

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ОБРАТНОЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ

Запропоновано оригінальний метод автоматизованого вимірювання електромагнітних завад у зворотній тяговій мережі, який реалізовано на базі вагону-лабораторії «Автоматика, телемеханіка та зв'язок». Для наукового обґрунтування методу розроблено математичну модель зворотньої тягової мережі, яка дозволила отримати математичні вирази зміни гармонійних складових напруги та струму в рейковій мережі з урахуванням неоднорідності ліній для подальшого аналітичного визначення джерела завади.

Предложен оригинальный метод автоматизированного измерения помех в обратной тяговой сети, который реализован на базе вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь». Для научного обоснования метода разработана математическая модель обратной тяговой сети, которая позволила получить математические выражения изменения гармонических составляющих напряжения и тока в рельсовой сети с учетом неоднородности линий для дальнейшего аналитического определения источника помехи.

The original automated method of measurement of electrical noise in the return electric-traction network is proposed. It is realized on the base of car-laboratory "Automatics, telemechanics and communication". The mathematic model of return electric-traction network is developed to scientific bases of automated measurement. It allows us obtaining the mathematic expressions for change of voltage and current harmonics in the rail net and taking into account the inhomogeneity of lines for the following analytic determination of a source of electric noise.

ВВЕДЕНИЕ

Рельсовые цепи (РЦ) и система автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), которые относятся к устройствам автоматики, обеспечивающим безопасность движения поездов, подвергаются постоянному электромагнитному воздействию со стороны системы тягового электроснабжения, что вызывает их неустойчивую работу. Обеспечение надежной и бесперебойной работы устройств железнодорожной автоматики с каждым годом приобретает все большее значение ввиду внедрения нового типа подвижного состава (с импульсной системой управления, асинхронными тяговыми двигателями и др.), микропроцессорных систем автоблокировки, диспетчерской и электрической централизации, устройств связи. Все это вызывает необходимость выполнять глубокий анализ источников помех в рельсовых линиях и проводить теоретические и экспериментальные исследования их распространения.

Комплексный анализ электромагнитной совместимости устройств автоматики с системой тягового электроснабжения включает в себя: определение степени влияния излучения источника на существующую аппаратуру; оценку уровня помех, возникающих в приемнике; нахождение источника и причины возникновения помехи; получение информации об электромагнитной обстановке конкретного месторасположения аппаратуры и восприимчивости

приемника. Таким образом, задача, связанная с обеспечением электромагнитной совместимости устройств автоматики с системой тягового электроснабжения на заданном участке, является актуальной и требующей немедленного планомерного решения.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель системы тягового электроснабжения участков с учетом влияния заземления различных устройств на рельсы, в которой рельсовые линии используются в качестве обратного провода.

Существует ряд математических моделей системы тягового электроснабжения, в которых локальная нагрузка заменена равномерно распределенной, что характерно для участков с большой интенсивностью движения поездов [1 – 4]. В настоящее время в связи с экономическим кризисом наметилась тенденция к уменьшению грузо- и пассажирооборота на железных дорогах Украины. Поэтому данная работа посвящена разработке математической модели системы тягового электроснабжения как грузонапряженных, так и малодетальных участков, которая послужит научным обоснованием методики автоматизированного измерения помех во время контрольной поездки вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь» по величине электродвижущей силы в приемных катушках, пропорциональной току в рельсовой линии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Для решения поставленной задачи – научно обоснования метода автоматизированного измерения с вагона-лаборатории – разработана математическая модель системы тягового электроснабжения, которая позволяет учесть влияние помех на устройства, подключенные к каналам АЛС. В отличие от существующих, в предложенной математической модели неоднородность участка определяется на основании данных, полученных во время проведения измерений вагоном-лабораторией с помощью специально разработанного аппаратно-программного комплекса.

Математическая модель системы тягового электроснабжения также дает возможность оценить распределение гармоник тягового тока на однородных и неоднородных малодетальных участках при различных значениях сопротивления изоляции и проводов по длине фидерной зоны при заданном числе локомотивов на участке.

Предлагается выполнять измерение уровня и спектрального состава помех с вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь» по значению электродвижущей силы в приемных катушках, которая наводится под действием обратного тягового тока. Поскольку приемные катушки вагона-лаборатории или локомотива включены последовательно встречно, то выполнять контроль уровней и спектральный состав электромагнитных помех в рельсовых линиях необходимо в паузах кодовых циклов и с каждой катушки по отдельности. Это, в свою очередь, дает возможность оценить величину токов асимметрии.

Структурная схема передачи информации о состоянии (свободности-занятости) впереди лежащих блок-участков на локомотив для одной РЦ и измерении электромагнитных помех и параметров кодового тока показана на рис. 1. На питающем конце рельсовой цепи установлен передатчик кодовых сигналов, который

включает в себя контакты транзитного реле T и ограничивающее сопротивление. Релейный конец РЦ шунтирован колесной парой, на расстоянии l_0 от первой колесной пары подвижного состава находятся приемные катушки ПК1 и ПК2, которые соединены последовательно. Ток $I_{\text{АЛС}}$ в канале связи, образованном рельсами «Рельс 1» и «Рельс 2» и колесной парой, протекает под каждой из катушек в противоположном направлении. Суммарная наведенная ЭДС равна

$$\bar{E} = \bar{E}_1 + \bar{E}_2, \quad (1)$$

где \bar{E}_1, \bar{E}_2 – ЭДС, наведенные в приемных катушках ПК1 и ПК2, соответственно.

Для математического описания процесса распространения гармонических составляющих тягового тока, тока утечки и кодового тока по длине рельсовой цепи и фидерной зоны была составлена математическая модель, рельсовая цепь в которой рассматривается как шестиполусник, а обратным проводом является земля. Наиболее полное представление о протекании обратного тягового тока в рельсовой сети однопутного участка с двусторонним питанием можно получить благодаря схеме, представленной на рис. 2, где показаны контактная и рельсовая сеть, подключенные к тяговому подстанциям ТП1 и ТП2, а также рельсовые цепи.

Участок оборудован системой трехзначной кодовой автоблокировки. На границе каждой рельсовой цепи установлены светофоры, а питающий и релейный концы рельсовых цепей обозначены буквами «п» и «р», соответственно.

Возможные сигнальные показания светофоров – красный К, желтый Ж и зеленый З огни. К рассмотрению была принята именно эта схема питания тяговой нагрузки, поскольку она позволяет выделить три основных случая влияния тягового тока на аппаратуру кодовых рельсовых цепей, а также учитывает такой частный случай, как одностороннее электроснабжение потребителей, и является подсхемой для исследования многопутных участков.

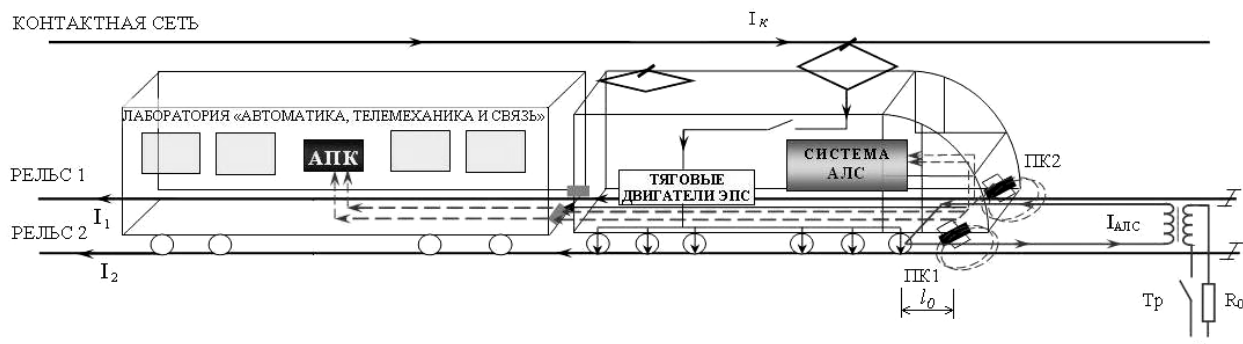


Рис. 1. Схема передачи информации к приемным устройствам подвижного состава по рельсовой цепи

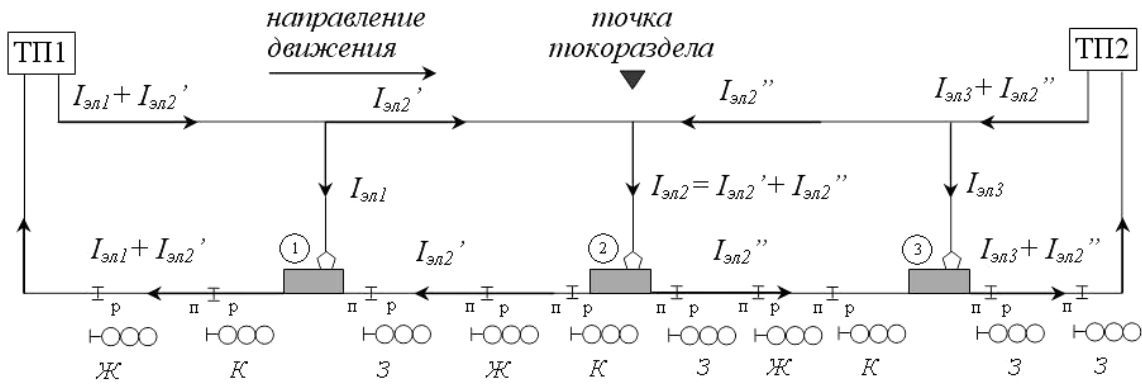


Рис. 2. Схема системы тягового электроснабжения однопутного участка с двусторонним питанием и тремя электровозами

По величине тягового тока, оказывающего влияние на аппаратуру питающего и релейного концов рельсовой цепи шунтированной электровозом (см. рис. 2), можно выделить такие виды воздействия: электровоз № 2 находится в точке токораздела и величины обратного тягового тока, протекающего через дроссель-трансформаторы (ДТ) питающего и релейного концов, соизмеримы; электровоз находится на участке «ТПП1 – точка токораздела» и величина обратного тягового тока, протекающего через ДТ питающего конца, меньше, чем через ДТ релейного; электровоз находится на участке «ТПП2 – точка токораздела» и величина обратного тягового тока, протекающего через ДТ релейного конца, меньше, чем через ДТ питающего. При одностороннем питании участка или в случае вынужденного режима работы системы двустороннего тягового электроснабжения при отключении ТПП1 влиянию обратного тягового тока будет подвержен лишь питающий конец рельсовой цепи шунтированной колесной парой локомотива, при отключении ТПП2 – релейный.

Для определения величины обратного тягового тока, протекающего под первой колесной парой локомотива, была составлена математическая модель рельсовой сети, рельсовая цепь в которой представлена шестиполусником (рис. 3).

Такое представление электрической цепи позволяет учитывать влияние различных источников помех и действие внешних факторов, которые приводят к изменению параметров рельсовой линии и оказывают влияние на работу смежных устройств системы железнодорожной автоматики и линий связи.

Для заданной схемы замещения (рис. 2) справедлива следующая система дифференциальных уравнений.

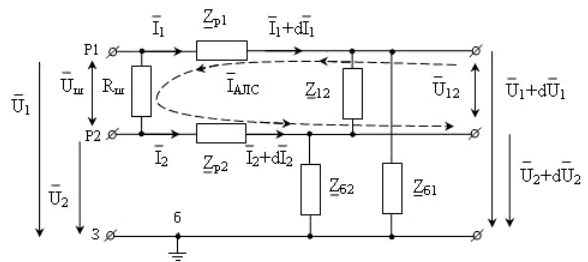


Рис. 3. Схема замещения рельсовой цепи, шунтированной колесной парой

Система уравнений составлена по методу контурных токов для внешних и внутренних контуров шестиполусника, который имеет один поперечный элемент (землю 3) и базисный узел (б), и метода узловых потенциалов.

$$\begin{cases} \frac{-d\bar{U}_1}{dx} = \bar{I}_1 \cdot \underline{Z}_{p1} - \bar{I}_2 \cdot \underline{Z}_M; \\ \frac{-d\bar{U}_2}{dx} = \bar{I}_2 \cdot \underline{Z}_{p2} - \bar{I}_1 \cdot \underline{Z}_M; \\ \frac{-d\bar{I}_1}{dx} = \frac{1}{\underline{Z}_{12}} (\bar{U}_1 - \bar{U}_2) + \frac{\bar{U}_1}{\underline{Z}_{61}}; \\ \frac{-d\bar{I}_2}{dx} = \frac{1}{\underline{Z}_{12}} (\bar{U}_2 - \bar{U}_1) + \frac{\bar{U}_1}{\underline{Z}_{62}}, \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{U}_1, \bar{U}_2 – комплексные падения напряжений в контурах «рельс P1 – земля», «рельс P2 – земля» на элементарном участке dx соответственно, В; \bar{I}_1, \bar{I}_2 – комплексные значения изменения тока на элементарном участке dx в рельсах, А (причем в общем случае ток в каждом из рельсов равен $\bar{I}_{1(2)} = \bar{I}_{эл1(2)} \pm \bar{I}_{АЛС1(2)}$); $\underline{Z}_{p1}, \underline{Z}_{p2}$ – комплекс удельных сопротивлений рельсов P1, P2, Ом/км; \underline{Z}_{12} – сопротивление изоляции между рельсами P1, P2, Ом·км; \underline{Z}_M – со-

противление взаимоиндукции между рельсами, Ом/км; Z_{61} , Z_{62} – сопротивление изоляции между рельсами P1 и P2 и землей, Ом·км.

Дифференцируя $\frac{d\bar{U}_1}{dx}$, $\frac{d\bar{U}_2}{dx}$ и подставляя в них значения $\frac{d\bar{I}_1}{dx}$, $\frac{d\bar{I}_2}{dx}$, получим систему линейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{-d^2\bar{U}_1}{dx^2} = \frac{d\bar{I}_1}{dx} \cdot Z_{p1} - \frac{d\bar{I}_2}{dx} \cdot Z_M; \\ \frac{-d^2\bar{U}_2}{dx^2} = \frac{d\bar{I}_2}{dx} \cdot Z_{p2} - \frac{d\bar{I}_1}{dx} \cdot Z_M; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{-d^2\bar{U}_1}{dx^2} = -\bar{U}_1 \cdot \frac{(Z_{p1} + Z_M) \cdot Z_{61} + Z_{p1} \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{61}} + \\ + \bar{U}_2 \cdot \frac{(Z_{p1} + Z_M) \cdot Z_{62} + Z_M \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{62}}; \\ \frac{-d^2\bar{U}_2}{dx^2} = \bar{U}_1 \cdot \frac{(Z_{p2} + Z_M) \cdot Z_{61} + Z_M \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{61}} - \\ - \bar{U}_2 \cdot \frac{(Z_{p2} + Z_M) \cdot Z_{62} + Z_{p2} \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{62}}. \end{cases} \quad (3)$$

Пусть

$$\begin{aligned} a &= \frac{(Z_{p1} + Z_M) \cdot Z_{61} + Z_{p1} \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{61}}; \\ b &= \frac{(Z_{p1} + Z_M) \cdot Z_{62} + Z_M \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{62}}; \\ c &= \frac{(Z_{p2} + Z_M) \cdot Z_{61} + Z_M \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{61}}; \\ d &= \frac{(Z_{p2} + Z_M) \cdot Z_{62} + Z_{p2} \cdot Z_{12}}{Z_{12} \cdot Z_{62}}; \end{aligned}$$

тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{-d^2\bar{U}_1}{dx^2} = -\bar{U}_1 \cdot a + \bar{U}_2 \cdot b; \\ \frac{-d^2\bar{U}_2}{dx^2} = \bar{U}_1 \cdot c - \bar{U}_2 \cdot d. \end{cases} \quad (4)$$

Причем при исследовании однородной рельсовой сети без асимметрии $a = d$, $b = c$.

Приведя систему дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши

$$\begin{cases} \frac{d\bar{U}_1}{dx} = \bar{U}_3; \\ \frac{d\bar{U}_2}{dx} = \bar{U}_4; \\ \frac{d\bar{U}_3}{dx} = \bar{U}_1 \cdot a - \bar{U}_2 \cdot b; \\ \frac{d\bar{U}_4}{dx} = -\bar{U}_1 \cdot c + \bar{U}_2 \cdot d \end{cases} \quad (5)$$

и записав характеристический определитель Коши

$$[A - \kappa \cdot E] = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 1 \\ a & -b & -\lambda & 0 \\ -c & d & 0 & -\lambda \end{bmatrix}, \quad (6)$$

получим решение в виде:

$$\bar{U}_1 = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot e^{\lambda_i \cdot x}; \quad \bar{U}_2 = \sum_{i=1}^4 C_i \cdot e^{\lambda_i \cdot x}, \quad (7)$$

где A_i , C_i – постоянные интегрирования, $i = 1 \dots 4$ – индекс, λ_i – корни уравнения $[A - \kappa \cdot E] = 0$:

$$\lambda_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{2(d+a) + 2\sqrt{d^2 + a^2 - 2ad - 4cd}};$$

$$\lambda_{3,4} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{2(d+a) - 2\sqrt{d^2 + a^2 - 2ad - 4cd}}.$$

Определить изменение тока в рельсах P1 и P2 по длине участка можно по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= -\frac{Z_{61} + Z_{12}}{Z_{61} \cdot Z_{12}} \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{\lambda_i} \cdot e^{\lambda_i \cdot x} + \frac{1}{Z_{12}} \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\lambda_i} \cdot e^{\lambda_i \cdot x} = \\ &= \sum_{i=1}^4 B_i \cdot e^{\lambda_i \cdot x}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 &= -\frac{Z_{62} + Z_{12}}{Z_{62} \cdot Z_{12}} \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\lambda_i} \cdot e^{\lambda_i \cdot x} + \frac{1}{Z_{12}} \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{\lambda_i} \cdot e^{\lambda_i \cdot x} = \\ &= \sum_{i=1}^4 D_i \cdot e^{\lambda_i \cdot x}, \end{aligned} \quad (9)$$

где B_i , D_i – постоянные интегрирования.

Таким образом, на основе уточненной схемы замещения обратной тяговой сети были получены математические зависимости изменения напряжения и тока в рельсах. При этом обратная тяговая сеть может рассматриваться как однородная, так и неоднородная длинная линия. Полученные уравнения (7 – 9) являются

универсальными, поскольку позволяют рассматривать изменение как постоянного тока и напряжения характерное для участков с электрической тягой, так и переменного – для участков с любым видом тяги.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование распространения гармоник по длине фидерной зоны выполнено для участка длиной 20 км с двусторонним питанием для мгновенного (в данный момент времени) расположения трех электровазов на расстоянии 5 км друг от друга (рис. 4). По результатам экспериментальных данных была зафиксирована гармоническая помеха амплитудой 10 А частотой 100 Гц, причиной возникновения которой является работа тяговых двигателей локомотивов [5]. Расчеты выполнены при сопротивлении рельсовой сети:

$$Z_{p1} = Z_{p2} = 0,108 + 0,181j \text{ Ом/км};$$

$$Z_{m12} = 0,099 + 0,56j \text{ Ом/км};$$

$$Z_{12} = 0,127 - 0,255j \text{ Ом}\cdot\text{км};$$

$$Z_{61} = Z_{62} = 2 \text{ Ом}\cdot\text{км} [1, 6].$$

Участок однопутный с рельсами Р65, уложенными на деревянных шпалах и щебеночном балласте. Тип контактной подвески М-95 + МФ-100.

При использовании упомянутых выше исходных данных было получено, что коэффициенты системы уравнений (4), составленной для участка с однородной рельсовой сетью, равны $a = d = -1,949 + 1,9j$, $c = b = -1,954 + 2,09j$, а корни характеристического уравнения – $\lambda_{1,2} = \pm 1,414 \pm 1,363j$, $\lambda_{3,4} = \pm 0,013 \pm 2,01j$.

Распределение тока гармоники частотой 100 Гц по длине однородной обратной тяговой сети показано на рис. 4. В результате получено, что ток изменяется по экспоненциальному закону в пределах расчетного участка (между электровазами или между электровазом и подстанцией). Знак «+» или «-» говорит о направлении тока, положительный ток в рельсовой сети протекает к ТП1, отрицательный – к ТП2. Относительная погрешность между рассчитанными данными и результатами измерений не превышает $\pm 10\%$.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет оценить распределение гармоник в обратной тягой сети и их влияние на смежные устройства СЦБ (рельсовые цепи). По результатам расчетов можно сделать вывод, что опасному влиянию со стороны тягового тока в данный момент времени подвержены рельсовые цепи, находящиеся возле первого и

третьего электровазов на участках ТП1 – электровазов № 1, ТП2 – электровазов № 3.

Проведенные экспериментальные исследования подчеркнули необходимость разработки теории, позволяющей оценить распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны с целью выявления опасных помех, которые могут привести к ложному срабатыванию путевого приемника рельсовых цепей.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Аппаратно-программный комплекс (АПК) реализован в виде приставки к персональному компьютеру типа IBM PC. Она осуществляет цифровую обработку сигнала и содержит следующие основные узлы: блок согласования, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), мультиплексоры, генератор тактовых импульсов, программируемый таймер, регистры данных и управления.

Данный измерительный комплекс позволяет записывать сигнал с выхода фильтра, как этого требует «Инструкция по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки», и с выходов катушек АЛС [7]. Сигнал, записанный с катушек АЛС, представляет собой сумму кодовых сигналов АЛС и тягового тока со всеми его гармоническими составляющими и импульсными помехами, возникающими во время работы локомотива. Поэтому данное устройство позволяет анализировать и оценивать степень влияния помех на работу систем автоматики и аналитически определить причины их появления.

Для оценки гармонического спектра тока в рельсах, т.е. определения частот гармонических составляющих сигнала, амплитуд и их начальных фаз была разработана методика, которая предполагает запись и анализ сигнала с катушек автоматической локомотивной сигнализации или приемных катушек ПК1, ПК2 во время контроля параметров кодов АЛС. Электродвижущая сила, наведенная в катушках АЛС, пропорциональна кодовому и тяговому току, протекающему в рельсах. Для оценки спектрального состава тока была использована теория Фурье о возможности разложения любого процесса в бесконечную, но счетную сумму отдельных гармонических составляющих [5, 8].

ВЫВОДЫ

Разработан и изготовлен опытный образец автоматизированного аппаратно-программного комплекса для измерения электромагнитных помех в рельсовой сети и возможные причины их возникновения, проведена его апробация на

базе вагона-лаборатории. АПК также позволяет определять электрические и временные параметры тока АЛС по всей длине рельсовой цепи, выполнять диагностику состояния рельсовой цепи.

Разработанная математическая модель распределения гармоник в обратной тяговой сети по длине фидерной зоны дает возможность учитывать сопротивление рельсовой линии, взаимоиנדукции, а также сопротивление балласта и изоляции рельсов между собой. Рельсовая цепь заменена шестиполюсником. Такое пред-

ставление обратной тяговой сети послужило математическим обоснованием для разработки метода автоматизированного измерения помех тяговой сети и разработки рекомендаций для определения их источников. Относительная погрешность между рассчитанными данными и результатами измерений не превышает $\pm 10\%$.

Моделирование выполнено на основании экспериментальных данных, полученных с помощью разработанного АПК и установленного в вагоне-лаборатории.

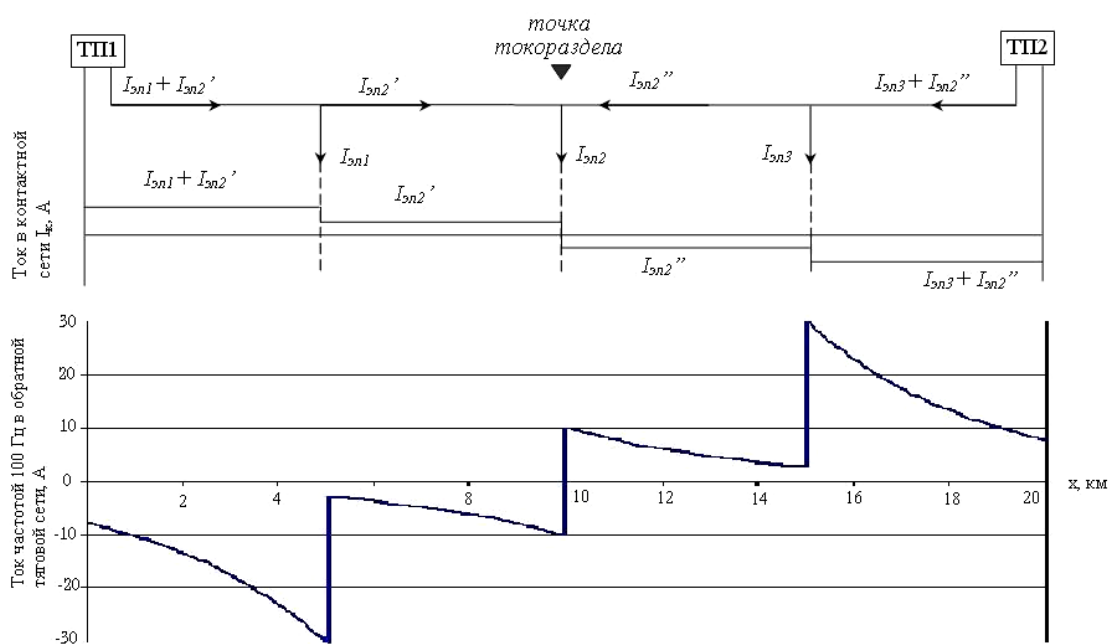


Рис. 4. Распределение тока гармоника частотой 100 Гц по длине однородной обратной тяговой сети однопутного участка с двусторонним питанием и тремя электровазми

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Бадер, М. П. Экспериментальное исследование гармонического состава тока в тяговой сети и рельсовых цепях [Текст] / М. П. Бадер // Межвуз. сб. науч. тр. – 1984. – № 756. – М.: МИИТ. – С. 17-20.
3. Котельников, А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств [Текст] / А. В. Котельников, А. В. Наумов, Л. П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
4. Ермоленко, Д. В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения [Текст] / Д. В. Ермоленко, В. И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 8. – С. 25-30.
5. Serdyuk, T. Rail circuits in the condition of electromagnetic influence of traction net [Текст] / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // 18th Int'l Wroclaw Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC'06. – Wroclaw (Poland). – 2006. – P. 482-485.
6. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст] / Н. Ф. Котляренко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
7. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012 [Текст] : Затв.: Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки Мінітрансу України 05.10.1998. – К., 1998. – 72 с.
8. Сердюк, Т. Н. Автоматизированная система для контроля параметров кодового тока в рельсах [Текст] / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 3. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2004. – С. 15-20.

Поступила в редколлегию 22.09.2009.
Принята к печати 24.09.2009.