

УДК 656.259.12:656.256.3

ГОНЧАРОВ К. В., к.т.н., доцент (ДИИТ).

Синтез цифровой модели тональной рельсовой цепи

Введение

Функциональная безопасность и надежность автоматизированных систем управления движением поездов в значительной мере зависят от первичных элементов контроля свободности путевых участков и целостности рельсовых нитей. В качестве таких элементов контроля наиболее широко применяются рельсовые цепи (РЦ), с помощью которых также организуется телемеханический канал для передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС).

В последнее время все чаще применяются тональные рельсовые цепи (ТРЦ), в которых несущие частоты сигналов контроля рельсовой линии (КРЛ) находятся в диапазоне от 420 Гц до 5555 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].

Различают три основных режима работы РЦ: нормальный, шунтовой, контрольный. В нормальном режиме контролируемый путевой участок свободен, рельсовые нити не повреждены. В шунтовом режиме рельсовая цепь занята подвижным составом, а в контрольном – имеет место излом (повреждение) или изъятие рельса. Кроме этого выделяют режим АЛС, при котором уровень сигнального тока должен быть достаточным для на-

дежной работы АЛС, и режим короткого замыкания, при котором поездной шунт расположен в месте подключения генератора к рельсовой линии.

Расчет рельсовой цепи в каждом из режимов выполняется с использованием схем замещения ее составных частей. Как правило, рельсовая линия и другие элементы РЦ заменяются четырехполюсниками [2 – 4]. После этого определяются параметры каждого четырехполюсника, а затем – параметры общего четырехполюсника всей РЦ. При этом используются нормативные значения первичных параметров рельсовой линии, а также параметров других элементов рельсовой цепи (дроссель-трансформаторов, изолирующих трансформаторов, кабельных линий) [3]. После определения параметров общего четырехполюсника устанавливается связь между входными и выходными сигналами рельсовой цепи. Такая методика позволяет выполнить расчет РЦ в установленном режиме на фиксированной частоте. Иными словами, можно определить реакцию рельсовой цепи на входное воздействие в виде гармонического колебания только на нескольких частотах, для которых известны нормативные значения параметров ее элементов. Описанная методика не позволяет рассчитать частотные и временные характеристики РЦ.

Одно из направлений дальнейшего развития рельсовых цепей связано с внедрением цифровых методов обработки сигналов контроля рельсовой линии, усовершенствованием формы сигнала КРЛ [5 – 9]. При разработке новых алгоритмов работы путевых приемников, поиске новых более информативных форм сигнала КРЛ целесообразно использовать модель,

позволяющую найти реакцию РЦ не только на гармонический, но и на входной сигнал произвольной формы.

Современный уровень развития компьютерной техники позволяет использовать цифровое моделирование для исследования достаточно сложных объектов в различных областях науки и техники. В общем случае, под цифровым моделированием устройства понимают получение алгоритмов, позволяющих с помощью ЭВМ точно или с допустимой погрешностью найти реакцию звена произвольной структуры на произвольное входное воздействие [10].

Цель работы

Целью данной работы является поиск новых методов анализа тональных рельсовых цепей, синтез цифровой модели тональной рельсовой цепи.

Математическое описание тональной рельсовой цепи в нормальном режиме

Для расчета тональной рельсовой цепи в нормальном режиме используется общая схема замещения (рис. 1) [2 – 4]. Четырехполосник РЛ замещает рельсовую линию, а четырехполосники Н и К – кабельные линии, а также устройства защиты и согласования соответственно на передающем и приемном конце РЦ. Через данные четырехполосники к рельсовой линии подключается путевой генератор с выходным напряжением U_r , а также путевой приемник с входным сопротивлением $Z_{пп}$.



Рис. 1. Общая схема замещения рельсовой цепи

Любой четырехполосник характеризуется комплексными параметрами A , B , C , D , которые являются коэффициентами уравнений, связывающих входные ($\dot{U}_1, \dot{I}_1$) и выходные ($\dot{U}_2, \dot{I}_2$) напряжения и токи [2 – 4]

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

Для рельсовой линии, которая представляет собой цепь с распределенными параметрами, параметры четырехполосника определяются следующим образом [2 – 4]

$$A = D = \operatorname{ch}(\gamma l), \quad (2)$$

$$B = Z_b \operatorname{sh}(\gamma l), \quad (3)$$

$$C = \operatorname{sh}(\gamma l) / Z_b, \quad (4)$$

где $\gamma = \sqrt{Z_p Y_n}$ – коэффициент распространения волны, $Z_b = \sqrt{Z_p / Y_n}$ – волновое сопротивление, l – длина рельсовой линии, $Z_p = R_p + j\omega L_p$ – полное километрическое сопротивление рельсовой петли, $Y_n = 1/R_n + j\omega C_n$ – полная километрическая проводимость изоляции, ω – циклическая частота, R_p и L_p – километрические активное сопротивление и индуктивность рельсовой петли, R_n и C_n – километрические сопротивление изоляции и емкость рельсовой линии.

Четырехполосник Н замещает следующие элементы ТРЦ: конденсатор $C_{\text{АЛС}}$, предназначенный для подачи в рельсовую цепь сигналов АЛСН, кабельный резистор R_{k1} , питающий кабель, разрядник, понижающий согласующий трансформатор, предохранитель и защитный резистор R_{31} [2]. С учетом того, что разрядник и предохранитель в рабочем режиме не влияют на работу РЦ, матрица коэффициентов четырехполосника Н определяется следующим образом

$$\begin{bmatrix} A_H & B_H \\ C_H & D_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{\text{АЛС}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{к1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} A_{\text{каб1}} & B_{\text{каб1}} \\ C_{\text{каб1}} & D_{\text{каб1}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_{\text{тр}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{\text{тр}}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{з1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $n_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации согласующего трансформатора. Так как питающий кабель представляет собой цепь с распределенными параметрами, то коэффициенты его четырехполюсника $A_{\text{каб1}}, B_{\text{каб1}}, C_{\text{каб1}}, D_{\text{каб1}}$ можно найти, используя выражения (2) – (4). При этом коэффициент распространения волны $\gamma_{\text{каб}}$ и волновое сопротивление $Z_{\text{вкаб}}$ кабельной линии определяются следующим образом

$$\gamma_{\text{каб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}})(G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}, \quad (6)$$

$$Z_{\text{вкаб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}}) / (G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}, \quad (7)$$

где $R_{\text{каб}}$ и $L_{\text{каб}}$ – километрические активное сопротивление и индуктивность кабеля, $G_{\text{каб}}$ и $C_{\text{каб}}$ – километрические проводимость изоляции и емкость кабеля.

Четырехполюсник К включает в себя следующие элементы: предохранитель, защитный резистор $R_{\text{з2}}$, повышающий согласующий трансформатор, разрядник, кабель приемного конца РЦ, кабельный резистор $R_{\text{к2}}$ и конденсатор $C_{\text{АЛС}}$ [2]. С учетом этого, матрица коэффициентов четырехполюсника К определяется следующим образом

$$\begin{bmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{з2}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{n_{\text{тр}}} & 0 \\ 0 & n_{\text{тр}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{\text{каб2}} & B_{\text{каб2}} \\ C_{\text{каб2}} & D_{\text{каб2}} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{к2}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{\text{АЛС}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_H & B_H \\ C_H & D_H \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Входная цепь путевого приемника ТРЦ представляет собой систему связанных колебательных контуров, обеспечивающих подавление сигналов смежных рельсовых цепей, гармоник тягового тока, а также сигналов АЛСН. Заменим входную цепь эквивалентным параллельным колебательным контуром, сопротивление которого определяется выражением [11]

$$Z_{\text{мп}} = \frac{Z_o}{1 + j\varepsilon}, \quad (10)$$

где $\varepsilon = 2Q(\omega - \omega_0) / \omega_0$ – обобщенная расстройка контура, ω_0 – средняя частота полосы пропускания приемника, Z_o – входное сопротивление приемника на частоте ω_0 , $Q = \omega_0 / \Delta\omega$ – добротность контура, $\Delta\omega$ – ширина полосы пропускания приемника.

Знание коэффициентов общего четырехполюсника рельсовой цепи позволяет найти зависимости между входными и выходными сигналами ТРЦ

$$\dot{U}_{\text{мп}} = \frac{\dot{U}_r Z_{\text{мп}}}{A_o Z_{\text{мп}} + B_o}, \quad (11)$$

$$\dot{I}_{\text{мп}} = \frac{\dot{U}_r}{A_o Z_{\text{мп}} + B_o}, \quad (12)$$

где $\dot{U}_{\text{мп}}$ и $\dot{I}_{\text{мп}}$ – напряжение и ток на входе путевого приемника. Следует отметить, что в ТРЦ путевой генератор подключается к четырехполюснику Н через путевой фильтр ФПМ [2]. Поэтому в выражения (11), (12) в качестве напряжения источни-

ка $\dot{U}_r$ нужно подставлять выходное напряжение фильтра ФПМ.

Математическое описание тональной рельсовой цепи в шунтовом режиме

Для обеспечения работы РЦ в шунтовом режиме необходимо, чтобы при максимальном напряжении генератора и наилучших условиях для передачи сигнала по рельсовой линии напряжение (ток) на входе путевого приемника были не выше значений его надежного несрабатывания. Наилучшие условия передачи имеют место при минимальном сопротивлении рельсовых нитей и максимальном сопротивлении изоляции. Поэтому при расчете рельсовой цепи в шунтовом режиме используется схема замещения, в которой проводимость изоляции не учитывается (рис. 2). При этом коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии определяются выражениями [2]

$$A_{ш} = 1 + \frac{Z_p(l-x)}{R_{ш}}, \quad (13)$$

$$B_{ш} = Z_p l + \frac{Z_p x \cdot Z_p(l-x)}{R_{ш}}, \quad (14)$$

$$C_{ш} = \frac{1}{R_{ш}}, \quad (15)$$

$$D_{ш} = 1 + \frac{Z_p x}{R_{ш}}, \quad (16)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление поездного шунта, x – расстояние от приемного конца рельсовой линии до места наложения шунта.

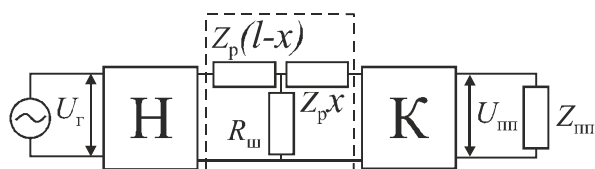


Рис. 2. Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме

Выполнив перемножение матриц коэффициентов всех четырехполюсников

рельсовой цепи, можно найти коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой цепи в шунтовом режиме $A_{ош}$ и $B_{ош}$, а затем определить напряжение и ток на входе путевого приемника

$$\dot{U}_{шш} = \frac{\dot{U}_r Z_{шш}}{A_{ош} Z_{шш} + B_{ош}}, \quad (17)$$

$$\dot{I}_{шш} = \frac{\dot{U}_r}{A_{ош} Z_{шш} + B_{ош}}. \quad (18)$$

Расчет рельсовой цепи в контрольном режиме проводится аналогичным образом после изменения структуры четырехполюсника рельсовой линии [2 – 4].

Частотные характеристики рельсовой цепи

Определим комплексный коэффициент передачи рельсовой цепи

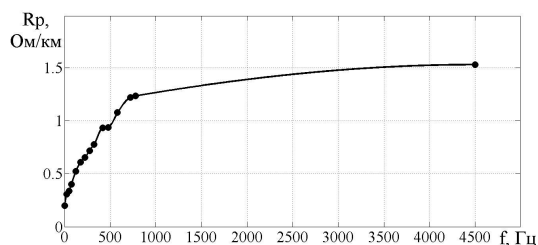
$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{шш}}{\dot{U}_r} = \frac{Z_{шш}}{A_0 Z_{шш} + B_0}. \quad (19)$$

В выражение (19) входят частотно-зависимое входное сопротивление путевого приемника, а также частотно-зависимые комплексные коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой цепи. Частотные характеристики коэффициентов A_0 и B_0 зависят от первичных параметров рельсовой и кабельных линий, а также от параметров элементов защиты и согласования. В свою очередь километрические параметры рельсовой линии также изменяются при изменении частоты. В табл. 1 представлены полученные из литературных источников [2, 3] нормативные значения километрического полного сопротивления рельсов с медными приварными соединителями в зависимости от частоты сигнального тока, а также рассчитанные по этим значениям километрические активное сопротивление и индуктивность.

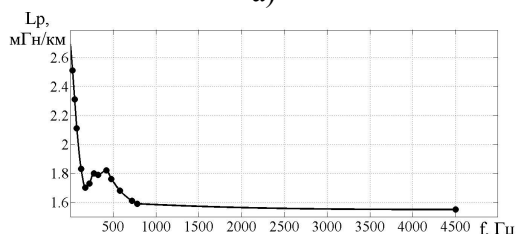
Таблица 1
Нормативные значения километрического сопротивления и индуктивности рельсовых нитей

$f, \text{Гц}$	$Z_p, \text{Ом/км}$	$R_p, \text{Ом/км}$	$L_p, \text{мГн/км}$
25	$0,5e^{j52}$	0,308	2,51
50	$0,8e^{j65}$	0,338	2,31
75	$1,07e^{j68}$	0,401	2,11
125	$1,53e^{j70}$	0,523	1,83
175	$1,97e^{j72}$	0,609	1,70
225	$2,53e^{j75}$	0,655	1,73
275	$3,19e^{j77}$	0,718	1,80
325	$3,74e^{j78}$	0,778	1,79
420	$4,9e^{j79}$	0,935	1,82
480	$5,4e^{j80}$	0,938	1,76
580	$6,2e^{j80}$	1,077	1,68
720	$7,4e^{j80,5}$	1,221	1,61
780	$7,9e^{j81}$	1,236	1,59
4500	$43,8e^{j88}$	1,529	1,55

Для определения частотных характеристик рельсовой цепи необходимо, прежде всего, знать частотные зависимости ее первичных параметров. С этой целью была выполнена интерполяция кубическим сплайном нормативных значений, приведенных в табл. 1. Результаты интерполяции показаны на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Частотные зависимости километрического активного сопротивления (а) и индуктивности (б) рельсовых нитей: точки – нормативные значения; линия – результат интерполяции

При расчете рельсовых цепей на частотах до 2 кГц, как правило, считается, что сопротивление изоляции является чисто активным, то есть $C_{ii} = 0$. В зависимости от типа шпал, состояния балласта и погодных условий сопротивление изоляции R_{ii} может изменяться от десятых долей Ом*км до десятков Ом*км.

В качестве примера для расчета частотных характеристик была выбрана тональная рельсовая цепь с такими параметрами:

длина ТРЦ – 0,7 км;

длина питающего кабеля – 1 км;

длина приемного кабеля – 1,7 км;

емкость конденсатора $C_{\text{АЛС}}$ – 4 мкФ;

коэффициент трансформации согласующих трансформаторов – 38;

сопротивление резисторов R_{31}, R_{32} – 0,3 Ом.

Для расчета кабельных линий были приняты следующие значения первичных параметров [2]:

$$R_{\text{каб}} = 47 \text{ Ом/км};$$

$C_{\text{каб}} = 50 \text{ нФ/км}; L_{\text{каб}} = 0; G_{\text{каб}} = 0$. Для определения сопротивления кабельных резисторов использовалось выражение [2]

$$R_k = 400 - R_{\text{каб}} L_{\text{каб}}, \quad (20)$$

где $L_{\text{каб}}$ – длина кабельной линии.

Расчет частотных характеристик РЦ проводился в следующем порядке. Первоначально был сформирован массив значений частоты в диапазоне от 0 до 2 кГц. Размер массива – 1024 элемента. Затем для каждого значения частоты определялись значения первичных параметров рельсовой линии и рассчитывался комплексный коэффициент передачи РЦ. В результате формировался массив значений комплексной частотной характеристики. По модульным значениям этого массива строилась амплитудно-частотная характеристика РЦ, а по значениям аргументов – фазочастотная характеристика.

На первом этапе была рассчитана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рельсовой цепи в нормальном ре-

жиме без учета частотных свойств входного сопротивления путевого приемника. При этом считалось, что сопротивление приемника является чисто активным и равняется 140 Ом. Расчеты проводились при двух значениях сопротивления изоляции рельсовой линии: 50 Ом*км и 0,5 Ом*км. Результаты представлены на рис. 4. Уменьшение коэффициента передачи на частотах ниже 70 Гц обусловлено наличием в передающей и приемной части ТРЦ конденсаторов $C_{АЛС}$. При дальнейшем повышении частоты коэффициент передачи монотонно убывает вследствие увеличения сопротивления рельсовых нитей, а также увеличения затухания сигнала в кабельных линиях. Уменьшение сопротивления изоляции рельсовой линии приводит к уменьшению коэффициента передачи, но не влияет на характер АЧХ.

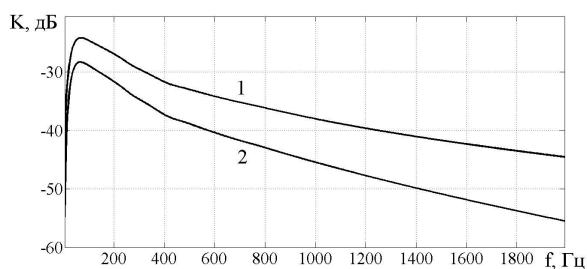


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики рельсовой цепи с активным входным сопротивлением приемника:
1 – $R_{и} = 50 \text{ Ом*км}$; 2 – $R_{и} = 0,5 \text{ Ом*км}$

На следующем этапе была определена АЧХ рельсовой цепи с учетом частотно-избирательных свойств путевого приемника. Расчет проводился при таких параметрах: средняя частота полосы пропускания приемника – 480 Гц; ширина полосы пропускания – 24 Гц; входное сопротивление на средней частоте – 140 Ом. Как видно из полученных зависимостей (рис. 5) максимум коэффициента передачи РЦ достигается на средней частоте полосы пропускания приемника. Уменьшение сопротивления изоляции рельсовой линии также при-

водит к уменьшению коэффициента передачи, но не влияет на характер АЧХ.

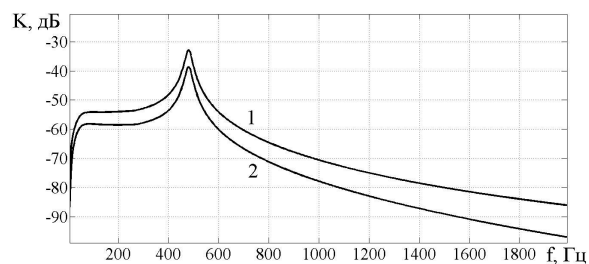


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики рельсовой цепи с частотно-избирательным приемником:
1 – $R_{и} = 50 \text{ Ом*км}$; 2 – $R_{и} = 0,5 \text{ Ом*км}$

Аналогичным образом были получены частотные характеристики рельсовой цепи в шунтовом и контрольном режимах.

Цифровая модель тональной рельсовой цепи

В качестве цифровой модели рельсовой цепи выберем линейную дискретную систему, выполняющую преобразование входной последовательности $x[nT]$ в выходную последовательность $y[nT]$ в соответствии с разностным уравнением [12, 13]

$$y[nT] = \sum_{i=0}^{N-1} b_i x[(n-i)T] - \sum_{k=1}^{L-1} a_k y[(n-k)T], \quad (21)$$

где T – интервал дискретизации, N и L – константы, определяющие порядок системы, b_i и a_k – вещественные коэффициенты (внутренние параметры системы).

В процессе синтеза цифровой модели рельсовой цепи, которая рассматривается как аналоговый прототип, необходимо выбрать такой набор коэффициентов b_i и a_k , при которых характеристики модели соответствуют характеристикам аналогового прототипа с заданной точностью. Как правило, для синтеза линейной дискретной системы необходимо знать аналитическое описание аналогового про-

тотипа в одной из форм: в форме дифференциального уравнения, в форме передаточной функции или импульсной характеристики [12 – 14]. Получение такого аналитического описания для рельсовой цепи является затруднительным, так как параметры ее элементов являются частотно-зависимыми.

Для определения коэффициентов цифровой модели воспользуемся методом, предложенным в [15], в котором используется не аналитическое описание, а числовые значения комплексной частотной характеристики аналогового прототипа. При этом будем рассматривать нерекурсивную дискретную систему с конечной импульсной характеристикой, которая описывается следующим разностным уравнением

$$y[nT] = \sum_{i=0}^{N-1} b_i x[(n-i)T]. \quad (22)$$

В такой системе коэффициенты b_i представляют собой значения дискретной импульсной характеристики, а порядок системы равняется $N-1$.

Синтез цифровой модели проводился в таком порядке:

1) формировался массив из 1024-х значений комплексной частотной характеристики РЦ для диапазона частот от 0 до $f_d/2$, где $f_d = 4$ кГц – частота дискретизации;

2) над полученным массивом выполнялось обратное быстрое преобразование Фурье, в результате которого был сформирован массив из 2048-ми значений импульсной характеристики системы;

3) выполнялся циклический сдвиг вправо массива импульсной характеристики на $M/2$ значений, после чего массив ограничивался $M+1$ значением, где M – длина ядра цифровой системы, $M+1$ – порядок системы;

4) массив из $M+1$ значений импульсной характеристики умножался на массив значений оконной функции Блэкмана-Хэрриса, в результате чего получал-

ся массив коэффициентов цифровой системы b_i ;

5) для определения частотных характеристик синтезированной цифровой модели и сопоставления их с характеристиками аналогового прототипа выполнялось быстрое преобразование Фурье над массивом значений импульсной характеристики модели.

На рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики аналогового прототипа и синтезированной цифровой модели при длине ядра $M = 150$. Как видно из полученных зависимостей, АЧХ модели довольно точно соответствует характеристике прототипа на ее пологих участках. Наибольшее расхождение характеристик наблюдается в экстремальной точке. Исследования показали, что чем больше длина ядра, а, следовательно, и порядок цифровой модели, тем ближе характеристики модели к характеристикам прототипа. На рис. 7 представлена зависимость среднеквадратичной ошибки воспроизведения АЧХ от длины ядра. Данная зависимость позволяет выбрать порядок цифровой модели с учетом требуемой точности.

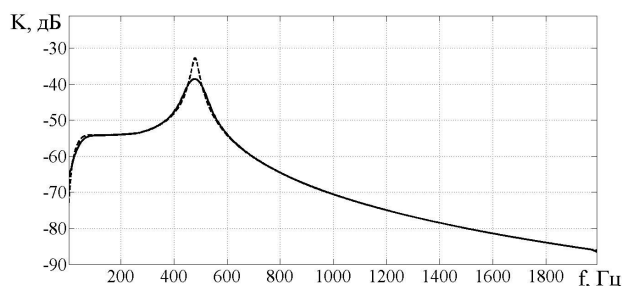


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика тональной рельсовой цепи: пунктир – аналоговый прототип; линия – цифровая модель

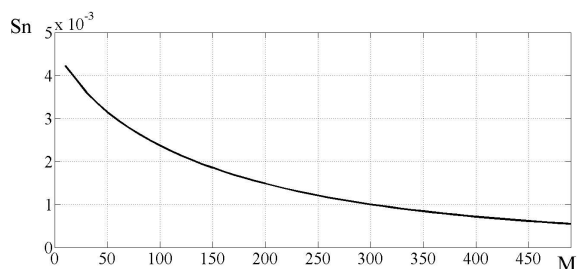


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичной ошибки от длины ядра цифровой модели

Синтез цифровой модели рельсовой цепи в шунтовом и контрольном режимах выполнялся аналогичным образом. При этом для определения комплексной частотной характеристики ТРЦ использовалась соответствующая этим режимам структура четырехполюсника рельсовой линии.

В качестве примера на рис. 8 показаны полученные с помощью синтезированной цифровой модели временные диаграммы напряжений на входе путевого приемника в нормальном и шунтовом режиме. При этом в качестве входного использовался амплитудно-манипулированный сигнал с несущей частотой 480 Гц, и модулирующей частотой 12 Гц. В шунтовом режиме были выбраны следующие параметры: $R_{ш} = 0,06 \text{ Ом}$; $x = l/2$. Полученные зависимости показывают, как влияет сопротивление изоляции и режим работы рельсовой цепи на уровень сигнала на входе путевого приемника.

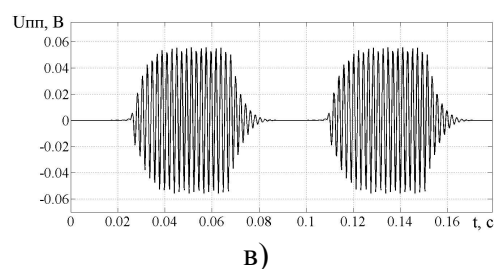
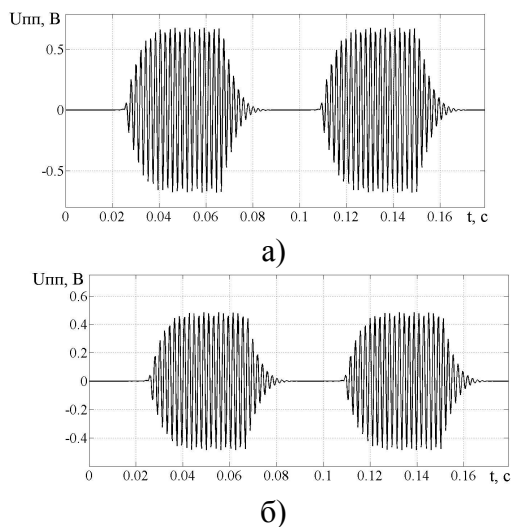


Рис. 8. Напряжение на входе путевого приемника: а – нормальный режим, $R_{и} = 50 \text{ Ом*км}$; б – нормальный режим, $R_{и} = 0,5 \text{ Ом*км}$; в – шунтовой режим

Выводы

1. Существующая методика расчета позволяет найти зависимости между входными и выходными сигналами рельсовой цепи только в установившемся режиме на фиксированной частоте.
2. Синтезированная цифровая модель позволяет найти реакцию рельсовой цепи на произвольное входное воздействие.
3. Предложенная цифровая модель может быть использована при разработке новых алгоритмов работы путевых приемников рельсовых цепей, поиске новых более информативных форм сигнала контроля рельсовой линии.

Список литературы

- Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями [Текст] / Н. Е. Федоров. – Самара: СамГАПС, 2004. – 132 с.
- 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.
- Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст] / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, 1992. – 384 с.

- Путевая блокировка и авто-регулировка [Текст] / Н. Ф. Котляренко [и др.] – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
- Чепцов, М. Н. Безопасность программного обеспечения микропроцессорных тональных рельсовых цепей [Текст] / М. Н. Чепцов // 36. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк. – 2006. – № 4. – С. 54 – 61.
- 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.
- О повышении надежности рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигналов [Текст] / А. П. Разгонов [и др.] // Тезисы IV Международной научно-практической конференции «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте», пгт. Чинадиево. – Д.: ДИИТ, 2011. – С. 65 – 66.
- Гончаров, К. В. Исследование цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей [Текст] / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2011. – № 37. – С. 180 – 185.
- Гончаров, К. В. Корреляционный путевой приемник тональных рельсовых цепей [Текст] / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2011. – № 38. – С. 188 – 193.
- Методы цифрового моделирования и идентификации стационарных случайных процессов в информационно-измерительных системах [Текст] / А. Н. Лебедев [и др.] – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 64 с.
- Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
- Основы цифровой обработки сигналов [Текст] / А. И. Солонина [и др.] – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.
- Безруков, В. В. Порівняльний аналіз базових методів цифрового моделювання аналогової системи [Текст] / В. В. Безруков, К. В. Гончаров, Д. Ф. Івахненко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2006. – № 12. – С. 12 – 16.
- Smith, S. W. Digital signal processing [Текст] / S. W. Smith. – California Technical Publishing, 1999. – 650 с.

Аннотации:

В работе показана целесообразность использования цифрового моделирования для исследования тональных рельсовых цепей. Получены амплитудно-частотные характеристики рельсовой цепи при различных значениях первичных параметров рельсовой линии. Синтезирована цифровая модель тональной рельсовой цепи, позволяющая найти отклик на произвольное входное воздействие.

Ключевые слова: тональная рельсовая цепь, схема замещения, четырёхполосник, амплитудно-частотная характеристика, импульсная характеристика, цифровая модель

В роботі показана доцільність застосування цифрового моделювання для дослідження тональних рейкових кіл. Отримані амплітудно-частотні характеристики рейкового кола при різних значеннях первинних параметрів рейкової лінії. Синтезована цифрова модель тонального рейкового кола, яка дозволяє знайти відгук на довільний вхідний вплив.

In paper feasibility of using digital simulation to study a tone rail circuits has been shown. The magnitude responses of the tone rail circuit at various values of the primary rail line parameters have been obtained. The digital model of tonal rail circuit, which allows finding a response to any input signal, has been synthesized.

