

Имитационная модель электромагнитной совместимости смежных сооружений инфраструктуры на участках тяжеловесного движения поездов

Валерий В. Польшов, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: PolyanovVV@mail.ru

Валерий Е. Митрохин, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: mitrokhin@list.ru



Валерий В.
Польшов



Валерий Е.
Митрохин

Резюме. В условиях постоянного повышения объемов движения и возрастания тяговых нагрузок увеличиваются нагрузки на инфраструктуру электроснабжения, что приводит к росту уровней электромагнитных излучений. За счёт этого возрастает вероятность аварийного режима функционирования контактной сети, вследствие которого токи достигают очень высоких величин и могут привести к серьезным авариям в смежных цепях хозяйств автоматики и телемеханики и связи. Такие аварии нередко становятся причиной различных отказов, влияющих на качество и безопасность перевозочного процесса, приводят к порче аппаратуры и могут служить причиной возгораний. Наиболее весомый вклад в общее количество аварий на кабельных линиях вносят электромагнитные влияния при прохождении тяжеловесных составов. Причем, прохождение такого состава вдоль линий связи с неисправным заземлением, привело к прожогу кабеля. На железнодорожной инфраструктуре ужесточаются требования по обеспечению электромагнитной совместимости объектов и сооружений, в том числе по соблюдению требований надежности и информационной безопасности систем связи и систем централизации и блокировки (СЦБ). Существующие методики определения наведенных токов и напряжений не учитывают нагрузок, возникающих при современных объемах движения, и не позволяют установить зависимость от параметров заземления объектов инфраструктуры. Не учитываются также параметры продольных сооружений, расположенных параллельно пути на всей протяженности железных дорог. Кроме того, параметры заземления изменяются в процессе движения тяжеловесных поездов по разным регионам. Поэтому актуальной является задача моделирования электромагнитных процессов в многопроводных системах с учетом собственных и взаимных параметров линий, а также параметров земли. Но математические модели электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте в силу своей сложности не всегда позволяют получить численные значения наведенных токов и напряжений в цепях связи и СЦБ. В статье предложен прикладной метод имитационного моделирования, позволяющий определить уровни наведенных токов и напряжений в продольных линиях связи и СЦБ на участках тяжеловесного движения поездов. Представлена методика имитационного моделирования, результаты моделирования для участка тяжеловесного движения и анализ влияния параметров заземления на величину наведенных напряжений. Результаты моделирования сопоставлены с данными эксперимента и признаны достоверными. Расчеты по предложенной методике позволили выявить ключевые зависимости наведенных токов и напряжений от параметров земли. Установлены нелинейные зависимости величины наведенного напряжения от сопротивления заземления, что является основой для дальнейших исследований и сопоставления полученных данных со статистикой, накопленной в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, тяжеловесное движение поездов, имитационное моделирование.

Формат цитирования: Польшов В.В., Митрохин В.Е. Имитационная модель электромагнитной совместимости смежных сооружений инфраструктуры на участках тяжеловесного движения поездов // Надежность. 2016. №3. С. 59-62. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-59-62

Мероприятия по повышению надежности на участках тяжеловесного движения

В связи с вводом в регулярное обращение поездов массой 6-12 тыс. тонн, на участках железных дорог в несколько раз возрастают тяговые нагрузки в системе

электроснабжения. Такие нагрузки нередко приводят к повреждению аппаратуры и линий электроснабжения и продольных сооружений. Это является причиной для совершенствования конфигурации тяговой сети, включающей в себя:

– создание более мощного силового оборудования, увеличение сечения фидеров контактной сети (до 5А-185);

– разработку систем тягового электроснабжения повышенной нагрузочной способности;

– повышение расчетной мощности трехфазного короткого замыкания на вводах тяговой подстанции до 1500 МВ*А;

– разработку и применение эффективных устройств автоматики, управления и защиты оборудования тяговых подстанций и контактной сети от токов короткого замыкания и недопустимой нагрузки (ЦЗАФ-3,3кВ, ЦЗАФ-27,5кВ).

– применение конструкций контактной сети для участков тяжеловесного движения, включающей замену контактных проводов (ПБСМ-95 на М-120), подвеску усиливающих проводов (А-185, 2А-185, М-120) и экранирующих проводов.

С учетом перечисленных требований конфигурация контактной сети над каждым главным путём перегонов включает в себя [1,2]:

– на участках постоянного тока – два контактных провода, сечением не менее 120 мм² каждый, согласно ГОСТ 2584-86 [3], один медный несущий трос сечением не менее 120 мм² и два усиливающих алюминиевых (сталеалюминевых) провода сечением не менее 185 мм² каждый согласно ГОСТ 839-80 [4];

– на участках переменного тока – два контактных провода сечением не менее 100 мм², медный несущий трос сечением не менее 120 мм², один алюминиевый (сталеалюминевый) экранирующий провод сечением не менее 185 мм².

Схемы расположения линейных сооружений инфраструктуры участков обращения тяжеловесных поездов изображены на рисунке 1.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: К – контактный провод, Н – несущий трос, У – усиливающий провод, Р – рельсы, ПРС – направляющая линия поездной радиосвязи 2,13 МГц, ВЛ-10 – воздушная линия 10кВ, ВСЛ – высоковольтно-сигнальные линии СЦБ, ДПР – линия «два провода – рельс», Э – экранирующий провод, КЛ – кабельная линия.

Математической моделью, описывающей процесс распространения токов и напряжений, вызванных магнитным влиянием контактной сети, в каждой линии

является система дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от числа линий, входящих в единую электромагнитную систему:

$$\begin{cases} -\frac{dU_K}{dx} = (R_K + j\omega L_K) \cdot I_K + \sum_{i=1}^n I_i \cdot j\omega M_{iK} - j\omega M_{K-кк} \cdot I_{кк} \cdot e^{-\gamma x} \\ -\frac{dI_K}{dx} = (G_K + j\omega C_K) \cdot U_K + \sum_{i=1}^n (G_{iK} + j\omega C_{iK})(U_i - U_K), \end{cases}$$

где R_k, L_k, G_k, C_k – собственные параметры k -го провода, M_{ik}, G_{ik}, C_{ik} – взаимные параметры между i -м и k -м проводами системы, рассчитанные в спектре частот;

$M_{K-кк}$ – взаимная индуктивность между k -м проводом и контактной сетью,

U_k, I_k, U_i, I_i – токи и напряжения в i -м и k -м проводах системы,

$I_{кк}$ – ток контактной сети.

При неизменных параметрах и геометрических соотношениях в линейных сооружениях инфраструктуры величина наведенных токов и напряжений зависит от граничных условий, определяемых нагрузкой в начале и конце линии. Поэтому важной задачей является составление имитационной модели для определения граничных условий с учётом параметров заземления кабельных линий и проводимости грунта на участках тяжеловесного движения поездов.

Составление имитационной модели

Имитационное моделирование процесса распространения токов и напряжений в линейных сооружениях проведено в программной среде Simulink (Matlab) по схеме на рисунке 2.

Моделирование проведено с учетом линейных сооружений инфраструктуры – контактная сеть, рельсы, жила и оболочка магистральной кабельной линии.

В соответствии с требованиями к тяжеловесному движению [1, 2], инфраструктура железнодорожного транспорта должна обеспечивать пропуск пакета из 3 тяжеловесных поездов 6300-9000-6300 т с интервалом 10 минут при условии движения поездов графического веса по соседнему пути. В соответствии с техническими ха-

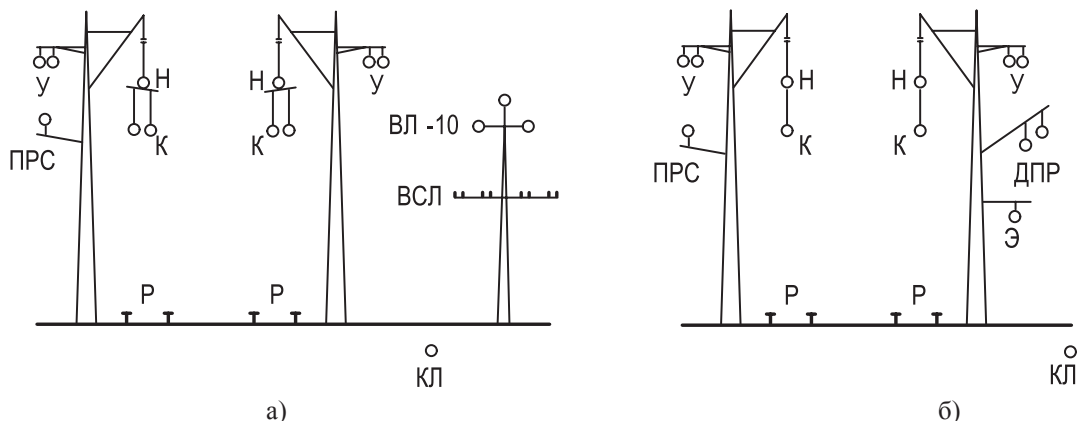


Рис. 1. Схемы линейных сооружений инфраструктуры участков тяжеловесного движения, электрифицированных а) – постоянным током, б) – переменным током.

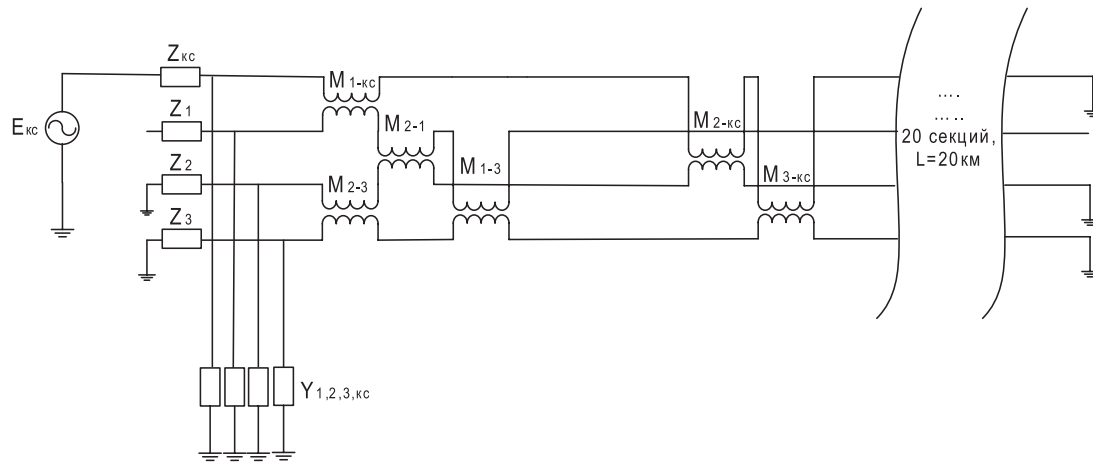


Рис. 2. Схема имитационного моделирования

рактическими локомотивов ВЛ-80 (С, К) [5] при работе в режиме многих единиц максимальный ток составляет 110 А для поезда графического веса, 155 А – для поезда 6300 т, 192 А – для поезда 9000 т. В качестве максимального эквивалентного тока контактной сети принят ток пуска всех поездов на участке 932 А. В результате получены значения для токов и напряжений на частоте 50 Гц.

На рисунке 3 приведены осциллограммы токов и напряжений на концах жилы и оболочки кабеля при условии тяжеловесного движения поездов.

Анализ влияния параметров заземления на величину наведенных напряжений

Особенностью участков тяжеловесного движения на полигоне Западно-Сибирской железной дороги является то, что грунт на этих участках имеет высокое удельное сопротивление (300-1500 Ом·м). Кроме того, тяжеловесные перевозки носят круглогодичный характер, а в течение года параметры грунта меняются в широких пределах. Проведем моделирование для участка тяжеловесного движения

длиной 20 км, с суммарным током 932 А (50 Гц) с учетом особенностей заземления линейных сооружений.

Примем к расчету заземление металлопокрывов кабеля в виде четырех вертикальных штырей, углубленных в грунт на 5 м. Для расчета воспользуемся формулами для определения сопротивления заземления. Сопротивление растеканию тока одного вертикального заземлителя (стержня) [6, 7]:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{экр}}}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{2L}{d} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{4T+L}{4T-L} \right) \right),$$

где $\rho_{\text{экр}}$ – эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м;

L – длина стержня, м;

d – его диаметр, мм;

T – расстояние от поверхности земли до середины стержня, м.

Заглубление горизонтального заземлителя можно найти по формуле [6, 7]:

$$T = \left(\frac{L}{2} \right) + t,$$

где t – заглубление вертикального заземлителя.

Полное сопротивление растеканию тока вертикальных заземлителей определяется по формуле [6, 7]:

$$R = \frac{R_0}{4 \cdot \eta},$$

где η – коэффициент спроса вертикальных заземлителей.

Получим значение наведенного напряжения в цепи «жила-оболочка» ($U_{\text{ж-об}}$) в начале линии при изменении удельного сопротивления грунта (с учетом изменения величины взаимной индукции между цепями).

Помимо сопротивления грунта важно учитывать особенности сооружения заземления оболочки на вводе в здания. Нормативными документами [8] регламентируется величина сопротивления заземления оболочки кабельной линии – 4 Ом и сопротивление металлосвязи цепи «металлопокрывы-ГЗШ-земля» – 0,1 Ом. Измерения параметров производятся дважды в год. Однако в течение года величина сопротивления и металлосвязи

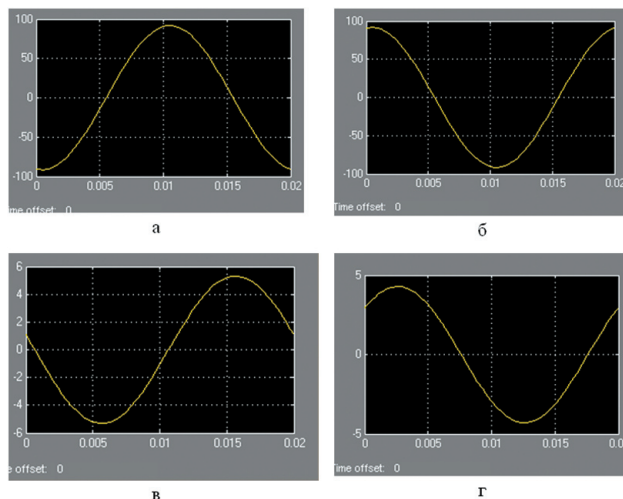


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при движении пакета тяжеловесных поездов: а) напряжение жилы в начале линии $U_{\text{ж-Н}}$, В; б) напряжение жилы в конце линии $U_{\text{ж-К}}$, В; в) ток оболочки в начале линии $I_{\text{ж-Н}}$, А; г) ток оболочки в конце линии $I_{\text{ж-К}}$, А.

Таблица 1. Зависимость напряжения в жиле кабеля от удельного сопротивления грунта

ρ , Ом*м	0	50	80	100	150	200	250	300	350	400	500	1000	1500	2000
$U_{ж-об}$, В	160	210	221	229	259	289	316	343	370	400	438	600	710	783

$R_{мет}$, Ом	0,1	1	2	3	4	5	10	50	100	1 к	10 к	100 к	1 М
$U_{ж-об}$, В	245	260	277	293	310	325	396	674	776	900	915	919	919



Рис. 4. График напряжения в жиле кабеля от удельного сопротивления грунта

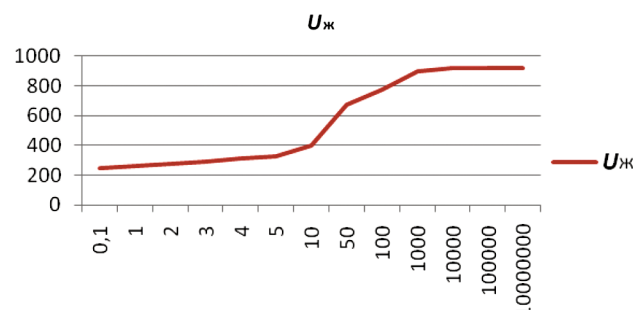


Рис. 5. Зависимость напряжения «жила-оболочка» от сопротивления заземления металлопокрова кабеля

может изменяться в очень широких пределах. Это связано с климатическими факторами и электрохимической коррозией, в условиях которой функционируют кабельные линии связи (КЛС). Часто причиной заброса потенциалов на КЛС является разрушение токоведущих частей или пайки металлосвязи.

Проведем моделирование с учетом особенностей монтажа заземления кабеля. Измерялось значение $U_{ж-об}$ в начале линии при изменении сопротивления заземления и металлосвязи в начале линии (в конце линии величина равна норме – 4,1 Ом).

Из рисунка видно, что при увеличении сопротивления земли свыше 10 Ом начинается выраженный рост напряжения в жиле, который заканчивается на отметке 0,9 кВ. Очень высокие значения сопротивления заземления (выше 1 кОм) соответствуют случаям повреждения или обрыва заземляющих проводников или монтажа.

Заключение

На основе составленной имитационной модели электромагнитной совместимости проведены вычисления уровней наведенных токов и напряжений в условиях тяжеловесного движения. Выявлены ключевые зави-

сисности величины наведенных токов и напряжений от параметров земли в диапазоне удельного сопротивления 0 – 2000 Ом*м при влияющем токе 932 А (50 Гц). Проведено моделирование в зависимости от сопротивления заземлителя и металлопокрова, установлено, что превышение нормы 4 Ом приводит к нелинейному росту наведенного напряжения, а превышение значения 10 Ом даёт резкий рост напряжения. Это позволяет сформулировать чёткие требования к качеству монтажа и параметрам заземления сооружений связи и СЦБ и повысить надежность их функционирования.

Библиографический список

1. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» №1704р от 28.08.12г. Москва, 2012, 64с.
2. Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» №2412р от 25.11.10г. Москва, 2010, 37 с.
3. ГОСТ 2584-86 «Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия». Москва, 1997, 9с.
4. ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия». Москва, 1981г., 26с.
5. Василько Н.М., Козельский Н.П. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1982 г., 454 с.
6. Базелян Э.М. Вопросы практической молниезащиты. М.: «ИМАГ», 2015, 208с.
7. Рудольф Карякин. Нормы устройства сетей заземления. М.: Энергосервис, 2006, 360с.
8. Правила устройства электроустановок ПУЭ. Издание 7. Утверждены приказом Минэнерго России №204 от 08.07.12г. Москва, 2012.

Сведения об авторах

Валерий В. Полянов, аспирант, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: PolyanovVV@mail.ru

Валерий Е. Митрохин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: mitrokhin@list.ru

Поступила 21.03.2016