

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный электрифицированный железнодорожный транспорт представляет собой многоуровневую структуру, включающую мощные источники и приемники (рецепторы) электрической энергии; распределительные устройства с разветвленными линиями передачи или кабельными трассами; защитную и коммутирующую аппаратуру; системы управления и коммутации. Развитие таких сложных электроэнергетических систем (ЭЭС) связано с автоматизацией, следовательно, с увеличением доли высокочувствительных элементов автоматики и полупроводниковой техники. Усложнение системы, в свою очередь, приводит к увеличению числа сбоев и отказов элементов, к снижению надежности и эффективности ЭЭС в целом. При проектировании сложных ЭЭС и систем управления проблема надежности их функционирования выдвигается на первое место.

Повышение надежности отдельных элементов или подсистем ЭЭС, введение структурной и временной избыточности, использование взаимозаменяемости и восстанавливаемости элементов, а также иных методов надежности сложной системы позволяют гарантировать отказоустойчивость системы, т. е. способность правильно функционировать при отказах или сбоях элементов. Для обеспечения гарантируемой отказоустойчивости ЭЭС в последнее время все чаще начинают учитывать изменения ее параметров и функций из-за взаимовлияния отдельных элементов в рамках проблемы электромагнитной безопасности (ЭМБ). Понятие ЭМБ вытесняет ранее используемое понятие «электромагнитная совместимость» (ЭМС) и представляется более ёмким.

ЭМБ можно рассматривать как способность устройства, использующего электромагнитные явления, удовлетворительно функционировать в данном электромагнитном окружении, не создавая недопустимых помех этому окружению, а также стойкость к мощным электромагнитным (ЭМ) излучениям от молний, ядерных взрывов и мощных внутрисистемных разрядных процессов.

Состояние безопасности, как следует из этого определения, может быть достигнуто при помощи правильного конструирования, размещения, надлежащего управления, а также с учетом воздействий внешней среды.

В настоящее время все большее число высокочувствительных электромагнитных элементов для своего надежного функционирования требуют решения тех или иных задач ЭМБ. При увеличении доли высокочувствительных элементов автоматики, измерительных и контролирующих комплексов, информационных линий и тому подобного в ЭЭС железной дороги область ЭМБ существенно расширяется. В большем объеме используются полупроводниковые преобразователи, микросхемы, микропроцессоры, на которые воздействуют ЭМ помехи. Кроме того, из-за наличия источников мощных электромагнитных полей (ЭМП) даже традиционные элементы установки, такие как коммутирующая аппаратура, устройства контроля и защиты, автоматические пульты и др.,

допускают сбои, ложные срабатывания, выходят из строя. Так, мощные импульсные ЭМП вызывают перенапряжения в электрических цепях системы, приводят к повреждениям полупроводниковых элементов, к коротким замыканиям (КЗ). Помехи, распространяющиеся по цепи и вызванные переходными процессами при переключениях в сетях питания, воздействуют на цифровые системы и информационные линии. Наличие низкочастотных электромагнитных процессов в общих сетях (гармонических составляющих питающего напряжения, перерывов питания и т. д.), а также нелинейных нагрузок, существенно расширяет проблематику ЭМБ, вовлекая в нее все виды источников и приемников электроэнергии. Уменьшается надежность, живучесть и безопасность ЭЭС железной дороги в целом.

Обеспечение совместной работы различных видов элементов электрооборудования (ЭО) в ограниченных по объему помещениях в настоящее время приобретает первостепенное значение.

Вопросы ЭМБ в их современном понимании до последнего времени ставились и решались как второстепенные в рамках проблемы помехоустойчивости. Лишь в последние десятилетия им стали уделять значительное внимание, когда возросла потребность в снижении ЭМП низких частот.

Важнейшими задачами обеспечения ЭМБ являются:

1. Прогнозирование уровня ЭМ помех в энергетических помещениях.
2. Разработка теории расчета ЭМ помех близко расположенного ЭО.
3. Оценка эффективности экранирования устройств от воздействия как стационарных, так и импульсных ЭМП.

Перечисленные задачи, часть из которых будет рассмотрена ниже, не охватывают всю проблему ЭМБ, но служат хорошей иллюстрацией ее сложности и многогранности. Можно ожидать, что все пути обеспечения ЭМБ ЭО, рассмотренные здесь, найдут свое применение, в том числе: активное и пассивное экранирование, рациональное размещение источников ЭМП и др.

На наш взгляд, в ближайшие годы найдет широкое распространение снижение полей помех с применением проектирования с учетом минимизации физических полей (например, магнитно-акустическое проектирование), применения специального размещения источников ЭМ помех и т. д., а также с использованием специальных помехоподавляющих устройств.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электроэнергетике и электротехнике большое внимание уделяется согласованию условий нормальной безаварийной и эффективной работы ЭО, производящего, передающего, преобразующего и потребляющего электроэнергию, при ее надлежащем качестве. В процессе работы ЭО подвергаются многочисленным внешним и внутренним ЭМ воздействиям, а также сами аналогичным образом воздействуют на окружающие объекты и среду. При этом часто нарушаются условия нормальной работы и функционирования как ЭО, так и окружающей среды, т. е. нарушаются условия ЭМБ (ранее использовался термин «электромагнитная совместимость» (ЭМС)). По мере расширения применения разнообразных электро- и радиоприборов, возрастания их мощности окружающие ЭП, МП и ЭМП становятся все более интенсивными и разнообразными по своим характеристикам.

Актуальными были и продолжают оставаться проблемы борьбы с радиопомехами, с защитой изоляции ЭО от грозовых и коммутационных перенапряжений, повышения качества электроэнергии, т. е. обеспечения ЭМС системы электроснабжения и ЭО для кондуктивных и ЭМ помех, распространяющихся по электрической сети.

В настоящее время все большее значение приобретают и другие аспекты обеспечения ЭМС, такие как ослабление ЭМП, т. е. снижение ЭМ помех; затруднение проникновения помех в прибор через сеть питания, корпус, систему заземления, сигнальные вводы; рациональное построение схем и конструкций приборов и функциональных связей между ними; сохранение помехоустойчивости и т. д.

В последнее десятилетие в электроэнергетике непрерывно расширяется использование микропроцессорной, вычислительной техники, компьютеров и т. д., происходит их миниатюризация при понижении уровней рабочих напряжений, полезных сигналов. Все активнее используется электронная аппаратура в системах релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматике ЭО высокого напряжения. При этом электронная аппаратура, как правило, весьма чувствительна к помехам, появляющимся во вторичных цепях подстанций, источниками которых являются коммутации выключателей и разъединителей высокого напряжения, удары молний, а также большие токи замыкания на землю. В связи с указанными обстоятельствами появилась необходимость решения сложной задачи ЭМ сосуществования электронных и электротехнических систем.

При проектировании и эксплуатации необходимо обеспечение ЭМС, которое производится на основе комплекса специальных средств и мероприятий, в основном определяемых директивными материалами — государственными стандартами РФ, руководящими указаниями и документами, правилами технической эксплуатации ЭО, экологической и биологической безопасности, а так-

же международными нормативными документами. Они ориентированы на объекты электротехнических комплексов, включая технические средства автоматического управления и измерения, применяемых на электростанциях и подстанциях, электрических сетей, систем электроснабжения, и распространяются на любые промышленные, коммунальные, бытовые и лабораторные электроустановки, в том числе и на объекты обеспечения жизнедеятельности и бесперебойности электроснабжения.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ДГА — дизель-генераторный агрегат
ДПР — два провода — рельс линия
КЗ — короткое замыкание
КС — контактная сеть
КТП — комплектная трансформаторная подстанция
ЛПЭ — линия продольного электроснабжения
ЛС — линия связи
ЛЭП — линия электропередачи
МП — магнитные поля
МУРЗ — микропроцессорное устройство релейной защиты
ТПС — тяговая подстанция
ТС — тяговые сети
ТТ — трансформатор тока
ТСН — трансформатор собственных нужд
СГ — синхронный генератор
СШ — сборные шины
ЭМ — электромагнитный
ЭМО — электромагнитная обстановка
ЭМБ — электромагнитная безопасность
ЭМЗ — электромеханическое реле защиты
ЭМП — электромагнитные поля
ЭМС — электромагнитная совместимость
ЭО — электрооборудование
ЭП — электрические поля
ЭПС — электроподвижной состав
ЭЭС — электроэнергетическая система
ХХ — холостой ход

**РАЗДЕЛ I.
НИЗКОЧАСТОТНЫЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПОМЕХИ**

ГЛАВА 1.

РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ОТ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

1.1. Общий подход

В настоящее время электрифицированная железная дорога на переменном токе имеет разветвленную систему электроснабжения. Она состоит из множества технических средств (элементов). Силовые элементы системы электроснабжения можно рассматривать в качестве источников внешних ЭМП. Слаботочные элементы можно рассматривать в качестве приемников (рецепторов), на которые воздействуют ЭМП силовых элементов.

В первую очередь, требуется оценить величины результирующих магнитных \vec{H} и электрических \vec{E} напряженностей ЭМП, которые характеризуют электромагнитную среду на железной дороге.

К силовым элементам, которые формируют электромагнитную среду, следует отнести:

- линии электропередачи (ЛЭП, ЛПЭ, ДПР), с помощью которых обеспечивается питание объектов железной дороги; тяговых и трансформаторных подстанций, электрооборудования вспомогательных служб;
- тяговые подстанции (ТПС), обеспечивающие надежную работу оборудования и бесперебойного электроснабжения электроподвижного состава (ЭПС);
- тяговые сети (ТС), связывающие ТПС с электровозами.

Нахождение суммарных ЭМП от многих источников затруднено из-за необходимости учета дифракционных полей как на оболочках самих источников, так и окружающих объектах [1.1].

Представьте себе картину: на станции скапливаются грузовые поезда, перевозящие жидкие грузы в металлических цистернах. Сам железнодорожный состав при расчетах может быть аппроксимирован бесконечно длинным металлическим цилиндром, существенно влияющим на распределение электрических и магнитных напряженностей (электромагнитной нагрузки) в окружающей среде, являющимся уже вторичным источником.

Решение задач по распределению полей при количестве источников $N > 2$ представляет значительные трудности, а поэтому в ряде случаев такие расчеты имеет смысл выполнять заранее и учитывать при расчетах результирующих напряженностей с помощью функций взаимовлияния.

Методика расчета результирующих электрических и магнитных напряженностей ЭМП от объектов электрифицированной железной дороги, созданных разнообразным железнодорожным ЭО, приведенная в данной главе, предполагает учет функций взаимовлияния [1.1, с. 140], и в первую очередь на станциях, где возможно скопление тяжелых грузовых поездов.

Учет функций взаимовлияния позволяет существенно упростить нахождение результирующих напряженностей ЭМП без решения сложных дифракционных задач со многими источниками полей.

1.2. Методика расчёта функций ЭМ среды на железнодорожных объектах

Расчет суммарных векторов магнитной $\dot{\vec{H}}$ и электрической $\dot{\vec{E}}$ напряженностей ЭМП от $i(i \in [1, N])$ источников в свободном пространстве в некоторой системе ортогональных криволинейных координат q_1, q_2, q_3 ¹ обычно осуществляется методом наложения:

$$\dot{H}_{q\beta} = \sum_i \dot{H}_{q\beta}^{(i)}, \quad \dot{E}_{q\beta} = \sum_i \dot{E}_{q\beta}^{(i)}, \quad i \in [1, N], \quad (1.1)$$

где $\dot{H}_{q\beta}, \dot{E}_{q\beta}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей суммарного поля по осям $q\beta (\beta = 1, 2, 3)$, $\dot{H}_{q\beta}^{(i)}, \dot{E}_{q\beta}^{(i)}$ — составляющие соответствующей напряженности i -го источника.

Использование (1.1) для расчета напряженностей полей удовлетворяет инженерным задачам в случае, когда расчет ведется для источников, находящихся на значительном расстоянии друг от друга: $L_{i-k} \gg 2l_{i,k}$, где L_{i-k} — расстояние между i -м и k -м источниками ($i \in [1, N], k \in [1, N], i \neq k$); $2l_{i,k}$ — диаметр наименьшего выпуклого тела, описанного около i -го источника поля [1.2].

Исследования показывают (см., например, [1.3]), что при $L_{i-k} \in [10, \infty]2l_{i,k}$ можно воспользоваться (1.1), при $L_{i-k} \in [5; 10]2l_{i,k}$ использование (1.1) приводит к погрешности результатов до 5–15%, при $L_{i-k} \in [2; 5]2l_{i,k}$ учет взаимовлияния необходим безусловно. Такой учет предлагается осуществлять с помощью функций взаимовлияния (ранее в опубликованной литературе они назывались корректирующими), введенных автором [1.1, 1.4], в виде:

$$\dot{H}_{q\beta} = \sum_i K_{q\beta(N-i)}^{SM(i)} \dot{H}_{q\beta}^{(e)(i)}, \quad \dot{E}_{q\beta} = \sum_i \dot{K}_{q\beta(N-i)}^{S\Delta(i)} \dot{E}_{q\beta}^{(e)(i)}, \quad (1.2)$$

где $\dot{H}_{q\beta}^{(e)(i)}, \dot{E}_{q\beta}^{(e)(i)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей i -го источника в свободном пространстве (индекс e); $\dot{K}_{q\beta(N-i)}^{SM(i)}, \dot{K}_{q\beta(N-i)}^{S\Delta(i)}$ — составляющие функций взаимовлияния по осям $q\beta$ соответственно для магнитной и электрической напряженностей, учитывающие влияние 1, 2, ..., $N-i$ источников на поле i -го источника; индексы S, M, Δ — соответственно вид поверхности (S): сфера, цилиндр и т. д., магнитный (M) — исследуется МП, электрический (Δ) — исследуется ЭП. Их определяют в виде:

$$\dot{K}_{q\beta(N-i)}^{SM(i)} = \dot{H}_{q\beta}^{i(N-i)} / \dot{H}_{q\beta}^{(e)(i)}, \quad \dot{K}_{q\beta(N-i)}^{S\Delta(i)} = \dot{E}_{q\beta}^{i(N-i)} / \dot{E}_{q\beta}^{(e)(i)}, \quad (1.3)$$

¹ В дальнейшем используем прямоугольную систему координат x, y, z , сферическую систему координат r, φ, θ и круговую цилиндрическую систему координат r, θ, z как наиболее приемлемые для проводимых ниже расчетов.

где $\dot{H}_{q\beta}^{i(N-i)}$, $\dot{E}_{q\beta}^{i(N-i)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей ЭМП i -го источника в присутствии $N-i$ тел, которыми ограничиваются источники.

По существу, расчет напряженностей ЭМП группы источников в свободном пространстве сводится к расчету напряженностей внешних полей каждого из i источников и функций взаимовлияния по (1.3). Последние могут быть найдены из дифракционных задач.

Расчет суммарных векторов магнитной \vec{H} и электрической \vec{E} напряженностей ЭМП от $i(i \in [1, M])$ источников, окруженных экранирующей оболочкой, в принципе может быть проведен по (1.2), если оболочку считать дополнительным источником поля. Однако появление дополнительного источника значительно усложняет задачу и не позволяет достаточно наглядно проанализировать результаты. Поэтому представляется целесообразным взаимовлияние источников поля и воздействие экранирующей оболочки учитывать раздельно: первое — посредством функций взаимовлияния $\dot{K}_{q\beta(N-i)}^{Sa(i)}$, второе — посредством функций экранирования $\dot{K}_{q\beta}^{Sa(i)}$ и обратного действия $\dot{W}_{q\beta}^{Sa(i)}$ ($\alpha = [M, \mathcal{E}]$) [1.5, с. 172]:

$$\dot{H}_{q\beta}^{(1)} = \sum_i \dot{K}_{q\beta(N-i)}^{SM(i)} \left\{ \frac{\dot{K}_{q\beta}^{SM(i)}}{(1 + \dot{W}_{q\beta}^{SM(i)})} \right\} \dot{H}_{q\beta}^{(i)}, \quad (1.4)$$

$$\dot{E}_{q\beta}^{(1)} = \sum_i \dot{K}_{q\beta(N-i)}^{S\mathcal{E}(i)} \left\{ \frac{\dot{K}_{q\beta}^{S\mathcal{E}(i)}}{(1 + \dot{W}_{q\beta}^{S\mathcal{E}(i)})} \right\} \dot{E}_{q\beta}^{(i)}, \quad (1.5)$$

где $\dot{H}_{q\beta}^{(1)}$, $\dot{E}_{q\beta}^{(1)}$, $\dot{H}_{q\beta}^{(2)}$, $\dot{E}_{q\beta}^{(2)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей в зоне до экрана и за экраном соответственно. Индекс $\alpha \equiv \mathcal{E}$, M для удобства во всех функциях экранирования, обратного действия и взаимовлияния используется в верхнем ряду индексов, исключение составляет лишь этот индекс при потенциалах.

В качестве экранов при оценке параметров электромагнитной среды на железной дороге могут выступать любые крупногабаритные объекты (например, цистерны, тяговые и трансформаторные подстанции, крупные зеленые насаждения и т. д.).

Исследования показывают, что расчет напряженностей по (1.4)–(1.5) целесообразен, если диаметр экранирующей оболочки d более чем в два раза превышает диаметр минимального выпуклого тела $2l$, описываемого около группы источников ($d > 4l$). Если $d \approx 2l$, то при расчетах появляется погрешность, составляя 30% и более. Используя (1.4)–(1.5), расчет поля группы источников, находящихся в общей экранирующей оболочке, сводится к расчету внешнего поля каждого из i источников, функций взаимовлияния, экранирующих функций и функций обратного действия.

В настоящее время распространен способ оценки эффективности экранирования с помощью функций экранирования:

$$K_{x\beta}^{SM} = \frac{H_{x\beta}^{(2)}}{H_{x\beta}^{(e)}}, \quad K_{x\beta}^{S\mathcal{E}} = \frac{E_{x\beta}^{(2)}}{E_{x\beta}^{(e)}}, \quad (1.6)$$

где $H_{\text{xp}}^{(2)}$, $E_{\text{xp}}^{(2)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей ЭМП за пределами экранирующей оболочки; $H_{\text{xp}}^{(e)}$, $E_{\text{xp}}^{(e)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей ЭМП в отсутствии экранирующей оболочки.

В ряде случаев с точностью, достаточной для инженерных приложений, в качестве функций экранирования используются отношения скалярных потенциалов \dot{U}_2^α и $\dot{U}_2^{(e)\alpha}$, соответственно при наличии и отсутствии экрана [1.6]:

$$K^{S\alpha} = \dot{U}_2^\alpha / \dot{U}_2^{(e)\alpha}, \alpha = [\text{м}, \text{э}]. \quad (1.7)$$

При этом если экранируется однородное постоянное или переменное поле, то функции $K^{S\alpha}$ являются постоянными. При экранировании неоднородного поля, структура которого зависит от координат пространства, функции $K^{S\alpha}$ будут переменными и зависеть от расположения источника ЭМП относительно экранирующей оболочки. В таких случаях использование $K^{S\alpha}$ в виде (1.6) или (1.7) представляется нецелесообразным. Поэтому при экранировании неоднородного поля с помощью как однородных, так и неоднородных экранирующих оболочек более удобно учитывать влияние экрана на структуру ЭМП функциями экранирования по пространственным гармоникам [1.7]:

$$\dot{K}_{nm}^{S\alpha} \cong \dot{U}_{2nm}^\alpha / \dot{U}_{nm}^{\alpha(e)}. \quad (1.8)$$

Такой подход к расчету функций экранирования вполне оправдан в случаях, когда оболочки являются однородными (μ , γ — const), и удобен при анализе функций экранирования оболочек, ограниченных полными координатными поверхностями.

Необходимо отметить, что расчет функций экранирования по (1.8) широко используется в опубликованной литературе [1.7–1.9].

Наряду с функциями экранирования $\dot{K}^{S\alpha}$ при выполнении расчетов суммарных напряженностей ЭП, МП и ЭМП могут быть использованы и функции обратного действия $\dot{W}^{S\alpha}$. Они определяются в виде:

$$\dot{W}^{SM} = \frac{\dot{H}_{q\text{p}}^{(1)(om)}}{\dot{H}_{q\text{p}}^{(e)}}, \dot{W}^{S\text{Э}} = \frac{\dot{E}_{q\text{p}}^{(1)(om)}}{\dot{E}_{q\text{p}}^{(e)}}, \quad (1.9)$$

где $\dot{H}_{q\text{p}}^{(1)(om)}$, $\dot{E}_{q\text{p}}^{(1)(om)}$ — составляющие магнитной и электрической напряженностей отраженного от экрана поля.

При использовании скалярных потенциалов:

$$\dot{W}^{Sa} \cong \dot{U}_1^{\alpha(om)} / \dot{U}^{\alpha(e)}, \dot{W}^{S\alpha} \cong \dot{U}_{1nm}^{\alpha(om)} / \dot{U}_{nm}^{\alpha(e)}, \quad (1.10)$$

где $\dot{U}_{\alpha 1}^{(om)}$ — скалярные потенциалы отраженного от экрана поля.

Функции экранирования, полученные с использованием аппарата гармонических функций, $\dot{K}^{S\alpha}$ и обратного действия $\dot{W}^{S\alpha}$ рассчитываются в виде:

$$\begin{aligned} \dot{K}^{S\alpha} &= \left[\frac{1}{N} \sum_n \sum_m (\dot{K}_{nm}^{S\alpha})^2 \right]^{0.5}; \\ \dot{W}^{S\alpha} &= \left[\frac{1}{N} \sum_n \sum_m (\dot{W}_{nm}^{S\alpha})^2 \right]^{0.5}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Формулы (1.4)–(1.5) пригодны для расчета напряженностей полей группы источников как в ближней зоне, так и в дальней. Если учесть, что функции взаимовлияния в удаленных от источников и экранирующей оболочки точках стремятся к единице ($\dot{K}_{q\beta(N-i)}^{Sa(i)} \rightarrow 0$ при $q\beta \rightarrow \infty$), то

$$\dot{H}_{q\beta}^{(2)} = \sum_i \dot{K}_{q\beta}^{SM(i)} \dot{H}_{q\beta}^{(i)}, \dot{E}_{q\beta}^{(2)} = \sum_i \dot{K}_{q\beta}^{S\alpha(i)} \dot{E}_{q\beta}^{(i)}. \quad (1.12)$$

В таких случаях достаточно рассчитать напряженности внешнего поля каждого из i источников и умножить их на соответствующие функции $\dot{K}_{q\beta}^{Sa(i)}$. На расстояниях, в 2,0–2,5 раза превышающих диаметр оболочки S , можно использовать усредненные значения $\dot{K}_{q\beta}^{Sa}$ для всех источников и вынести их за знак суммы в (1.11)–(1.12):

$$\dot{H}_{q\beta}^{(2)} = \dot{K}_{q\beta}^{SM} \sum_i \dot{H}_{q\beta}^{(i)}, \quad (1.13)$$

$$\dot{E}_{q\beta}^{(2)} = \dot{K}_{q\beta}^{S\alpha} \sum_i \dot{E}_{q\beta}^{(i)}. \quad (1.14)$$

В отсутствие экранирующих оболочек ($K_{q\beta}^{Sa} \rightarrow 1$) формулы (1.13)–(1.14) переходят в (1.1).

Из рассмотрения следует, что использование той или иной формулы для расчета суммарных МП, ЭП и ЭМП группы электроэнергетических объектов вытекает из геометрии объекта, его пространственного размещения и размеров используемых экранирующих оболочек.

Кроме того, необходимо учитывать, что силовые элементы разнесены по длине железнодорожной дороги на значительные расстояния. Например, тяговые подстанции отстоят друг от друга на расстояниях от 30 до 80 км, ЛЭП отстоят от железной дороги на десятки и сотни метров и т. д. Если каждый из этих источников и создает значительное поле у своей поверхности, то с расстоянием оно быстро спадает, как правило, по следующим зависимостям (по модулю):

$$\left| \dot{E}_r \right| = \left| \dot{E}_0 \right| \cdot (r_0/r)^{(p+2)}, \left| \dot{H}_r \right| = \left| \dot{H}_0 \right| \cdot (r_0/r)^{(p+1)}, \quad (1.15)$$

где $\left| \dot{E}_0 \right|$, $\left| \dot{H}_0 \right|$ — модули комплексов электрической и магнитной напряженностей на поверхности источника внешнего поля; p — порядок пространственной гармоники ($p = 1$ — дипольная, $p = 2$ — квадрупольная и т. д.); r_0 — максимальный радиус сечения выпуклого тела, описанного около источника.

Анализ распределения электрических и магнитных напряженностей ЭМП от «значимых» источников полей на электрифицированной железной дороге показывает, что затухание напряженностей происходит сравнительно быстро и в пределах инженерной точности расчетов необходимости в учете полей дифракции и интерференции в большинстве случаев нет, а значит, нет и необходимости в учете взаимовлияния энергетических объектов.

Таким образом, при оценке ЭМО на железнодорожных станциях или на железнодорожных перегонах в дальнейшем будем использовать следующие модели расчетов.

1. При расчете электрических и магнитных напряженностей ЭМП в воздушной среде на перегонах, на пассажирских платформах и вообще на открытых пространствах используются упрощенные модели расчетов, т. е. хорошо зарекомендовавший себя метод наложения по (1.1).

2. В случаях, когда на перегонах или на железнодорожных станциях сосредоточены тяжеловесные составы со значительным включением металлических цистерн, необходимо прибегать к использованию функций взаимовлияния по зависимостям (1.2).

3. Если суммарное поле рассчитывается в ограниченных по размерам помещениях или при расчете ЭМП на перегруженных участках ж/д станции (с учетом подвижного состава) следует придерживаться более сложной методики расчета и использовать формулы (1.4)–(1.5).

Дальнейшие расчеты ориентированы на электрифицированную железную дорогу с тягой на переменном токе. Это вносит некоторое упрощение в использование разработанной методики расчета. Большинство из источников, размещаемых на тяговых подстанциях, имеют значительную протяженность вдоль железной дороги, параллельны между собой (например, тяговые сети и линии продольного электроснабжения), слабо влияют друг на друга в стационарных режимах работы, а поэтому нахождение результирующих напряженностей существенно упрощается — расчет может выполняться лишь в поперечных сечениях путей по двум координатам (y, z — декартовы или r, θ — полярные координаты). Ниже приводятся упрощенные методики расчета электрических и магнитных напряженностей ЭМП для характерных участков электрифицированной железной дороги.

1.3. Расчет результирующих напряженностей ЭМП на разных участках электрифицированной железной дороги

1.3.1. На перегонах

Расчет суммарной магнитной напряженности ЭМП

$$\left| \dot{\vec{H}}_{\Sigma}(y, z) \right| = \dot{K}_{(j-i)}^{\text{ЦМ}(i)} \left| \dot{\vec{H}}_{\text{ЛЭП}} \right| + \left| \dot{\vec{H}}_{\text{ЛПЭ}}(y, z) \right|^2, \quad (1.16)$$

где $\left| \dot{\vec{H}}_{\Sigma}(y, z) \right|$ — модуль комплексной результирующей магнитной напряженности ЭМП, А/м; $\left| \dot{\vec{H}}_{\text{ЛЭП}} \right|$ — модуль комплексной электрической напряженности ЭМП от ЛЭП, А/м; $\left| \dot{\vec{H}}_{\text{ЛПЭ}}(y, z) \right|$ — модуль комплексной электрической напря-

² Коэффициенты взаимовлияния типа $\dot{K}_{(j-i)}^{\text{ЦМ}(i)}$ ($i, j \in [1, 2], i \neq j$) при ЛПЭ в (1.16) не используются из-за их малого отличия от единицы даже при наличии крупных «металлических предметов» на перегоне. Аналогично и в (1.17).

женности ЭМП от ЛПЭ, А/м; $\dot{K}_{(j-i)}^{IM(i)} (i, j \in [1, 2], i \neq j)$ — комплексные коэффициенты взаимовлияния, учитывающие наличие на перегоне крупных «металлических предметов».

Расчет суммарной электрической напряженности ЭМП

$$\left| \dot{\vec{E}}_{\Sigma}(y, z) \right| = \dot{K}_{(j-i)}^{IC(i)} \sum_{i=1}^{i=n} \left| \dot{\vec{E}}_{TC}^{(i)} \right| + \left| \dot{\vec{E}}_{ЛПЭ}(y, z) \right|, \quad (1.17)$$

где $\left| \dot{\vec{E}}_{\Sigma}(y, z) \right|$ — модуль комплексной результирующей электрической напряженности ЭМП, В/м; $\left| \dot{\vec{E}}_{ЛЭП} \right|$ — модуль комплексной электрической напряженности ЭМП от ЛЭП, В/м; $\left| \dot{\vec{E}}_{ЛПЭ}(y, z) \right|$ — модуль комплексной электрической напряженности ЭМП от ЛПЭ, В/м; $\dot{K}_{(j-i)}^{IM(i)} (i, j \in [1, 2], i \neq j)$ — комплексные коэффициенты взаимовлияния, учитывающие наличие на перегоне крупных «металлических предметов».

1.3.2. Вблизи тяговых подстанций

Расчет суммарной магнитной напряженности ЭМП

$$\left| \dot{\vec{H}}_{\Sigma}(y, z) \right| = \dot{K}_{(2-1)}^{IM(1)} \left| \dot{\vec{H}}_{ЛЭП} \right| + \left| \dot{\vec{H}}_{ЛПЭ}(y, z) \right| + \sum_{k=1}^{k=K} \left| \dot{\vec{H}}_{ТП}^{(k)} \right|, \quad (1.18)$$

где $\left| \dot{\vec{H}}_{\Sigma}(y, z) \right|$ — модуль комплексной результирующей магнитной напряженности ЭМП, А/м; $\left| \dot{\vec{H}}_{ЛЭП} \right|$ — модуль комплексной электрической напряженности ЭМП от ЛЭП, А/м; $\left| \dot{\vec{H}}_{ЛПЭ}(y, z) \right|$ — модуль комплексной электрической напряженность ЭМП от ЛПЭ, А/м; $\dot{K}_{(2-1)}^{IM(1)}$ — коэффициент взаимовлияния, учитывающий наличие на перегоне крупных «металлических предметов»; $\sum_{k=1}^{k=K} \left| \dot{\vec{H}}_{ТП}^{(k)} \right|$ — модуль суммарной магнитной напряженности ЭМП от k ТП ($k \in [1 - 4]$), А/м.

Расчет суммарной электрической напряженности ЭМП

$$\left| \dot{\vec{E}}_{\Sigma}(y, z) \right| = K_{(2-1)}^{IC(1)} \sum_{i=1}^{i=n} \left| \dot{\vec{E}}_{TC}^{(i)} \right| + \left| \dot{\vec{E}}_{ЛПЭ}(y, z) \right| + \sum_{k=1}^{k=K} \left| \dot{\vec{E}}_{ТП}^{(k)} \right|, \quad (1.19)$$

где $\left| \dot{\vec{E}}_{\Sigma}(y, z) \right|$ — модуль комплексной результирующей электрической напряженности ЭМП, В/м; $\left| \dot{\vec{E}}_{ЛЭП} \right|$ — модуль комплексной электрической напряженности ЭМП от ЛЭП, В/м; $\left| \dot{\vec{E}}_{ЛПЭ}(y, z) \right|$ — модуль комплексной электрической

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru