

# АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.12:656.256.3

К. В. ГОНЧАРОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта goncharov\_k@inbox.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

**Цель.** Поиск новых методов анализа тональных рельсовых цепей, определение формы сигнала контроля рельсовой линии на входе путевого приемника. **Методика.** Для исследования переходных процессов применялся метод частотных характеристик. С помощью быстрого преобразования Фурье определялся спектр сигнала на выходе путевого генератора. После определения комплексной частотной характеристики тональной рельсовой цепи рассчитывался спектр сигнала на входе путевого приемника. При этом использовались полученные в результате интерполяции нормативных значений частотные характеристики первичных параметров рельсовой линии, а также рассчитанная частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника. Для определения временной зависимости сигнала на входе приемника применялось обратное быстрое преобразование Фурье. **Результаты.** В результате выполненных исследований были установлены причины искажения формы сигналов в тональных рельсовых цепях. Путевой фильтр, а также входной фильтр путевого приемника ограничивают верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала контроля рельсовой линии, что приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов. Рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнальных импульсов и изменяют только их амплитуду. При воздействии фронта и среза сигнальных импульсов в связанных контурах приемника на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, в результате интерференции которых происходят биения и появляется дополнительный межсигнальный импульс. **Научная новизна.** Усовершенствован метод анализа тональных рельсовых цепей, что позволяет определить не только уровень, но и временную зависимость сигнала на входе путевого приемника при произвольном входном воздействии. **Практическая значимость.** Полученная временная зависимость сигнала на входе путевого приемника будет полезна при разработке новых более совершенных методов определения свободы тональной рельсовой цепи. Предложенный метод анализа рельсовых цепей может быть использован для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

**Ключевые слова:** тональные рельсовые цепи; путевого приемник; переходные процессы; комплексная частотная характеристика; спектр; искажения

### Введение

Рельсовые цепи (РЦ) представляют собой непрерывные путевые датчики, выполняющие ответственные функции контроля свободы путевых участков и целостности рельсовых ни-

тей. От надежности и функциональной безопасности таких датчиков во многом зависит безопасность движения поездов. Рельсовая цепь применяется также в качестве телемеханического канала для передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС).

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В настоящее время широкое распространение получили тональные рельсовые цепи (ТРЦ), благодаря своим эксплуатационным, техническим и экономическим преимуществам. Использование сигнального тока тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность, ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, снизить потребляемую мощность. Кроме этого, в ТРЦ обеспечивается возможность исключить ненадежные изолирующие стыки и уменьшить число дроссель-трансформаторов [6, 12, 17].

В существующих ТРЦ применяется электронный путевой приемник, в котором в качестве полосовых фильтров используются связанные колебательные контуры. Настройка такого приемника представляет собой сложный и трудоемкий процесс [5]. Каждой комбинации несущей и модулирующей частот сигнального тока соответствует свой тип путевого приемника, который отличается типами трансформаторов и емкостями конденсаторов в колебательных контурах.

Одно из направлений дальнейшего совершенствования рельсовых цепей связано с цифровыми методами обработки сигналов контроля рельсовой линии (КРЛ) [2, 3, 8, 13]. Применение современных микропроцессорных средств для построения ТРЦ позволит получить универсальный перепрограммируемый путевой приемник для любых комбинаций несущих и модулирующих частот. В таком приемнике основная обработка сигнала КРЛ будет выполняться программно. Это позволит упростить его настройку, а также даст возможность выполнять более совершенные алгоритмы обработки сигналов, реализация которых на аналоговой элементной базе была затруднительной или принципиально невозможной.

Путевой приемник ТРЦ решает задачу обнаружения сигнала КРЛ на фоне помех, создаваемых тяговым током, смежными рельсовыми цепями, а также сигналами АЛС. Повысить помехозащищенность приемника можно, используя статистические методы обработки сигналов [3, 7]. Для этого необходима информация как о форме и параметрах полезного сигнала на входе приемника, так и о типах и параметрах помех. В работах [9, 14–16] приведены результаты исследования электромагнитного влияния тяговой сети на работу рельсовых цепей, полу-

чены параметры помех, создаваемых тяговым током.

В тональных рельсовых цепях применяются амплитудно-манипулированные сигналы КРЛ. При передаче каждого сигнального импульса в ТРЦ происходит переход от одного установившегося состояния к другому, то есть переходный процесс, в результате которого форма импульса искажается. Существующая методика позволяет рассчитать рельсовую цепь и найти уровень сигнала на входе приемника только в установившемся состоянии на нескольких фиксированных частотах, для которых известны нормативные значения первичных параметров рельсовой линии и других элементов РЦ [1, 6, 10]. С помощью такой методики нельзя исследовать переходный процесс в ТРЦ и невозможно определить форму сигнала на входе путевого приемника. В то же время для разработки более совершенных методов обнаружения сигнала КРЛ необходимо знать его форму.

### Цель

Целью данной работы является поиск новых методов анализа тональных рельсовых цепей, определение формы сигнала контроля рельсовой линии на входе путевого приемника.

### Методика

Существует несколько режимов работы рельсовой цепи [1, 6]. В нормальном режиме контролируемый участок свободен и рельсовые линии не повреждены. При занятии участка подвижным составом рельсовая цепь переходит в шунтовой режим, а при изломе рельсовых нитей – в контрольный. Кроме этого, выделяют режим АЛС, при котором уровень сигнального тока должен быть достаточным для надежной работы АЛС, и режим короткого замыкания, при котором поездной шунт расположен в месте подключения генератора к рельсовой линии.

Расчет рельсовой цепи в нормальном режиме выполняется с помощью схемы замещения, содержащей три каскадно включенных четырехполюсника (рис. 1). Четырехполюсник РЛ замещает рельсовую линию, а четырехполюсники Н и К – кабельные линии, а также устройства защиты и согласования на передающем и приемном конце РЦ соответственно. К рельсовой цепи подключается путевой генератор

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

с выходным напряжением  $U_r$ , а также путевой приемник с входным сопротивлением  $Z_{\text{пн}}$ .



Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи в нормальном режиме

Каждый четырехполюсник можно описать с помощью параметров  $A, B, C, D$ , которые связывают входные ( $\dot{U}_1, \dot{I}_1$ ) и выходные ( $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ ) напряжения и токи [1, 6]

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{cases} \quad (1)$$

Матрица коэффициентов общего четырехполюсника РЦ определяется путем перемножения матриц четырехполюсников Н, РЛ, К

$$\begin{bmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{\text{см1}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{\text{см2}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $A_n, B_n, C_n, D_n$  – параметры четырехполюсника Н;  $A, B, C, D$  – параметры четырехполюсника рельсовой линии;  $A_k, B_k, C_k, D_k$  – параметры четырехполюсника К;  $Z_{\text{см1}}, Z_{\text{см2}}$  – входные сопротивления смежных рельсовых линий (учитываются при отсутствии изолирующих стыков).

Расчет рельсовой цепи в шунтовом режиме выполняется с помощью схемы замещения, представленной на рис. 2. В такой схеме четырехполюсник рельсовой линии разбит на две части – РЛ1 и РЛ2, между которыми включено сопротивление поездного шунта  $R_{\text{ш}}$ . При этом матрица коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A B \\ C D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ C_1 D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{\text{ш}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 B_2 \\ C_2 D_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $A_1, B_1, C_1, D_1$  – параметры четырехполюсника участка рельсовой линии между точкой подключения генератора и поездным шунтом;  $A_2, B_2, C_2, D_2$  – параметры четырехполюсника участка рельсовой линии между поездным шунтом и точкой подключения приемника.

Параметры общего четырехполюсника РЦ в шунтовом режиме определяются с помощью выражения (2).

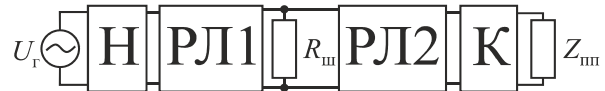


Рис. 2. Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме

Расчет рельсовой цепи в контрольном режиме выполняется аналогичным образом. При этом необходимо использовать соответствующую данному режиму схему замещения рельсовой линии [1, 6].

Знание коэффициентов общего четырехполюсника позволяет найти комплексный коэффициент передачи рельсовой цепи

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{пн}}}{\dot{U}_r} = \frac{Z_{\text{пн}}}{A_o Z_{\text{пн}} + B_o}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $\dot{U}_{\text{пн}}$  – напряжение на входе путевого приемника.

Для исследования переходных процессов в ТРЦ был выбран метод частотных характеристик [11]. В соответствии с ним с помощью преобразования Фурье находим спектр сигнала  $u_r(t)$  на входе РЦ

$$U_r(j\omega) = \int_0^{\infty} u_r(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

После этого определяется комплексная частотная характеристика рельсовой цепи  $K(j\omega)$  и спектр сигнала на входе путевого приемника

$$U_{\text{пн}}(j\omega) = U_r(j\omega) K(j\omega). \quad (6)$$

Для определения временной характеристики сигнала на входе приемника применяется обратное преобразование Фурье

$$u_{\text{пн}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{пн}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно из выражения (4), для нахождения комплексной частотной характеристики рельсовой цепи необходимо определить частотные зависимости коэффициентов общего четырехполюсника  $A_o, B_o$ , а также частотную характеристику входного сопротивления путевого приемника  $Z_{\text{пр}}$ . Рассмотрим более подробно четырехполюсники, входящие в схему замещения рельсовой цепи.

Четырехполюсник Н замещает следующие элементы ТРЦ: путевой фильтр, конденсатор  $C_{\text{АЛС}}$ , предназначенный для подачи в рельсовую цепь сигналов АЛСН, кабельный резистор  $R_{\text{к1}}$ , питающий кабель, понижающий согласующий трансформатор и защитный резистор  $R_{\text{з1}}$  [6]. С учетом этого, матрица коэффициентов четырехполюсника Н определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_H & B_H \\ C_H & D_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\Phi & B_\Phi \\ C_\Phi & D_\Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{\text{АЛС}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{к1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} A_{\text{каб1}} & B_{\text{каб1}} \\ C_{\text{каб1}} & D_{\text{каб1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{\text{тр}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{\text{тр}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{з1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $A_\Phi, B_\Phi, C_\Phi, D_\Phi$  – параметры четырехполюсника путевого фильтра;  $n_{\text{тр}}$  – коэффициент трансформации согласующего трансформатора.

Так как питающий кабель представляет собой цепь с распределенными параметрами, то коэффициенты его четырехполюсника  $A_{\text{каб1}}, B_{\text{каб1}}, C_{\text{каб1}}, D_{\text{каб1}}$  определяются следующим образом [1, 6]:

$$A_{\text{каб1}} = D_{\text{каб1}} = \text{ch}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}), \quad (9)$$

$$B_{\text{каб1}} = Z_{\text{вкаб}} \text{sh}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}), \quad (10)$$

$$C_{\text{каб1}} = \text{sh}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}) / Z_{\text{вкаб}}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{\text{каб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}})(G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}$  – коэффициент распространения волны;  $Z_{\text{вкаб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}})/(G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}$  – волновое сопротивление кабельной линии;  $R_{\text{каб}}$  и  $L_{\text{каб}}$  – километрические активное сопротивление и индуктивность кабеля соответственно;

$G_{\text{каб}}$  и  $C_{\text{каб}}$  – километрические проводимость изоляции и емкость кабеля соответственно;  $l_{\text{каб1}}$  – длина питающего кабеля.

Путевой фильтр реализуется в виде последовательного колебательного контура с трансформаторной связью [5]. В качестве индуктивности контура используется первичная обмотка трансформатора. Настройка на несущую частоту генератора осуществляется изменением емкости конденсатора. Последовательный колебательный контур обеспечивает необходимую амплитудно-частотную характеристику фильтра, а трансформатор позволяет получить требуемое выходное сопротивление.

Представим путевой фильтр в виде двух четырехполюсников: последовательного колебательного контура и идеального трансформатора, включенных каскадно (рис. 3). Тогда матрицу коэффициентов четырехполюсника фильтра можно определить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_\Phi & B_\Phi \\ C_\Phi & D_\Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{1\Phi}}{Z_{2\Phi}} & Z_{1\Phi} \\ \frac{1}{Z_{2\Phi}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{n_\Phi} & 0 \\ 0 & n_\Phi \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $Z_{1\Phi} = R_\Phi + \frac{1}{j\omega C_\Phi}$ ;  $Z_{2\Phi} = j\omega L_\Phi$ ;  $R_\Phi, C_\Phi, L_\Phi$  – параметры контура;  $n_\Phi$  – коэффициент трансформации трансформатора.

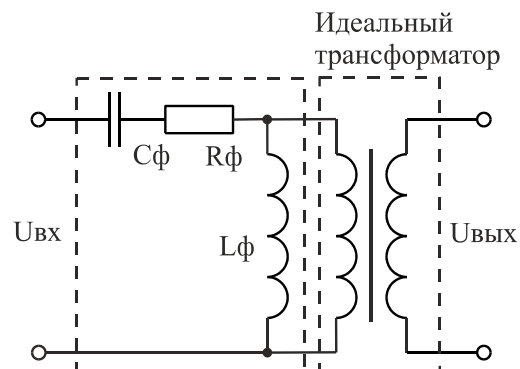


Рис. 3. Схема замещения путевого фильтра ФПУ

В справочной литературе [5] приводятся следующие параметры путевого фильтра ФПУ: емкость конденсатора для несущей частоты

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

480 Гц – 6,108 мкФ; входное сопротивление ненагруженного фильтра, настроенного в резонанс – 5...7 Ом; напряжение на вторичной обмотке, соответствующей выходному сопротивлению 140 Ом, при входном напряжении 1 В и отключенном конденсаторе – 0,412 В. В результате анализа справочных данных были получены следующие значения элементов схемы замещения фильтра:  $C_{\phi} = 6,108$  мкФ,  $L_{\phi} = 18$  мГн,  $R_{\phi} = 5...7$  Ом,  $n_{\phi} = 0,412$  (для выходного сопротивления 140 Ом).

Четырехполюсник К включает в себя следующие элементы: защитный резистор  $R_{32}$ , повышающий согласующий трансформатор, кабель приемного конца РЦ, кабельный резистор  $R_{к2}$  и конденсатор  $C_{АЛС}$  [6]. Матрица коэффициентов такого четырехполюсника определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{32} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_{тр} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{каб2} & B_{каб2} \\ C_{каб2} & D_{каб2} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & R_{к2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & j\omega C_{АЛС} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $A_{каб2}, B_{каб2}, C_{каб2}, D_{каб2}$  – коэффициенты четырехполюсника кабеля приемного конца, которые определяются так же, как и коэффициенты питающего кабеля.

Рельсовая линия, как и кабельные линии, представляет собой цепь с распределенными параметрами. Поэтому, чтобы найти коэффициенты четырехполюсника РЛ, можно использовать выражения (9)–(11). При этом коэффициент распространения волны  $\gamma$  и волновое сопротивление  $Z_{в}$  рельсовой линии определяются следующим образом:

$$\gamma = \sqrt{Z_p Y_{и}}, \quad (14)$$

$$Z_{в} = \sqrt{Z_p / Y_{и}}, \quad (15)$$

где  $Z_p = R_p + j\omega L_p$  – полное километрическое сопротивление рельсовой петли;

$Y_{и} = 1/R_{и} + j\omega C_{и}$  – полная километрическая

проводимость изоляции;  $R_p$  и  $L_p$  – километрические активное сопротивление и индуктивность рельсовой петли соответственно;  $R_{и}$  и  $C_{и}$  – километрические сопротивление изоляции и емкость рельсовой линии соответственно.

Частотная характеристика рельсовой линии определяется частотными зависимостями ее километрических параметров. В справочной литературе приводятся нормативные значения данных параметров только для нескольких фиксированных частот [1, 6]. Для получения частотных характеристик километрического активного сопротивления и индуктивности рельсов с медными приварными соединителями была выполнена интерполяция нормативных значений кубическим сплайном, результаты которой показаны на рис. 4.

Сопротивление изоляции рельсовой линии  $R_{и}$  в зависимости от типа шпал, состояния балласта и погодных условий может изменяться в широких пределах – от десятых долей Ом·км до десятков Ом·км. При расчете рельсовых цепей на частотах до 2 кГц, как правило, считается, что сопротивление изоляции является чисто активным, то есть  $C_{и} = 0$  [6].

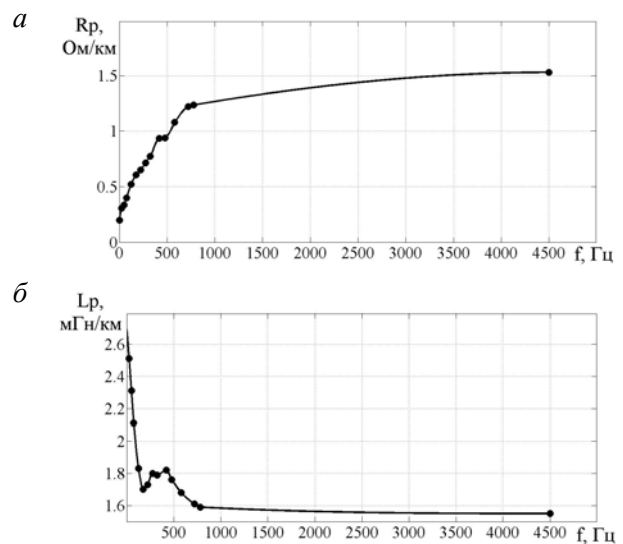


Рис. 4. Частотные зависимости километрических активного сопротивления (а) и индуктивности (б) рельсовых нитей:

точки – нормативные значения;  
линия – результат интерполяции

Путевой приемник ТРЦ предназначен для приема и дешифрирования амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсо-

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вой линии и управления путевым реле в соответствии с уровнем этого сигнала. Подавление сигналов соседних рельсовых цепей, сигналов АЛС, гармоник тягового тока осуществляется с помощью входного полосового фильтра, собранного из двух пар связанных колебательных контуров [5]. В каждой паре связь между контурами выбирается выше критической, а между парами контуров реализуется слабая связь через усилительный каскад на биполярном транзисторе.

Для определения входного сопротивления путевого приемника рассмотрим схему замещения его входной цепи, содержащую первую пару связанных контуров  $L_2$ ,  $C_2$  и  $L_3$ ,  $C_3$  (рис. 5). В данную схему для учета влияния входного сопротивления транзисторного каскада, а также потерь в контурах введены резисторы  $R_2$  и  $R_3$ . С помощью катушки  $L_1$ , которая индуктивно связана с катушкой  $L_2$ , обеспечивается требуемое значение входного сопротивления.

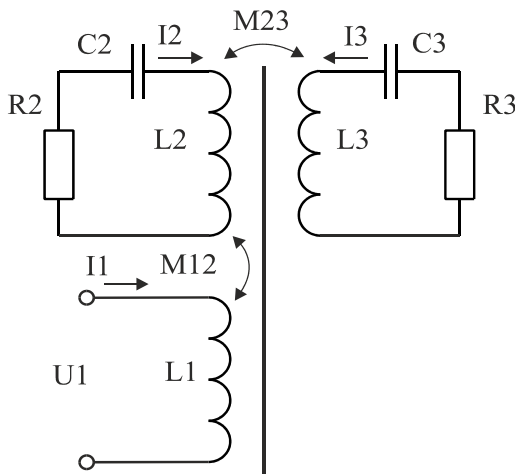


Рис. 5. Схема замещения входной цепи путевого приемника

Запишем второй закон Кирхгофа для каждого контура входной цепи приемника

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}, \\ -M_{12} \frac{di_1}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt + M_{23} \frac{di_3}{dt}, \\ -M_{23} \frac{di_2}{dt} = R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_3} \int_0^t i_3 dt, \end{cases} \quad (16)$$

где  $M_{12}$  и  $M_{23}$  – взаимные индуктивности контуров. Для синусоидального входного напряжения уравнения (16) можно переписать в комплексной форме

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_{12}, \\ -\dot{I}_1 Z_{12} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_3 Z_{23}, \\ -\dot{I}_2 Z_{23} = \dot{I}_3 Z_3, \end{cases} \quad (17)$$

где  $Z_1 = j\omega L_1$ ,  $Z_2 = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$ ,

$Z_3 = R_3 + j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)$  – полные сопротивления контуров;  $Z_{12} = j\omega M_{12}$ ,  $Z_{23} = j\omega M_{23}$  – сопротивления связи.

Из системы уравнений (17) получим выражение для определения входного сопротивления путевого приемника

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_1 - \frac{Z_{12}^2 Z_3}{Z_2 Z_3 - Z_{23}^2}. \quad (18)$$

В соответствии с выражением (18) была рассчитана частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника, настроенного на несущую частоту 480 Гц. В справочной литературе [5] указано, что емкость конденсаторов  $C_2$  и  $C_3$  для частоты 480 Гц составляет 79,6 нФ. С учетом этого было определено, что индуктивность катушек  $L_2$  и  $L_3$  составляет 1,38 Гн. Параметры остальных элементов схемы замещения выбирались таким образом, чтобы получить нужное значение входного сопротивления на несущей частоте, обеспечить требуемую ширину полосы пропускания и реализовать связь между контурами выше критической. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Полученная зависимость соответствует частотной характеристике реального путевого приемника [5], что подтверждает правомерность выбранной схемы замещения и значений ее параметров.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

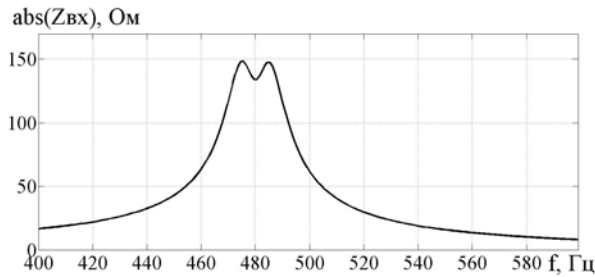


Рис. 6. Частотная характеристика модуля входного сопротивления путевого приемника

Для определения временной зависимости напряжения на входе путевого приемника выполнялись следующие операции:

1) формировался массив значений амплитудно-манипулированного сигнала  $u_r(t)$ ;

2) с помощью быстрого преобразования Фурье определялся спектр  $U_r(j\omega)$ ;

3) формировался массив частот, соответствующих полученному спектру;

4) для каждого значения частоты в соответствии с выражением (4) рассчитывался комплексный коэффициент передачи ТРЦ. При этом использовались полученные в результате интерполяции частотные характеристики первичных параметров рельсовой линии, а также частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника;

5) в соответствии с выражением (6) рассчитывалась спектральная характеристика напряжения на входе путевого приемника;

6) с помощью быстрого обратного преобразования Фурье определялась временная характеристика напряжения на входе приемника.

### Результаты

В качестве объекта исследования была выбрана тональная рельсовая цепь с такими параметрами:

- 1) несущая частота – 480 Гц;
- 2) частота модуляции – 8 Гц;
- 3) длина ТРЦ – 500 м;
- 4) длина питающего кабеля – 2,4 км;
- 5) длина приемного кабеля – 2 км;
- 6) емкость АЛС – 4 мкФ;
- 7) коэффициент трансформации согласующих трансформаторов – 38;
- 8) сопротивление защитных резисторов  $R_{31}, R_{32}$  – 0,3 Ом;

9) сопротивление изоляции рельсовой линии  $R_{и}$  – 50 Ом·км.

Для кабельных линий были приняты следующие значения первичных параметров [6]:  $R_{каб} = 47$  Ом/км;  $C_{каб} = 50$  нФ/км;  $L_{каб} = 0$ ;  $G_{каб} = 0$ . При определении сопротивления кабельных резисторов использовалось выражение [5, 6]

$$R_k = 400 - R_{каб} l_{каб}, \quad (19)$$

где  $l_{каб}$  – длина кабельной линии.

Полученные в соответствии с описанной выше методикой временные диаграммы сигналов представлены на рис. 7.

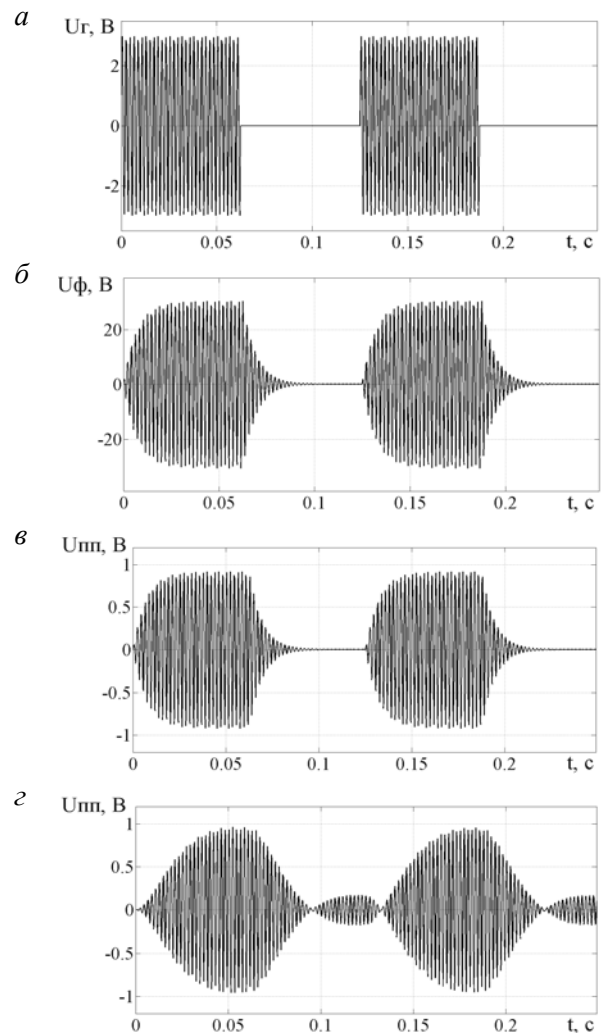


Рис. 7. Временные диаграммы сигналов: а – на выходе генератора; б – на выходе фильтра ФПУ; в – на входе приемника с активным сопротивлением; г – на входе частотно-избирательного приемника

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно, при прохождении через ТРЦ сигнальные импульсы заметно искажаются. Путевой фильтр ФПУ ограничивает верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала КРЛ. Это приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов (см. рис. 7, а, б).

Напряжение на входе путевого приемника рассчитывалось для двух случаев: 1) для частотно-независимого приемника с активным входным сопротивлением  $R_{\text{вх}} = 140 \text{ Ом}$ ; 2) для частотно-избирательного приемника, входное сопротивление которого определяется выражением (18). В первом случае форма сигнала на входе приемника соответствует форме сигнала на выходе путевого фильтра (см. рис. 7, б, в). Таким образом, рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнала КРЛ и изменяют только его уровень.

Зависимость входного сопротивления путевого приемника от частоты приводит к существенному искажению формы сигнальных импульсов (см. рис. 7, з). Ширина полосы пропускания приемника меньше, чем у путевого фильтра. Это приводит к еще большему ограничению спектра сигнала КРЛ и большему затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов. Кроме этого, в паузе появляется дополнительный импульс. Это можно объяснить спецификой связанных контуров, имеющих два частных резонанса. При воздействии фронта и среза сигнальных импульсов в связанных контурах на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, в результате интерференции которых появляются биения [4].

Аналогичным образом можно исследовать шунтовой и контрольный режимы рельсовой цепи. При этом необходимо использовать соответствующую этим режимам схему замещения рельсовой линии.

#### Научная новизна и практическая значимость

Усовершенствован метод анализа тональных рельсовых цепей, что позволяет определить не только уровень, но и временную зависимость сигнала на входе путевого приемника при произвольном входном воздействии.

Полученная временная зависимость сигнала на входе путевого приемника будет полезна

при разработке новых более совершенных методов определения свободности тональной рельсовой цепи. Предложенный метод анализа рельсовых цепей может быть использован для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

#### Выводы

1. Одно из направлений дальнейшего совершенствования тональных рельсовых цепей связано с использованием статистических методов обнаружения сигнала контроля рельсовой линии, которые базируются на знании формы и параметров такого сигнала.

2. Путевой фильтр ограничивает верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала контроля рельсовой линии, что приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов.

3. Рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнальных импульсов и изменяют только их амплитуду.

4. Зависимость входного сопротивления путевого приемника от частоты приводит к заметному затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов, а также к появлению дополнительного импульса в паузе. Последнее является результатом биений, которые возникают вследствие интерференции свободных колебаний в связанных контурах приемника.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – М. : Транспорт, 1992. – 384 с.
2. Гончаров, К. В. Исследование цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 180–185.
3. Гончаров, К. В. Корреляционный путевого приемник тональных рельсовых цепей / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 188–193.
4. Котельников, В. А. Основы радиотехники. В 2 ч. Ч. I / В. А. Котельников, А. М. Николаев. – М. : Радио и связь, 1954. – 373 с.



## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Кулик, П. Д. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл: керівний нормативний документ «Укрзалізниці» / П. Д. Кулик, О. О. Удовіков, В. І. Басов. – К. : Мінтрансв'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 / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – К. : Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
7. Майстренко, В. А. Статистические методы приема и обработки сигналов в системах радиосвязи / В. А. Майстренко, В. Ф. Попов. – Омск : ОмГТУ, 2009. – 120 с.
8. О повышении надежности рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигналов / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук и др. // Электромагнитная совместимость и безопасность на ж.-д. трансп. (15.02-19.02.2011) : тез. IV междунар. науч.-практ. конф. / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 65–66.
9. Сердюк, Т. Н. Измерение электромагнитных помех в обратной тяговой сети / Т. Н. Сердюк, А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 134–139.
10. Тарасов, Е. М. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий / Е. М. Тарасов. – Самара : СамГАПС, 2003. – 118 с.
11. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2003. – 572 с.
12. Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2004. – 132 с.
13. Чепцов, М. М. Методи синтезу сигнально-процесорної централізації стрілок і сигналів : монографія / М. М. Чепцов, А. Б. Бойнік, Д. М. Кузьменко. – Донецьк : ДонІЗТ, 2010. – 181 с.
14. Gavrilyuk, V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij, A. Myrgorodska // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 33–37.
15. Gavrilyuk, V. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij // Archives of Transport System Telematics. – 2010. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 14–18.
16. Serdyuk, T. Automated measured of rail circuits parameters and harmonics of return tractive current to improve safety of movement / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Issue 3. – P. 17–21.
17. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking: International Compendium / G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg : Eurailpress, 2009. – 448 p.

К. В. ГОНЧАРОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта goncharov\_k@inbox.ru

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТОНАЛЬНИХ РЕЙКОВИХ КОЛАХ

**Мета.** Пошук нових методів аналізу тональних рейкових кіл, визначення форми сигналу контролю рейкової лінії на вході колійного приймача. **Методика.** Для дослідження перехідних процесів використовувався метод частотних характеристик. За допомогою швидкого перетворення Фур'є визначався спектр сигналу на виході колійного генератора. Після визначення комплексної частотної характеристики тонального рейкового кола розраховувався спектр сигналу на вході колійного приймача. При цьому застосовувались отримані в результаті інтерполяції нормативних значень частотні характеристики первинних параметрів рейкової лінії, а також розрахована частотна характеристика вхідного опору колійного приймача. Для визначення часової залежності сигналу на вході приймача використовувалося обернене швидке перетворення Фур'є. **Результати.** У результаті виконаних досліджень було встановлено причини спотворення форми сигналів у тональних рейкових колах. Колійний фільтр, а також вхідний фільтр колійного приймача обмежують верхню та нижню бокові смуги спектру сигналу контролю рейкової лінії, що призводить до затягу-

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вання фронту та зрізу сигнальних імпульсів. Рейкова та кабельні лінії, а також пристрої захисту та узгодження практично не впливають на форму сигнальних імпульсів, а змінюють лише їх амплітуду. При дії фронту та зрізу сигнальних імпульсів у зв'язаних контурах приймача на резонансних частотах виникають вільні коливання, у результаті інтерференції яких відбуваються биття і з'являється додатковий міжсигнальний імпульс. **Наукова новизна.** Удосконалено метод аналізу тональних рейкових кіл, що дозволяє визначити не лише рівень, але й часову залежність сигналу на вході колійного приймача при довільному вхідному впливі. **Практична значимість.** Отримана часова залежність сигналу на вході колійного приймача буде корисною при розробці нових більш досконалих методів визначення вільності тонального рейкового кола. Запропонований метод аналізу рейкових кіл може бути використаний для пошуку нових більш інформативних форм сигнального струму.

*Ключові слова:* тональні рейкові кола; колійний приймач; перехідні процеси; комплексна частотна характеристика; спектр; спотворення

K. V. HONCHAROV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail goncharov\_k@inbox.ru

## INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN TONAL TRACK CIRCUITS

**Purpose.** The purpose of investigation is the search for new analysis methods of tonal track circuits, the definition of signal waveform at the track receiver input. **Methodology.** The method of frequency characteristics was used for investigation of transient processes. Signal spectrum at the output of track generator was determined using fast Fourier transform. Signal spectrum at the input of track receiver was calculated after determining complex frequency characteristic of the tonal track circuit. To carry out such calculations the frequency characteristics of rail line parameters have been obtained resulting interpolation of reference data and the frequency characteristic of track receiver impedance has been calculated. To determine the signal time dependence at the input of track receiver the inverse fast Fourier transform was applied. **Findings.** The causes of signal distortion in the tonal track circuits have been clarified. Track filter and input filter of track receiver restrict upper and lower sidebands of the signal spectrum, which leads to prolonging the rise and fall of signal pulses. The rail line, cable lines, and the devices for protection and alignment do not affect the shape of signal pulses, and change only their amplitude. At influence of rise and fall of signal pulses in the connected RLC circuits of receiver arise free oscillations at the resonance frequencies. As a result of the interference of these oscillations occur beats and appears additional pulse. **Originality.** The method for the analysis of tonal track circuits has been improved that allows determining not only the level but also the time dependence of signal at the track receiver for any input action. **Practical value.** Obtained time dependence of signal at the track receiver input will be useful in the development of the new more perfect methods for determining the state of tonal track circuit. Proposed method of track circuit analysis may be used to search for new more informative form of signal current.

*Keywords:* tonal track circuits; track receiver; transient processes; complex frequency characteristic; spectrum; distortion

### REFERENCES

1. Arkatov V.S., Bazhenov A.I., Kotlyarenko N.F. *Relsovyye tsepi magistralnykh zheleznykh dorog* [Track circuits of mainline railways]. Moscow, Transport Publ., 1992. 384 p.
2. Honcharov K.V. Issledovaniye tsifrovogo putevogo priyemnika tonalnykh relsovykh tsepey [Investigation of digital track receiver of the tonal track circuits]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 180-185.
3. Honcharov K.V. Korrelyatsionnyy putevoy priyemnik tonalnykh relsovykh tsepey [Correlation track receiver of the tonal track circuits]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 188-193.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. Kotelnikov V.A., Nikolayev A.M. *Osnovy radiotekhniki. Chast I* [Fundamentals of Radio Engineering. Part I]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1954. 373 p.
5. Kulik P.D., Udovikov O.O., Basov V.I. *Praktychnyi posibnyk z tekhnichnoho utrymannia apparatury tonalnykh reikovykh kil* [Practical guide to technical facility retention of tonal track circuits]. Kyiv, Mintransviazku Ukrainy Publ., 2006. 236 p.
6. Kulik P.D., Ivakin N.S., Udovikov A.A. *Tonalnyye relsovyye tsepi v sistemakh ZHAT: postroyeniye, regulirovka, obsluzhivaniye, poisk i ustraneniye neispravnostey, povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti* [Tonal track circuits in railway automatic and telemechanic systems: buildup, control, service, searching and eliminating of failures, maintainability enhancement]. Kyiv, Manufaktura Publ., 2004. 288 p.
7. Maystrenko V.A., Popov V.F. *Statisticheskiye metody priyema i obrabotki signalov v sistemakh radiosvyazi* [Statistical methods for receiving and processing signals in radio communication systems]. Omsk, OmGTU Publ., 2009. 120 p.
8. Razgonov A.P., Zhuravlev A.Yu., Yashchuk Ye.I., Lebedev A.Yu., Razgonov S.A. O povyshenii nadezhnosti relsovykh tsepoy s ispolzovaniyem tsifrovoy obrabotki signalov [About increasing the reliability of track circuits using digital signal processing]. *Tezisy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Elektromagnitnaya sovmestimost i bezopasnost na zheleznodorozhnom transporte"* [Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Sci. and Practical Conf. "Electromagnetic compatibility and safety on railway transport"]. Dnipropetrovsk, 2011, pp. 65-66.
9. Serdyuk T.N., Zavgorodniy A.V., Gavrilyuk V.I. Izmereniye elektromagnitnykh pomekh v obratnoy tyagovoy seti [Measurement of electromagnetic interference in the return traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 134-139.
10. Tarasov Ye.M. *Matematicheskoye modelirovaniye relsovykh tsepoy s raspredelennymi parametrami relsovykh liniy* [Mathematical modeling of the track circuits with distributed parameters of rail lines]. Samara, SamGAPS Publ., 2003. 118 p.
11. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Tom 2* [Fundamentals of Electrical Engineering. Vol. 2]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2003. 572 p.
12. Fedorov N.Ye. *Sovremennyye sistemy avtoblokirovki s tonalnymi relsovyimi tsepyami* [Modern automatic block systems with tonal track circuits]. Samara, SamGAPS Publ., 2004. 132 p.
13. Cheptsov M.M., Boinik A.B., Kuzmenko D.M. *Metody syntezu syhnalno-protseornoj tsentralizatsii strilok i syhnaliv* [Methods of synthesis signal processor centralizing of switches and signals]. Donetsk, DonIZT Publ., 2010. 181 p.
14. Gavrilyuk V., Zavgorodnij A., Myrgorodska A. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic. *Archives of Transport System Telematics*, 2009, vol. 2, issue 1, pp. 33-37.
15. Gavrilyuk V., Zavgorodnij A. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits. *Archives of Transport System Telematics*, 2010, vol. 3, issue 4, pp. 14-18.
16. Serdyuk T., Gavrilyuk V. Automated measured of rail circuits parameters and harmonics of return tractive current to improve safety of movement. *Archives of Transport System Telematics*, 2009, vol. 2, issue 3, pp. 17-21.
17. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg, Eurailpress Publ., 2009. 448 p.

*Статья рекомендована к публикации д.ф.-м.н., проф. В. И. Гаврилюком (Украина); д.ф.-м.н., проф. А. В. Коваленко (Украина)*

Поступила в редколлегию 22.05.2013

Принята к печати 01.08.2013