

Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока

Е.Ю. Микаэльян, В.Н. Черных

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы связанные с моделирование электромагнитного влияния тяговых сетей электрифицированных железных дорог переменного тока. Модель предназначена для определения степени электромагнитного влияния тяговых сетей электрифицированных железных дорог переменного тока. Потенциал, наводимый полем, может создавать угрозу жизни и здоровью, создавать условия для выхода из строя низковольтной аппаратуры, быть источником помех. В работе рассматриваются некоторые подходы к расчету характеристик электромагнитного поля, дается критический анализ применяемых методов.

Ключевые слова: электромагнитное поле, тяговая сеть, железная дорога, электромагнитная совместимость, наведенное напряжение, электробезопасность

Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться при эксплуатации электрифицированных железных дорог переменного тока, является проблема электромагнитной совместимости [1]. Как известно, степень воздействия любой линии электропередачи на смежные сети и живые организмы, находящиеся в зоне влияния, определяется уровнем напряжения линии, протекающими по ней токами и степенью симметричности. Широко развитая в нашей стране тяговая сеть, использующая в качестве прямого провода тока контактный провод, а в качестве обратного провода – рельсовую цепь, является несимметричной однофазной линией электропередачи, работа которой вызывает в пространстве значительные электромагнитные влияния [2].

Таким образом, одной из ключевых задач является разработка адекватной математической модели, которая позволяет выполнять расчёты электромагнитных полей железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

В настоящее время кроме традиционной тяговой сети переменного тока 25 кВ применяются так называемые многопроводные тяговые сети. К

наиболее распространенным следует отнести систему тягового электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП) и систему 2х25 кВ с автотрансформаторами [3].

При системе с ЭУП усиливающий провод (УП) и экранирующий провод (ЭП) располагаются с полевой стороны опоры контактной сети. Эти провода фактически образуют ЛЭП, подключенную параллельно тяговой сети: УП – параллельно контактной сети, ЭП – параллельно рельсам.

В системе 2х25 кВ с дополнительным питающим проводом (ПП) на опоре контактной сети контактный провод подключен к выводу одной вторичной обмотки трансформатора подстанции, а ПП – к выводу другой. Обмотки соединены последовательно, средняя точка соединена с рельсом. Таким образом, контактная сеть и ПП находятся под напряжением $U = 25$ кВ по отношению к земле. Напряжение между ними равно 50 кВ. На некотором расстоянии примерно 10-12 км установлены автотрансформаторы (АТ), которые понижают напряжение и подают в контактную сеть 25 кВ для питания электровозов. До автотрансформатора энергия к электровозам передается по проводам контактной сети и ПП на повышенном напряжении 50 кВ.

Указанные многопроводные сети обладают пониженным сопротивлением, позволяющим увеличить расстояние между тяговыми подстанциями на 50 – 70 %. Важным отличием данных сетей является также пониженный уровень магнитных влияний, так как на опорах подвешивается дополнительный провод обратного тока. Для системы с ЭУП это экранирующий провод, в системе 2х25 кВ – питающий провод. Обе описанные многопроводные сети являются энергосберегающими, так как обладают лучшими энергетическим и ресурсосберегающими характеристиками, позволяющими снизить затраты на строительство тяговых подстанций за счёт увеличения расстояния между ними. Именно наличие

этих факторов определило внедрение этих систем как в России, так и в других странах [4].

При анализе электромагнитной обстановки следует принимать во внимание, что кроме проводов, указанных выше систем, на опорах контактной сети располагают линии для питания нетяговых железнодорожных потребителей. Зачастую эти линии получают питание от тяговых подстанций с уровнем напряжения 25 кВ, а протекающие в них токи значительно меньше тяговых токов. Такие линии принято выполнять по схеме «два провода – рельс» (ДПР), где в качестве третьего провода трёхфазной линии используется рельс. Такая линия электропередачи будет явно несимметрична. Провода двух фаз находятся на опорах контактной сети, а третий проводник – рельс находится на значительном удалении. Электромагнитные поля такой линии слабо компенсируются даже при полностью симметричной нагрузке. На опорах контактной сети могут дополнительно находиться и провода трёхфазной ЛЭП, питающие железнодорожные ТП [5].

Линии питания автоблокировки и продольного электроснабжения напряжением 10 кВ, помимо существенно меньшего напряжения по сравнению с контактной сетью, в нормальном режиме характеризуются симметричной системой напряжений по отношению к земле. Нормально эти линии располагают на отдельно стоящих опорах вблизи железной дороги, но с учётом местных условий могут быть подвешены и на опорах контактной сети.

Несмотря на очевидные особенности указанных сетей вопрос электрических влияний при их эксплуатации исследован явно недостаточно. Определение электрических влияний вблизи ЭЖД является сложной многофакторной задачей. Картина электрического поля вблизи опор контактной сети определяется: числом питающих линий, расположенных на

опоре и их симметричностью, уровнем напряжения, наличием заземлённых проводов, геометрией взаимного расположения.

Расчёт электрических полей такой системы нескольких ЛЭП позволяет определить условия работы обслуживающего персонала и оптимизировать расположение волоконно-оптического кабеля железнодорожной связи. Особенностью такой линии является необходимость её прокладки в непосредственной близости к ЭЖД или на опорах контактной сети [1;6].

Целью проводимых исследований является расчёт электрических полей, создаваемых в результате совместного влияния всех ЛЭП, расположенных на опоре контактной сети, и определение зон с потенциально высокой опасностью для нахождения человека при производстве работ.

Для решения поставленной задачи на сегодняшний день на рынке имеется значительное количество программ, позволяющих моделировать различные варианты электромагнитных полей [7]. В основе математического аппарата достаточно большой группы таких программ лежит решение системы уравнений, записанных в соответствии с первой группой формул Максвелла.

$$\varphi_1 = \tau_1 \alpha_{11} + \tau_2 \alpha_{12} + \tau_3 \alpha_{13} + \dots$$

$$\varphi_2 = \tau_1 \alpha_{21} + \tau_2 \alpha_{22} + \tau_3 \alpha_{23} + \dots$$

$$\varphi_3 = \tau_1 \alpha_{31} + \tau_2 \alpha_{32} + \tau_3 \alpha_{33} + \dots$$

В этом случае расчет поля заряженных проводников, расположенных вблизи плоской проводящей поверхности, ограничивающей среду (в нашем случае это поверхность земли), сводится к расчету поля нескольких проводников при отсутствии проводящей среды.

Представленные выражения образуют систему линейных уравнений, где в левой части задаются граничные условия для данной картины плоскопараллельного поля – потенциалы всех проводников рассматриваемого участка. Коэффициенты α , стоящие в правой части

уравнений, называют потенциальными коэффициентами. Размерность их равна размерности единицы длины, разделенной на фараду.

Так как у всех коэффициентов α под знаком логарифма находится дробь, числитель которой всегда больше знаменателя, то все коэффициенты α положительны:

$$\alpha_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}}; \quad \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{2h_k}{r_k};$$

Система позволяет подсчитать потенциалы заряженных тел по известным общим зарядам тел. При расчете потенциала, наводимого в заданной точке пространства, линейная плотность заряда τ_k неизвестна, однако потенциалы всех влияющих на величину наведенного потенциала проводников можно задать вполне определенно. На этом принципе и построен используемый метод расчета.

Такой подход достаточно хорошо себя зарекомендовал ввиду высокой скорости машинного анализа при решении системы уравнений. Ограниченность его определяется, собственно, основным методом анализа – методом зеркальных изображений, предполагающим поверхность земли бесконечной и, что самое главное, идеально ровной. Для большинства задач такой подход вполне допустим, однако, зачастую при анализе картины электромагнитного поля участка железной дороги на насыпях и в выемках данный алгоритм практически не пригоден [8].

Хороших результатов при решении указанной задачи можно добиться, проводя исследования на программном обеспечении в основу которого положен принцип решения уравнения Пуассона для каждой точки пространства анализа методом конечных элементов [9].

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_{своб.}}{\epsilon_a}.$$

Или в декартовой системе координат уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho_{\text{своб.}}}{\epsilon_a}$$

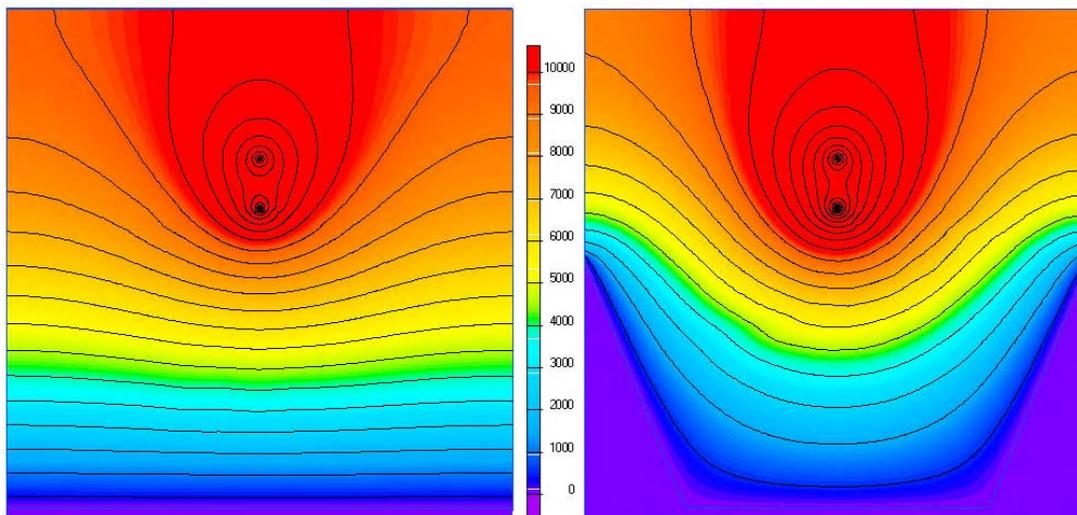


Рисунок 1 – Картина электрического поля контактной сети

На рис. 1 приводятся две картины электрического поля контактной сети, причем на левом наличие выемки не учитывается, в отличие от картины поля на правом рисунке. Цветовая шкала проградуирована в вольтах. Судя по картине поля, искажения, вызываемые наличием выемки, значительно меняют картину поля в области железнодорожного полотна, и пренебрегать этим фактом нельзя [10].

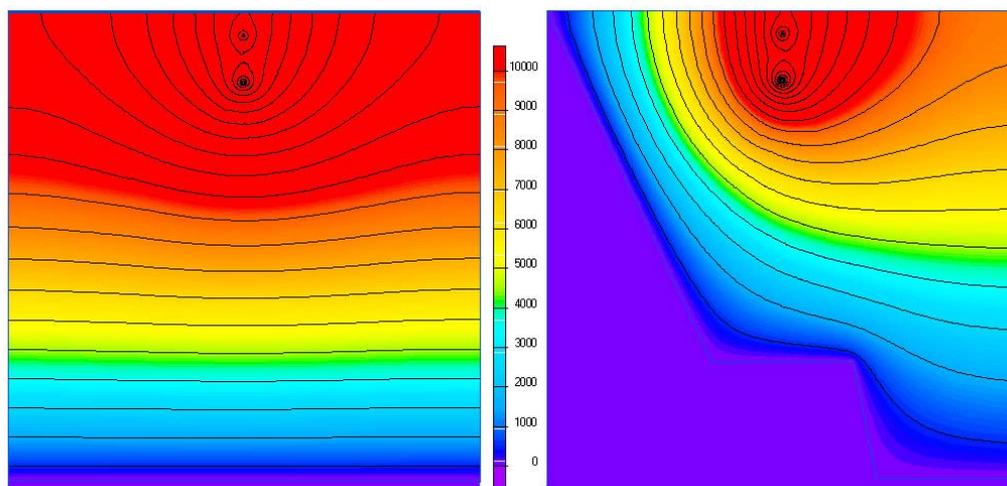


Рисунок 2 – Картина электрического поля контактной сети

Аналогичную картину можно наблюдать для участка дороги, где имеется насыпь. На рис. 2 приведены результаты расчета для случая прохождения дороги, например в прибрежном районе. Как и в предыдущем случае на левом рисунке влияние рельефа не учитывалось, в отличие от правого.

Проведённые исследования свидетельствуют:

1) При выполнении расчетов картины электромагнитного поля участка железной дороги обязательно следует принимать во внимание рельеф местности, в противном случае результаты расчета будут искажаться как в сторону увеличения, так и в сторону занижения, что недопустимо по соображениям надежности и безопасности.

2) При небольшой ширине сближения напряжения, наводимые на проводах смежных воздушных линий, оказываются столь большими, что являются опасными для обслуживающего персонала и целостности линий. По таким линиям производится питание железнодорожных потребителей. С влиянием приходится считаться даже в случае смежных линий напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью и линий ДПР. Величины наводимых напряжений электрического влияния сопоставимы по величине с рабочими напряжениями смежных линий.

3) Анализ поля тяговой сети однопутного участка железной дороги, показал, что на высоте человеческого роста потенциал, наводимый тяговой сетью, не будет превышать 2000 – 3000 В. Потенциал во всех металлических предметах, расположенных на теле опоры, не будет превышать 5000-6000 В.

Литература

1. Осипов В.А., Соловьев Г. Е., Гороховский Е. В., Капкаев А. А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий



связи и перспективные направления их решения //Инженерный вестник Дона, 2013 №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539

2. Стороженко Е. А., Кляморов А. С., Стороженко Д. Е., Гукасов К. С. Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи // Инженерный вестник Дона, 2013 №2. URL: .ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645

3. Мотин В.Н. Проблемные вопросы фундаментальной и прикладной науки // Инженерный вестник Дона, 2007, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/41

4. Кузина Е.Л. Обоснование эколого-экономической оценки деятельности объектов железнодорожного транспорта // Инженерный вестник Дона, 2011 №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/498

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. // Учебник для ВУЗов, М: Высшая школа, 1987 – 264 с.

6. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог//Учебник для вузов ж.-д. транспорта, М.: Транспорт, 1965 – 464 с.

7. Carter, Waldron. Mathematical model of dry-band arcing on self-supporting, all-dielectric, optical cable strung on overhead power lines, IEEE Proceedings s-c, vol.139, № 3, May 1992, pp. 185-196.

8. D.A. Keller, D.J. Benze 1, J.P. Bonicel, C Bastide, E Davidson. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices // 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings. - Eatontown, New Jersey, 17-20 Nowember, 1997. - pp. 24-31.

9. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость // Учебник для вузов ж.-д. транспорта, М.: УМК МПС, 2002 – 638 с.

10. Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока // М.: Транспорт, 1987 – 279 с.



References

1. Osipov V.A., Solov'ev G. E., Gorohovskij E. V., Kapkaev A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539
 2. Storozhenko E. A., Kljamorov A. S., Storozhenko D. E., Gukasov K. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645
 3. Motin V.N. Inzhenernyj Vestnik Dona, 2007, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/41
 4. Kuzina E.L. Inzhenernyj Vestnik Dona, 2011, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/498
 5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki. Uchebnik dlja VUZov [Theoretical fundamentals of electrical engineering. Textbook for HEIs]. M: Vysshaja shkola, 1987. 264 p.
 6. Markvardt K.G. Jelektrosnabzhenie jelektrificirovannyh zheleznyh dorog. Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta. [Electricity supply of electrified railways. Textbook for railway transport universities]. M.: Transport, 1965. 464 p.
 7. Carter, Waldron. IEEE Proceedings s-c, vol.139, № 3, May 1992, pp. 185-196
 8. D.A. Keller, D.J. Benze 1, J.P. Bonicel, S Bastide, E Davidson. 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings. Eatontown, New Jersey, 17-20 November, 1997. pp. 24-31.
 9. Bader M.P. Jelektromagnitnaja sovместimost'. Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta. [Electromagnetic compatibility Textbook for Railway Transport Universities]. M.: UMK MPS, 2002. 638 p.
 10. Karjakin R.N. Tjagovye seti peremennogo toka. [AC traction networks]. M.: Transport, 1987. 279 p.
-