

Проблемы электромагнитной безопасности в урбанизированном пространстве

АПОЛЛОНСКИЙ С.М., ГОРСКИЙ А.Н.

Термин «глобальное электромагнитное загрязнение окружающей среды» официально введен в 1995 г. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), включившей эту проблему в перечень приоритетных для человечества. Живые организмы, в том числе человек, в процессе эволюции приспособились к определенным уровням ЭМП, однако резкое значительное повышение (в историческом аспекте) уровней ЭМП вызывает напряжение адапционно-компенсаторных возможностей организма. Долговременное действие этого фактора может привести к их истощению, что повлечет необратимые последствия на системном уровне. В статье рассмотрены основные источники электромагнитного загрязнения в урбанизированном пространстве; методы расчёта напряженностей от источников электромагнитного поля; проблемы, связанные с электромагнитным загрязнением и с обеспечением электромагнитной безопасности технических средств и человека в урбанизированном пространстве.

Ключевые слова: электромагнитное поле, урбанизированное пространство, электромагнитная безопасность, нормирование электромагнитных полей, способы снижения электромагнитной нагрузки

Интенсивное использование электромагнитной и электрической энергии в современном информационном обществе привело к тому, что в последней трети XX в. возник и сформировался новый значимый фактор загрязнения окружающей среды – электромагнитный. К его появлению привело развитие современных технологий передачи информации и энергии, дистанционного контроля и наблюдения, некоторых видов транспорта, а также ряда технологических процессов.

С начала 90-х годов произошли изменения в структуре источников электромагнитных полей (ЭМП), связанные с возникновением их новых видов (сотовой и других видов персональной и мобильной коммуникации), освоением новых частотных диапазонов теле- и радиовещания, развитием средств дистанционного наблюдения и контроля и т.д. Особенностью этих источников является создание равномерной зоны «радио-покрытия», что является ничем иным, как увеличением электромагнитной нагрузки в окружающую среду.

Термин «глобальное электромагнитное загрязнение окружающей среды» официально введен в 1995 г. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), включившей эту проблему в перечень приоритетных для человечества. Живые организмы, в том числе человек, в процессе эволюции приспособились к определенным уровням ЭМП, однако, резкое значительное повышение (в историческом аспекте) уровней ЭМП вызывает напряжение адап-

тационно-компенсаторных возможностей организма. Долговременное действие этого фактора может привести к их истощению, что повлечет необратимые последствия на системном уровне.

Формирование электромагнитной среды в урбанизированном пространстве. Электромагнитная среда в мегаполисе и прилегающих районах формируется за счет фоновых и техногенных источников.

Фоновые источники электромагнитных излучений. Естественные ЭМП в атмосфере имеют различное происхождение, включая меняющиеся в течение суток магнитное поле (МП) с индукцией примерно $3 \cdot 10^{-8}$ Тл, которые вызваны солнечным и лунным влиянием на ионосферные токи. Наибольшие атмосферные ЭМП возникают периодически в результате интенсивной солнечной активности и гроз, достигая индукции $5 \cdot 10^{-7}$ Тл во время больших магнитных бурь [1].

Волновые и корпускулярные излучения Солнца находятся в диапазоне частот $0,1 \div 3000$ Гц. Индукция переменного МП составляет $\approx 10^{-7}$ Тл. Это значение претерпевает существенные изменения при пертурбациях на Солнце $\approx 10^{-7} \div 10^{-5}$ Тл. Переменное МП космического происхождения оценивается индукцией $\approx 10^{-14}$ Тл при частотах $0,005 \div 0,1$ Гц. Вариации солнечной активности приводят к магнитным бурям, которые вызывают изменения МП в смысле классических «вариаций», но

одновременно и вариаций ЭМП во всем диапазоне ультранизких частот (УНЧ).

Одновременно на земном шаре бушует около 2000 гроз, во время которых молния ударяет в земную поверхность около 16 раз в секунду. Возникающее на уровне земли значение тока может достигать $2 \cdot 10^5$ А. Поля с очень широким частотным диапазоном возникают во время ударов молнии и распространяются на большие расстояния, влияя на суммарное магнитное поле Земли. При наложении на МП Земли переменных полей, связанных с нерегулярными атмосферными явлениями и возникновением резонансных частот $8 \div 40$ Гц напряженностью $H = 10^{-5}$ А/м (феномен Шумана), образуются слабые переменные МП. Генерированные разрядами молний, эти поля распространяются в пространстве между земной поверхностью и нижней границей ионосферы.

Естественные ЭМП Земли характеризуются индукцией МП $(5 \div 10) \cdot 10^{-8}$ Тл при частоте пульсаций $0,0002 \div 0,1$ Гц; кратковременными геомагнитными пульсациями с частотой 5 Гц и продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов; уменьшением индукции ЭМП от 10^{-11} до 10^{-14} Тл при увеличении частоты от 0,1 до 3 кГц [1].

Техногенные источники электромагнитных излучений можно разделить на две условные группы. К первой относятся системы, технологически предназначенные для преднамеренного излучения электромагнитной энергии. Это технологии передачи информации, которые используют радиочастотный диапазон, как традиционные, так и самые современные телекоммуникационные системы: эфирное телевидение, радиовещание, системы сотовой и транкинговой связи, а также радиорелейные и спутниковые системы передачи.

К второй группе относятся системы, функционирование которых сопровождается непреднамеренным генерированием ЭМП. Как правило, это источники промышленной частоты ($f = 50, 400$ Гц), в том числе системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии: электростанции, воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), трансформаторные подстанции, системы распределения электроэнергии и др., а также системы энергоснабжения электротранспорта — контактные линии, тяговые подстанции и др. Принципиальное отличие источников промышленной частоты от источников радиочастотного диапазона в том, что воздушные и кабельные ЛЭП, трансформаторные подстанции формируют преимущественно локальную электромагнитную среду, которая существенна лишь для отдельных районов.

Отдельно следует отметить систему питания городского электротранспорта (трамвай, троллейбус, метрополитен) с сопутствующими тяговыми подстанциями. С позиции электромагнитной безопасности (ЭМБ) для населения мегаполиса процесс развития энергосистемы урбанизированного пространства практически не контролируется.

В мегаполисах и близких к ним районных территориях расположен ряд мощных объектов телекоммуникаций, представляющих собой комплексы излучающих технических средств (ТС). К ним относятся радиотелевизионные передающие центры, состав передающего оборудования и антенн которых совершенствуется, следовательно, освоение прилегающих к центру территорий, очевидно, должно сопровождаться их электромагнитной экспертизой.

Бурное развитие сетей, конкурентная борьба операторов, отсутствие стратегии развития мобильной связи города в целом приводят к практически неконтролируемому наращиванию числа базовых станций в современных мегаполисах.

Большое влияние на распределение высокочастотных ЭМП в пределах интенсивной застройки оказывают железобетонные конструкции жилых и производственных зданий; необрушенные контактные провода и рельсы от неиспользуемых линий электротранспорта; металлические крыши [2].

Влияние на электромагнитное загрязнение урбанизированного пространства климатических и геологических особенностей. Распределение ЭМП в воздушной среде зависит не только от инфраструктуры окружающего пространства, но и от его электромагнитных параметров: электрической проводимости γ_B , магнитной μ_B и диэлектрической ϵ_B проницаемостей. Анализ влияния изменения этих параметров на электромагнитные процессы в зависимости от метеорологических условий и практической деятельности человека показывает:

процессы индустриализации, урбанизации и других видов практической деятельности человека приводят к существенным изменениям электрической проводимости по регионам, увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей;

возведение высоких объектов приводит к изменению зарядов генерирующих процессов; распределению зарядов и грозовой активности в облаках;

электромагнитные параметры воздушной среды существенно меняются в местах природных катаклизмов — скопления грозовых туч, очагов зарождения воздушных вихрей, районах землетрясений и т.д. Риск попадания в места повышенной опасности высок, особенно в районах предполагаемых землетрясений, ибо электромагнитные параметры

воздушной среды начинают меняться задолго до землетрясения, о котором порой никто не догадывается [3].

Распространение и структура ЭМП в воздушной среде урбанизированного пространства зависят и от особенностей геологического строения земной поверхности в местах размещения ТС:

от электрических и магнитных характеристик грунтов поверхностного слоя под объектами ЭЭС, рельефа местности. Так, в гористой местности увеличивается рассеяние электроэнергии от воздушных ЛЭП на корону из-за изменений плотности воздуха. Приблизительно считается, что начальная напряженность ЭП в окружающей воздушной среде изменяется прямо пропорционально плотности воздуха [4]: $E_0(\delta) \approx k_1 \delta$, где k_1 – коэффициент пропорциональности; δ – плотность воздуха; E_0 – начальная напряженность ЭП, при которой выполняется условие самостоятельности разряда в газе. Основным фактором, определяющим потери на корону и радиопомехи на ЛЭП, является отношение фактической напряженности (градиента) ЭП E на поверхности проводов к E_0 ;

меняется интенсивность поглощения энергии высокочастотных излучений (например, высокочастотных радиоволн) грунтами на трассе распространения в зависимости от изменения их электрических характеристик. В местах с залеганием хорошо фильтрующих песчаников и супесчаных сред изменение влажности и температурного режима приводит к поляризации поверхности и изменению электрических характеристик в воздушной среде, соприкасающейся с этими грунтами;

большие водные пространства на пути объектов ЭЭС могут способствовать появлению широкополосных помех, возникающих при рассеянии ЭМП от водной поверхности [5];

возникают блуждающие токи в земле. Кора земного шара состоит из нескольких слоев земляных пород (минералов), воды и газов, заполняющих пустоты в слоях. Кора представляет собой полупроводящий материал, удельная проводимость которого в различных местах определяется характером породы и глубиной ее залегания. Вода морей и океанов также является проводящей средой. При возникновении разностей электрических потенциалов между двумя точками земли или воды возникают электрические токи, протекающие от мест с более высоким потенциалом положительного знака по направлениям к местам с потенциалами отрицательного знака. Как правило, эти токи отличаются по значению в различных точках земной или водной поверхности, в разных слоях и на различной глубине.

Основными причинами возникновения разности потенциалов в различных точках земной поверхности и появления блуждающих токов являются: воздушные ЛЭП, использующие «землю» в качестве обратного провода; электрифицированные железные дороги постоянного и переменного тока (в том числе и городской трамвай), в которых в качестве обратного провода используются рельсовые пути и земля; магнитные бури или сильные возмущения магнитного поля (МП) на поверхности земного шара. Кроме того, причиной возникновения блуждающих токов является течение потока морской воды с определенной скоростью в МП земли.

К сожалению, многое из отмеченного выше еще не нашло должного понимания и отражения в действующей нормативной документации.

Расчёты электромагнитной нагрузки на окружающую среду. Аналитические решения, имеющие достаточно простой математический вид. «Дальняя зона». Во многих случаях отдельные части электрооборудования можно представить простыми геометрическими телами: сферой, цилиндром, длинной линией, в других – электрическими и магнитными диполями. Такая замена особенно полезна и оправдана при анализе ЭМП на больших расстояниях от заряженных тел, в так называемой «дальней зоне».

В статье рассматриваются только электрические и магнитные поля при сравнительно низких частотах (от нуля до десятков килогерц), когда в едином электромагнитном поле (ЭМП) можно выделить электрическую и магнитную составляющие.

Электрическое поле. Пусть рассматриваемую часть электрооборудования приблизительно можно заменить сферой радиусом R . Тогда в окружающем сфере пространстве на расстояниях $r \gg R$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \text{ [В/м];} \quad (1)$$

$$U = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \text{ [В],} \quad (2)$$

где Q – заряд рассматриваемого тела, Кл; r – расстояние от заданной точки до центра заряженного тела, м; ϵ – диэлектрическая проницаемость окружающего пространства – как правило, это воздух, поэтому $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-17}$ Ф/м. Таким образом, при $r \gg R$ электрическое поле сферы совпадает с полем точечного заряда, причем принимается равным нулю потенциал бесконечно удаленных точек. Полученный результат может быть обобщен. Любая система заряженных тел с отличным от нуля суммарным зарядом, расположенным в конечной области пространства, может рассматриваться на

расстояниях, значительно больших по сравнению с размерами этой области (практически при $l \geq 10R$, где R – размеры области, l – расстояние), как точечный заряд. Поэтому на больших расстояниях будут справедливы формулы (1) и (2), т.е. потенциал с увеличением расстояния от заряженной системы тел убывает пропорционально $1/r$, а напряженность электрического поля $E \approx 1/r^2$.

Известно, что в произвольной точке M , отстоящей от центра диполя на расстоянии r (рис. 1), напряженность электрического поля E и потенциал U определяются по выражениям:

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon r^3} \sqrt{3\cos^2 \varphi + 1}, \quad (3)$$

$$U = \frac{p \cos \varphi}{4\pi\epsilon r^2}, \quad (4)$$

где $p = Qd$ – электрический момент диполя; φ – угол между радиусом-вектором r и осью диполя, положительное направление которой принято от отрицательного заряда к положительному.

Как следует из (3) и (4), потенциал диполя на больших расстояниях от него убывает как $1/r^2$, а напряженность – как $1/r^3$. Поэтому для любой совокупности заряженных тел, заключенных в конечной области пространства и имеющих суммарный заряд, равный нулю, потенциал убывает не медленнее, чем $1/r^2$, а напряженность поля не медленнее, чем $1/r^3$. Это объясняется тем, что любую систему заряженных тел с суммарным зарядом $Q=0$ можно подразделить на диполи, так как каждому положительному заряду dQ_1 можно подобрать в системе равный ему по величине отрицательный dQ_2 .

Магнитное поле. Значение индукции магнитного поля \vec{B} в произвольной точке M , отстоящей на расстоянии r от центра кругового контура, в случае, если это расстояние значительно больше линейных размеров контура (рис. 2), определяется по формулам:

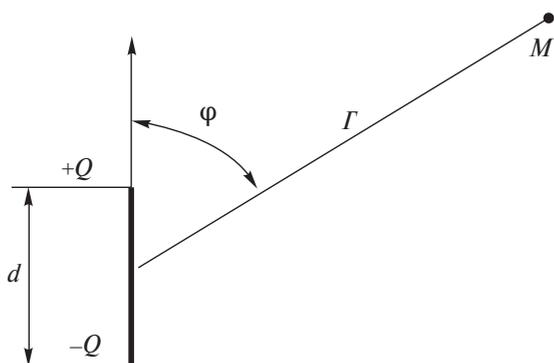


Рис. 1. Электрическое поле диполя

$$\begin{aligned} B_R &= \mu_0 \frac{iS}{4\pi r^3} 2\cos\theta; \\ B_\theta &= \mu_0 \frac{iS}{4\pi r^3} \sin\theta; \\ B &= \mu_0 \frac{iS}{4\pi r^3} \sqrt{3\cos^2\theta + 1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение (5) сходно с выражением для напряженности электрического поля диполя (3). Отличие заключается в замене электрического момента диполя $\vec{p} = Q\vec{l}$ величиной, которую называют магнитным моментом

$$\vec{p}_M = i\vec{S},$$

где i – значение тока в контуре; S – площадь контура; r – длина вектора. Направление вектора \vec{S} совпадает с направлением оси z и образует с направлением вектора \vec{R} угол θ (рис. 2).

Интересно отметить, что на больших расстояниях от контура тока значение магнитной индукции (и напряженности магнитного поля $H = B/\mu_0$) убывает обратно пропорционально кубу расстояния и характер поля не зависит от формы контура тока (т.е. совершенно не обязательно, чтобы контур был круглым).

Электромагнитные поля в «ближней зоне». «Ближней зоной» будем называть область пространства, в которой расстояние от заряженных тел до рассматриваемой точки соизмеримо с размерами заряженных тел и расстояниями между ними.

Электрическое поле. В общем случае задача расчета электрического поля заряженных тел в области пространства вне этих тел может быть решена путем интегрирования уравнения Лапласа. В прямоугольной системе координат она имеет вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения Лапласа позволяет найти потенциал в каждой точке поля $U(x, y, z)$, а затем и напряженность поля \vec{E} :

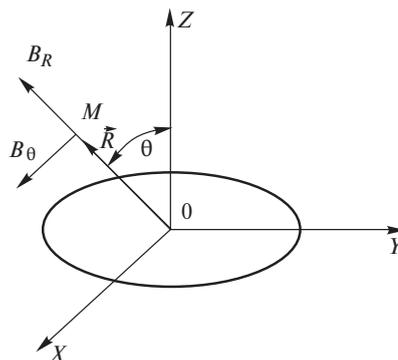


Рис. 2. Магнитное поле кругового контура с током

$$\vec{E} = -\text{grad}U. \tag{7}$$

При этом необходимо учитывать граничные условия, т.е. те физические условия, которые существуют на поверхностях раздела двух сред: проводника и диэлектрика или двух проводников. В общем случае решение уравнений (6) и (7) может представлять математические трудности. Для ряда тел простых геометрических форм в работах [6, 7] получены аналитические решения, имеющие удобный для анализа вид, который также может быть использован при качественном анализе электрического поля более сложных геометрических форм. В других случаях расчет электрического или магнитного поля можно выполнить на основе построения картины поля с помощью программного комплекса ELCUT [8].

Магнитное поле. Расчет магнитных полей токов, протекающих по контурам, имеющим во всех направлениях конечные размеры, представляет собой весьма сложную задачу. При этом все величины, характеризующие поле, являются функциями трех координат.

Магнитное поле в области вне токов описывается уравнением Лапласа для скалярного магнитного потенциала:

$$\nabla^2 \varphi_M = \frac{\partial^2 \varphi_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_M}{\partial z^2} = 0. \tag{8}$$

Пусть требуется сделать анализ магнитного поля длинного уединенного прямолинейного провода радиусом r , по которому протекает постоянный ток I . На расстоянии r от провода

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Значение магнитного потенциала

$$\varphi_M = -\int H dl = -\int 2 I r \cdot r d\theta = -\frac{I}{2\pi} \theta + \text{const}.$$

Знак «минус» означает, что увеличение магнитного потенциала происходит в сторону, противоположную направлению вектора \vec{H} (рис. 3).

Картина магнитного поля линейных токов совпадает с картиной электрического поля линейных зарядов, если токи и заряды распределены в пространстве одинаково. Различие лишь в том, что на месте линий напряженности электрического поля располагаются линии равного магнитного потенциала, а на месте линий равного электрического потенциала – линии напряженности магнитного поля.

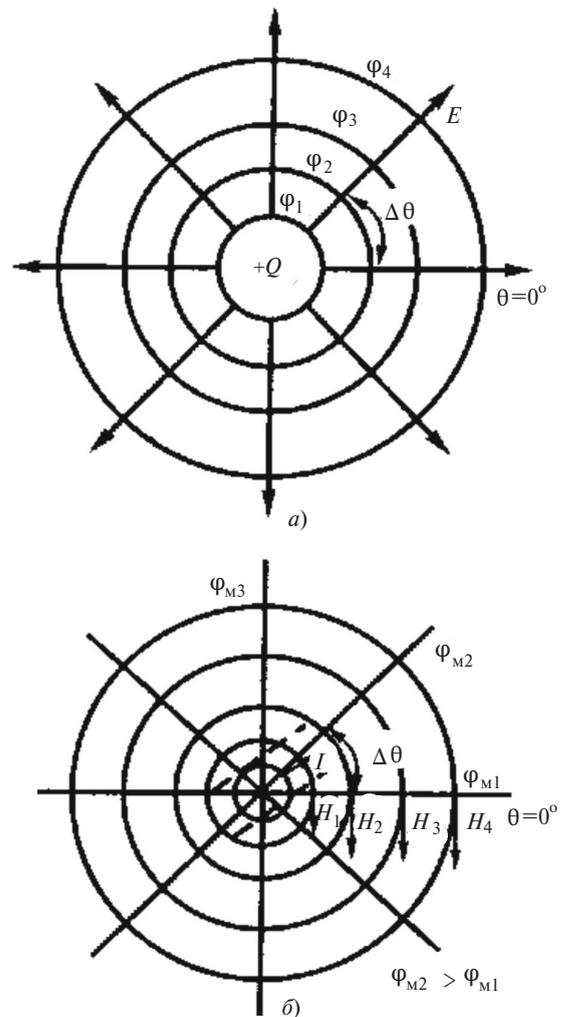


Рис. 3. Картины электрического поля заряда и магнитного поля тока

Сравнивая уравнение Пуассона для плоскопараллельного магнитного поля

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z; \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

с уравнением Пуассона для плоскопараллельного электрического поля можно видеть, что при аналогичном распределении токов $J_z(x, y)$ и зарядов $\rho(x, y)$ решения будут аналогичны. Составляющие вектора магнитной индукции с учетом $A_x = A_y = 0$ в этом случае равны:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial x} = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = -\frac{\partial A_z}{\partial x};$$

$$B_z = 0.$$

Составляющие вектора напряженности электрического поля:

$$E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = 0.$$

Отсюда следует соответствие:

Электрическое поле	ρ	φ	ε	\vec{E}	\vec{D}	τ	C'
Магнитное поле	J_z	A_z	$1/\mu$	\vec{B}	\vec{H}	I	$1/L'$

Значения C' , L' – емкость и индуктивность на единицу длины; D , B – векторы электрической и магнитной индукции; φ – электрический потенциал; A – магнитный потенциал; τ – линейная плотность заряда; I – постоянный ток; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость. Линии векторов \vec{E} и \vec{B} будут взаимно перпендикулярны, причем, так как $B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}$; $E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$

и $B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}$; $E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}$, на месте линий напряженности электрического поля будут линии равного магнитного потенциала φ_M , а на месте линий равного электрического потенциала будут линии магнитной индукции.

Если источники разнесены на большие расстояния друг от друга, можно при расчете использовать метод наложения – суммировать поля от отдельных источников. Так как суммирование производится с векторными величинами, то практически складываются составляющие напряженностей по осям координат:

$$H_{q\beta} = \sum_i H_{q\beta}^{(i)}; \quad E_{q\beta} = \sum_i E_{q\beta}^{(i)}, \quad i \in [1, N]. \quad (9)$$

Значения \vec{E} и \vec{H} , определяемые, например, через проекции на оси прямоугольной системы координат, равны: $\vec{H} = \vec{i}H_x + \vec{j}H_y + \vec{k}H_z$; $\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z$; в (9), $H_{q\beta}$, $E_{q\beta}$ – составляющие магнитной и электрической напряженности суммарного поля по осям $q\beta$, q – система координат (прямоугольная, цилиндрическая, сферическая); β – обозначение оси (например, в прямоугольной системе $q\beta$ – x, y, z); i – порядковый номер источника, создающего ЭМП.

По мере приближения источников друг к другу при высоких частотах или кратковременных импульсах появляется необходимость учитывать их взаимное влияние (например, отражения и переотражения ЭМП на соседних элементах). Согласно [9] при $L_{i-k} \in [10, \infty] 2l_{i,k}$ можно воспользоваться формулами (9), при $L_{i-k} \in [5, 10] 2l_{i,k}$ использование (9) приводит к погрешности до 15%, при $L_{i-k} \in [2, 5] 2l_{i,k}$ учет взаимовлияния необходим безусловно. Здесь L_{i-k} – расстояние между i -м и k -м источниками; $2l_{i,k}$ – диаметр наименьшего выпуклого тела, описанного около i -го или k -го источника.

При необходимости учета взаимовлияний значения \vec{H}_j и \vec{E}_j определяются по формулам (9) с учетом коэффициентов взаимовлияния K :

$$\begin{aligned} H_{q\beta} &= \sum_i K_{q\beta(N-1)}^{Sm(i)} H_{q\beta}^i; \\ E_{q\beta} &= \sum_i K_{q\beta(N-1)}^{S\alpha(i)} E_{q\beta}^i, \end{aligned} \quad (10)$$

где $H_{q\beta}^i$, $E_{q\beta}^i$ – значения, вычисленные по (9); $K_{q\beta(N-1)}^{Sm(i)}$, $K_{q\beta(N-1)}^{S\alpha(i)}$ – составляющие функций взаимовлияния по осям $q\beta$ соответственно для магнитной (м) и электрической (э) напряженностей, учитывающих влияние $1, 2, \dots, N-1$ источников на поле i -го источника; индекс S – вид поверхности (сфера, цилиндр и др.).

Приведённые выше формулы использовались авторами для расчёта суммарной низкочастотной электромагнитной нагрузки применительно к урбанизированному пространству и инфраструктуре электрифицированной железной дороги. Были проведены и экспериментальные исследования [10], которые подтвердили результаты расчетов.

Расчет электрических и магнитных полей с помощью программного комплекса ELCUT. Мощный современный комплекс программ ELCUT применяется для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [11]. С его помощью можно рассматривать две группы двумерных задач: плоскопараллельные и осесимметричные. Плоскопараллельные используют декартову систему координат x, y, z , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z . Описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработку результатов можно проводить в плоскости x, y , называемой плоскостью модели.

Программный комплекс ELCUT позволяет строить картину электрического и магнитного полей. Картина поля может быть построена как в функции двух координат (плоскопараллельное поле), так и в функции трех координат (объемная картина поля). При построении картины поля можно задавать заряды электродов или потенциалы на границе сред. Поскольку система линейная, численные значения потенциалов или зарядов на границе сред на картину поля не влияют. Также можно задавать различные параметры среды, в которой находятся заряженные тела: диэлектрическую проницаемость, удельную проводимость, магнитную проницаемость. Линии равного потенциала

определяют значение потенциала (электрического и магнитного) в произвольной точке пространства, а также границы энергетической зоны (той части пространства, в которой с интенсивностью электрического и магнитного полей нельзя не считаться). Силовые линии поля используются для определения вектора напряженности электрического и магнитного полей.

Использование программного комплекса ELCUT для построения картины поля позволяет также решить ряд задач, которые без него было бы решить сложно. Одной из таких задач является определение влияния частоты изменения во времени заряда или потенциала заряженных тел на картину электрического поля.

Исследования, проведенные с помощью программного комплекса ELCUT, показали, что картина электрического поля при одинаковой геометрии при $f=0, 50, 400, 1000$ Гц и т.д. до 96 кГц не меняется (рис. 4 и 5). Таким образом, подтверждается высказанное в [6] замечание: «при наиболее часто встречающихся длинах проводников электрооборудования частоты, при которых электрическое поле еще можно считать квазистационарным: $f < 10^5$ Гц.

При этом условии квазистационарности заключается в том, что в каждый момент времени магнитное поле в непосредственной близости от проводника определяется мгновенным значением создающего его тока, если изменения тока во времени значительно медленнее, чем распространение в пространстве этого изменения.

Математически это можно описать выражением $f \ll c/l$.

Защита от электромагнитных полей. Для защиты технического объекта от воздействия электромагнитных полей применяют различные средства. Выбор способа или технического средства защиты определяется многими факторами: характером ЭМП, его частотным диапазоном, амплитудно-фазовыми характеристиками, гармоническим составом и т.д. Среди основных средств защиты можно отметить два: экранирование и рациональное размещение оборудования.

Эффективное экранирование технических средств от ЭМП можно реализовать с помощью многослойных пассивных, активных и комбинированных экранов (как электрических, так и магнитных) [6, 12].

Под пассивными экранами понимают такие устройства, которые позволяют уменьшить влияние исходного электрического, магнитного и электромагнитного полей в защищаемой области. Это обеспечивается установкой экранирующего устройства на пути распространения поля. При этом экран частично отражает исходное поле, частично поглощает (или отводит по своим конструкциям, минуя защищаемую область). В зависимости от назначения различают экраны с внутренним размещением источника ЭМП (рецепторы снаружи экрана) и экраны с внешним размещением источника ЭМП (рецепторы внутри экрана). Наибольшая степень экранирования достигается при применении многослойных экранов, при этом целесообразно

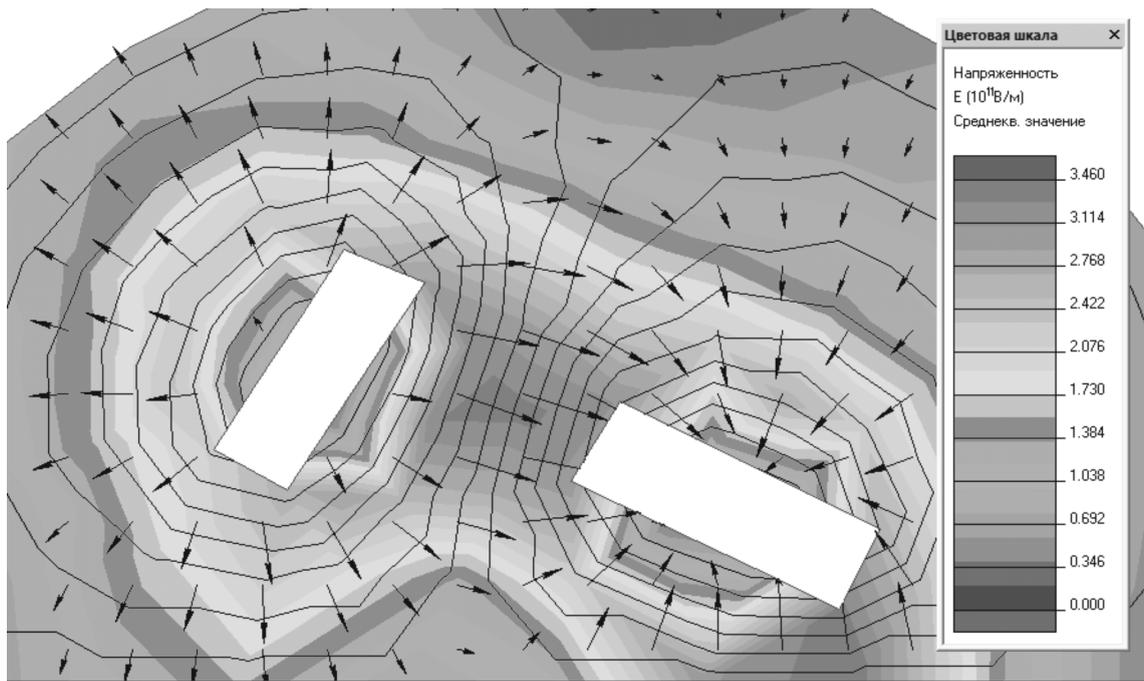


Рис. 4. Картина поля двух проводников произвольной формы при частоте $f=0$ Гц

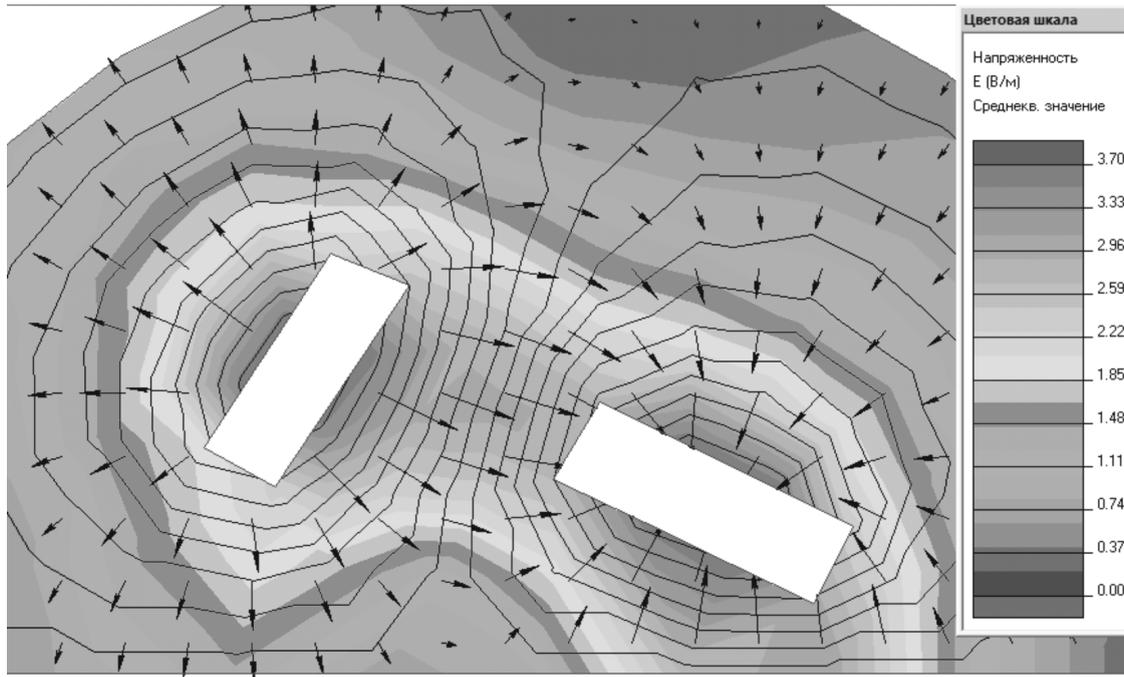


Рис. 5. Картина поля двух проводников произвольной формы при частоте $f = 50 \dots 96$ кГц

но сочетание материалов с большой магнитной проницаемостью и большой электрической проводимостью (например, пермаллой и медь). В зависимости от интенсивности и степени неоднородности воздействующего поля может быть рассчитана оптимальная структура слоев многослойной оболочки. Многослойные экраны позволяют достичь высокого магнитного вакуума в экранируемом помещении, но отличаются высокой стоимостью.

В [13] приведены некоторые практические рекомендации использования экранов:

начальные магнитная проницаемость и электрическая проводимость материала экрана должны быть по возможности более высокими;

толщина экрана должна быть не меньше глубины проникновения ЭМП в конкретных условиях, а размеры экрана рекомендуется выбирать так, чтобы зазор между экраном и экранируемым элементом был не меньше половины диаметра экранируемого элемента (диаметра сферы, которой можно его описать);

конструкция экрана должна быть такой, чтобы на пути силовых линий помехонесущего поля не встречались швы и стыки. Недопустимо крепление экранируемого элемента стальными деталями, которые могут образовывать пути с малым магнитным сопротивлением;

наряду с многослойными экранами возможно также применение нескольких экранов, расположенных один внутри другого и разделенных воздушными промежутками.

Активное экранирование осуществляется с помощью тока, распределенного по поверхности экрана, чтобы компенсировать магнитное поле помех, проникающих в защищаемое пространство. Необходимое распределение тока по поверхности экрана может быть реализовано с помощью петлевой обмотки. Система компенсации должна быть построена так, чтобы в результате наложения имеющегося магнитного поля и поля компенсации результирующее поле в рассматриваемой области пространства отвечало бы заданным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аполлонский С.М., Каляда Т.В., Синдаловский Б.Е. Безопасность человека в электромагнитных полях. Учебное пос. СПб.: Политехника, 2006, 264 с.
2. Аполлонский С.М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека. Т. III. Воздействие внешней электромагнитной среды на человека и средства защиты. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011, 286 с.
3. Gohberg M.B., Chirkov E.B. Electromagnetic prediction earthquakes (Электромагнитные предвестники катастроф тектонического происхождения). — Сб. реф. докл. Междунар. науч. конф. «Геофизика и современный мир», Москва, 9–13 авг. 1993, М., 1994, с. 84.
4. Kamra A.K. Inadvertent modification of atmospheric electricity. — Curr. sci. (India), 1991, vol. 60, No. 11, pp. 639–646.
5. Рахманкулов Д.Л. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций. М., 2003, 160 с.
6. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей/Под ред. А.Н. Горского. М.: Маршрут, 2006, 992 с.
7. Горский А.Н., Сергеев Н.А. Расчет статических электрических и магнитных полей различной геометрии. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 3, с. 17–22.

8. Сергеев Н.А., Горский А.Н. Исследование статических полей с помощью программного комплекса ELCUT. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 4, с. 24–28.

9. Аполлонский С.М. Расчет электромагнитного поля группы источников. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1983, №3, с. 84–90.

10. Горский А.Н., Аполлонский С.М. НТО «Экспериментальные исследования электромагнитной обстановки на железнодорожном транспорте, электрифицированном на постоянном токе, участок Мга-Гатчина». СПб.: МАНЭБ, 2009, 120 с.

11. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2000, 130 с.

12. Аполлонский С.М. Расчет электромагнитных экранирующих оболочек. — Электричество, 1988, № 5, с. 82–84.

13. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. М.: Радио и связь, 1991, 224 с.

[03.02.2020]

А в т о р ы: Аполлонский Станислав Михайлович — доктор техн. наук, профессор, научный консультант ООО «Центр Электромехатроники», диссертацию защитил в 1988 г.

Горский Анатолий Николаевич — доктор техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения, диссертацию защитил в 1995 г.

Electrichestvo, 2020, No. 7, pp. 65–73

DOI:10.24160/0013-5380-2020-7-65-73

Problems of Electromagnetic Safety in Urbanized Environment

APOLLONSKIY Stanislav M. (LLC «Center of Electromechanics», St. Petersburg, Russia) — Scientific Consultant, Professor, Dr. Sci. (Eng.)

GORSKIY Anatoly N. (St. Petersburg State University of Railways) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The term «global electromagnetic pollution of environment» was officially introduced in 1995 by the World Health Organization (WHO), which included this problem in the list of top-priority ones for the mankind. Living organisms, including humans, have become adapted to certain levels of electromagnetic fields (EMFs); however, a significant and very rapid (in the historical scale) growth in the EMF levels has a challenging influence on the adaptive and compensation capabilities of the organism. A long-term effect of this factor may lead to exhaustion of these capabilities, which will entail irreversible consequences at the system level. The article considers the main sources of electromagnetic pollution in urbanized environment, methods for calculating the field intensities produced by electromagnetic field sources, problems associated with electromagnetic pollution and with assurance of the electromagnetic safety of equipment and people in urbanized environment.

Key words: *electromagnetic field, urbanized environment, electromagnetic safety, standardization of electromagnetic fields, electromagnetic burden reduction methods*

REFERENCES

1. Apollonskiy S.M., Kalyada T.V., Sindalovskiy B.Ye. *Bezopasnost' cheloveka v elektromagnitnykh pol'yakh. Uchebnoye pos. (Human safety in electromagnetic fields. Educational village). St. Petersburg: Politehnika, 2006, 264 p.*
2. Apollonskiy S.M. *Elektromagnitnaya bezopasnost' tekhnicheskikh sredstv i cheloveka. T. III. Vozdeystviye vneshney elektromagnitnoy sredy na cheloveka i sredstva zashchity (Electromagnetic safety of technical means and man. T. III. The impact of an external electromagnetic environment on a person and protective equipment). SPb.: Izd-vo SZTU, 2011, 286 p.*
3. Gohberg M.B., Chirkov E.B. *Electromagnetic prediction earthquakes (Elektromagnitnyye predvestniki katastrof tektonicheskogo proiskhozhdeniya. — Sb. ref. dokl. Mezhdunar. nauch. konf. «Geofizika i sovremennyy mir» (Electromagnetic harbingers of tectonic origin. — Sat. Ref. Dokl. Intern. scientific conf. «Geophysics and the modern world», Moscow, August 9–13 1993. M., 1994, p. 84.*
4. Kamra A.K. *Inadvertent modification of atmospheric electricity. — Curr. sci. (India), 1991, vol. 60, No. 11, pp. 639–646.*
5. Rakhmankulov D.L. *Sovremennyye sistemy zashchity ot elektrokhimicheskoy korrozii podzemnykh kommunikatsiy (Modern protection systems against electrochemical corrosion of underground utilities). M., 2003, 160 p.*
6. Apollonskiy S.M., Gorskiy A.N. *Raschety elektromagnitnykh poley/Pod red. A.N. Gorskogo (Calculations of electromagnetic fields/Ed. A.N. Gorskiy), M., 2006, 992 p.*
7. Gorskiy A.N., Sergeyenkov N.A. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta — in Russ. (Electronics and electrical equipment of transport), 2018, No. 3, pp. 17 – 22.*
8. Sergeyenkov N.A., Gorskiy A.N. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta — in Russ. (Electronics and electrical equipment of transport), 2018, No. 4, pp. 24–28.*
9. Apollonskiy A.M. *Izv. AN CCCP. Energetika i transport — in Russ. (News of USSR Academy of Sciences. Energetics and Transport), 1983, No. 3, pp. 84–90.*
10. Gorskiy A.N., Apollonskiy S.M. *NTO «Eksperimental'nyye issledovaniya elektromagnitnoy obstanovki na zheleznodorozhnom transporte, elektrifitsirovannom na postoyannom toke, uchastok Mga-Gatchina» (NTO «Experimental studies of the electro-magnetic situation in railway transport, electrified with constant current, Mga-Gatchina section»). SPb.: MANEB, 2009, 120 p.*
11. ELCUT. *Modelirovaniye dvumernykh poley metodom konechnykh elementov. Versiya 4.2. Rukovodstvo pol'zovatelya (ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. Version 4.2. User's manual). SPb.: Proizvodstvennyy kooperativ TOR, 2000, 130 p.*
12. Apollonskiy S.M. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), No. 5, pp. 83–84.*
13. Rusin Yu.S., Glikman I.Ya., Gorskiy A.N. *Elektromagnitnyye elementy radioelektronnnoy apparatury: Spravochnik (Electromagnetic elements of electronic equipment: Handbook). M.: Radio and Svyaz', 1991, 224 p.*

[03.02.2020]