к появлению на выходе широкополосного фильтра (ШФ) свободных затухающих колебаний на частоте резонанса фильтра, уровень которых уменьшается с помощью амплитудного ограничителя (АО). Широкополосный фильтр обеспечивает также первоначальное подавление сосредоточенных по спектру помех, благодаря чему уменьшается вероятность появления «опасных» комбинационных частот на выходе амплитудного ограничителя. Узкополосный фильтр (УФ) выполняет дальнейшее подавление помех.



Рис. 1. Система «широкополосный фильтр – ограничитель – узкополосный фильтр»

В существующих путевых приемниках тональных рельсовых цепей [1, 2] входными элементами являются двухсторонний амплитудный ограничитель, реализованный на полупроводниковых стабилитронах, и узкополосный фильтр, настроенный на несущую частоту сигнала контроля рельсовой линии. Таким обра-

зом, для реализации системы ШОУ путевого приемник ТРЦ следует дополнить широкополосным фильтром. Проанализируем, как влияют параметры такого фильтра на эффективность подавления импульсных помех.

В качестве входного широкополосного фильтра можно использовать низкодобротный колебательный контур, настроенный на несущую частоту сигнала контроля рельсовой линии. После каждой импульсной помехи в колебательном контуре возникают свободные затухающие колебания [7]

$$S_{шф}^n(t - \tau_0) = U_{шф}^n e^{-\delta(t - \tau_0)} \sin(\omega_0(t - \tau_0) + \varphi_{шф}^n), \quad (5)$$

где $U_{шф}^n$, $\varphi_{шф}^n$ – амплитуда и фаза помехи; τ_0 – время появления импульсной помехи; ω_0 – частота резонанса контура; δ – коэффициент затухания контура.

Рассмотрим случай воздействия мощной импульсной помехи, когда амплитуда колебаний (5) превышает пороговый уровень ограничителя. При этом ограничитель уменьшает уровень колебаний и изменяет их форму, так как «обрезаются» верхушки синусоиды. Такое изменение формы помехи приводит к появлению в ее спектре дополнительных высокочастотных составляющих, которые не попадают в полосу пропускания узкополосного фильтра. Поэтому в первом приближении помеху на выходе амплитудного ограничителя можно описать выражением

$$S_n(t - \tau_0) = U_{nop} e^{-\delta(t - \tau_0)} \sin(\omega_0(t - \tau_0) + \varphi_n), \quad (6)$$

где U_{nop} – пороговый уровень ограничителя, φ_n – фаза помехи на выходе ограничителя.

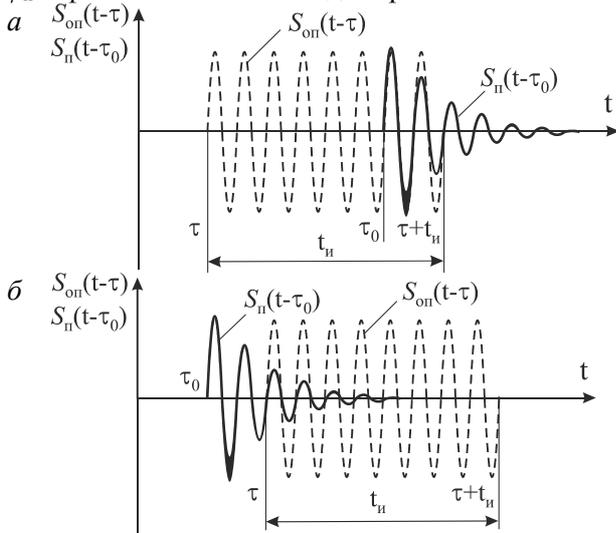


Рис. 2. Определение взаимокорреляционной функции помехи и опорного сигнала: а – $\tau \leq \tau_0$; б – $\tau \geq \tau_0$

В работе [8] показана эффективность ис-

пользования в приемнике ТРЦ в качестве узкополосного входного фильтра коррелятора, определяющего взаимокорреляционную функцию принятого колебания и опорного сигнала. Определим сигнал на выходе коррелятора при воздействии помехи (6)

$$q_n(\tau) = \int_0^T S_{on}(t - \tau) \cdot S_n(t - \tau_0) dt, \quad (7)$$

где T – интервал наблюдения; $S_{on}(t - \tau)$ – опорный сигнал вида

$$S_{on}(t - \tau) = \sin(\omega_0(t - \tau) + \varphi_{on}), \tau \leq t \leq \tau + t_u, \quad (8)$$

где φ_{on} – фаза опорного сигнала; t_u – длительность импульса в сигнале КРЛ.

Рассмотрим случай, когда $\tau \leq \tau_0$ (рис. 2, а). Проводим интегрирование по области, в которой подынтегральное выражение (7) отлично от нуля

$$q_{n1}(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau + t_u} S_{on}(t - \tau) \cdot S_n(t - \tau_0) dt. \quad (9)$$

Подставив выражения (6), (8) в (9) и выполнив интегрирование, получим

$$q_{n1}(\tau) = \frac{U_{nop}}{2\delta} \cos(\omega_0(\tau - \tau_0) + \varphi_n - \varphi_{on}) \times (1 - e^{-\delta(\tau + t_u - \tau_0)}). \quad (10)$$

Определяем корреляционный интеграл (7) для случая $\tau \geq \tau_0$ (рис. 2, б)

$$q_{n2}(\tau) = \int_{\tau}^{\tau + t_u} S_{on}(t - \tau) \cdot S_n(t - \tau_0) dt. \quad (11)$$

После интегрирования получим

$$q_{n2}(\tau) = \frac{U_{nop}}{2\delta} \cos(\omega_0(\tau - \tau_0) + \varphi_n - \varphi_{on}) \times e^{-\delta(\tau - \tau_0)} (1 - e^{-\delta t_u}). \quad (12)$$

Для обоих случаев максимальное значение помехи на выходе коррелятора достигается при $\tau = \tau_0$ и $\varphi_n = \varphi_{on}$

$$q_{n \max} = \frac{U_{nop}}{2\delta} (1 - e^{-\delta t_u}). \quad (13)$$

Определим сигнал на выходе коррелятора при воздействии сигнала контроля рельсовой линии

$$S_c(t - \tau_c) = U_c \sin(\omega_0(t - \tau_c) + \varphi_c), |t - \tau_c| \leq t_u/2, (14)$$

где U_c , φ_c – амплитуда и фаза сигнала; τ_c – время появления сигнала. Для этого находим взаимокорреляционную функцию сигнала контроля рельсовой линии и опорного сигнала

$$q_c(\tau) = \int_0^T S_{on}(t - \tau) \cdot S_c(t - \tau_c) dt. (15)$$

Рассматривая отдельно случаи $\tau \leq \tau_c$, $\tau \geq \tau_c$ и проводя интегрирование по областям, в которых подынтегральное выражение (15) отлично от нуля, получим

$$q_c(\tau) = \frac{U_c t_u}{2} \cos(\omega_0(\tau - \tau_c) + \varphi_c - \varphi_{on}) \times \left(1 - \frac{|\tau - \tau_c|}{t_u}\right), |\tau - \tau_c| \leq t_u. (16)$$

Максимальное значение сигнала на выходе коррелятора достигается при $\tau = \tau_c$ и $\varphi_c = \varphi_{on}$

$$q_{c \max} = \frac{U_c t_u}{2}. (17)$$

Как правило, пороговый уровень амплитудного ограничителя выбирается равным максимально возможному уровню полезного сигнала. Поэтому можно считать, что $U_{пор} \approx U_c$, то есть амплитуды помехи и сигнала на входе коррелятора совпадают. При этом отношение амплитуд сигнала и импульсной помехи на выходе коррелятора равняется

$$\frac{q_{c \max}}{q_{n \max}} = \frac{\delta t_u}{1 - e^{-\delta t_u}} = \frac{\pi \Delta f t_u}{1 - e^{-\pi \Delta f t_u}}, (18)$$

где $\Delta f = \delta/\pi$ – полоса пропускания широкополосного фильтра. На рис. 3 показана зависимость отношения сигнал/помеха от полосы пропускания широкополосного фильтра при несущей частоте 480 Гц и модулирующей частоте 12 Гц. Так как произведение δt_u значительно выше единицы, то данная зависимость является практически линейной.

Таким образом, чем больше полоса пропускания широкополосного фильтра, тем более эффективным является применение схемы ШОУ для подавления импульсных помех. С другой стороны увеличение полосы пропускания входного фильтра приводит к расширению спектра синусоидальных помех, попадающих на амплитудный ограничитель, что повышает вероятность появления «опасных» комбинационных частот.

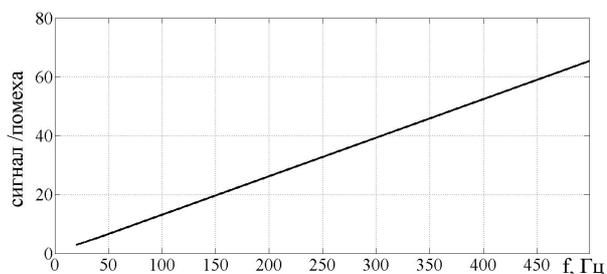


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал / импульсная помеха на выходе коррелятора от полосы пропускания широкополосного фильтра

Имитационное моделирование

Для исследования эффективности схемы ШОУ было проведено имитационное моделирование в среде Matlab. Проводился сравнительный анализ помехоустойчивости трех вариантов построения путевого приемника ТРЦ:

- 1) использование одного входного узкополосного фильтра как в существующих приемниках ТРЦ;
- 2) использование схемы ШОУ;
- 3) использование схемы ШОУ с коррелятором в качестве узкополосного фильтра.

Моделирование проводилось для путевого приемника, настроенного на несущую частоту 480 Гц. Цифровая модель входного узкополосного фильтра была синтезирована с помощью программы FDATool пакета Matlab в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [9]. Параметры модели узкополосного фильтра:

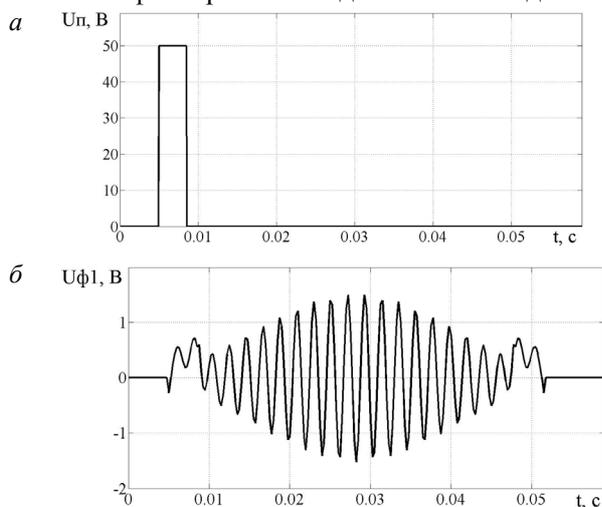
- тип – КИХ-фильтр;
- порядок – 86;
- частота дискретизации – 2 кГц;
- полоса пропускания по уровню 3 дБ – (468-492) Гц;
- коэффициент передачи на несущей частоте – 1;
- полоса задерживания – < 444 Гц, > 516 Гц;
- затухание в полосе задерживания – > 38 дБ.

В работе [10] проводились исследования импульсных помех, создаваемых электровозом постоянного тока 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.). Авторы работы [10] получили следующие оценки параметров помех: амплитуда зафиксированных импульсных помех находилась в диапазоне от -47 до 51 В, математи-

ческое ожидание длительности помех составило 3,52 мс, дисперсия длительности помех – 17,01 мс², математическое ожидание межимпульсных интервалов – 171,7 мс, дисперсия межимпульсных интервалов – 0,2034 с².

В качестве тестовой помехи в данной работе использовался одиночный кратковременный импульс амплитудой 50 В и длительностью 3,5 мс (рис. 4, а). На рис. 4, б показан результат воздействия такой помехи на узкополосный фильтр с полосой пропускания 24 Гц. Амплитуда помехи на выходе фильтра составляет 1,78 В.

На следующем этапе моделирования исследовалась помехоустойчивость схемы ШОУ. Для этого разработанная ранее модель узкополосного фильтра была дополнена моделями



широкополосного фильтра и амплитудного ограничителя. В качестве широкополосного фильтра применялся колебательный контур с передаточной функцией [7]

$$K(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \Delta\omega p + \omega_0^2}, \quad (19)$$

где ω_0 – частота резонанса контура; $\Delta\omega$ – полоса пропускания контура. Моделирование выполняли для контура с частотой резонанса 480 Гц и полосой пропускания 100 Гц. При такой полосе широкополосный фильтр обеспечивает надежное подавление гармоник тягового тока и выполняет предварительное подавление сигналов соседних рельсовых цепей.

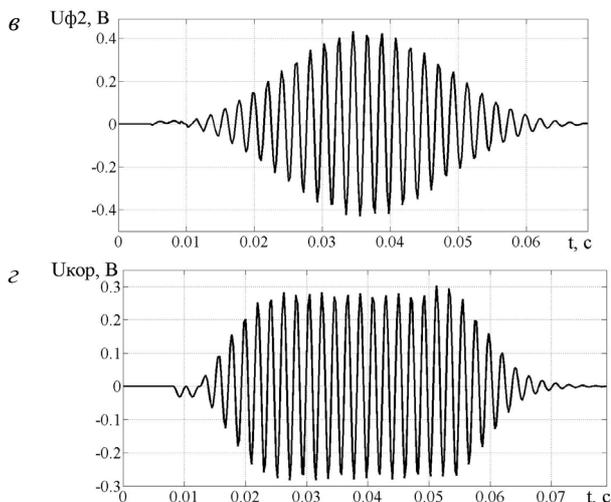


Рис. 4. Временные диаграммы сигналов: а – тестовая помеха; б – подавление помехи обычным фильтром; в – подавление помехи схемой ШОУ; г – подавление помехи схемой ШОУ с коррелятором

С помощью билинейного преобразования функции (19) была получена передаточная функция цифровой модели контура

$$K(z) = \frac{0,1164z^2 + 0,2329z + 0,1164}{z^2 - 1,406z + 0,8713}. \quad (20)$$

Пороговый уровень ограничителя был выбран равным уровню сигнала КРЛ на выходе колебательного контура. В схему ШОУ также был введен нормирующий усилитель, обеспечивающий коэффициент передачи схемы на несущей частоте, равным единице. На рис. 4, в показан сигнал на выходе схемы ШОУ при воздействии тестовой помехи. Амплитуда такого сигнала составляет 0,43 В. Таким образом, схема ШОУ позволила повысить отношение сигнал / помеха в 4,1 раз по сравнению с обычным узкополосным фильтром.

На третьем этапе проводилось исследование схемы ШОУ, в которой в качестве узкополосного фильтра использовался коррелятор. С по-

мощью нормирующего усилителя коэффициент передачи такой схемы на несущей частоте также подбирался равным единице. Результат воздействия тестовой помехи показан на рис. 4, г. Амплитуда сигнала составляет 0,3 В, т.е. схема ШОУ с коррелятором позволила повысить отношение сигнал / помеха в 5,9 раз по сравнению с узкополосным фильтром.

Выводы

1. Применение амплитудных ограничителей на входе путевого приемника тональных рельсовых цепей позволяет подавить импульсные помехи. Однако аддитивная смесь гармоник тягового тока и сигналов соседних рельсовых цепей приводит к появлению на выходе ограничителя комбинационных частот, которые могут попасть в полосу пропускания входного фильтра приемника и привести к сбою в работе рельсовой цепи.

2. Схема «широкополосный фильтр – огра-

ничитель – узкополосный фильтр» позволяет не только подавить импульсные помехи, но и ограничить спектр гармонических помех, уменьшая вероятность появления «опасных» комбинационных частот. При полосе пропускания широкополосного фильтра 100 Гц схема ШОУ позволяет повысить отношение сигнал / импульсная помеха в 4,1 раз по сравнению с обычным узкополосным фильтром.

3. В качестве узкополосного фильтра в схеме ШОУ целесообразно использовать коррелятор. При этом отношение сигнал / импульсная помеха зависит практически прямо пропорционально от полосы пропускания широкополосного фильтра. При полосе пропускания 100 Гц схема ШОУ с коррелятором позволяет повысить отношение сигнал / импульсная помеха в 5,9 раз по сравнению с узкополосным фильтром.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями [Текст] : учеб. пособие / Н. Е. Федоров. – Самара: СамГАПС, 2004. – 132 с.
2. 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.
3. Фомин, А. Ф. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи [Текст] / А. Ф. Фо-

- мин, Ю. В. Ваванов. – М.: Транспорт, 1987. – 295 с.
4. Каллер, М. Я. Теоретические основы транспортной связи [Текст] / М. Я. Каллер, А. Ф. Фомин. – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.
5. Гусев, В. Г. Электроника: учебное пособие [Текст] / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
6. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений [Текст] / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
7. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
8. Гончаров, К. В. Корреляционный путевой приемник тональных рельсовых цепей [Текст] / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 188-193.
9. Методичні вказівки з експлуатації тональних рейкових кіл [Текст]: керівний нормативний документ «Укрзалізниці», ЦШ/0034 : Затв.: Наказ «Укрзалізниці» від 23.02.2004 №030-Ц. – К.: Мінтранс України, 2004. – 48 с.
10. 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.

Поступила в редколлегию 11.11.2011.

Принята к печати 14.11.2011.

ГОНЧАРОВ К. В. (ДІПТ)

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ТОНАЛЬНИХ РЕЙКОВИХ КІЛ ВІД ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

В роботі проведений аналіз різних методів зменшення імпульсних завад, досліджені особливості їх застосування в колійних приймачах тональних рейкових кіл. Результати імітаційного модулювання показали високу завадостійкість системи «широкопasmовий фільтр – обмежувач – корелятор».

Ключові слова: Тональні рейкові кола, колійний приймач, імпульсні завади, смуговий фільтр, смуга пропускання фільтру, корелятор, амплітудний обмежувач

GONCHAROV K. V. (DNURT)

METHODS OF PROTECTION OF TONE RAIL CIRCUITS FROM INFLUENCE OF PULSE INTERFERENCE

In paper the various methods for suppressing pulse interference have been analyzed, the features of their application in the track receivers of tone rail circuits have been investigated. Simulation results showed a high noise immunity of the system «broadband filter – limiter – correlator».

Keywords: Tone rail circuits, track receiver, pulse interference, bandpass filter, the bandwidth of the filter, correlator, amplitude limiter