

Электрические поля линий электропередачи с высокотемпературными проводами

Е. А. Канунникова, канд. техн. наук, ekanunnikova@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

В России для транспортирования больших потоков электроэнергии на дальние расстояния предусматривается, согласно генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики [1], сооружение воздушных линий (ВЛ) электропередачи постоянного тока напряжением ± 500 и ± 750 кВ, что соответствует мировой тенденции. В нашей стране (как и во всём мире) проводятся исследования, направленные на создание более компактных конструкций ВЛ, которые одновременно обладали бы повышенной пропускной способностью и пониженным влиянием на окружающую среду. В частности, в ОАО "НИИПТ" проводятся исследования [2–4] по определению оптимальной конструкции энергоэффективных компактных ВЛ с их минимальным влиянием на окружающую среду. Однако при проектировании ВЛ постоянного тока, например, в [3, 4], предусматривалось использование сталеалюминиевых проводов марки АС, поскольку сегодня в России они являются основным используемым типом проводов для высоковольтных ВЛ. В настоящее время за рубежом широко используют высокотемпературные провода, провода с улучшенными аэродинамическими характеристиками, стойкие к вибрации и самодемпфирующие провода из алюминия и его сплавов, устойчивые к внешним, в том числе ветровым и гололёдным, воздействиям. В частности, продукция компаний "J-Power Systems" [5], "ЗМ" [6] прошла в ОАО "ФСК ЕЭС" аттестацию. Производство по выпуску отечественных проводов подобного типа планируется запустить в 2011 г. [7].

Возникшие потребности приводят к необходимости исследования указанных аспектов проблемы с учётом новых технических разработок.

Цель описываемой работы — исследование на основе вычислитель-

ных экспериментов электрических полей (ЭП) ВЛ постоянного тока с применением современной технологии математического моделирования и с последующим использованием установленных зависимостей между напряжённостью ЭП и расстоянием от энергоэффективных ВЛ для определения зон отчуждения, охранных и санитарно-защитных.

Постановка задачи. Рассмотрим ВЛ постоянного тока ± 500 кВ с конструкцией полюса $4 \times АС 650/79$, ключевые параметры которой разработаны ОАО "НИИПТ" [4], но при использовании высокотемпературных неизолированных проводов — с возможностью увеличения допустимой токовой нагрузки линии. Из всех высокотемпературных проводов возьмём, например, провод марки АССР 1351-Т13 компании "ЗМ", возможности нагрузки для которого на 50–200% больше по сравнению с проводом АС 650/79 (без ухудшения характеристик). Схема расположения проводов показана на рис. 1, причём $r_1 = 0,0181$ м, $l_0 = 0,45$ м, $r_2 = 0,0085$ м, $H_1 = 12$ м, $H_2 = 7,4$ м, $2l_2 = 9$ м, $2l_1 = 15$ м, $\varphi_0 = 500$ кВ, принимая расстояния наименьшими среди допустимых в середине пролёта.

Таким образом, моделируем плоскопараллельное электрическое поле высоковольтной биполярной ВЛ постоянного тока [8], для чего необходимо решить внешнюю задачу Дирихле

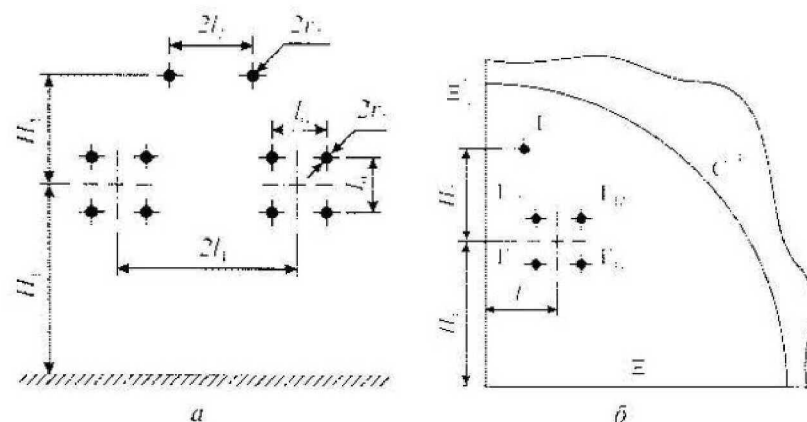


Рис. 1. Схема ВЛ постоянного тока: а) конструкция; б) модель

для уравнения Лапласа на плоскости. Пусть $G_e^{1/4}$ — область, внешняя к некоторым гладким замкнутым контурам $\tilde{\Gamma}_1 = \Gamma_{11} \cup \Gamma_{12} \cup \Gamma_{13} \cup \Gamma_{14}$, Γ_2 и ограниченная полубесконечными границами $\tilde{\Xi}_2 = \Xi_2^1 \cup \Xi_2^2$, и G — область, ограниченная $\tilde{\Gamma}_1, \Gamma_2$, тогда задача имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= 0 \text{ в } G_e^{1/4}, \\ u|_{\tilde{\Gamma}_1} &= \varphi(P), \quad P \in \tilde{\Gamma}_1, \\ u|_{\Gamma_2} &= 0, \\ u|_{\tilde{\Xi}_2} &= 0, \\ u(M) &\rightarrow 0 \text{ при } M \rightarrow \infty. \end{aligned} \right\}$$

Согласно методу инверсии (МИ) [9], позволяющему сводить бесконечную область к конечной, преобразуем полупространство $\tilde{\Xi}_2^{1/4} = G \cup \tilde{\Gamma}_1 \cup \Gamma_2 \cup \tilde{\Xi}_2 \cup G_e^{1/4}$, $G_e^{1/4} = D_C^{1/4} \cup C^{1/4} \cup D_r^{1/4}$ в область $D_2^{1/4} = G \cup \tilde{\Gamma}_1 \cup \Gamma_2 \cup \tilde{\Xi}_2 \cup \tilde{D}_2^{1/4}$, $\tilde{D}_2^{1/4} = D_C^{1/4} \cup C^{1/4} \cup D_r^{1/4}$ и получим внешнюю задачу Дирихле следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= 0 \text{ в } \tilde{D}_2^{1/4}, \\ u|_{\tilde{\Gamma}_1} &= \varphi(P), \quad P \in \tilde{\Gamma}_1, \\ u|_{\Gamma_2} &= 0, \\ u|_{\tilde{\Xi}_2} &= 0, \\ u(M) &= 0, \quad M \in D_r^{1/4}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $D_2^{1/4}$ — конечная двусоставная область.

Для построения разностной задачи с помощью метода конечных разностей введём в $D_2^{1/4}$ универсальную регулярную прямоугольную сетку $\tilde{\omega}_{h,2}^{1/4} = \tilde{\omega}_{h,2}^{1/4} + \tilde{\gamma}_{h,2}^1 + \tilde{\gamma}_{h,2}^2 + \tilde{\xi}_{h,2} + \tilde{\omega}_{h,2}^{1/4}$, $\tilde{\omega}_{h,2}^{1/4} = \omega_{h,2}^{1/4} + \chi_{h,2}^{1/4} + \tilde{\omega}_{h,2}^{1/4}$ и аппроксимируем на этой сетке уравнение и краевые условия со вторым порядком точности. Проведём два семейства параллельных прямых $x_i = ih_{x, i-1}$, $y_j = ih_{y, j-1}$, $i = 0, 1, 2, \dots$, $j = 0, 1, 2, \dots$.

Поставим в соответствии с непрерывной задачей (1) разностную задачу

$$a_{i-1}u_{i-1,j} + a_i u_{i,j} + a_{i+1}u_{i+1,j} + a_j u_{i,j-1} + (a_{i-1} + a_i + a_{i+1} + a_j)u_{ij} = 0, (x_i, y_j) \in \tilde{\omega}_{h,2}^{1/4}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_{ij} &= 0 (x_i, y_j) \in \tilde{\gamma}_{h,2}^1 = \\ &= \tilde{\gamma}_{h,2}^{11} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{12} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{13} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{14}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$u_{ij} = 0, (x_i, y_j) \in \tilde{\gamma}_{h,2}^2, \quad (4)$$

$$u_{ij} = 0, (x_i, y_j) \in \tilde{\xi}_{h,2} = \xi_{h,2}^1 + \xi_{h,2}^2, \quad (5)$$

$$u_{ij} = 0, (x_i, y_j) = (0, 0) \in \tilde{\omega}_{h,2}^{1/4}, \quad (6)$$

$$a_{i-h} = \frac{2}{(h_{x,i-1} + h_{x,i})h_{x,i+h}}, \quad a_{j-h} = \frac{2}{(h_{y,j-1} + h_{y,j})h_{y,j+h}}, \quad b = 0, 1.$$

Для решения системы уравнений (2) — (6) воспользуемся итерационными методами, например, методом верхней релаксации.

Результаты численных расчётов TNR

1. Проведём сравнительный анализ результатов расчёта задачи по МИ с данными натурального эксперимента [10] для биполярной ВЛ постоянного тока в г. Куньмин (Kunming) (рис. 2), где $H_1 = 18$ м, $2l_1 = 22$ м, конструкция полюса 6xLGJ-630/45, $r_1 = 0,0168$ м, $l_0 = 0,45$ м, на проводах полюса $\varphi = 500$ кВ. В соответствии с МИ решалось уравнение (2) на сетке $\tilde{\omega}_{h,2}^{1/4}$ с граничными условиями (3), (5), (6), при этом $\tilde{\gamma}_{h,2}^1 = \tilde{\gamma}_{h,2}^{11} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{12} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{13} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{14} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{15} + \tilde{\gamma}_{h,2}^{16}$. Относительная погрешность отклонения результатов вычислительного и натурального экспериментов составляет в среднем 11% (рис. 3,а).

2. Приняв расстояния наименьшими среди допустимых расстояний в середине пролёта линии, рассмотрим предельный случай влияния высоковольтной ВЛ постоянного тока на окружающую среду. Распределение напряжённости электрического поля под проводами линии на уровне 1,8 м над землёй проиллюстрирова-

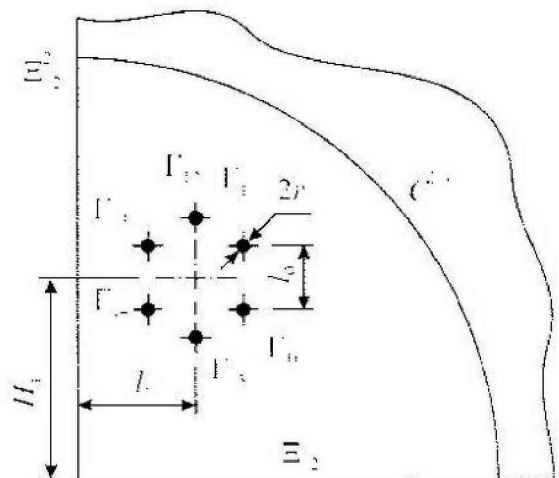


Рис. 2. Схема моделирования ВЛ для задачи по методу инверсии

но рис. 3, б. Сравнение данных проводят с допустимыми значениями напряжённости электрического поля s под проводами на уровне 1,8 м над землёй, принятыми для ВЛ ± 750 кВ "Экибастуз — Центр" (см. ниже). Отметим, что Канадский институт IREQ при проектировании биполярных ВЛ постоянного тока рекомендует принимать максимальную напряжённость s (предельно допустимое значение) не более 40 кВ/м [11].

	кВ/м
Населённая местность	10
Пересечения с автодорогами	15
Ненаселённая местность (доступная для транспорта, сады, огороды)	25
Труднодоступная местность (для транспорта)	30

Анализируя приведённые данные (см. рис. 3, б), следует указать, что при повышении напряжения на высокотемпературных прово-

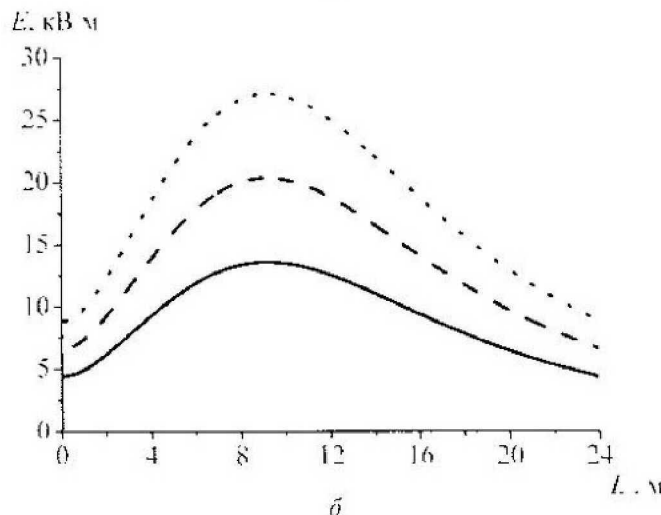
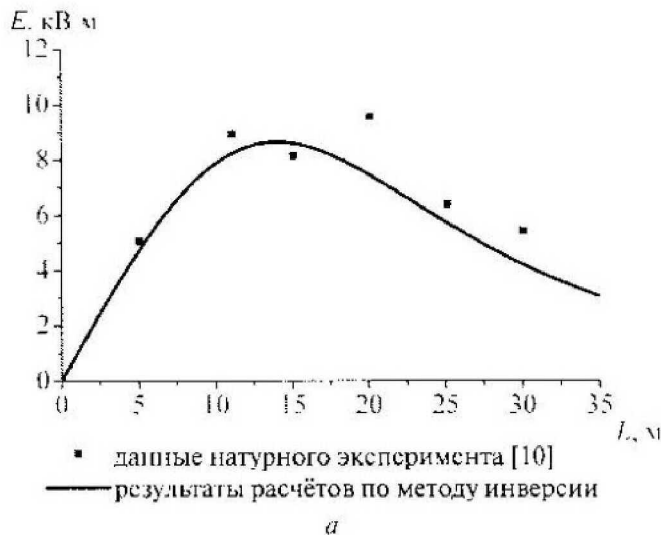


Рис. 3. Распределение напряжённости электрического поля s под проводами ВЛ (а) и под проводами ВЛ на уровне земли (б):
 \square — φ_0 (—); $\varphi = 1,5\varphi_0$ (---); $\varphi = 2\varphi_0$ (-·-·)

дах ВЛ постоянного тока максимальное допустимое значение s не превышено. Также в ходе исследования выявлено, что при повышении напряжения в 1,5—2 раза в труднодоступной для транспорта местности и в 1,5 раза в ненаселённой местности, доступной для транспорта, допустимые значения напряжённости не превышаются; для населённой местности этот уровень s достигает допустимых значений на расстоянии не менее 20 м при повышении напряжения в 1,5 раза и 23 м при повышении напряжения в два раза.

Таким образом, определяются характеристики районов прохождения ВЛ постоянного тока с высокотемпературными проводами при повышении напряжения на полюсе и без превышения допустимых значений напряжённости ЭП на уровне земли, а также расстояния от ВЛ при напряжённости ЭП не выше допустимых значений, что представляет интерес при решении проблем, связанных с определением зон отчуждения, охранных и санитарно-защитных.

Выводы

1. Компьютерное моделирование ЭП ВЛ с применением МИ адекватно результатам натурального эксперимента качественно и количественно.

2. Результаты проведённых вычислительных экспериментов для ВЛ постоянного тока с высокотемпературными проводами при повышении напряжения показали распределение ЭП как на расстоянии от исследуемой ВЛ, так и вблизи неё. На основании компьютерного моделирования ЭП определены характеристики районов прохождения линий без превышения предельно допустимых значений напряжённости ЭП на уровне земли, а также допустимые расстояния от ВЛ при напряжённости ЭП не выше допустимых значений, что позволяет точнее определять зоны отчуждения, охранные и санитарно-защитные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 г. Распоряжение Правительства РФ от 22 февраля 2008 г. № 215-р // Собр. законодательства РФ. 2008. № 11 (Ч. II). С. 3491—3659. (ст. 1038).
2. Владимирский Л. Л. Конструктивные особенности воздушных линий электропередачи постоянного тока сверхвысокого напряжения / Л. Л. Владимирский // Электрические сети России: сб. материалов науч.-техн. семинара (Москва, 1—5 декабря 2008 г.). М., 2008. <http://expoelectroseti.ru/d2008/nipt1.doc>. — 08.01.2011.

3. Тиходеев Н. Н., Владимирский Л. Л., Зевин А. А. и др. Оптимизация воздушных линий электропередачи $\pm (400-750)$ кВ постоянного тока // Известия РАН. Энергетика. 2004. № 1.

4. Тиходеев Н. Н. Некоторые вопросы оптимизации воздушных линий электропередачи переменного и постоянного тока / Н. Н. Тиходеев, А. А. Зевин, Л. И. Качановская // Прогресс в проектировании, строительстве и эксплуатации электрических сетей: сб. материалов науч.-техн. семинара (Москва, 19–20 ноября 2003 г.). М., 2003. <http://www.fsk-ees.ru/common/img/uploaded/sp-p-9.doc>. — 08.01.2011.

5. Overhead Aluminum Wire & Conductor // J-Power Systems Corporation: информационный портал. Токио, 2010. http://www.jpowers.co.jp/english/product/overhead_alum.html. — 08.01.2011.

6. Решения для электрических сетей: ACCR композитный провод для воздушных ЛЭП // 3M: информационный портал. М., 2010. http://solutions.3mussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/EU-ElectronicsElectrical/Home/ProdInfo/JointsTerminations/. — 08.01.2011.

7. Петербургский международный экономический форум 2010 // Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы:

информационный портал. М., 2010. http://www.fsk-ees.ru/evolution_technology_seminars_forum.html — 08.01.2011.

8. Потапенко А. Н., Капунникова Е. А., Дьячков М. И. Математическое моделирование электрических полей высоковольтных воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 9–10. С. 45–51.

9. Капунникова Е. А., Колтунов Л. И., Потапенко А. Н. Численное моделирование распределенных электротехнических систем в полубезграничных областях на основе метода инверсии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 5 (65). С. 189–198.

10. Zhang Z. Measurement of Corona Characteristics and Electromagnetic Environment of ± 800 kV HVDC Transmission Lines under High Altitude Condition / Z. Zhang, R. Zeng, Z. Yu // Progress In Electromagnetics Research Symposium: PIERS Proceedings, 18–21 Aug. 2009. Moscow, 2009. P. 61–65.

11. Кутузова Н. Б. Состояние нормирования факторов экологического влияния ВЛ в России и за рубежом / "ЭнергоИнфо": информ.-аналит. журн. 2007. № 5 (5). <http://www.energo-info.ru/content/view/1127/112/>. — 08.01.2011.

Парадоксы электромеханики, мнимые и настоящие

В. М. Малыгин, канд. техн. наук, нач. лаборатории, ОАО "НИИЭМ"

В данной статье мы продолжим начатое в [1] изучение результатов ряда электротехнических экспериментов, относительно которых часть специалистов даёт одно теоретическое объяснение, некоторые — другое, а читатели остаются в неведении из-за возникающего парадокса, противоречия во мнениях. В основном это эксперименты из области электромеханики. Описания некоторых приведены в работах известных учёных с мировым именем [2], несколько десятков их подобрано в работе [3], есть они и в Интернете.

В [1] мы рассмотрели внешние и внутренние силы, действующие на элемент длины линейного проводника простейшей электрической цепи постоянного тока, изображённой на рис. 1, в статике (с точки зрения механики при макроскопическом приближении), когда части цепи неподвижны друг относительно друга. И обсудили физический смысл формулы силового взаимодействия элементов проводников с постоянным током, предложенной Ампером на основании обобщения им экспериментальных данных.

Здесь же рассмотрим движение частей цепи друг относительно друга. Общим подходом при анализе работы подобных устройств является использование закона сохранения энергии, в том числе в его локальной форме

[2, с. 285]. Энергетический способ применяется в курсах электрических машин и вообще в электромеханике (преимущественно в интегральной форме), а вот о локальности законов сохранения (когда используют понятия вектора плотности потока энергии и импульса) вспоминают гораздо реже.

Традиционный подход к объяснению результатов экспериментов. Более простым и распространённым, хотя и менее общим, является метод кинестатики, которым мы воспользуемся далее и который позволит использовать здесь все выводы работы [1]. При этом будем исходить из следующих положений. 1. Третий закон Ньютона (действие равно противодействию) выполняется во всех практически реализованных электромеханических устройствах. 2. Движущаяся часть электрической цепи (в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй) имеет в рассматриваемых экспериментах толь-

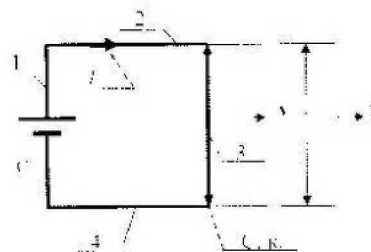


Рис. 1. Электрическая схема цепи с движущимся проводником 3, где С, к. — скользящий контакт, E — источник ЭДС, I — электрический ток