



Расчёт влияния гармоник тягового тока на рельсовую цепь



Антон АНТОНОВ
Anton A. ANTONOV

Михаил БАКИН
Mikhail E. BAKIN



Calculation of Traction Current Harmonics' Influence on Track Circuit
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 34)

Рельсовые цепи, как и другие элементы железнодорожной автоматики, находятся в зоне влияния электроподвижного состава и, в частности, тягового тока. С точки зрения электромагнитной совместимости – это зона риска, требующая своих средств изучения и контроля. Разработано математическое описание для расчёта влияния гармоник тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути двухпутных участков, и его гармонических составляющих на рельсовые цепи. Показаны схема замещения и система дифференциальных уравнений, которые призваны решать задачи обеспечения эксплуатационной надёжности железнодорожной линии.

Ключевые слова: железная дорога, электромагнитная совместимость, математическое описание, рельсовая цепь, гармоника тягового тока, контактный провод, смежный путь.

Антонов Антон Анатольевич – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Бакин Михаил Евгеньевич – соискатель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» МИИТ, Москва, Россия.

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава и устройств железнодорожной автоматики, в том числе рельсовых цепей, стоит достаточно остро и в России, и за рубежом [1–7].

При расчёте влияния гармоник тягового тока на работу рельсовой цепи она представляется в виде однопроводных взаимосвязанных электрических линий с сопротивлением рельсовых нитей z_1 и z_2 . Эти линии подвержены индуктивному влиянию тяговых токов, протекающих в контактном проводе как рассматриваемого, так и смежного пути [8].

Величина тягового тока в рельсах любой точки участка между тяговой подстанцией и электровозом представляет собой сумму двух слагаемых, первое из которых не зависит от координаты контролируемой точки и является индуктированным током. Второе слагаемое определяется координатой точки и убывает по мере удаления от электровоза [9].

Учитывая индуктивное влияние тяговых токов, протекающих в контактном проводе рассматриваемого и смежного пути, величину тока в рельсах и напряжение

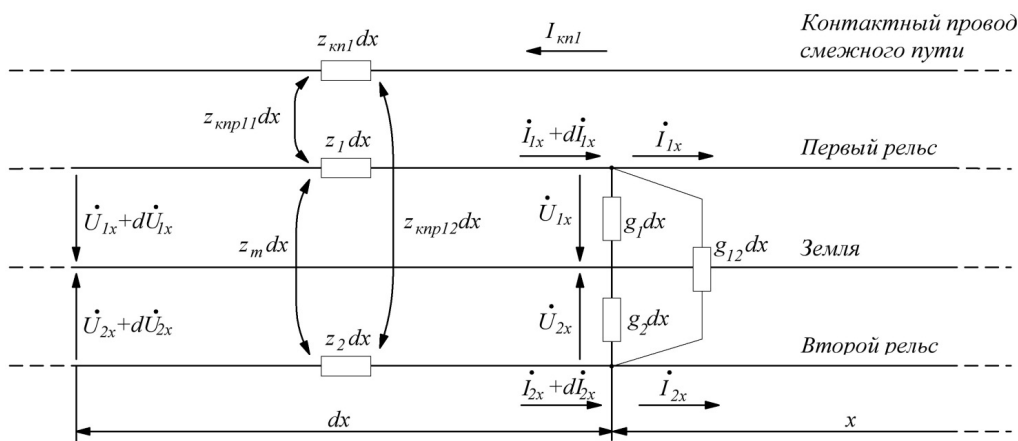


Рис. 1. Схема замещения элемента dx рельсовой линии при учёте влияния тягового тока в контактном проводе смежного пути.

относительно земли в любой точке между электровозом и тяговой подстанцией можно найти решением дифференциальных уравнений согласно [10, 11]. При составлении схемы замещения для дифференциальных уравнений дополнительно учитывается и влияние высоковольтной линии электропередач [12–14].

В условиях эксплуатации поездная обстановка на участках между тяговыми подстанциями определяется графиком движения поездов и регламентом обслуживания устройств персоналом, теми технологическими «окнами», когда движение электроподвижного состава по одному из путей не производится. В такой ситуации может проявиться мешающее влияние тягового тока, протекающего в контактном проводе смежного пути, выраженное ложной занятостью рельсовой цепи при отсутствии поезда.

Отсюда возникает потребность произвести оценку степени влияния тягового тока в контактном проводе смежного пути без учёта процессов в контактном проводе рассматриваемого пути, на котором поезда отсутствуют, в соответствии с рис. 1.

Обозначения в демонстрируемой схеме:

z_1, z_2 — удельные сопротивления одиночных рельсов;

z_m — сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей;

$z_{кнр11}, z_{кнр12}$ — сопротивления взаимной индуктивности контактного провода и каждой рельсовой нити;

$z_{кн1}$ — 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;

i_{1x}, i_{2x} — соответственно токи в первой и второй рельсовых нитях с положительным направлением от питающего конца к нагрузке;

u_{1x}, u_{2x} — напряжения первой и второй рельсовых нитей относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле;

$i_{кн1}$ — ток, протекающий в контактном проводе смежного пути с положительным направлением от тяговой подстанции.

Дифференциальные уравнения для напряжений и токов рельсовой линии имеют вид:

$$\frac{d\dot{u}_{1x}}{dx} = z_1 \dot{i}_{1x} + z_m \dot{i}_{2x} + z_{кнр11} \dot{i}_{кн1}; \quad (1)$$

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

$$\frac{d\dot{u}_{2x}}{dx} = z_2 \dot{i}_{2x} + z_m \dot{i}_{1x} + z_{кнр12} \dot{i}_{кн1}; \quad (3)$$

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

Проводимость «контактный провод смежного пути — земля» принимается равной нулю, то есть $\frac{d\dot{i}_{кн1}}{dx} = 0$.

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



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

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

$$\dot{I}_{1x} = A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x + \frac{I_{\kappa n1}(z_2 z_{\kappa np11} - z_m z_{\kappa np12})}{z_m^2 - z_1 z_2}; \quad (7)$$

$$\dot{I}_{2x} = M(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + N(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x) - \frac{I_{\kappa n1}(z_m z_{\kappa np11} - z_1 z_{\kappa np12})}{z_m^2 - z_1 z_2}, \quad (8)$$

где

$$P = \gamma_1 \frac{g_2 + g_{12}(1 + M)}{g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}};$$

$$Q = \gamma_2 \frac{g_2 + g_{12}(1 + N)}{g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}};$$

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

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

γ_1 – коэффициент распространения волны земляного тракта двухпроводной рельсовой линии:

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

γ_2 – коэффициент распространения волны фазового тракта двухпроводной рельсовой линии:

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

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 контактом проводе смежного пути двухпутных участков, и его гармонических составляющих.

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

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

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

$$\dot{I}_{1x} = A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x + \frac{I_{\kappa n1}(z_p z_{\kappa np11} - z_m z_{\kappa np12})}{z_m^2 - z_p^2}; \quad (13)$$

$$\dot{I}_{2x} = M(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + N(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x) - \frac{I_{\kappa n1}(z_m z_{\kappa np11} - z_p z_{\kappa np12})}{z_m^2 - z_p^2}. \quad (14)$$

При хорошей изоляции рельсовых нитей проводимость одного рельса по отношению к земле g_1 и проводимость между рельсами g_{12} равны нулю. Проводимость другой рельсовой нити g_{on} определяется проводимостью опор контактной сети. Такая ситуация характерна для зимнего времени года. В связи с тем, что опоры контактной сети должны быть подключены к рельсовой нити на равных расстояниях друг от друга, проводимость этих опор можно считать распределённой, т.е. $g_2 = g_{on}$.

С учётом $z_1 = z_2 = z_p$ уравнения (1)–(4) примут вид:

$$\frac{d\dot{U}_{1x}}{dx} = z_p \dot{I}_{1x} + z_m \dot{I}_{2x} + z_{\kappa np11} \dot{I}_{\kappa n1}; \quad (15)$$

$$\frac{d\dot{I}_{1x}}{dx} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{d\dot{U}_{2x}}{dx} = z_p \dot{I}_{2x} + z_m \dot{I}_{1x} + z_{\kappa np12} \dot{I}_{\kappa n1}; \quad (17)$$

$$\frac{d\dot{I}_{2x}}{dx} = g_{on} \dot{U}_{2x}. \quad (18)$$

Решение уравнений (15)–(18):

$$\dot{U}_{1x} = x \left[A_1 \left(z_m - \frac{z_p^2}{z_m} \right) - I_{\kappa n1} \left(\frac{z_p z_{\kappa np12}}{z_m} - z_{\kappa np11} \right) \right] + \quad (19)$$

$$+ \frac{z_m}{\gamma_{on}} (A_2 sh\gamma_{on} x + A_3 ch\gamma_{on} x) + A_4;$$

$$\dot{U}_{2x} = \frac{\gamma_{on}}{g_{on}} (A_2 sh\gamma_{on} x + A_3 ch\gamma_{on} x); \quad (20)$$

$$\dot{I}_{1x} = \frac{-z_p A_1 - I_{\kappa n1} z_{\kappa np12}}{z_m}; \quad (21)$$

$$\dot{I}_{2x} = A_1 + A_2 ch\gamma_{on} x + A_3 sh\gamma_{on} x, \quad (22)$$



где $\gamma_{\text{оп}}$ — коэффициент распространения волны двухпроводной рельсовой линии при хорошей изоляции рельсовых нитей, $\gamma_{\text{оп}} = \sqrt{g_{\text{оп}} z_p}$.

Из уравнений (16), (21) очевидно, что при $g_1 = g_2 = 0$ ток, протекающий в первом рельсе, является неизменным. И этот результат вполне отвечает заданным условиям задачи. Подтверждается действенность предложенного математического аппарата для расчёта влияния гармоник тягового тока на рельсовые цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики: Учеб. пособие. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. — 244 с.
2. EMC for European Railways/ Lloyd's Register Rail Report for ERA. November 2010. [Электронный ресурс]: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents>. Доступ 17.12.2015.
3. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management. Berlin: Springer, 2013. — 600 p.
4. Бадёр М. П. Анализ и синтез электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V международной научно-практ. конференции (Воловец, Украина, 11 июня — 13 июня 2014 г.). — Д.: ДНУЖТ, 2014. — С. 8–14.
5. Кравцов Ю. А., Архипов Е. В., Антонов А. А., Бакин М. Е. Работоспособность путевых приёмников

рельсовых цепей тональной частоты при воздействии сетевого тока электропоезда «Сапсан» // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 14–19.

6. Кравцов Ю. А., Антонов А. А., Бакин М. Е. Методика экспериментальной проверки помехоустойчивости приёмников рельсовых цепей тональной частоты // Мир транспорта. — 2015. — № 6. — С. 102–109.

7. Schön, W. Signalisation et automatismes ferroviaires. V. 3. Paris: La vie du rail, 2013, 399 p.

8. Атабеков Г. И., Купалян С. Д., Тимофеев А. Б. и др. Теоретические основы электротехники. — М.: Энергия, 1979. — 431 с.

9. Брылеев А. М. Рельсовые цепи. — М.: Трансжелдориздат, 1939. — 312 с.

10. Кравцов Ю. А., Машенко П. Е., Бакин М. Е. Исследование работоспособности опытных образцов путевых приёмников рельсовых цепей с автоматическим регулированием уровня сигнала // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 1. — С. 20.

11. Леушин В. Б., Юсупов Р. Р., Ахмадуллин Ф. Р. К вопросу о моделировании импульсных помех от постоянного тягового тока в рельсовых линиях // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Под. ред. С. А. Лунева. — Омск, 2015. — С. 47–51.

12. Горенбейн Е. В. Определение, методы измерения и контроля первичных параметров рельсовой линии // Наука и техника транспорта. — 2010. — № 4. — С. 37–47.

13. Кравцов Ю. А., Архипов Е. В., Щербина А. Е., Бакин М. Е. Синтез рельсовых цепей тональной частоты с автоматическим регулированием уровня сигнала // Вестник транспорта Поволжья. — 2012. — № 5. — С. 60–69.

14. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрических железных дорог. — М.: Транспорт, 1965. — 528 с.

Координаты авторов: **Антонов А. А.** — ant-a-antonov@yandex.ru, **Бакин М. Е.** — msl87@mail.ru. Статья поступила в редакцию 17.12.2015, принята к публикации 28.03.2016.

