

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ПУТЕВОГО ПРИЕМНИКА ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

В роботі показано доцільність використання цифрової обробки сигналів у колійних приймачах тональних рейкових кіл. На підставі результатів спектрального аналізу сигнального струму тональних рейкових кіл, а також з врахуванням діючих нормативів сформульовано вимоги до частотних характеристик цифрових фільтрів для колійного приймача, проведено синтез таких фільтрів. Імітаційне моделювання синтезованого цифрового приймача підтвердило його відповідність вимогам існуючих відомчих нормативних документів.

*Ключові слова:* тональні рейкові кола, колійний приймач, цифровий сигнальний процесор, спектр сигналу, амплітудно-частотна характеристика, імітаційне моделювання

В работе показана целесообразность использования цифровой обработки сигналов в путевых приемниках тональных рельсовых цепей. На основании результатов спектрального анализа сигнального тока тональных рельсовых цепей, а также с учетом действующих нормативов сформулированы требования к частотным характеристикам цифровых фильтров для путевого приемника, проведен синтез таких фильтров. Имитационное моделирование синтезированного цифрового приемника подтвердило его соответствие требованиям существующих ведомственных нормативных документов.

*Ключевые слова:* тональные рельсовые цепи, путевой приемник, цифровой сигнальный процессор, спектр сигнала, амплитудно-частотная характеристика, имитационное моделирование

In the paper the practicability of using the digital signal processing in track receivers of the tone track circuits is shown. On the basis of spectral analysis results of the signal current of the tone track circuits, as well as with taking the acting standards into account, the requirements to frequency features of digital filters for the track receiver are formulated, and the syntheses of such filters are conducted. A simulation modeling of the synthesized digital receiver has confirmed its correspondence to the requirements of existing departmental normative documents.

*Keywords:* tonal track circuits, track receiver, digital signal processor, signal spectrum, amplitude-frequency characteristic, simulation

### Введение

Безопасность движения поездов и эффективность перевозочного процесса во многом зависят от надежности и функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Базовым элементом таких систем являются рельсовые цепи, выполняющие ответственные функции путевых датчиков и телемеханических каналов.

В настоящее время на сети железных дорог Украины достаточно широко применяются рельсовые цепи тональной частоты (ТРЦ), причем количество участков оборудованных ТРЦ постоянно увеличивается. Использование сигнального тока тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность и ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, в несколько раз снизить потребляемую мощность, осуществить централизованное размещение аппаратуры. Кроме этого, использование ТРЦ позволяет исключить изолирующие стыки, благодаря чему обеспечивается возможность применения цельносварных рельсовых плетей, обеспечивается электрическая непрерывность цепи возврата тягового тока, сокра-

щается число используемых дроссель-трансформаторов [1, 2].

Одним из наиболее ответственных элементов ТРЦ является путевой приемник, который выполняет фильтрацию и демодуляцию амплитудно-манипулированного (АМ) сигнала, полученного из рельсовой линии, а также управляет путевым реле в соответствии с уровнем полученного сигнала. Путевой приемник содержит входной полосовой фильтр, настроенный на несущую частоту сигнального тока, и два полосовых фильтра модулирующей частоты. В существующих путевых приемниках полосовые фильтры строятся на базе колебательных  $LC$ -контуров, причем входной фильтр содержит две пары связанных  $LC$ -контуров. Настройка таких фильтров представляет собой сложный и трудоемкий процесс, который выполняется работниками ремонтно-технологического участка (РТУ) в соответствии с методикой, изложенной в [3].

Для защиты ТРЦ от взаимного влияния применяется чередование несущих и модулирующих частот. При этом для каждой комбинации частот используется свой тип путевого приемника, который отличается типами транс-

форматоров и емкостями конденсаторов в колебательных контурах. Так в тональных рельсовых цепях третьего поколения (ТРЦ3) применяются пять несущих частот (420 Гц, 480 Гц, 580 Гц, 720 Гц, 780 Гц) и две модулирующие частоты (8 Гц, 12 Гц), которым соответствуют десять типов путевых приемников. В рельсовых цепях четвертого поколения (ТРЦ4) несущие частоты составляют 4545 Гц, 5000 Гц и 5555 Гц, а модулирующие – 8 и 12 Гц, что соответствует шести типам путевых приемников.

Современный уровень развития цифровых сигнальных процессоров позволяет строить на их основе надежные устройства, выполняющие довольно сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, в том числе алгоритмы цифровой фильтрации. Характеристики цифрового фильтра зависят от значения коэффициентов фильтра, которые хранятся в памяти сигнального процессора [4, 5]. Изменяя данные коэффициенты можно выполнять регулировку фильтра.

Использование цифровой обработки сигналов в путевых приемниках ТРЦ позволит значительно упростить технологию обслуживания таких устройств. При этом обеспечивается возможность применения только одного типа унифицированного перепрограммируемого путевого приемника. Построение приемников ТРЦ на базе сигнальных процессоров позволит также расширить их функциональные возможности: использовать адаптивные алгоритмы обработки сигналов, функции самотестирования, диагностики и др. Кроме этого, избирательность цифровых фильтров, зависит от их порядка. Увеличивая порядок цифровых фильтров, можно построить путевой приемник, селективность и помехозащищенность которого гораздо выше, чем в существующих путевых приемниках с аналоговыми *LC*-фильтрами.

Вопросы построения цифровых путевых приемников ТРЦ рассмотрены в работах [6 – 8]. Однако основное внимание в этих работах уделено безопасности программного обеспечения микропроцессорного приемника ТРЦ. Кроме этого, предложенная математическая модель построена только для случая, когда на вход приемника поступает немодулированный синусоидальный сигнал. Перспективность использования цифровой обработки сигналов для повышения надежности рельсовых цепей показана также в работе [9].

### Цель работы

Целью данной работы является синтез цифровых фильтров для построения путевого приемника тональных рельсовых цепей, исследо-

вание синтезированного цифрового приемника с помощью имитационного моделирования.

### Структура путевого приемника тональных рельсовых цепей

Структурная схема путевого приемника тональных рельсовых цепей представлена на рис. 1. Такой приемник относится к классу приемников прямого усиления [10] и содержит следующие функциональные узлы [1, 2]: входной фильтр (ВФ), демодулятор (ДМ), амплитудный ограничитель (АО), первый фильтр частоты модуляции (ФМ), пороговый элемент (ПЭ), выходной усилитель (ВУ), второй фильтр частоты модуляции ( $C_{\phi}$ , Тр), выпрямитель.

Входной фильтр выделяет амплитудно-модулированный сигнал с частотой несущей, соответствующей настройке фильтра, и подавляет сигналы с другими несущими частотами, сигналы АЛС и гармоники тягового тока. С помощью демодулятора и первого фильтра модулирующей частоты из полученного амплитудно-модулированного колебания выделяется сигнал с частотой модуляции. Включение амплитудного ограничителя перед фильтром позволяет повысить защищенность приемника от гармоник тягового тока. Если уровень сигнала на выходе фильтра превышает заданное граничное значение, то на выходе порогового элемента формируется последовательность прямоугольных импульсов с частотой модуляции, которая усиливается выходным усилителем и через второй фильтр частоты модуляции и выпрямитель поступает на путевое реле, приводя к его срабатыванию.

Безопасность данного путевого приемника обеспечивается за счет динамического режима работы всех его элементов. Срабатывание путевого реле происходит только в случае появления на выходе усилителя сигнала с частотой модуляции. Статические отказы различных узлов приемника не приводят к ложному срабатыванию реле.

Рассмотрим возможность использования цифровой обработки сигналов в данном путевом приемнике. Фильтры ВФ и ФМ могут быть реализованы на цифровом сигнальном процессоре (ЦСП) с помощью алгоритмов цифровой фильтрации. Операция амплитудного ограничения может быть запрограммирована с помощью команд сравнения и условных переходов: если входная переменная не превышает заданное граничное значение, то переменная не изменяется, в противном случае переменной присваивается граничное значение. Аналогично, можно реализовать функцию, выполняемую пороговым элементом.

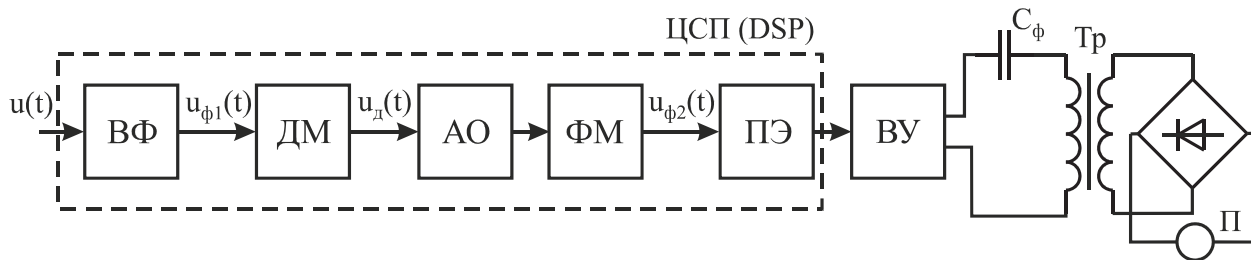


Рис. 1. Структурная схема путевого приемника тональных рельсовых цепей

Существующие амплитудные демодуляторы [10] состоят из нелинейного элемента (диода или транзистора), с помощью которого двухполярный амплитудно-модулированный сигнал преобразуется в однополярный, и фильтра низких частот. Таким образом, демодулятор выполняет нелинейное преобразование АМ сигнала, изменяющее его спектр. В результате этого в спектре сигнала появляется составляющая модулирующей частоты, которая выделяется с помощью фильтра низких частот. При выполнении цифровой обработки в качестве такого нелинейного преобразования можно использовать команду нахождения абсолютного значения величины. В этом случае, также как в схемах диодных и транзисторных детекторов, будет выполняться преобразование двухполярного сигнала в однополярный. При этом в качестве низкочастотного фильтра для выделения сигнала модулирующей частоты можно использовать фильтр ФМ (см. рис. 1). На рис. 2 показаны низкочастотные составляющие спектра модуля амплитудно-модулированного сигнала. Такой спектр был определен численно с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье при частоте несущей 480 Гц и частоте модуляции 12 Гц. Как видно из рис. 2, после выполнения операции «абсолютное значение» в спектре АМ сигнала появляется составляющая модулирующей частоты 12 Гц, а также ее гармоники.

Таким образом, функциональные узлы ВФ, ДМ, АО, ФМ и ПЭ можно реализовать на базе цифрового сигнального процессора, который будет обрабатывать цифровой поток, полученный с помощью аналого-цифрового преобразователя из входного АМ сигнала. При соответствующих параметрах АМ сигнала (уровне, частоте несущей и частоте модуляции) на выходе ЦСП будет формироваться последовательность прямоугольных импульсов с частотой модуляции, которая через выходной усилитель, фильтр  $C_\phi$ , Тр и выпрямитель поступит на путевое реле, приводя к его срабатыванию.

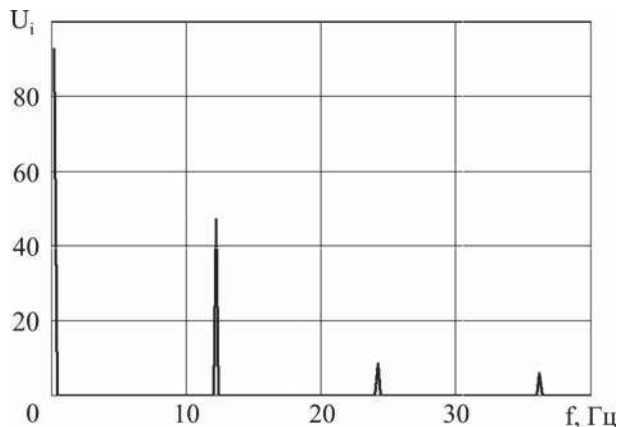


Рис. 2. Низкочастотные составляющие спектра модуля амплитудно-модулированного сигнала

#### Исследование спектра сигнального тока тональных рельсовых цепей

Для формулировки требований к частотной характеристике синтезируемого входного фильтра путевого приемника проанализируем спектр сигнального тока ТРЦ. На вход приемника поступает сигнал:

$$u(t) = A_0 \cdot u_m(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A_0$  – амплитуда сигнала,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – несущая частота,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $u_m(t)$  – модулирующий сигнал, который изображен на рис. 3 и описывается выражением

$$u_m(t) = \begin{cases} 1, & t_{и}(2i-1/2) \leq t < t_{и}(2i+1/2); \\ 0, & t_{и}(2i+1/2) \leq t < t_{и}(2i+3/2), \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_{и}$  – длительность сигнального импульса,  $i = 0, 1, 2, \dots$

Т.к. сигнал  $u_m(t)$  является периодическим (см. рис. 3), его можно разложить в ряд Фурье [11]:

$$u_m(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\Omega t) + b_k \sin(k\Omega t)], \quad (3)$$

где  $\Omega = 2\pi F$ ,  $F$  – частота модулирующего сигнала. Определим коэффициенты ряда Фурье:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} u_m(t) dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_n}{2}}^{+\frac{t_n}{2}} dt = \frac{2t_n}{T}, \quad (4)$$

где  $T$  – период модулирующего сигнала. Т.к. скважность модулирующих импульсов равна двум, т.е.  $T = 2t_n$ , то  $a_0 = 1$ .

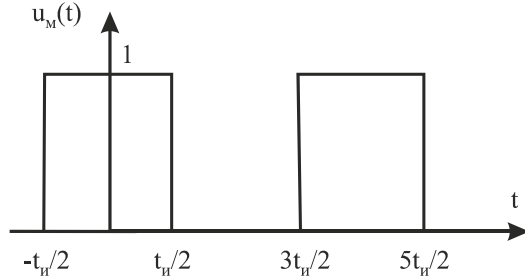


Рис. 3. Временная диаграмма модулирующего сигнала

Определим коэффициенты  $a_k$ :

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} u_m(t) \cos(k\Omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_n}{2}}^{+\frac{t_n}{2}} \cos(k\Omega t) dt. \quad (5)$$

После упрощения, учитывая, что  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ , получим:

$$a_k = \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2}. \quad (6)$$

Определим коэффициенты  $b_k$ :

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} u_m(t) \sin(k\Omega t) dt. \quad (7)$$

Т.к. сигнал  $u_m(t)$  представляет собой четную функцию (см. рис. 3), то коэффициенты  $b_k$  равняются нулю. Подставляя выражения (4) и (6) в (3), получим

$$u_m(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \cos(k\Omega t) \right]. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в (1), после упрощения получим

$$\begin{aligned} u(t) = & \frac{A_0}{2} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \\ & + \frac{A_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \cos[(2\pi f_0 + 2\pi kF)t + \varphi_0] + \\ & + \frac{A_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \cos[(2\pi f_0 - 2\pi kF)t + \varphi_0]. \quad (9) \end{aligned}$$

На рис. 4 изображен спектр амплитудно-манипулированного сигнала, построенный в соответствии с выражение (9). Как видно, спектр сигнального тока ТРЦ содержит несущую частоту амплитудой  $A_0/2$ , а также верхнюю и нижнюю боковые полосы, состоящие только из нечетных гармоник.

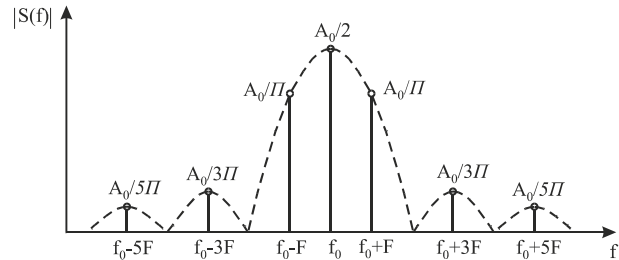


Рис. 4. Спектр амплитуд сигнального тока тональных рельсовых цепей

### Синтез цифровых фильтров

Цифровые фильтры делятся на фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) и фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ) [4, 5]. В БИХ-фильтрах возможна потеря устойчивости, что делает неприемлемым их использование для построения ответственных устройств – путевых приемников ТРЦ.

Алгоритм работы КИХ-фильтра описывается разностным уравнением [5]:

$$y(nT) = \sum_{l=0}^N b_l x(nT - lT), \quad (10)$$

где  $x(nT)$  и  $y(nT)$  –  $n$ -е отсчеты входного и выходного сигналов фильтра,  $b_l$  – коэффициенты фильтра,  $N$  – порядок фильтра. Таким образом, алгоритм цифровой фильтрации предполагает выполнение трех операций: задержку (запоминание) информации, умножение и сложение. Количество таких операций зависит от порядка фильтра. Для построения фильтра необходимо определить значение всех его коэффициентов.

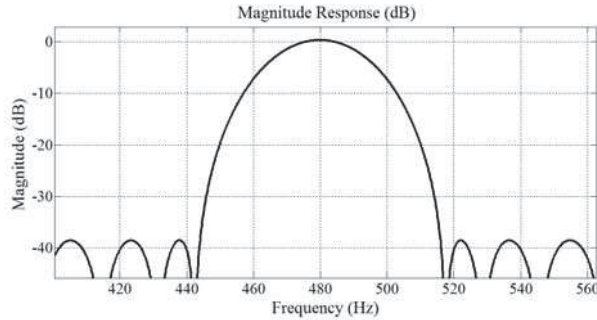
Входной фильтр путевого приемника должен выделять несущую частоту и первые гармоники модулирующей частоты. Исходя из спектра АМ сигнала (см. рис. 4), ширина полосы пропускания входного фильтра должна быть не менее  $2F$ . В тоже время, согласно [3], затухание сигналов соседних каналов должно составлять не менее 38 дБ.

С помощью программы Filter Design & Analysis Tool (FDATool) пакета MathLab был синтезирован входной фильтр путевого приемника для несущей частоты 480 Гц и частоты модуляции 12 Гц. Параметры фильтра:

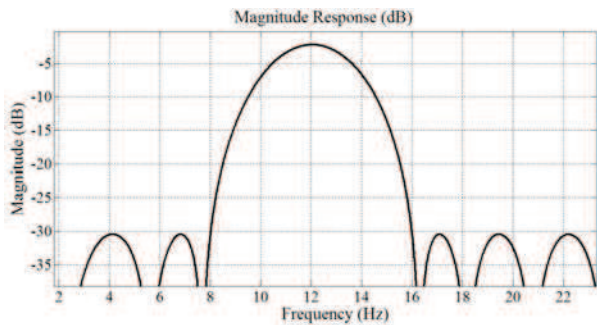
- тип – КИХ-фильтр;

- порядок – 86;
- частота дискретизации – 2 кГц;
- полоса пропускания по уровню 3 дБ – (468...492) Гц;
- полоса задерживания – < 444 Гц, > 516 Гц;
- затухание в полосе задерживания – > 38 дБ.

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра представлена на рис. 5, а.



а)



б)

Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика синтезированных цифровых фильтров:

а – входной фильтр; б – фильтр модулирующей частоты

Фильтр ФМ должен выделять из спектра демодулированного АМ сигнала (см. рис. 2) составляющую модулирующей частоты и надежно подавлять модулирующий сигнал соседних каналов. В существующих путевых приемниках в качестве такого фильтра применяется колебательный контур с добротностью равной шести [1]. Таким образом, при модулирующей частоте 12 Гц полоса пропускания фильтра составляет 2 Гц.

С помощью программы FDATool был синтезирован фильтр модулирующей частоты 12 Гц с такими параметрами:

- тип – КИХ-фильтр;
- частота дискретизации – 2 кГц;
- полоса пропускания по уровню 3 дБ – (11...13) Гц;
- полоса задерживания – < 8 Гц, > 16 Гц;
- затухание в полосе задерживания – > 30 дБ.

Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра представлена на рис. 5, б.

### Результаты имитационного моделирования

Для исследования цифрового путевого приемника ТРЦ было проведено имитационное моделирование с помощью программы Simulink пакета MathLab. В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1, была построена модель цифровой части путевого приемника. Моделирование проводилось при частоте несущей 480 Гц, частоте модуляции 12 Гц и амплитуде входного АМ сигнала 1 В. В качестве фильтров ВФ и ФМ были использованы модели цифровых фильтров, синтезированные с помощью программы FDATool (см. рис. 5). На рис. 6 представлены полученные в результате моделирования временные диаграммы сигналов после фильтрации и демодуляции АМ сигнала. Следует отметить, что реальный сигнальный процессор оперирует не уровнями сигнала, представленными в вольтах, а цифровыми отсчетами сигнала, представленными в двоичной системе счисления.

В соответствии с существующими ведомственными нормативными документами [3] при свободной и исправной ТРЦ напряжение на выходе путевого приемника составляет не менее 4,2 В, а при поступлении на вход приемника сигнала соседнего канала – не более 0,1 В. Таким образом, затухание сигналов соседних каналов должно составлять не менее 32,5 дБ. Представленные в табл. 1 результаты моделирования цифрового путевого приемника подтверждают его соответствие данным требованиям.

Таблица 1

Результаты исследования цифрового путевого приемника

Измеряемый параметр	Несущая / модулирующая частота, Гц					
	420/8	420/12	480/8	480/12	580/8	580/12
Амплитуда сигнала на выходе фильтра ФМ, мВ	1,1	1,4	4,2	230	0,9	1,9
Затухание сигналов соседних каналов, дБ	46,4	44,3	34,8	–	48,1	41,7

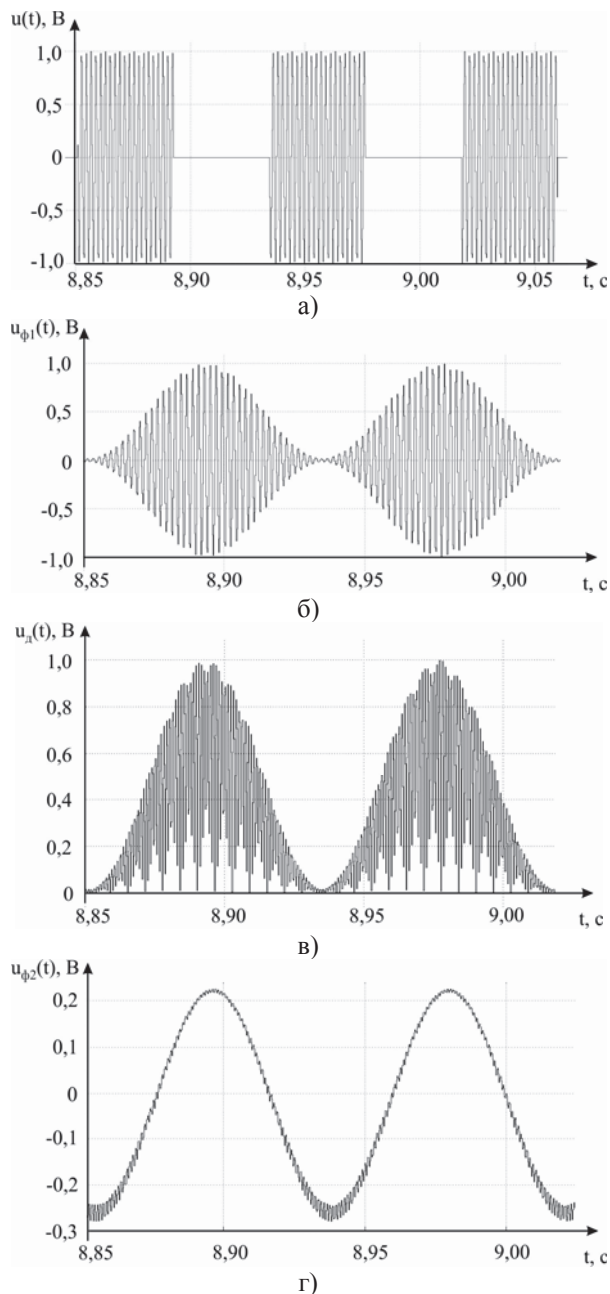


Рис. 6. Временные диаграммы напряжений:  
 а – на входе путевого приемника; б – на выходе первого фильтра; в – на выходе нелинейного элемента;  
 г – на выходе фильтра модулирующей частоты

### Выводы

В данной работе показана целесообразность использования цифровой обработки сигналов в путевых приемниках тональных рельсовых цепей. На основании спектрального анализа сигнального тока ТРЦ, с учетом существующих нормативных документов, сформулированы требования к частотным характеристикам цифровых фильтров для путевого приемника. С помощью программы FDATool пакета MathLab выполнен синтез таких фильтров. Проведенное имитационное моделирование показало, что

характеристики синтезированного цифрового приемника соответствуют характеристикам существующих путевых приемников.

### 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. Кулик, П. Д. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл [Текст] : керівний нормативний документ «Укрзалізниця», ЦШ 0041 : Затв.: Наказ «Укрзалізниця» № 745-ЦЗ від 26.12.2005 / П. Д. Кулик, О. О. Удовіков, В. І. Басов. – К.: Мінтранс'язку України, 2006. – 236 с.
4. Сперанский, В. С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники [Текст] / В. С. Сперанский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 168 с.
5. Цифровые фильтры в электросвязи и радиотехнике [Текст] / под ред. Л. М. Гольденберга. – М.: Радио и связь, 1982. – 224 с.
6. Чепцов, М. М. Методи синтезу сигнально-процесорної централізації стрілок і сигналів [Текст] : монографія / М. М. Чепцов, А. Б. Бойнік, Д. М. Кузьменко. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 181 с.
7. Чепцов, М. Н. Безопасность программного обеспечения микропроцессорных тональных рельсовых цепей [Текст] / М. Н. Чепцов // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк, 2006. – № 4. – С. 54-61.
8. Чепцов, М. Н. Безопасность программного обеспечения приемника прямого преобразования тональных рельсовых цепей [Текст] / М. Н. Чепцов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 1. – С. 19-22.
9. О повышении надежности рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигналов [Текст] / А. П. Разгонов [и др.] // Тезисы IV Межд. науч.-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте», пгт. Чинадиево. – Д.: ДИИТ, 2011. – С. 65-66.
10. Изюмов, Н. М. Основы радиотехники [Текст] / Н. М. Изюмов, Д. П. Линде. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
11. Теория электрической связи [Текст] / под ред. К. К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2010.  
 Принята к печати 22.11.2010.