

**УЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В статье представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния подземных металлических трубопроводов, проложенных вдоль трассы электрифицированной железной дороги переменного тока. Приведены результаты расчета магнитного поля, создаваемого тяговой сетью.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, электромагнитные поля, влияние подземных трубопроводов.

Введение. Тяговые сети (ТС) железных дорог переменного тока могут создавать значительные электромагнитные поля (ЭМП). В ряде случаев, особенно при прохождении трассы дороги по селитебной территории, уровни напряженности этих полей могут превосходить предельно допустимые уровни (ПДУ). Так, например, согласно [1], напряженность магнитного поля промышленной частоты в жилых помещениях не должна превышать 8 А/м. Более поздние уточнения [2, 3] устанавливают ПДУ для жилых помещений в 4 А/м, а для селитебной территории – 8 А/м. По помехоустойчивости уровни напряженности магнитного поля в зависимости от степени жесткости нормируются в пределах от 1 до 100 А/м [4].

В условиях электрифицированной железной дороги трудно получить экспериментальные данные, отвечающие максимальным уровням напряженности ЭМП, поэтому рекомендуется исследования ЭМП, создаваемых системами тягового электроснабжения (СТЭ) как на эксплуатируемых, так и на вновь создаваемых объектах, выполнять на основе математического моделирования [5].

Методика моделирования. Разработанные в ИрГУПСе методы и средства расчетов синусоидальных режимов [6] в фазных координатах позволяют при определении режима электроэнергетической системы (ЭЭС) или системы тягового электроснабжения провести одновре-

менные расчеты напряженностей электромагнитных полей многопроводных линий. Одновременный расчет режима многопроводной системы и создаваемых этой системой ЭМП позволяет реализовать новый, системный подход к анализу электромагнитной обстановки. Его отличительной особенностью является возможность моделирования ЭМП с учетом всех свойств и характеристик сложной СТЭ и питающей ЭЭС.

Составляющие напряженности электрического поля системы из N проводов определяются по следующим формулам:

$$\dot{E}_Y = -\frac{1}{\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{y_i[(x-x_i)^2 - y^2 + y_i^2]}{[(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2][(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]};$$

$$\dot{E}_X = \frac{2}{\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{(x-x_i)y_i}{[(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2][(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]},$$

где $\dot{\tau}_i$ – заряд провода i на единицу длины, определяемый из первой группы формул Максвелла:

$$\dot{T} = A^{-1} \cdot \dot{U}.$$

Здесь $\dot{U} = [\dot{U}_1 \dots \dot{U}_N]^T$ – вектор-столбец напряжений проводов по отношению к земле; $\dot{T} = [\dot{\tau}_1 \dots \dot{\tau}_N]^T$ – вектор-столбец зарядов проводов на единицу их длины; A – симметричная матрица потенциальных коэффициентов, в которой

* - автор, с которым следует вести переписку.

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i};$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}};$$

x_i, y_i – координаты расположения провода i радиуса r_i над землей ($y=0$ соответствует поверхности земли), ϵ_0 – электрическая постоянная.

После перехода от комплексных действующих значений составляющих \dot{E}_X и \dot{E}_Y к временным зависимостям можно получить параметрические выражения для построения годографа вектора:

$$E_x(t) = \sqrt{2} E_X \sin(\omega t + \varphi_X);$$

$$E_y(t) = \sqrt{2} E_Y \sin(\omega t + \varphi_Y),$$

где множитель $\sqrt{2}$ требуется из-за того, что расчеты напряжений проводятся по действующим значениям; $\omega=314$ рад/с.

Максимального значения напряженность поля достигает в моменты времени, определяемые следующим уравнением:

$$t_{\max} = \frac{1}{2\omega} \arctg \frac{E_X^2 \sin 2\varphi_X + E_Y^2 \sin 2\varphi_Y}{E_X^2 \cos 2\varphi_X + E_Y^2 \cos 2\varphi_Y}.$$

Выбор одного из значений арктангенса производится по условию отрицательного значения второй производной

$$E_X^2 \cos 2(\omega t_{\max} + \varphi_X) + E_Y^2 \cos 2(\omega t_{\max} + \varphi_Y) < 0.$$

Эффективное значение определяется обычным образом:

$$E = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{E_X^2 [\sin(\omega t + \varphi_X)]^2 + E_Y^2 [\sin(\omega t + \varphi_Y)]^2\} d(\omega t)} = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2}$$

X - и Y -составляющие напряженности магнитного поля, создаваемые всеми проводами, вычисляются следующим образом:

$$\dot{H}_X = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2};$$

$$\dot{H}_Y = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}.$$

Для вычисления напряженностей электрического и магнитного полей рассчитывается режим расчетной схемы, определяются заряды и токи проводов, в том числе и заземленных, и находятся составляющие $\dot{E}_X, \dot{E}_Y, \dot{H}_X, \dot{H}_Y$.

Следует отметить, что при моделировании могут учитываться основные факторы, влияющие на уровень ЭМП:

- неровность подстилающей поверхности, вызванная наличием насыпей, выемок, а также пассажирских платформ; наличие металлических вагонов и цистерн на станции, которые существенно изменяют картину распределения уровней напряженности ЭМП в пространстве;
- заземленные протяженные металлические объекты (трубопроводы, кабельные линии с заземленными оболочками, заземленные тросы), также изменяющие картину ЭМП.

Настоящая статья посвящена подробному изучению последнего фактора. Моделирование осуществлялось на основе программного комплекса «Fazonord-Качество», разработанного в ИрГУПС [6].

Результаты моделирования. Моделирование выполнялось применительно к тяговой сети 27.5 кВ железнодорожной станции, схема которой показана на рис. 1, а фрагмент сечения представлен на рис. 2.

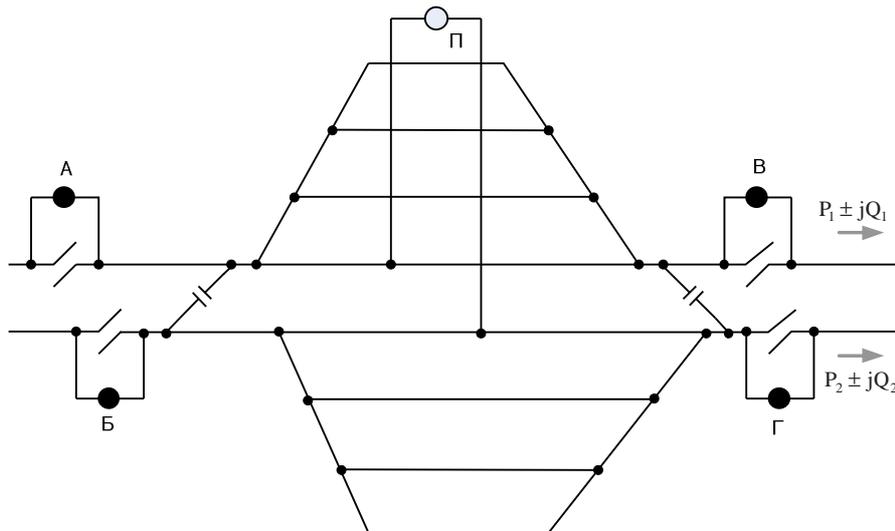


Рис. 1. Схема тяговой сети:

А, Б, В, Г – продольные нормально включенные разъединители, П – поперечный нормально отключенный разъединитель.

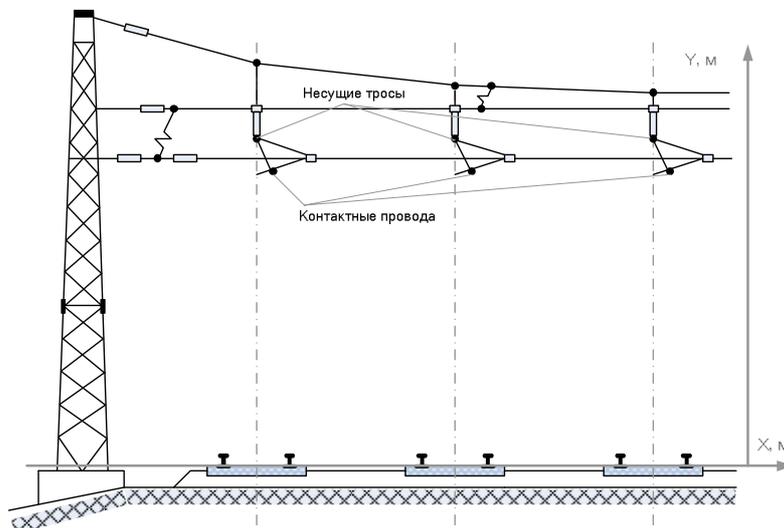


Рис. 2. Фрагмент сечения тяговой сети.

Координаты расположения контактных проводов, несущих тросов, тяговых рельсов и трубопровода, проложенного параллельно трассе железной дороги, приведены на рис. 3. Трубопровод выполнен из стальных труб диаметром 300 мм, проводимость растеканию принята равной 0.5 См/км. Длина трубопровода – один километр. Расчетная схема, сформированная средствами программного комплекса «Fazonord-Качество», представлена на рис. 4. Трубопроводу соответствуют элементы, ограниченные узлами 23-26; 24-27, 25-28. Ввиду невысокого напряжения в тяговой сети превышение ПДУ по уровню напряженности электри-

ческого поля практически невозможно, поэтому ниже приведены результаты определения напряженности магнитного поля, которая может достигать значительных величин из-за того, что по контактным проводам, несущим тросам и рельсам могут протекать большие токи. Расчеты выполнены при нагрузках тяговой сети $P_1 + jQ_1, P_2 + jQ_2$ (рис. 1), равных $10 + j10$ МВ·А, что близко к максимально допустимым мощностям для плеча питания подстанции с трансформатором 40000 кВ·А.

При моделировании рассматривалось четыре варианта:

- трубопровод отсутствует;
- однетрубная конструкция, проложенная на глубине 1 м;
- двухтрубная конструкция, проложенная на той же глубине;
- трехтрубная конструкция, проложенная на той же глубине.

Результаты расчета максимальных напряженностей H_m магнитного поля на высоте 1,8 м для указанных вариантов приведены на рис. 5. Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что уровни H_m не превосходят ПДУ в 80 А/м, установленного для эксплуатационного персонала [9, 10], но могут значительно превышать допустимые значения для сельской территории.

За счет наведения токов в заземленной металлической конструкции трубопровода имеет место существенное возрастание поля в области пространства, расположенной над ним. Так, например, на расстоянии 33 м от начала принятой системы

координат (рис. 3) за счет металлических труб напряженность поля увеличивается по сравнению с вариантом отсутствия трубопровода следующим образом:

- при наличии одной трубы в 1.9 раза (10.5 А/м);
- при двухтрубной конструкции в 2.5 раза (13.8 А/м);
- при двухтрубной конструкции почти в три раза (16.1 А/м).

Данный факт необходимо учитывать при анализе электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта и разработке мероприятий по ее улучшению, так как за счет влияния подземных металлических трубопроводов, проложенных вдоль трассы железной дороги, возможно превышение ПДУ в локальных областях пространства. Такая ситуация часто имеет место при прохождении железной дороги в пределах населенных пунктов.

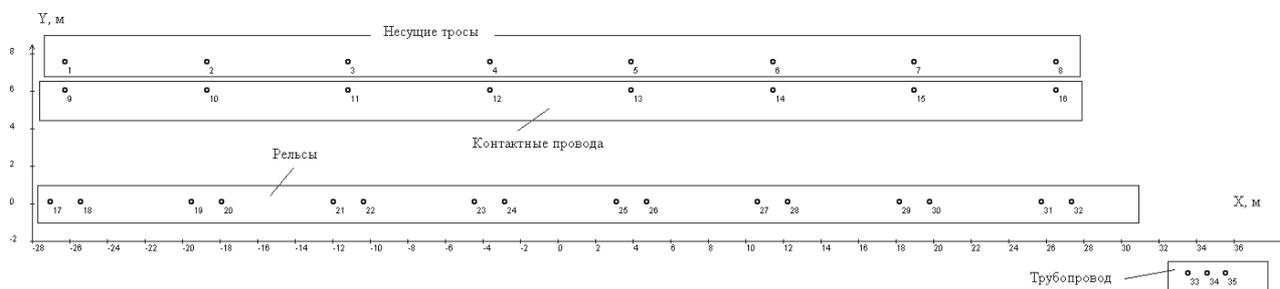


Рис. 3. Координаты расположения проводов, рельсов и трубопровода.

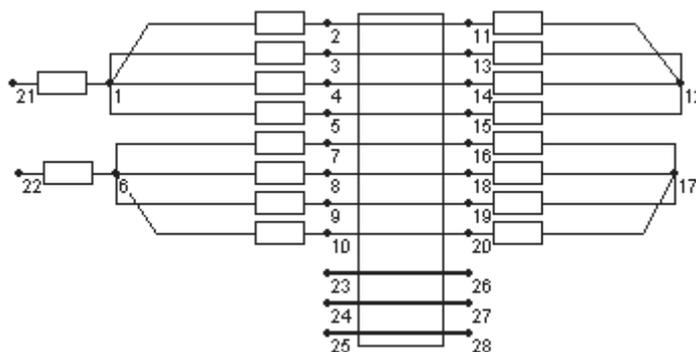


Рис. 4. Расчетная схема.

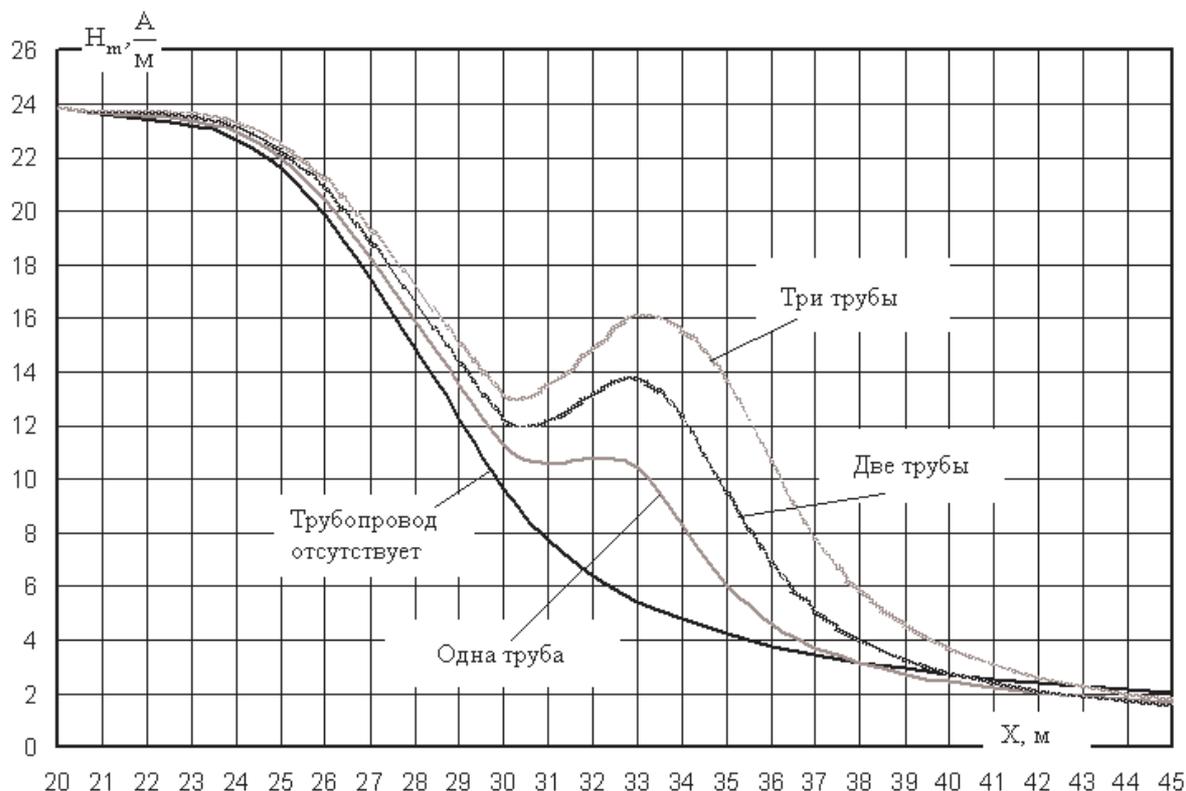


Рис. 5. Результаты расчета.

Заключение. На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. На основе разработанных в ИрГУПС методов и средств расчетов синусоидальных режимов в фазных координатах реализован новый, системный подход к анализу электромагнитной обстановки на объектах железных дорог переменного тока. Отличительной особенностью этого подхода является возможность моделирования электромагнитных полей с учетом всех свойств, характеристик и режимов сложной СТЭ и питающей электроэнергетической системы.

2. Результаты компьютерного моделирования показали применимость разработанного метода анализа ЭМП для решения практических задач, возникающих при проектировании и эксплуатации ЭЭС и СТЭ.

3. Уровни напряженности магнитного поля, создаваемого тяговой сетью с восемью контактными подвесками, не превосходят предельный уровень, установленный для эксплуатационного персона-

ла, но могут значительно превышать допустимые значения для селитебных территорий.

4. Подземные трубопроводы, проложенные вдоль трассы железной дороги, существенно повышают уровень напряженности магнитного поля в локальной области пространства, расположенной над ним. Данный факт необходимо учитывать при анализе электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта и разработке мероприятий по ее улучшению

Литература

1. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы : СанПиН 2.1.2.1002-00. М.: Минздрав РФ, 2001. 24 с.

2. Создание нормативнометодического документа, регламентирующего уровни внепроизводственных воздействий

магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) : отчет о НИР (№ госрег.01200311814). М.: ГУ НИИ МТ РАМН. 2003. 147 с.

3. Системы нормативных документов в строительстве Нормы (предельно допустимые уровни) магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях : дополнение к МГСН 2. 03.-97. (проект). М.: 2003. 13 с.

4. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станци-

ях и подстанциях. Стандарт организации СО 34.35.311-2004. М.: МЭИ, 2004. 77 с.

5. Аполлонский, С. М., Богаринова А. Н. Напряженности воздушной среды на электрифицированной железной дороге // Сборник докладов Девятой Российской научно – технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. СПб.: 2006. С. 579-583.

6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

УДК 629.1.05

Н.Ю. Лебедева, А.В. Лукьянов, А.А. Чиж*

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Создано устройство для измерения вибрации, которое позволяет измерять параметры в опасных зонах с возможностью дистанционного запуска процесса измерения и дистанционного приема данных. Проведены вибрационные испытания изобретенной аппаратуры совместно с СТД-2160, СТД-3300 и СК-1100. Для повышения точности анализа вибрации по спектру создана программа «VibrAn», имеющая удобный интерфейс и алгоритм анализа частотных характеристик вибрации.

Ключевые слова: вибрация, виброизмерительный модуль, метрологические характеристики.

Наличие проводов у виброизмерительной техники доставляет неудобства в процессе измерения параметров, а также ограничивают свободу перемещения оператора. В случае нахождения объекта измерения в опасной зоне измерения делаются невозможными по требованиям техники безопасности. Для решения проблем, связанных с нахождением объекта измерения в опасных зонах, необходимо разработать виброизмерительную аппаратуру, которая могла бы работать дистанционно. В лаборатории «Техническая диагностика» был разработан комплекс «Спектр» для входного виброконтроля

вспомогательных машин (мотор-вентиляторов, мотор-компрессоров, фазорасщепителей). Комплекс включает одноканальные виброизмерительные модули (4-10 шт.) с дистанционным управлением, на основе которых формируется схема одновременного измерения вибрации нескольких вспомогательных машин (2-5 ВМ), и программу автоматизированной вибродиагностики дефектов с использованием технологии вибродиагностики МВ при работе электровоза под контактным проводом. Характеристики виброизмерительных модулей приведены в таблице 1.

* - автор, с которым следует вести переписку.