

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ДВУХПУТНЫХ УЧАСТКОВ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА

Антон А. Антонов
ant-a-antonov@yandex.ru

Российский университет транспорта (МИИТ)
Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9
РОССИЯ

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, математическое описание, рельсовая линия, тяговый ток, контактный провод смежного пути

Резюме: В настоящее время проблема обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава и устройств железнодорожной автоматики, в том числе рельсовых цепей, стоит достаточно остро во многих странах мира, в том числе в России и в Европейских странах.

Вопрос помехоустойчивости аппаратуры рельсовых цепей тональной частоты, являющихся одними из основных при новом проектировании устройств интервального регулирования движения поездов, становится все более актуальным в связи с растущей долей локомотивного парка с асинхронным приводом.

В данной работе проведена оценка степени влияния тягового тока на двухпутном участке в контактном проводе параллельного пути, на котором находятся поезда, без учёта влияния тока, протекающего в контактном проводе рассматриваемого пути, на котором поезда отсутствуют.

Одним из приоритетных направлений повышения безопасности движения поездов в настоящее время является обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики. В последние годы в связи с большим применением электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями возникает проблема защиты устройств железнодорожной автоматики, в том числе рельсовых цепей, устройств автоматической локомотивной сигнализации от негативного влияния гармоник тягового тока, возникающих в диапазоне частот работы этих устройств.

На сети Российских железных дорог большое распространение получило применение рельсовых цепей тональной частоты в диапазоне 420 – 925 Гц (ТРЦЗ, АБТЦ-МШ), 1650 – 1850 Гц (ЦАБ-Е), 4,5 – 5,5 кГц (ТРЦ4) и так далее.

Оценка степени влияния гармоник тягового тока на рельсовые цепи на двухпутном участке должна быть проведена с учетом того, что рельсовые линии подвержены индуктивному влиянию тяговых токов, протекающих в контактном проводе как данного, так и параллельного пути.

Величина обратного тягового тока, протекающего в рельсах

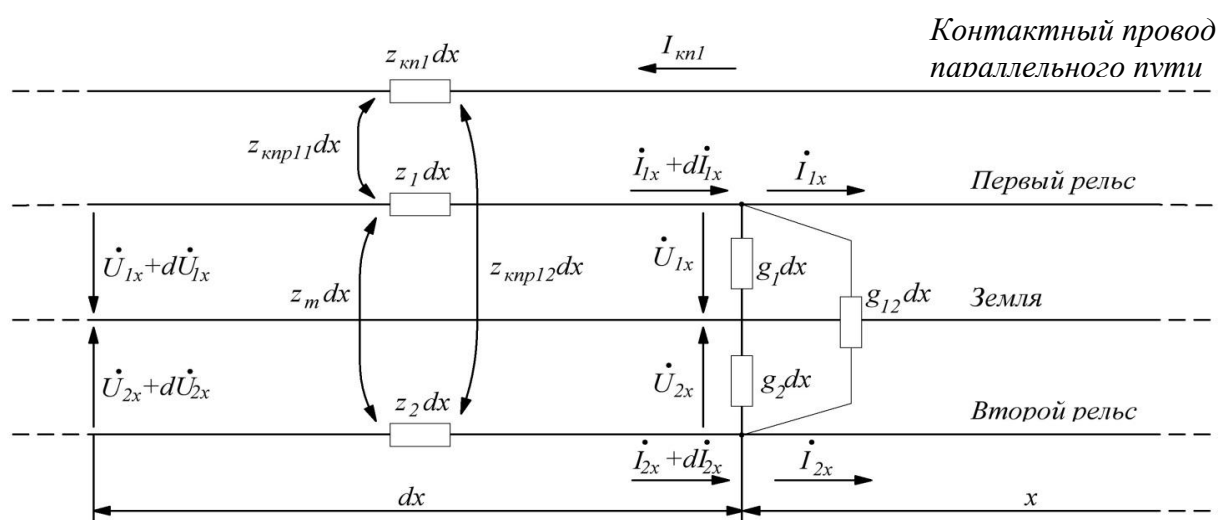
$$I_{\text{ТТ}} = I_{\text{ИТ}} + I_{\text{К}}$$

представляет собой сумму двух слагаемых, первое из которых $I_{\text{ИТ}}$ не зависит от координаты рассматриваемой точки и является индуктированным током. Второе слагаемое $I_{\text{К}}$ определяется координатой рассматриваемой точки и убывает по мере удаления от электровоза. Величину тока в рельсах и напряжение относительно земли в любой точке между электровозом, находящимся на участке, и тяговой подстанцией с учетом индуктивного влияния тяговых токов, протекающих в контактном проводе своего и параллельного пути можно определить решением дифференциальных уравнений [1, 2]

В условиях эксплуатации регламентная поездная обстановка на участках между тяговыми подстанциями может оказаться такой, когда движение электроподвижного состава по одному из путей не производится. В этом случае может проявиться мешающее влияние тягового тока, протекающего в контактном проводе параллельного пути, когда появляется ложная занятость рельсовой цепи того пути, на котором поезда отсутствуют.

Поэтому следует провести оценку степени влияния тягового тока в контактном проводе параллельного пути без учёта влияния тока, протекающего в контактном проводе данного пути.

Для этого составлена схема замещения элементарного участка dx рельсовой линии с распределенными параметрами с учетом влияния тягового тока в контактном проводе параллельного пути, представленная на Фиг. 1.



Фиг. 1

Обозначения на рисунке 1:

z_1, z_2 – удельные сопротивления одиночных рельсов;

z_m – сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей;

$z_{кnp11}, z_{кnp12}$ – сопротивления взаимной индуктивности контактного провода и каждой рельсовой нити;

$z_{кn1}$ – удельное сопротивление контактного провода;

g_1, g_2 – удельные проводимости заземления рельсовых нитей;

g_{12} – удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал;

x – расстояние от конца рельсовой линии, где подключена нагрузка;

\dot{I}_{1x} , \dot{I}_{2x} – соответственно токи в первой и второй рельсовых нитях с положительным направлением от питающего конца к нагрузке;

\dot{U}_{1x} , \dot{U}_{2x} – напряжения соответственно первой и второй рельсовых нитей относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле;

$\dot{I}_{кн1}$ – ток, протекающий в контактном проводе смежного пути с положительным направлением от тяговой подстанции.

Дифференциальные уравнения для напряжений и токов рельсовой линии имеют вид:

$$(1) \frac{d\dot{U}_{1x}}{dx} = z_1 \dot{I}_{1x} + z_m \dot{I}_{2x} + z_{кн11} \dot{I}_{кн1};$$

$$(2) \frac{d\dot{I}_{1x}}{dx} = (g_1 + g_{12}) \dot{U}_{1x} - g_{12} \dot{U}_{2x};$$

$$(3) \frac{d\dot{U}_{2x}}{dx} = z_2 \dot{I}_{2x} + z_m \dot{I}_{1x} + z_{кн12} \dot{I}_{кн1};$$

$$(4) \frac{d\dot{I}_{2x}}{dx} = (g_2 + g_{12}) \dot{U}_{2x} - g_{12} \dot{U}_{1x}.$$

Проводимость между контактном проводом смежного пути и землей принимается равной нулю, то есть $\frac{d\dot{I}_{кн1}}{dx} = 0$.

В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) – (4) получим:

$$(5) \dot{U}_{1x} = P(A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) + Q(A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x);$$

$$(6) \dot{U}_{2x} = \frac{M\gamma_1 + Pg_{12}}{g_2 + g_{12}}(A_1 sh \gamma_1 x + A_2 ch \gamma_1 x) + \frac{N\gamma_2 + Qg_{12}}{g_2 + g_{12}}(A_3 sh \gamma_2 x + A_4 ch \gamma_2 x);$$

$$(7) \dot{I}_{1x} = A_1 ch \gamma_1 x + A_2 sh \gamma_1 x + A_3 ch \gamma_2 x + A_4 sh \gamma_2 x + \frac{I_{кн1}(z_2 z_{кн11} - z_m z_{кн12})}{z_m^2 - z_1 z_2};$$

$$(8) \dot{I}_{2x} = M(A_1 ch \gamma_1 x + A_2 sh \gamma_1 x) + N(A_3 ch \gamma_2 x + A_4 sh \gamma_2 x) - \frac{I_{кн1}(z_m z_{кн11} - z_1 z_{кн12})}{z_m^2 - z_1 z_2};$$

где

$$P = \gamma_1 \frac{g_2 + g_{12}(I + M)}{g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}}; \quad Q = \gamma_2 \frac{g_2 + g_{12}(I + N)}{g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}}$$

$$M = \frac{\gamma_1^2 - (z_1 g_1 + z_1 g_{12} - z_m g_{12})}{z_m g_1 + z_m g_{12} - z_2 g_{12}}; \quad N = \frac{\gamma_2^2 - (z_1 g_1 + z_1 g_{12} - z_m g_{12})}{z_m g_1 + z_m g_{12} - z_2 g_{12}}.$$

γ_1 – коэффициент распространения волны земляного тракта двухпроводной рельсовой линии:

$$(9) \gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{2}a + \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - b}};$$

γ_2 – коэффициент распространения волны фазового тракта двухпроводной рельсовой линии:

$$(10) \gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{2}a - \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - b}};$$

где $a = z_1(g_1 + g_{12}) + z_2(g_1 + g_{12}) - 2z_m g_{12};$
 $b = (z_m^2 - z_1 z_2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}).$

Данные выражения используются для математического описания работы рельсовой цепи с учётом влияния тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути двухпутных участков, и его гармонических составляющих.

Для симметричной рельсовой линии с параметрами $z_1=z_2=z_p$ решение системы дифференциальных уравнений (1) – (4) будет иметь следующий вид:

$$(11) \dot{U}_{1x} = P(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + Q(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x);$$

$$(12) \dot{U}_{2x} = \frac{M\gamma_1 + Pg_{12}}{g_2 + g_{12}}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + \frac{N\gamma_2 + Qg_{12}}{g_2 + g_{12}}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x);$$

$$(13) \dot{I}_{1x} = A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x + \frac{I_{кн1}(z_p z_{кнp11} - z_m z_{кнp12})}{z_m^2 - z_p^2};$$

$$(14) \dot{I}_{2x} = M(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + N(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x) - \frac{I_{кн1}(z_m z_{кнp11} - z_p z_{кнp12})}{z_m^2 - z_p^2}.$$

С учетом вышеизложенного следует отметить, что результирующее воздействие гармонических составляющих на аппаратуру тональных рельсовых цепей должно определяться с учетом воздействия гармоник тягового тока данного и параллельного пути по принципу суперпозиции как результат алгебраического сложения вычисленных значений токов через приведённые сопротивления нагрузки тональных рельсовых цепей с учетом фазы и коэффициента асимметрии [3] K_{ac} .

Расчетная асимметрия при определении допустимых гармоник в рабочей полосе частот путевых приёмников вычисляется по формуле:

$$K_{ac} = \frac{\left| |I_{p1}| - |I_{p2}| \right|}{\left| |I_{p1}| + |I_{p2}| \right|},$$

где I_{p1}, I_{p2} – токи в первой и второй рельсовых нитях соответственно.

Гармоническая составляющая тока электроподвижного состава частотой f , которая оказывает мешающее влияние на аппаратуру тональных рельсовых цепей, характеризуется коэффициентом влияния $K_{вн}$ и определяется следующим образом:

$$K_{вн}^{ДУ} = \frac{|I_{ni}^{ДУ}|}{|I_{кп1}|} = \frac{|I_{ni}^{OV} + I_{ni}|}{|I_{кп1}|}$$

где $I_{ni}^{ДУ}$ – ток помехи, протекающий через приведённое сопротивление аппаратуры генерации или приёма сигнала рельсовой цепи на двухпутном участке, определенный по принципу суперпозиции, определяется как сумма токов вследствие влияния гармонических составляющих контактного провода данного пути (участка одного пути) I_{ni}^{OV} и параллельного пути I_{ni} ,

i – выбирается в зависимости от схемы замещения с распределенными параметрами и места подключения аппаратуры генерации или приёма сигнала тональной рельсовой цепи.

Ток I_{ni}^{OV} рассчитывается по формулам, описанным в [4, 5].

Для определения тока I_{ni} требуется разработка специального математического описания, подробнее об этом в [6 – 9].

С помощью полученной методики математического описания представляется возможным производить расчет и оценку степени влияния гармоник тягового тока контактного провода параллельного пути на работу рельсовой цепи данного пути.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 17-20-01003 офи_м_РЖД

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
- [2] Бадёр, М. П. Электромагнитная совместимость: учебное пособие для вузов ж.д. трансп. – М.: УМК МПС России, 2002. – 637 с.
- [3] Шаманов, В. И. Параметры тяговой рельсовой сети и устойчивость работы приборов безопасности / В. И. Шаманов, В. П. Суров, Ю. А. Трофимов, Ю. А. Алешечкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 2. – С. 140 – 145.
- [4] Кравцов, Ю. А. Анализ нормативов по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методов их проверки, применяемых на Российских железных дорогах / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, П. Е. Машенко, М. Е. Бакин, Е. Б. Ромашова // Труды четырнадцатой научно-практической конференции "Безопасность движения поездов" – М.: МИИТ, 2013. – С. 110 – 112.
- [5] Кравцов, Ю. А. Методика расчёта контрольного режима рельсовой цепи с учётом воздействия тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. Б. Чегуров, М. Е. Бакин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – №1. – С. 108-115.
- [6] Антонов А.А., Бакин М.Е. Расчет влияния гармоник тягового тока на рельсовую цепь // Мир транспорта. 2016. том 14. №2. С. 30 – 36.
- [7] Антонов А.А., Архипов Е.В., Бакин М.Е. Методика расчета уровня гармоник тягового тока смежного пути в примыкающих к тяговой подстанции рельсовых цепях с изолирующими стыками// Вестник транспорта Поволжья.- 2016.- №5.- С. 42-47.
- [8] Антонов А.А., Бакин М.Е., Линьков В.И. Методика расчета уровня гармоник тягового тока смежного пути в примыкающих к тяговой подстанции рельсовых цепях с изолирующими стыками и общим источником питания // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 6. – С.36-43.
- [9] Антонов А.А., Бакин М.Е. Методика расчета уровня гармоник тягового тока в рельсовых цепях без изолирующих стыков // Транспорт Урала. – 2016. – №4. – С.41-46.

MATHEMATICAL SIMULATION OF DOUBLE-TRACK SECTIONS TRACK CIRCUITS TAKING INTO ACCOUNT THE ELECTROMAGNETIC INFLUENCE OF TRACTION CURRENT

Anton A. Antonov
ant-a-antonov@yandex.ru

*Russian Transport University (MIIT), 9, build.9, Obrazcova str., Moscow
RUSSIA*

Key words: *Electromagnetic compatibility, mathematical description, rail line, traction current, parallel track contact wire*

Abstract: *Currently, the problem of electromagnetic compatibility of electric rolling stock and railway automation equipment, including track circuits, is quite acute in many countries, including in Russia and in European countries.*

The question of the immunity of the equipment of audio frequency track circuits, which are one of the major new design of the train traffic control devices, is becoming increasingly relevant in connection with the growing share of locomotives with asynchronous drive.

There are some studies of the level of traction current harmonics in the working lane of receivers when driving the electric rolling stock on one of the station tracks. However, studies of the effect of electric rolling stock, moving on the parallel station tracks were not conducted.

The efficiency of the control device of vacancy of the station track circuits shall be ensured under worst operating conditions, taking into account the influence of electric rolling stock, moving on the parallel station tracks.

In this work, the author assessed the degree of influence of traction current on electrified double-track section in the contact wire parallel tracks excluding the effects of the current flowing in the contact wire are looking at tracks in which trains do not exist.