

## АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

Рассмотрены особенности расчета бесстыковой тональной рельсовой цепи в нормальном и шунтовом режимах работы. Выполнен анализ составления схем замещения элементов рельсовой цепи. Разработана компьютерная математическая модель для анализа искажений амплитудно-манипулированного сигнала методом спектрального анализа электрических цепей в среде Matlab.

Тональные рельсовые цепи (ТРЦ) третьего поколения в настоящий момент времени являются одними из самых широко распространенных систем контроля рельсовых линий (КРЛ). Надежность и функциональная безопасность систем КРЛ непосредственно влияет как на безопасность перевозочного процесса, так и на эксплуатационные показатели работы железнодорожного транспорта Республики Беларусь.

Использование в ТРЦ сигнального тока тонального диапазона (420–780 Гц), позволило значительно повысить пропускную способность, улучшить помехозащищенность, ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, снизить потребляемую мощность, уменьшить количество дроссель-трансформаторов и исключить один из самых ненадежных элементов перегонных рельсовых цепей – изолирующие стыки [1, 2, 4].

Целью данной статьи является разработка компьютерной математической модели в среде Matlab для анализа ТРЦ, определения спектра и формы сигнала КРЛ на различных участках рельсовой цепи.

В настоящее время при составлении регулировочных таблиц ТРЦ используют классическую методику расчета, основанную на цепочечном соединении четырехполюсников [1–4] позволяющую рассчитать уровень сигнала КРЛ только в установившемся состоянии. Данный способ расчета сигнала КРЛ не учитывает искажение сигнального тока после его прохождения через элементы аппаратуры ТРЦ. Это в свою очередь может привести к некорректной регулировке ТРЦ в соответствии с нормальными.

Как было отмечено в работах [5, 6] для анализа амплитудно-манипулированного (АМн) сигнала в ТРЦ целесообразно использовать метод рядов Фурье. Суть метода заключается в анализе искажений спектра сиг-

нального тока при его прохождении через эквивалентные аппаратуры ТРЦ четырехполюсники с последующим переходом во временную область. Исследования, представленные в работе [6] недостаточно точно отражают искажения спектра сигнала КРЛ, т. к. некоторые элементы аппаратуры имитировались четырехполюсниками с идеальными параметрами. При разработке математической модели в соответствии с методикой изложенной в [7] были определены коэффициенты четырехполюсников аппаратуры ТРЦ.

У любой рельсовой цепи можно выделить следующие режимы работы [1–4]:

1) нормальный режим – рельсовая цепь (РЦ) свободна и исправна, путевого приемник выдает дискретную информацию «Свободно»;

2) шунтовой режим – РЦ занята и исправна, путевого приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

3) контрольный режим – РЦ свободна и неисправна (полный электрический разрыв рельсовой нити в любом участке рельсовой линии (РЛ)), путевого приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

4) режим АЛСН – РЦ занята и исправна, в рельсовой петле создается уровень кодового сигнала, достаточный для срабатывания локомотивного приемника, расположенного на удаленном от генератора АЛСН конце РЛ;

5) режим короткого замыкания – рельсовая цепь занята и исправна (координата шунта совпадает с координатой подключения путевого генератора), путевого приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

Рассмотрим расчет перегонной бесстыковой ТРЦ в нормальном и шунтовом режиме. В нормальном режиме укрупненная схема замещения РЦ будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

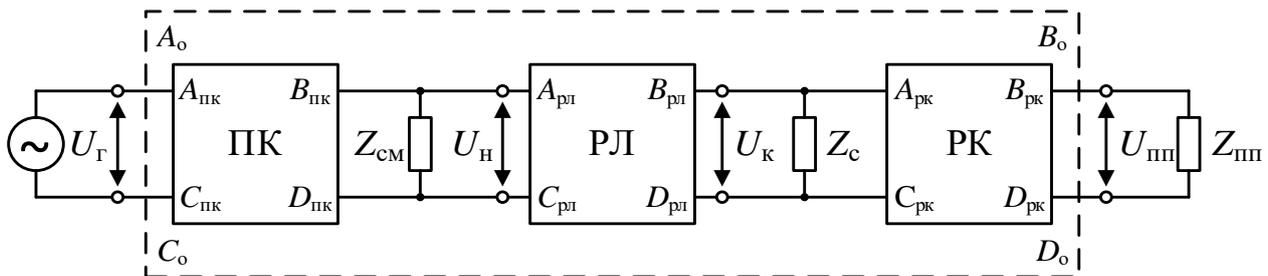


Рисунок 1 – Укрупненная схема замещения бесстыковой ТРЦ в нормальном режиме

Схема замещения представляет собой каскадное соединение четырехполюсников питающего конца (ПК), эквивалентного сопротивления смежной РЦ ( $Z_{см}$ ), четырехполюсника рельсовой линии (РЛ), эквивалентного сопротивления соседней РЦ ( $Z_c$ ) и четырехполюсника релейного конца (РК) нагруженного на сопротивление путевого приемника ( $Z_{пп}$ ). Зависимость между входными ( $U_r, I_r$ ) и выходными ( $U_{пп}, I_{пп}$ ) напряжениями РЦ с помощью коэффициентов  $A_o, B_o, C_o, D_o$  можно описать уравнением четырехполюсника типа А [8]

$$\left. \begin{aligned} U_r &= A_o U_{пп} + B_o I_{пп} \\ I_r &= C_o U_{пп} + D_o I_{пп} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} U_r \\ I_r \end{pmatrix} = M_o \begin{pmatrix} U_{пп} \\ I_{пп} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\begin{pmatrix} U_r \\ I_r \end{pmatrix}$  и  $\begin{pmatrix} U_{пп} \\ I_{пп} \end{pmatrix}$  – матрицы-столбцы напряжения и тока соответственно в начале и конце РЦ;  $M_o = \begin{pmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{pmatrix}$  – квадратная матрица коэффициентов общего четырехполюсника РЦ.

Матрица коэффициентов общего четырехполюсника вычисляется перемножением матриц четырехполюсников, входящих в рельсовую цепь

$$M_o = M_{ПК} M_{см} M_{рл} M_c M_{РК}, \quad (3)$$

где  $M_{ПК}$  – матрица четырехполюсника питающего конца;  $M_{см}$  – матрица эквивалентного сопротивления смежной РЦ;  $M_{рл}$  – матрица четырехполюсника рель-

совой линии;  $M_c$  – матрица эквивалентного сопротивления соседней РЦ;  $M_{РК}$  – матрица четырехполюсника релейного конца.

Матрицы  $M_{см}$  и  $M_c$  представляют собой параллельно включенное входное сопротивление ( $Z_{вх}$ ) смежной / соседней РЦ:

$$Z_{вх} = \frac{AZ_H + B}{CZ_H + D}, \quad (4)$$

где  $Z_H$  – сопротивление нагрузки, представляющее собой входное сопротивление путевого приемника (ПП) или обратное входное сопротивление путевого фильтра (ФПМ);  $A, B, C, D$  – коэффициенты матрицы общего четырехполюсника соответственно питающего или релейного конца смежной / соседней рельсовой цепи.

Стоит отметить, что при длине смежной рельсовой линий более 500 м при расчетах достаточно учитывать ее входное сопротивление в режиме холостого хода [11].

Матрица четырехполюсника ПК (рисунок 2, а) в общем случае состоит из следующих элементов: фильтра путевого ( $M_{фпм}$ ), разделительного конденсатора АЛС ( $M_{алс}$ ), кабельного резистора ( $M_k$ ), кабельной линии (КЛ) от поста ЭЦ до путевого ящика ПК ( $M_{кл}$ ), путевого трансформатора типа ПОС2-50 ( $M_{пт}$ ), защитного резистора ( $M_3$ ) и дроссель-трансформатора ( $M_{дт}$ ).

Матрица четырехполюсника РК (рисунок 2, б) свою очередь может состоять из дроссель-трансформатора ( $M_{дт}$ ), защитного резистора ( $M_3$ ), путевого трансформатора типа ПОС2-50 ( $M_{пт}$ ), КЛ от поста ЭЦ до путевого ящика РК ( $M_{кл}$ ), кабельного резистора ( $M_k$ ) и разделительного конденсатора АЛС ( $M_{алс}$ ).

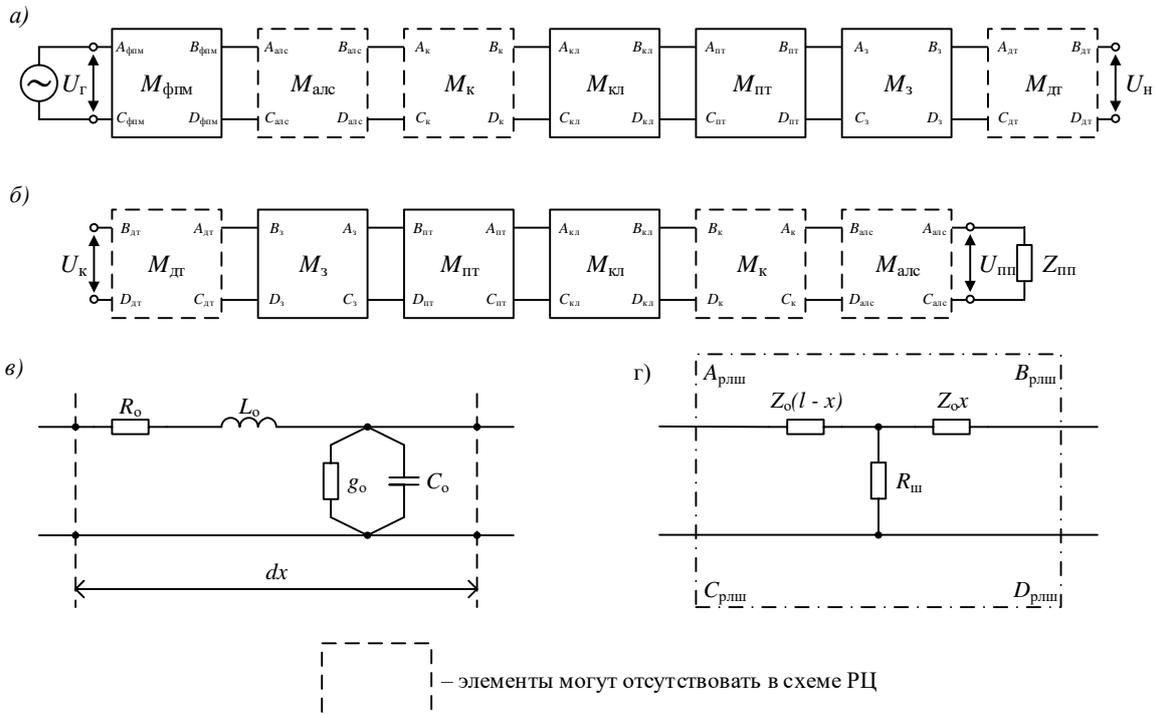


Рисунок 2 – Схемы замещения для участков РЦ:

а – матрица ПК; б – матрица РК; в – рельсовая / кабельная линия; г – рельсовая линия в шунтовом режиме

Типы, количество и номиналы элементов ПК и РК выбираются на основании исходных данных к расчету (путевые планы перегонов или двухниточные планы станций) и могут корректироваться по результату выполненного расчета.

Рельсовые и кабельные линии можно рассматривать как цепи с распределенными параметрами [4, 8]. Для получения уравнений однородной линии их можно условно представить в виде отдельных участков бесконечно малой длины  $dx$  со структурой, представленной на рисунке 2, в. Под первичными параметрами линии будем понимать сопротивление  $R_0$ , индуктивность  $L_0$ , проводимость  $g_0$  и ёмкость  $C_0$ , отнесенные к единице её длины. Их значения могут изменяться в широких пределах в зависимости от конструкции [9]. Полное километрическое сопротивление линии находится как  $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ , а полная километрическая проводимость изоляции – как  $Y_0 = g_0 + j\omega C_0$ , где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота сигнального тока.

Коэффициенты четырехполосника для линии с распределенными параметрами определяются следующим образом [1–3]:

$$\left. \begin{aligned} A &= \operatorname{ch}(\gamma l) \\ B &= Z_B \operatorname{sh}(\gamma l) \\ C &= \gamma l / Z_B \\ D &= \operatorname{ch}(\gamma l) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения волны;  $Z_B$  – волновое сопротивление волны. Волновое сопротивление и коэффициент распространения волны называют вторичными параметрами линии.

Вторичные параметры для РЛ и КЛ вычисляются по следующим формулам [1–4]:

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}, \quad (6)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_0 / Y_0}. \quad (7)$$

При выполнении расчета принимались следующие первичные параметры КЛ для кабеля марки СБПАШП [9] с диаметром жилы 0,9 мм:  $R_0 = 59$  Ом,  $C_0 = 50$  нФ,  $g_0 = 0$  См,  $L_0 = 0$  Гн.

Для расчета вторичных параметров РЛ вместо проводимости  $g_0$ , как правило, используют ее обратную величину – сопротивление изоляции  $r_{и}$ . При расчете РЦ на частотах до 2 кГц, сопротивление изоляции будет чисто активным [1–4], т. е.  $C_0 = 0$ . С учетом этого выражения (6) и (7) примут следующий вид:

$$\gamma = \sqrt{Z_0 / r_{и}}, \quad (8)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_0 r_{и}}. \quad (9)$$

Сопротивление изоляции РЛ  $r_{и}$  изменяется от десятых долей Ом·км до десятков Ом·км и зависит от типа шпал, состояния балласта и погодных условий. Для расчета РЦ на перегоне с нормальным сопротивлением балласта минимальное расчетное значением  $r_{и} = 1$  Ом·км, а максимальное  $r_{и} = 50$  Ом·км.

Полное километрическое сопротивление РЛ  $Z_0$  зависит от ее первичных параметров. В справочной литературе [1–4] приведены значения  $Z_0$  только для

некоторых частот. Для анализа влияния РЛ на форму сигнала КРЛ воспользуемся математической моделью РЛ. Основными параметрами для создания математической модели РЛ являются [1, 4]:

Активное сопротивление рельсов, Ом/км, определяется по формуле Неймана [1]

$$R_a = \frac{0,28}{u} \sqrt{\mu_{er} \rho f}, \quad (10)$$

где  $u$  – периметр поперечного сечения рельса, м;  $\mu_{er}$  – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали;  $\rho$  – удельное сопротивление РЦ, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $f$  – частота сигнального тока.

В области слабых магнитных полей, создаваемых сигнальными токами величиной до 30 А, при расчетах РЦ начальное значение относительной магнитной проницаемости рельсов берут равным  $\mu_{er} \approx 100$  [10].

Протекая по РЛ переменный ток создает магнитный поток, часть которого находится в пределах каждого рельса, а часть – между рельсами. В соответствии с этим полную удельную индуктивность двухпроводной линии  $L_{\pi}$  можно представить в следующем виде [1, 3]:

$$L_{\pi} = L_e + 2(L_i + L_{ст}), \quad (11)$$

где  $L_e$  – внешняя индуктивность двухпроводной линии, Гн/км;  $L_i$  – внутренняя индуктивность целой рельсовой нити, Гн/км;  $L_{ст}$  – индуктивность стыковых соединителей, приходящихся на 1 км рельсовой нити, Гн/км.

Внутренняя индуктивность, так же как и активное сопротивление рельсов, зависит от частоты переменного тока и магнитной проницаемости стали [1]

$$L_i = \frac{0,0955 R_a}{f}. \quad (12)$$

Удельная внешняя индуктивность двухпроводной однородной линии будет зависеть от ее геометрических параметров [1, 3]:

$$L_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \ln \frac{a-b}{b}, \quad (13)$$

где  $a$  – расстояние между осями рельсов, м;  $b = u/2\pi$  – радиус эквивалентного проводника, м.

Согласно [1, 3] полное километрическое сопротивление РЛ  $Z_0$  переменному току, Ом/км,

$$Z_0 = 2 \left( R_a + \sum_1^n r_{ст} \right) + j\omega L_{\pi} = |Z_0| e^{j\varphi_{Z_0}}, \quad (14)$$

где  $r_{ст}$  – активное сопротивление стыковых соединителей, Ом/км;  $n$  – количество стыковых соединителей, приходящихся на 1 км рельсовой нити.

Параметры (10)–(14) определялись для рельсов типа Р65 с длиной плетей 25 м с приварными стыковыми соединителями. Частотные зависимости вторичных параметров РЛ определялись по (8), (9) для различных значений сопротивления изоляции и представлены на рисунке 3.

Для получения частотных характеристик вторичных параметров РЛ также можно выполнить интерполяцию нормативных значений [6].

Для обеспечения работы РЦ в шунтовом режиме, необходимо, чтобы при максимальном напряжении источника питания и наилучших условиях для передачи сигнала, напряжение (ток) на входе путевого приемника были не выше значений его надежного отпускания. При расчете шунтового режима схема замещения РЛ, заменяется схемой, представленной на рисунке 2, з. Коэффициенты четырехполюсника РЛ определяются из соотношений

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{рлш}} &= 1 + \frac{Z_0 \cdot (l-x)}{R_{\text{шн}}} \\ B_{\text{рлш}} &= Z_0 \cdot l + \frac{Z_0 \cdot x \cdot Z_0 \cdot (l-x)}{R_{\text{шн}}} \\ C_{\text{рлш}} &= 1/R_{\text{шн}} \\ D_{\text{рлш}} &= 1 + \frac{Z_0 \cdot x}{R_{\text{шн}}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где  $l$  – длина рельсовой линии;  $x$  – расстояние от приемного конца до места наложения шунта;  $R_{\text{шн}}$  – сопротивление нормативного шунта.

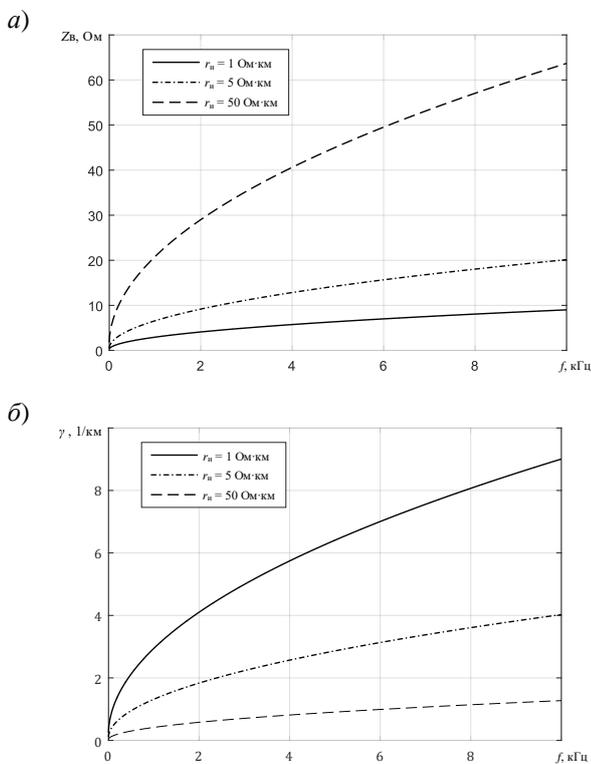


Рисунок 3 – Расчетные частотные зависимости:  
а – модуля волнового сопротивления рельсовой линии;  
б – модуля коэффициента распространения рельсового тракта;

С учетом (15) выражение (3) примет следующий вид:

$$M_0 = M_{\text{пк}} M_{\text{см}} M_{\text{рлш}} M_{\text{с}} M_{\text{рк}}, \quad (16)$$

где  $M_{\text{рлш}} = \begin{bmatrix} A_{\text{рлш}} & B_{\text{рлш}} \\ C_{\text{рлш}} & D_{\text{рлш}} \end{bmatrix}$  – квадратная матрица коэф-

фициентов четырехполюсника РЛ в шунтовом режиме. Зная фактическое напряжение на путевом генераторе, рассчитанное в нормальном режиме, определяют напряжение на входе путевого приемника в шунтовом

режиме и сравнивают его с максимально допустимым напряжением отпускания.

Для расчета РЦ в остальных режимах работы необходимо использовать соответствующие схемы замещения [1–4].

Режим работы РЦ можно характеризовать передаточными функциями при заданном сопротивлении приемника. Комплексная передаточная функция по напряжению на участке  $i$  РЦ [8]

$$K_{U_i}(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}_i}(j\omega)}{U_{\text{вх}_i}(j\omega)} = \frac{Z_{\text{н}}(j\omega)}{A_i(j\omega)Z_{\text{н}}(j\omega) + B_i(j\omega)}, \quad (17)$$

где  $U_{\text{вых}_i}$  – комплексное выходное напряжение на участке  $i$ ;  $U_{\text{вх}_i}$  – комплексное входное напряжение на участке  $i$ ;  $Z_{\text{н}}$  – комплексное сопротивление нагрузки;  $A_i$  и  $B_i$  – коэффициенты четырехполюсника  $i$ , через который проходит сигнал КРЛ.

Знание коэффициентов четырехполюсников аппаратуры входящей в состав РЦ, частотных зависимостей РЛ и РК, а также частотной характеристики входного сопротивления ПП позволяет определять комплексные коэффициенты передачи на любом участке РЦ.

При составлении компьютерной модели для анализа ТРЦ использовался спектральный метод анализа электрических цепей [8]. С помощью инструментов среды Matlab был произведен синтез АМн сигнала КРЛ  $u_r(t)$  (рисунок 4, а). АМн сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов с прямоугольной огибающей. С помощью преобразования Фурье находится спектр сигнала  $u_r(t)$  в начале РЦ (рисунок 4, б)

$$U_r(j\omega) = \int_0^{\infty} u_r(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (18)$$

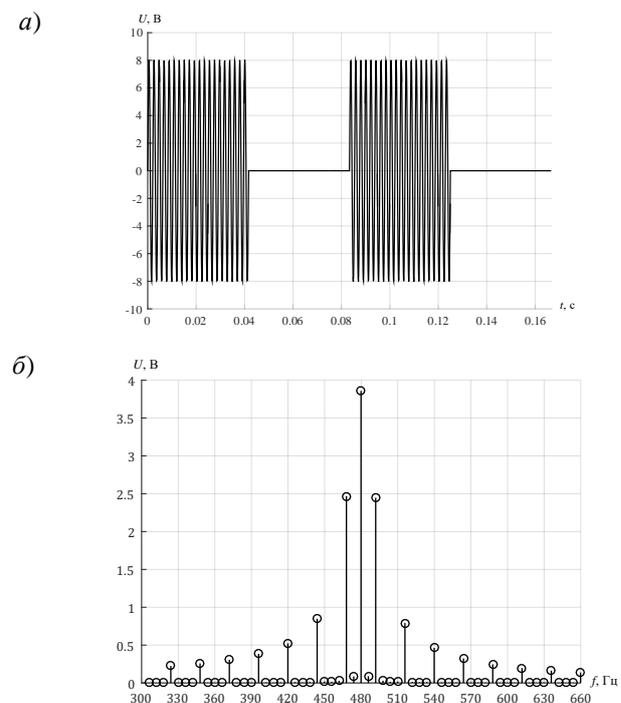


Рисунок 4 – Временная (а) и частотная (б) характеристика АМн сигнала в начале РЦ

После этого для анализа сигнала КРЛ на любом участке РЦ с помощью выражений (17) и (4) определяется комплексная частотная характеристика четырехполюсника, через который проходит сигнал, коэффициенты  $A_i$  и  $B_i$  соответственно берутся для исследуемого четырехполюсника. Определяется спектр сигнала на выходе участка  $i$

$$U_{\text{вых}_i}(j\omega) = U_{\text{вх}_i}(j\omega)K_{U_i}(j\omega). \quad (19)$$

Для перехода во временную область используется обратное преобразование Фурье

$$u_{\text{вых}_i}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{вых}_i}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (20)$$

Как можно увидеть из выражения (17) ( $Z_{\text{н}} = Z_{\text{пт}}$ ), для анализа искажений АМн сигнала КРЛ помимо частотных характеристик четырехполюсников необходимо также определить частотную характеристику водного сопротивления путевого приемника.

Путевые приемники ППЗ, ППЗМ предназначены для приема и дешифрования АМн сигнала с несущими частотами ( $f_{\text{н}}$ ) в диапазоне от 420 до 780 Гц, частотой модуляции ( $f_{\text{м}}$ ) 8 или 12 Гц и входят в состав аппаратуры КРЛ при любом виде тяги поездов [12]. Подавление сигналов соседних РЦ, сигналов АЛС, гармоник тягового тока осуществляется с помощью входного полосового фильтра, собранного из двух пар связанных колебательных контуров [6].

Для определения входного сопротивления путевого приемника примем из работы [6] схему замещения входной цепи и базовые аналитические зависимости (формулы (21), (22)).

Первый колебательный контур состоит из катушки  $L_1$ , индуктивно связанной с катушкой  $L_2$ , и обеспечивает требуемое значение входного сопротивления.  $L_2$ ,  $C_2$  и  $L_3$ ,  $C_3$  представляют пару связанных контуров (рисунок 5). В данную схему для учета влияния входного сопротивления транзисторного каскада, а также потерь в контурах введены резисторы  $R_2$  и  $R_3$  [6].

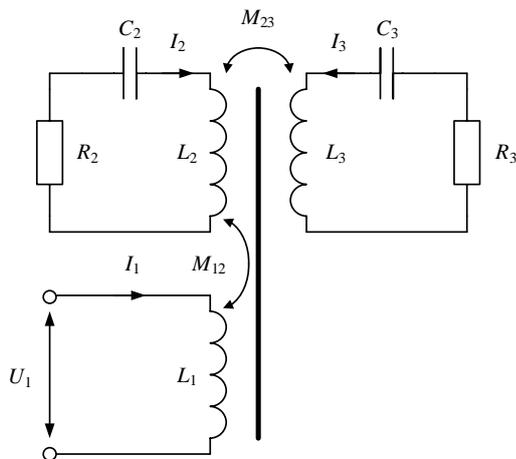


Рисунок 5 – Схема замещения входной цепи путевого приемника

Выражения для токов  $- \dot{I}_{1,2,3}$ , возбуждаемых в контурах входного фильтра в комплексной форме,

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_{12}, \\ -\dot{I}_1 Z_{12} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_3 Z_{23}, \\ -\dot{I}_2 Z_{23} = \dot{I}_3 Z_3, \end{cases} \quad (21)$$

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,  $M_{12}$  и  $M_{23}$  – взаимные индуктивности контуров.

Из системы уравнений (21) получим выражение для определения входного сопротивления путевого приемника

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_1 - \frac{Z_{12}^2 Z_3}{Z_2 Z_3 - Z_{23}^2}. \quad (22)$$

В соответствии с выражением (22) рассчитана идеальная частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника для частоты 480 Гц (рисунок 6, а). Полученная частотная характеристика соответствует характеристикам, указанным в [4, 12]. Однако стоит отметить, что при эксплуатации довольно часто встречаются приемники, у которых входное сопротивление на частоте  $f_{\text{н}}$  ниже среднего значения, допускаемого по ТУ, а сопротивление на частотах  $f_{\text{н}} \pm \pm f_{\text{м}}$  могут отличаться в 2,2–2,5 раза [13] (рисунок 6, б), что также необходимо учитывать при моделировании.

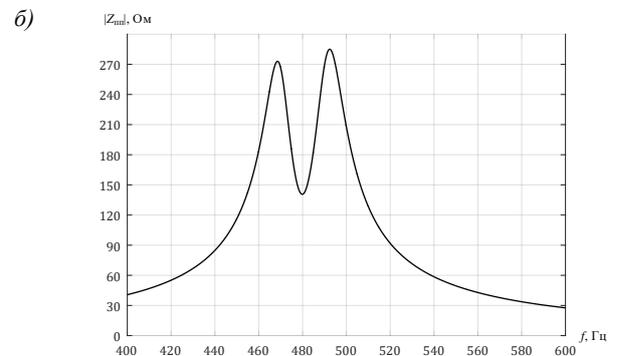
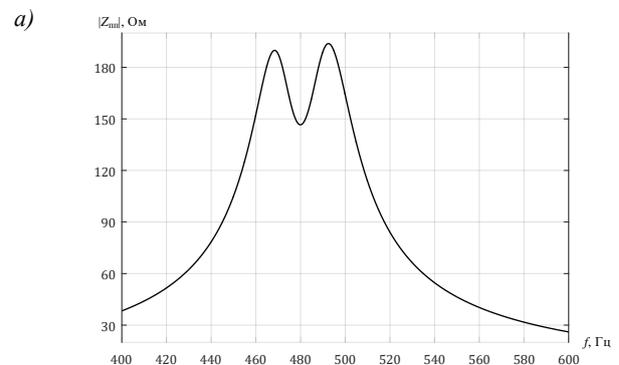


Рисунок 6 – Частотные зависимости модуля входного сопротивления путевого приемника

Полученные в соответствии с описанной моделью частотные и временные диаграммы сигнала КРЛ представлены на рисунке 7.

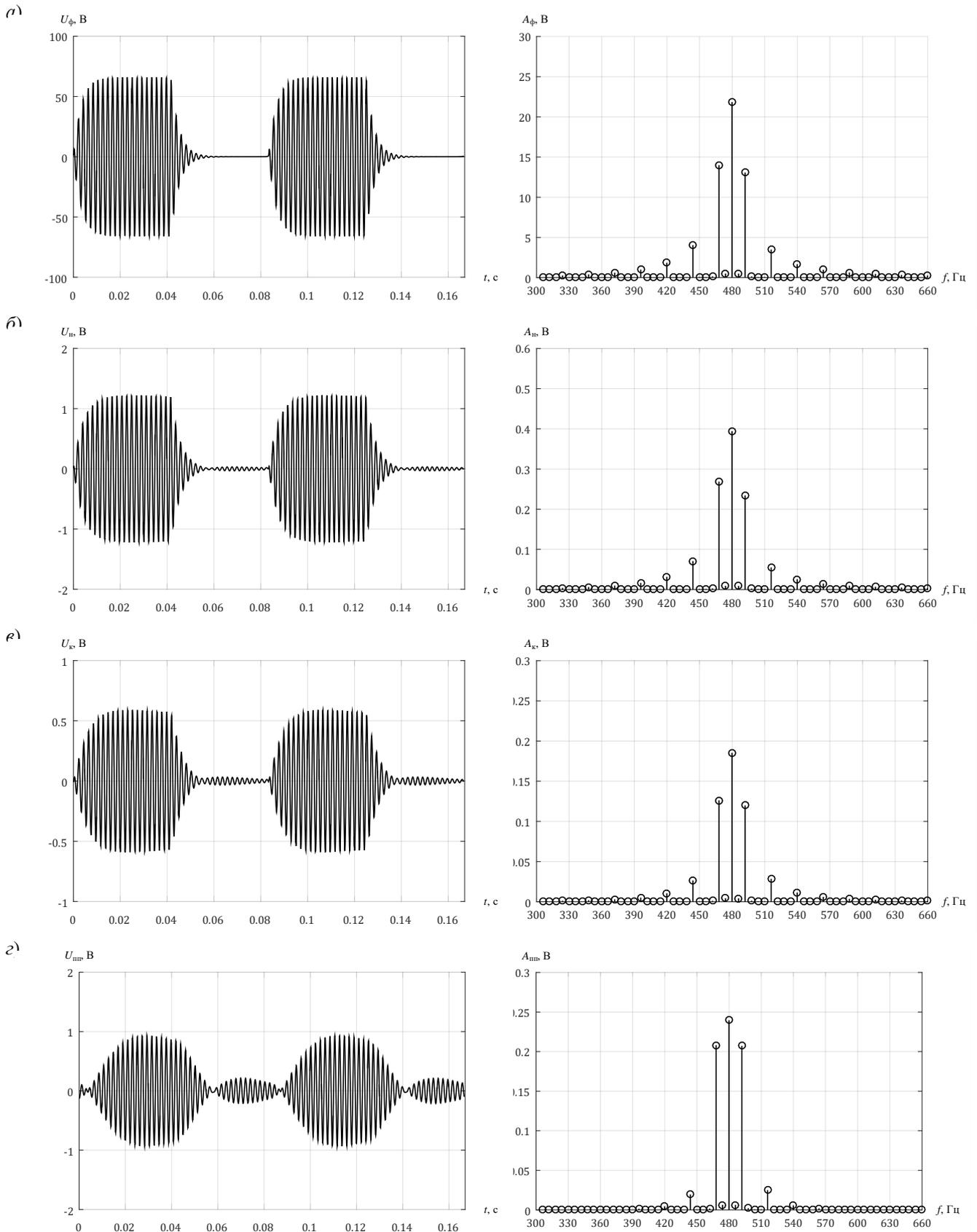


Рисунок 7 – Временные и частотные диаграммы сигналов:  
 а – на выходе ФПМ; б – в начале РЛ; в – в конце РЛ; г – на входе ПП

Для исследования искажений АМн сигнала КЛР в нормальном режиме была смоделирована бесстыковая ТРЦ со следующими параметрами:

- 1) несущая частота – 480 Гц;
- 2) моделирующая частота – 12 Гц;
- 3) длина РЦ – 0,7 км;
- 4) длина смежных РЦ – 0,65 и 0,59 км;
- 5) длина кабеля ПК – 1,1 км;
- 6) длина кабеля РК – 1,8 км;
- 7) емкость конденсатора АЛС – 4 мкФ;
- 8) выход ФПМ – 12–61;
- 9) сопротивление балласта – 1 Ом·км;
- 10) коэффициент трансформации согласующих трансформаторов типа ПОС2-50 – 38;
- 11) сопротивление защитного резистора ПК – 2,2 Ом;
- 12) сопротивление защитного резистора РК – 0,23 Ом;
- 13) сопротивление кабельных резисторов – 47 Ом.

Входное сопротивление путевого приемника соответствует рисунку 6, а.

Не трудно заметить, что при прохождении через аппаратуру ТРЦ сигнал КРЛ значительно искажается. Путевой фильтр ФПМ значительно ограничивает верхнюю и нижнюю боковую полосу спектра сигнала КЛР, что в свою очередь приводит к затягиванию фронта и среза импульсов сигнала (см. рисунки 4 и 7, а). Форма сигнала в начале и конце РЛ (рисунок 7, б, в) соответствует форме сигнала на выходе путевого фильтра. Это позволяет сделать вывод, что устройства защиты и согласования, а также кабельная линия влияют в основном на амплитуду сигнала КРЛ.

Форма сигнала на входе путевого приемника значительно искажена (рисунок 7, г). Это объясняется спецификой конструкции входного полосового фильтра, состоящего из двух связанных контуров имеющих два частных резонанса, что приводит к еще большему ограничению амплитудного спектра сигнала КРЛ, а также к искажению фазового спектра. В связанных контурах на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, что приводит к появлению в паузе дополнительного импульса.

Использование спектрального метода анализа тональных рельсовых цепей позволяет определить не только уровень, но и частотную и временную зависимость сигнала КРЛ на входе путевого приемника при различных значениях напряжения путевого генератора.

Полученные зависимости сигнала КРЛ будут полезны при разработке новых аппаратно-программных средств контроля состояния рельсовой линии. Предложенный метод анализа может использоваться для анализа рельсовых цепей с различными формами сиг-

нального тока, а также для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

#### Список литературы

- 1 **Аркатов, В. С.** Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
- 2 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справ. / В. С. Аркатов [и др.]. – 3-е изд. – М. : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с.
- 3 **Брылеев, А. М.** Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.
- 4 **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. : Мануфактура, 2004. – 288 с.
- 5 **Комнатный, Д. В.** Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала тональных рельсовых цепей / Д. В. Комнатный // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч. Ч. 1, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 220–221.
- 6 **Гончаров, К. В.** Исследование переходных процессов в тональных рельсовых цепях / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 4. – С. 8–17.
- 7 **Медведев, Д. Д.** Определение первичных параметров элементов ЖАТС с ферромагнитными компонентами / Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко, И. О. Жигалин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 2 (47). – С. 11–13.
- 8 Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке [и др.], – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 9 **ГОСТ Р 56292–2014.** Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия. – Введ. впервые ; введ. РФ 2014–11–26. – М. : РСТ, 2014. – 27 с.
- 10 **Шаманов, В. И.** Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 196–203.
- 11 **Медведев, Д. Д.** Определение длины смежных и соседних рельсовых линий для решения задач расчета бесстыковых рельсовых цепей / Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа. В 2 ч. Ч. 1, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 226–228.
- 12 **Сороко, В. И.** Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. 4 кн. Кн. 1 / В. И. Сороко, Ж. В. Фоткина. – 4-е изд. – М. : НПФ «Планета», 2013. – 1060 с.
- 13 Корректный метод контроля и расчета параметров сигналов тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 37–43.

Получено 13.03.2024

#### **D. D. Medvedev.** Distortion analysis of the amplitude-manipulated rail line control signal.

The article considers the peculiarities of calculating a jointless tonal rail circuit in normal and shunt modes of operation. The analysis of substitution diagrams of rail circuit elements is performed. A computer mathematical model for analyzing distortions of amplitude-manipulated signal by the method of spectral analysis of electric circuits in Matlab environment is developed.