

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПО ФАКТОРУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2009 В.Н. Довбыш

Управление Росприроднадзора по Самарской области

В статье рассмотрены проблемы экологического мониторинга электромагнитного излучения при загрязнении окружающей среды при воздействии воздушных и подземных ЛЭП. Найдены математические выражения напряженности электромагнитного поля. С применением метода конечных элементов получена основа для автоматизированного проведения мониторинга.

Ключевые слова: экологический мониторинг, электромагнитное излучение, антропогенное воздействие

Ежегодно в регионах России вводятся в эксплуатацию новые и реконструируются существующие объекты и технические средства системы энергоснабжения. Известно, что энергетическое оборудование, в частности, линии электропередач, сети питания и тяговые подстанции электротранспорта, силовые трансформаторы, силовые распределительные пункты создают электромагнитные поля промышленной частоты, которые вносят существенный, а зачастую и определяющий вклад в общую электромагнитную обстановку на селитебных территориях. В задачах электромагнитной экологии зачастую необходим анализ поля в непосредственной близости от технических средств с учетом реальных особенностей их размещения и наличия других технических средств и материальных тел [1], что накладывает известные трудности на корректное проведение эксперимента и воспроизводимость результатов, получаемых эмпирическим путем. Это обстоятельство, очевидно, и обуславливает повышенный, особенно в последние десятилетия, интерес к созданию методик расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки. Инструментальные же методы традиционно используются при проверке корректности расчетных методик, а также в случаях, когда получение исчерпывающей информации об объекте исследования, необходимой для построения корректной теоретической

модели, невозможно. Данное обстоятельство существенно отличает электромагнитную экологию от других экологических направлений, в которых для оценки состояния природной среды используют в основном данные, получаемые в результате экспериментов.

Основными техническими средствами, входящими в состав региональной энергосистемы – «поставщиками» электромагнитной энергии в регионе, являются высоковольтные ЛЭП, силовые трансформаторные установки, и т.п. [1]. В рамках разработки электродинамических моделей все рассматриваемые технические средства следует классифицировать, прежде всего, по критериям, относящимся к пространственной форме и характерным размерам соответствующих излучающих структур. В этом смысле будем различать линейные источники и локальные источники [1]. Первый класс образуют источники, пространственная форма которых характеризуется существенным преобладанием одного линейного размера над другими. Соответствующие технические средства – локальные участки цепей энергоснабжения, линии питания электротранспорта и т.п. Второй класс образуют источники, локализованные в относительно небольшой (по сравнению с размерами помещения) области пространства. К ним относятся оконечные устройства сетей и цепей электроснабжения, силовые установки, тяговые подстанции и т.д. При вычислении электрического поля, линейный источник следует рассматривать как распределенный

Довбыш Владимир Николаевич, кандидат технических наук, руководитель управления

вдоль отрезка прямой электрический мультиполь – систему параллельных заряженных нитей [2]. При вычислении магнитного поля линию следует рассматривать как систему параллельных противоположно направленных одинаковых по величине линейных токов.

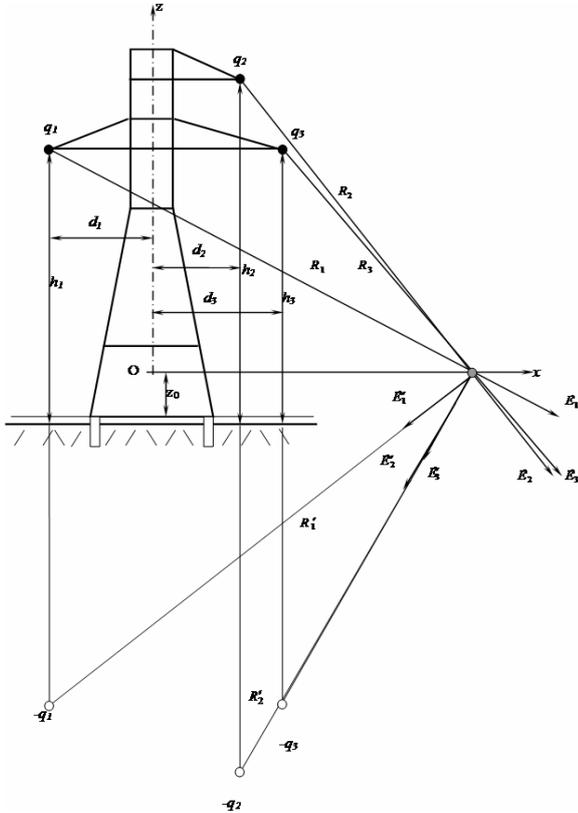


Рис. 1. К расчету электрического поля многопроводной линии

Рассмотрим модель прямолинейного участка цепи электроснабжения с точки зрения вычисления электрического поля. ЛЭП, конфигурация проводов которой соответствует типовой опоре У-35, размещенная в декартовой системе координат показана на рис. 1. Нахождение электрического поля, с учетом названных допущений и ограничений, сводится к решению двумерной квазистатической задачи [2]. Влияние подстилающей поверхности учтено введением зеркального изображения проводников, при этом делается предположение о металлическом характере электропроводности почвы.

Эквивалентные электрические заряды, соответствующие проводникам линии (отнесенные к единице длины проводника) определяются следующим образом:

$$q_1 = C_1 \cdot U_\phi, \quad q_2 = C_2 \cdot U_\phi \cdot e^{j\Delta},$$

$q_3 = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{-j\Delta} = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{j2\Delta}$, где U_ϕ – класс напряжения ЛЭП, $\Delta = 120^\circ$ – фазовый сдвиг, j – мнимая единица, C_i – погонная емкость электрической системы провод-Земля, определяемая при помощи выражения: $C_i = \pi\epsilon_0 / \ln \frac{2h_i}{a}$, где ϵ_0 – электрическая постоянная, a – радиус провода линии.

Искомое электрическое поле определяется геометрическим суммированием полей, создаваемых каждым из проводников в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N (\vec{E}_i + \vec{E}'_i) \quad (1)$$

Выражение, стоящее под знаком суммы в (1) определяет частичное электрическое поле, создаваемое i -й системой провод-зеркальное изображение; N – число проводов, соответствующее типу опоры ЛЭП. Модуль вектора, стоящего под знаком суммы в (1) находится следующим образом:

$$|\vec{E}_i + \vec{E}'_i| = \frac{U_\phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \cdot \ln \frac{2h_i}{a}} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R_i')^2} + \frac{2}{R_i(R_i')} \cos \psi} \quad (2)$$

где ψ – угол, образованный векторами \vec{E}_i и \vec{E}'_i , косинус которого легко определяется из рис.1 следующим образом:

$$2 \cos \psi = \frac{R_i}{R_i'} + \frac{R_i'}{R_i} - \frac{4h_i^2}{R_i R_i'} \quad (3)$$

Результирующее магнитное поле находится геометрическим суммированием частичных полей, аналогично (1). Модуль вектора, стоящего под знаком суммы, определяется выражением вида [2] по формуле (4). На рис.2 приведены результаты расчета электрического поля ЛЭП 35 кВ, размещенной на опоре У-35-1. Расчет проведен в направлении перпендикулярном коридору прохождения ЛЭП.

$$|\vec{H}_i + \vec{H}'_i| = \frac{I \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R'_i)^2} + \frac{2}{R_i \cdot (R'_i)} \cos\psi} \quad (4)$$

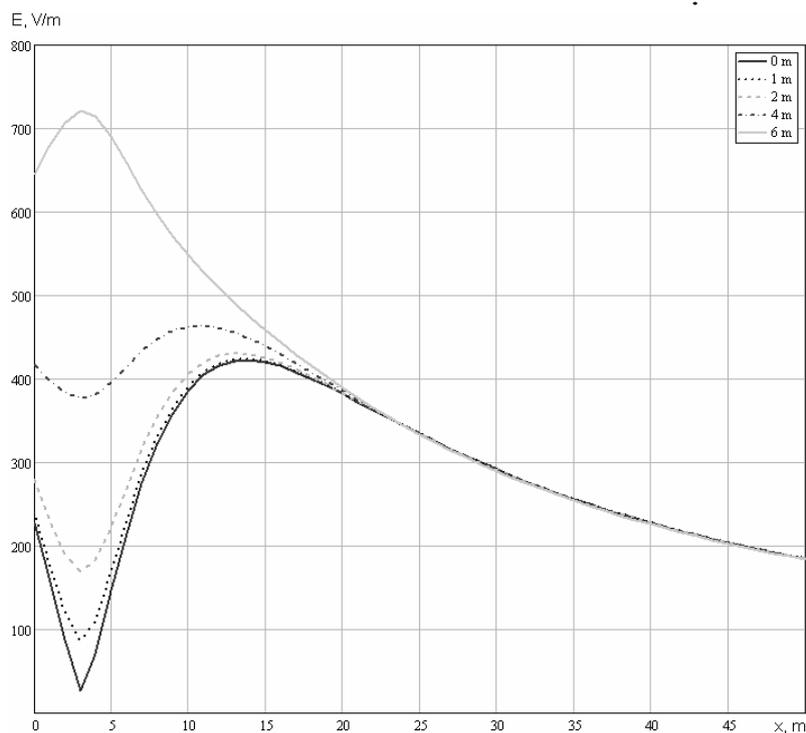


Рис. 2. Результат расчета электрического поля ЛЭП 35 кВ

Из приведенных на рис. 2 результатов видно, что закон изменения поля изменится с высотой множества точек наблюдения. Данное обстоятельство обусловлено несимметричным расположением проводов ЛЭП. Максимальному кровеню электрического поля на высоте 2 м соответствует величина 420В/м.

В последние годы в проектных решениях реконструкции городских систем энергоснабжения все чаще используются реализации высоковольтных ЛЭП классов 35...220 кВ в виде подземных линий. При анализе электромагнитной обстановки в коридорах прохождения подземных ЛЭП возникает необходимость учета влияния условий прокладки кабелей на характеристики электромагнитного поля. Данное обстоятельство не позволяет использовать предложенной в настоящей работе подход к анализу воздушных ЛЭП. Как представляется автору применительно к данной проблеме, наиболее целесообразным является использование какого-либо универсального численного метода решения краевых электродинамических задач.

Как отмечено выше, в уравнениях Максвелла в правых частях останутся только первые члены [3]

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}, \text{rot } \vec{E} = 0, \text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \text{div } \vec{H} = 0, \text{ где}$$

плотность тока в проводах, образующих линию $\vec{j} = \vec{z}_0 I / \pi a^2$; \vec{z}_0 – азимутальный орт декартовой системы координат (ось z совпадает с направлением прохождения ЛЭП); a – радиус провода. Первое и четвертое уравнения используем для расчета магнитного поля; второе и третье – для расчета электрического поля.

Систему уравнений Максвелла для квазистационарного случая нетрудно преобразовать в систему уравнений второго порядка:

$$\nabla^2 \vec{E} = \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon} - \Delta^2 \vec{H} = \text{rot} \vec{j}, \quad (5)$$

Систему, состоящую из уравнений (5) необходимо дополнить условиями, накладываемыми на искомое решение на границе области тока. Для электрического поля это условия следующего вида [4]:

$$\varepsilon \vec{n}_0 \vec{E}_1 - \varepsilon \vec{n}_0 \vec{E}_2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial q}{\partial S}, [\vec{n}_0 \vec{E}_1] - [\vec{n}_0 \vec{E}_2] = 0. \quad (6)$$

Условия для магнитного поля имеют вид [3]:

$$\mu \vec{n}_0 \vec{H}_1 - \mu \vec{n}_0 \vec{H}_2 = 0, [\vec{n}_0 \vec{H}_1] - [\vec{n}_0 \vec{H}_2] = \vec{l}_0 \frac{\partial i}{\partial l}. \quad (7)$$

где \vec{n}_0 – вектор нормали к границе области тока, q – заряд, распределенный на границе, i – тангенциальная составляющая тока, на краевой линии элемента, ∂l – элемент контура, нормального линиям тока, \vec{l}_0 – орт линий тока.

Уравнения (5) могут быть решены численно при помощи известного метода конечных элементов (МКЭ). Этот метод получил весьма широкое распространение в вычислительной электродинамике в последнее время. МКЭ составляет основу многих известных программных пакетов электродинамического моделирования, таких как ANSYS, Maxwell, QuickField, HFSS и др. В данном методе анализируемая область пространства, одна из границ которой совпадает с границей области тока, разбивается на элементы конечных размеров, вообще говоря, произвольной формы. В пределах каждого элемента решение задачи аппроксимируется кусочно-непрерывной полиномиальной функцией специального вида [4]. Разбиение непрерывной области на элементы целесообразно начинать с граничной поверхности анализируемой области пространства. При численной реализации метода конечных элементов форма аппроксимирующего элемента, вообще говоря, может быть различной. Однако наиболее целесообразным представляется выбор элементов треугольной формы. При этом удобно в качестве интерполянтов использовать линейные алгебраические полиномы следующего вида:

$$\begin{aligned} E_{\xi, \eta, \theta} &= a_{0_{\xi, \eta, \theta}} + a_{1_{\xi, \eta, \theta}} \xi + a_{2_{\xi, \eta, \theta}} \eta, \\ H_{\xi, \eta, \theta} &= b_{0_{\xi, \eta, \theta}} + b_{1_{\xi, \eta, \theta}} \xi + b_{2_{\xi, \eta, \theta}} \eta. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета напряженности электрического

поля подземной ЛЭП. При расчетах моделировалась система заземления, традиционная для современных подземных ЛЭП, в целях исследования влияния последнего на структуру и уровни ЭМП. Из приведенных результатов видно, что для подземной кабельной ЛЭП, размещенной в армированном железобетонном лотке с заземлением на оконечных пунктах, уровни электрического поля на поверхности земли не превышают 50 В/м, что значительно меньше нормируемого уровня. Относительно ЭМП, создаваемых трансформаторной подстанцией, можно отметить то, что в анализируемой области пространства, так же как и в случае линии электропередач, выполняется условие квазистационарности [5]. Источниками электрических и магнитных полей являются заряды и токи, локализованные в конструктивных элементах оборудования трансформаторной подстанции. Численное решение сформулированной задачи Дирихле проводится с использованием МКЭ.

Для уменьшения затрат времени на вычисления при реализации МКЭ размерность задачи целесообразно понизить. Нетрудно заметить, что анализируемые в данной работе устройства имеют либо осевую (обмотки), либо плоскостную симметрию (трансформатор в целом), причем эта симметрия распространяется и на конфигурацию сторонних источников. Иными словами, для моделируемых рассматриваемых устройств возможен переход от трехмерной задачи к двумерной, учитывающий геометрические особенности модели, с сохранением пространственной трехмерной структуры решения. Задачи данного типа назовем псевдодвумерными [5]. В общем случае в обобщенных координатах уравнения (5) могут быть представлены в виде:

$$\alpha(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \Phi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \beta(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \Phi(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} = F(\xi, \eta) \quad (9)$$

где $\alpha(\xi, \eta)$ и $\beta(\xi, \eta)$ – линейные функции или операторы, зависящие от типа выбранной системы координат; ξ, η – обобщенные координаты; $\Phi(\xi, \eta)$ – обобщенное решение уравнения (компоненты векторов $E_{\xi, \eta, \theta}$ или $H_{\xi, \eta, \theta}$); $F(\xi, \eta)$ – известная функция, определяемая сторонними источниками.

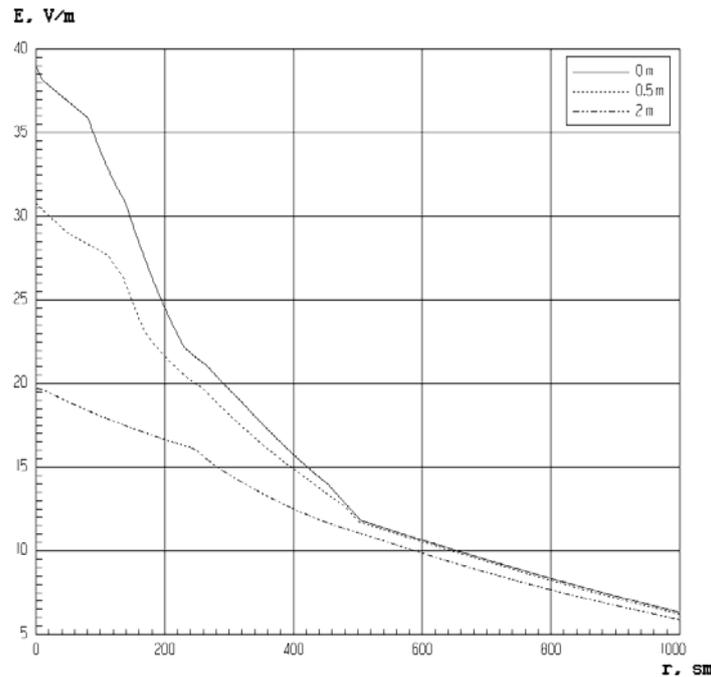


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

Как отмечалось ранее, в МКЭ решение $\Phi(\xi, \eta)$ аппроксимируется функцией, специфической для каждого элемента вида (8), что в общем виде можно представить как приближенное решение:

$$\tilde{\Phi}(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^3 A_m^{(n)}(\xi, \eta) \Phi_m, \quad (10)$$

где так называемая функция формы глобальной системы координат $A_m^{(n)}(\xi, \eta)$, Φ_1, Φ_2, Φ_3 – узловые значения искомой величины; $\Phi_m = \Phi(\xi_m^{(n)}, \eta_m^{(n)})$ – принимают различные значения при различных индексах m ; N – максимальный номер элемента. При аппроксимации решения вы-

ражением (10) невязка решения определяется выражением [5]:

$$\varepsilon = \alpha(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \beta(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} - F(\xi, \eta) \quad (11)$$

Минимизация невязки достигается путем обеспечения ортогональности невязки и каждой базисной функции, т.е. требуется выполнение соотношения [5]:

$$\int_D A_m^{(n)} \cdot \varepsilon \cdot dD = 0, \quad (12)$$

где D – область определения решения; dD – элемент этой области; индекс (n) принимает различные значения в различных элементах. (12) с учетом (11) имеет вид:

$$\int_D A_m^{(n)}(\xi, \eta) \left[\alpha(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \beta(\xi, \eta) \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} - F(\xi, \eta) \right] dD = 0 \quad (13)$$

Краевые условия для уравнения (10) в общем виде будут выглядеть как:

$$\gamma(\xi, \eta) \tilde{\Phi}_1(\xi, \eta) - \delta(\xi, \eta) \tilde{\Phi}_2(\xi, \eta) = G(\xi', \eta') \quad (14)$$

где ξ', η' – координаты на границе раздела двух элементов; $\gamma(\xi, \eta)$ и $\delta(\xi, \eta)$ – функции, определяющие ориентацию векторов поля относительно границы раздела (тригонометрические функции угла наклона вектора к границе при определении

тангенциальных и нормальных составляющих). Особенности слагаемых, входящих в подынтегральное выражение в (13) рассмотрены в [1].

Все вычислительные процедуры, рассмотренные в настоящей работе, реализованы в виде программных модулей, которые в дальнейшем составят основу перспективной автоматизированной системы и подробно описаны в [1]. На всех этапах работы проведены тестовые расчеты, подтверждающие работоспособность программ. Расчеты проводились на примере реальных объектов, эксплуатирующихся, либо вводимых в эксплуатацию на территории г. Самары и Самарской области. Корректность результатов полученных при помощи расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Довбыш, В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев // ИПК «Содружество». Самара, 2009. – 198 с.
2. Довбыш, В.Н. Экологический мониторинг состава почвы в зоне размещения высоковольтной ЛЭП / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, О.Ю. Сарокваша // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2006. - №4 (44). – С.182-193.
3. Довбыш, В.Н. Электромагнитный мониторинг энергетических систем / В.Н. Довбыш, Ю.М. Сподобаев, М.Ю. Маслов // Академия Энергетики. – 2006. - №1 (09). – С. 4-7.
4. Довбыш, В.Н. Электродинамическая модель трансформатора с сердечником, выполненным из материала с нелинейными свойствами / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, С.В. Ситникова, Ю.М. Сподобаев // Информационные технологии. -2004. – Том 2, №3. – С. 72-76.
5. Довбыш, В.Н. Численный анализ электромагнитного поля силовых трансформаторов в реальных условиях размещения. / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев // Ежегодник РНКЗНИ 2003. Сб. трудов. – М.: Изд. АЛАНА, 2004. – С.151-163.

ECOLOGICAL MONITORING OF ELEMENTS OF THE REGIONAL POWER INFRASTRUCTURE UNDER THE FACTOR OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

© 2009 V.N. Dovbysh
Department of Rosprirodnadzor in Samara oblast

In article problems of electromagnetic radiation ecological monitoring under environmental pollution with the influence of air and underground electric mains are examined. Mathematical expressions of electromagnetic field intensity are found. With application of final elements method the basis for the automated carrying out of monitoring is received.

Key words: ecological monitoring, electromagnetic radiation, anthropogenous influence