

Раздел 4. ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ТРУДА И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.311.1(045)

Кучеренко С. В., Асанов М. М., Бекиров Э. А.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Аннотация. Работа посвящена расчету электрических полей высоковольтных линий электропередач напряжением 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, а также определению санитарно-защитной зоны высоковольтных линий. Расчет напряженности электрического поля высоковольтной линии производился методом зеркальных отображений. На основании расчета проведен анализ влияния электрических полей высоковольтных линий электропередач на окружающую среду, построены графики зависимости напряженности электрического поля от высоты воздушных линий над уровнем земли и от расстояния крайних фазных проводов до точки на поверхности земли.

Ключевые слова: экологическое влияние, линия электропередач, метод зеркальных отображений.

Кучеренко С. В., Асанов М. М., Бекиров Э. А.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ДОВКІЛЛЯ

Анотація. Робота присвячена розрахунку електричних полів високовольтних ліній електропередач напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, а також визначенню санітарно-захисної зони високовольтних ліній. Розрахунок напруженості електричного поля високовольтної лінії проводився методом дзеркальних відображень. На підставі розрахунку проведено аналіз впливу електричних полів високовольтних ліній електропередач на довкілля, побудовано графіки залежності напруженості електричного поля від висоти повітряних ліній над рівнем землі та від відстані крайніх фазних проводів до точки на поверхні землі.

Ключові слова: екологічний вплив, лінія електропередач, метод дзеркальних відображень.

Kucherenko S. V., Asanov M. M., Bekirov E. A.

ASSESSMENT OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELDS TRANSMISSION LINE INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT

Summary. This work is devoted to the calculation of the electric fields of high voltage power lines of 35 kV, 110 kV and 220 kV, as well as the determination of the sanitary protection zone of high-voltage power lines. One of the parameters for assessing the environmental impact of high voltage power lines is the intensity level of the electric field formed in the space near the line. Recent studies have shown that a large electric field level even with short-term exposure can cause adverse effects on living organisms. In order to protect the people from the effects of the electric field of high-voltage power lines, sanitary protection zones are established. Calculation of the electric field intensity of high voltage power line is made by the mirror images method.

Analysis of the influence of electric fields of high voltage power lines on the environment is made, diagrams of the electric field intensity dependence on the height of the power lines above ground level and the distance from the extreme phase conductors to the point on the earth's surface are built on the basis of the calculations.

Key words: environmental impact, power line, the mirror image method.

Постановка проблемы. Одним из параметров оценки экологического влияния высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП) является уровень напряженности электрического поля, создаваемого в пространстве, окружающем линию.

Анализ научной литературы показал, что большой уровень электрического поля может вызвать негативные последствия на живые орга-

низмы даже при кратковременном воздействии. При длительном систематическом пребывании человека в электрическом поле могут возникать изменения функционального состояния нервной, сердечнососудистой, иммунной систем, так же имеется вероятность увеличения риска развития злокачественных новообразований центральной нервной системы [1–4].

Согласно санитарным нормам установлены следующие предельно допустимые уровни напряженности электрического поля [4]:

- внутри жилых зданий – 0,5 кВ/м;
- на территории зоны жилой застройки – 1 кВ/м;
- в населенной местности, вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа, в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов, в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов – 5 кВ/м;
- на участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I–V категории – 10 кВ/м;
- в ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта и сельскохозяйственные угодья) – 15 кВ/м;
- в труднодоступной местности (не доступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально отгороженных для исключения доступа населения – 20 кВ/м.

В целях защиты населения от воздействия электрического поля высоковольтных линий (ВЛ) устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной ВЛ является территория вдоль трассы ВЛ, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м [1–4].

Целью настоящей работы является расчет напряженности электрических полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередач напряжением 35 кВ, 110 кВ и 220 кВ, а также оп-

ределение санитарно-защитной зоны высоковольтных линий.

Изложение основного материала. Трехпроводная линия электропередачи с фазным напряжением U_ϕ находится на высоте h над поверхностью земли. Расстояние между ближайшими проводами равно d , радиусы проводов равны r_0 .

Определение линейных плотностей зарядов на проводах линии. Ввиду квазистационарности электрического поля на частоте 50 Гц для расчета линейных плотностей заряда проводов можно использовать теорию электростатического поля [5–7].

Для этого необходимо найти мгновенные значения напряжений на проводах в заданный момент времени.

Фазные напряжения на трех фазах определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} u_A &= U_\phi \sqrt{2} \sin(2\pi ft); \\ u_B &= U_\phi \sqrt{2} \sin(2\pi ft - 120^\circ); \\ u_C &= U_\phi \sqrt{2} \sin(2\pi ft + 120^\circ). \end{aligned} \tag{1}$$

В момент времени $t = 0$:

$$\begin{aligned} u_A &= 0 = \varphi_A; \\ u_B &= U_\phi \sqrt{2} \sin(-120^\circ) = -U_\phi \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \varphi_B; \\ u_C &= U_\phi \sqrt{2} \sin(120^\circ) = U_\phi \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \varphi_C, \end{aligned}$$

где $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – потенциалы на поверхности проводов фазы A, B и C , соответственно.

Для дальнейших расчетов следует воспользоваться методом зеркальных отображений и построить расчетную схему [5–7]. На рис. 1 представлена полученная схема трехпроводной линии.

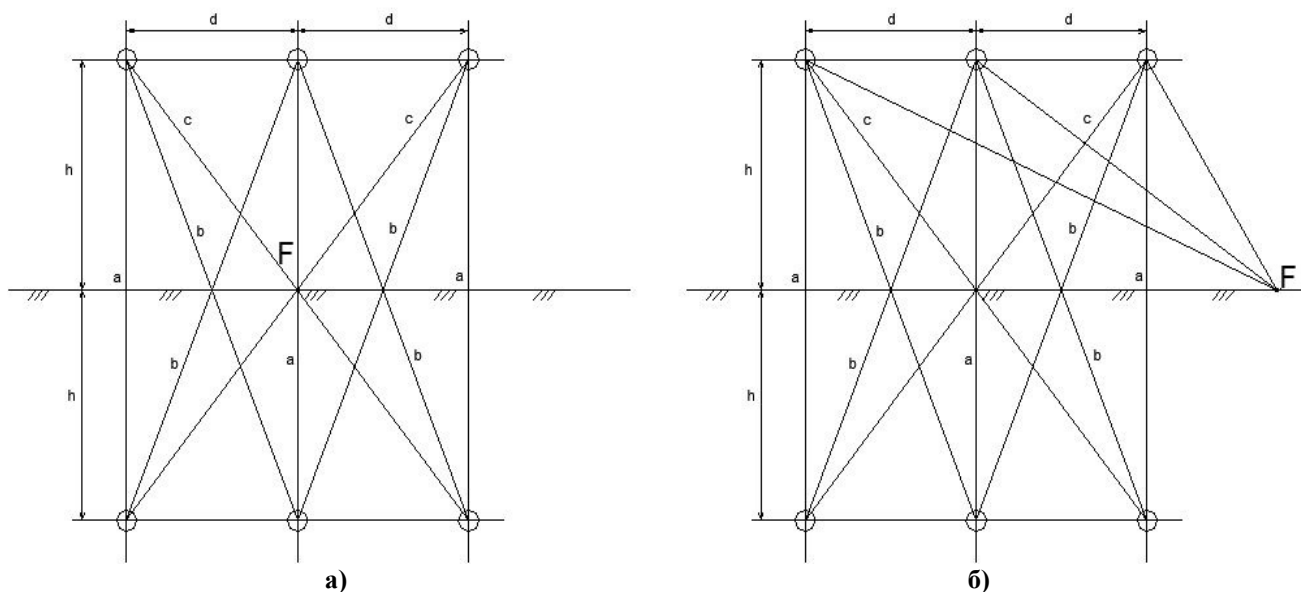


Рис. 1. Трехпроводная линия электропередачи: а) точка у основания линии электропередачи; б) точка вне линии электропередачи.

Исходя из геометрических параметров линии можно определить потенциалы на поверхности каждого провода. Например, потенциал на поверхности первого провода φ_A будет складываться из потенциала φ_{AA} , создаваемого им самим и его зеркальным отображением, а также потенциалов φ_{AB} и φ_{AC} , создаваемых остальными проводами и их зеркальными отображениями:

$$\varphi_A = \varphi_{AA} + \varphi_{AB} + \varphi_{AC}. \quad (2)$$

Потенциал φ_{AA} , создаваемый самим проводом и его зеркальным отображением, можно найти по формуле:

$$\varphi_{AA} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{a}{r_0}\right), \quad (3)$$

где τ_A – линейная плотность заряда на проводе А, Кл/м;

r_0 – радиус провода, м;

$a = 2h$ – расстояние от провода до его зеркального отображения, м.

Потенциалы полей соседних проводов и их зеркальных отображений можно определить по формулам:

$$\varphi_{AB} = \frac{\tau_B}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{b}{d}\right); \quad (4)$$

$$\varphi_{AC} = \frac{\tau_C}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{c}{2d}\right), \quad (5)$$

где b, c – соответствующие расстояния в расчетной схеме.

Под знаком логарифма в знаменателе стоит расстояние от провода А до какого-либо из соседних проводов, а в числителе – от провода А до зеркального отображения соответствующего провода.

Если значения потенциалов, найденных по формулам (3), (4), (5), разделить на соответствующую плотность заряда, то можно получить потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{a}{r_0}\right); \\ \alpha_{AB} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{b}{d}\right); \\ \alpha_{AC} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{c}{2d}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Из рис. 1 следует:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA} &= \alpha_{BB} = \alpha_{CC}; \\ \alpha_{BA} &= \alpha_{AB} = \alpha_{BC} = \alpha_{CB}; \\ \alpha_{CA} &= \alpha_{AC}. \end{aligned}$$

Для определения зарядов проводов составим первую группу формул Максвелла:

$$\begin{cases} \varphi_A = \tau_A \alpha_{AA} + \tau_B \alpha_{AB} + \tau_C \alpha_{AC}; \\ \varphi_B = \tau_A \alpha_{BA} + \tau_B \alpha_{BB} + \tau_C \alpha_{BC}; \\ \varphi_C = \tau_A \alpha_{CA} + \tau_B \alpha_{CB} + \tau_C \alpha_{CC}. \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), получим линейные плотности зарядов для трех проводов.

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Напряженность электрического поля у основания линии в точке F (рис. 1) будет складываться из напряженностей полей всех проводов и их зеркальных отображений.

Используя полученные величины плотностей зарядов, можем записать:

$$\vec{E}_F = \vec{E}_{FA} + \vec{E}_{FB} + \vec{E}_{FC} + \vec{E}_{FA}^* + \vec{E}_{FB}^* + \vec{E}_{FC}^*. \quad (8)$$

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям:

$$\begin{aligned} E_{FA} &= E_{FA}^* = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{0,5c}; \\ E_{FB} &= E_{FB}^* = \frac{\tau_B}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{h}; \\ E_{FC} &= E_{FC}^* = \frac{\tau_C}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{0,5c}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из рис. 1 видно, что горизонтальные проекции всех векторов напряженности будут компенсироваться.

Если принять во внимание равенство модулей соответствующих напряженностей, модуль вектора E_F можно найти по формуле:

$$E_F = 2 \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{0,5c} \sin \gamma + 2 \frac{\tau_B}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{h} + 2 \frac{\tau_C}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{0,5c} \sin \gamma, \quad (10)$$

где γ – угол между прямой c и плоскостью земли; h, c – соответствующие расстояния в расчетной схеме (рис. 1).

Расчет электрического поля трехпроводной линии 35 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение U_{ϕ} , кВ	35
Высота подвеса h , м	13
Расстояние между проводами d ,	3
Радиус провода r_0 , см	1,5
Длина пролета, м	150
Стрела провеса, м	1,5

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$\begin{aligned} u_A &= 0 = \varphi_A; \\ u_B &= -42,9 \text{ кВ} = \varphi_B; \\ u_C &= 42,9 \text{ кВ} = \varphi_C. \end{aligned}$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA} &= 13,2 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AB} &= 3,7 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AC} &= 2,5 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\begin{aligned} \tau_A &= 0,45 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}; \\ \tau_B &= -4,63 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}; \\ \tau_C &= 4,46 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}. \end{aligned}$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$\begin{aligned} E_{FA} &= E_{FA}^* = 68 \text{ В/м;} \\ E_{FB} &= E_{FB}^* = 724 \text{ В/м;} \\ E_{FC} &= E_{FC}^* = 674 \text{ В/м.} \end{aligned}$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin \gamma = 0,966; E_F = 2881,38 \text{ В/м.}$$

Расчет электрического поля трехпроводной линии 110 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение U_ϕ , кВ	110
Высота подвеса h , м	14
Расстояние между проводами d , м	4
Радиус провода r_0 , см	2
Длина пролета, м	150
Стрела провеса, м	1,5

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$\begin{aligned} u_A &= 0 = \varphi_A; \\ u_B &= -134,72 \text{ кВ} = \varphi_B; \\ u_C &= 134,72 \text{ кВ} = \varphi_C. \end{aligned}$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA} &= 12,8 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AB} &= 3,3 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AC} &= 2,1 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\begin{aligned} \tau_A &= 1,44 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м;} \\ \tau_B &= -14,51 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м;} \\ \tau_C &= 14,03 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м.} \end{aligned}$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$\begin{aligned} E_{FA} &= E_{FA}^* = 197 \text{ В/м;} \\ E_{FB} &= E_{FB}^* = 2089 \text{ В/м;} \\ E_{FC} &= E_{FC}^* = 1919 \text{ В/м.} \end{aligned}$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin \gamma = 0,95; E_F = 8198 \text{ В/м.}$$

Расчет электрического поля трехпроводной линии 220 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение U_ϕ , кВ	220
Высота подвеса h , м	25
Расстояние между проводами d , м	8
Радиус провода r_0 , см	2,7
Длина пролета, м	400
Стрела провеса, м	4

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$\begin{aligned} u_A &= 0 = \varphi_A; \\ u_B &= -269,44 \text{ кВ} = \varphi_B; \\ u_C &= 269,44 \text{ кВ} = \varphi_C. \end{aligned}$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_{AA} &= 13,2 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AB} &= 3 \cdot 10^{10}; \\ \alpha_{AC} &= 1,9 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\begin{aligned} \tau_A &= 2,34 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м;} \\ \tau_B &= -26,9 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м;} \\ \tau_C &= 26,19 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м.} \end{aligned}$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$\begin{aligned} E_{FA} &= E_{FA}^* = 187 \text{ В/м;} \\ E_{FB} &= E_{FB}^* = 2304 \text{ В/м;} \\ E_{FC} &= E_{FC}^* = 2097 \text{ В/м.} \end{aligned}$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin \gamma = 0,935; E_F = 8879 \text{ В/м.}$$

На рис. 2–4 отражены зависимости напряженности ВЛЭП (35–220 кВ) от высоты над поверхностью земли, а на рис. 5–7 – зависимости напряженности ВЛЭП (35–220 кВ) от расстояния крайнего фазного провода до расположения индивидуальных строительных жилищ и домов.

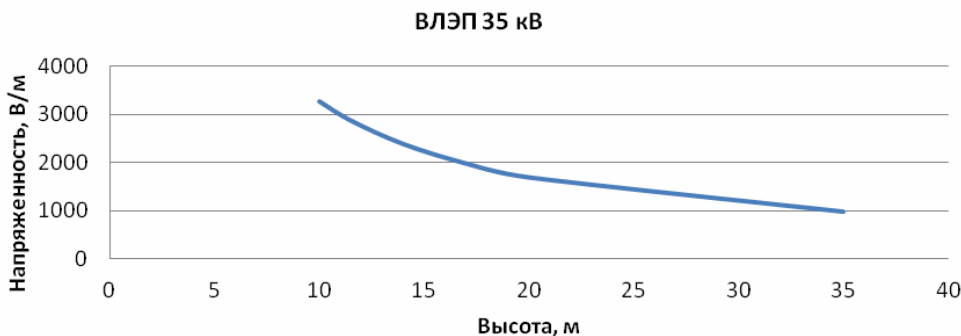


Рис. 2. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 35 кВ.

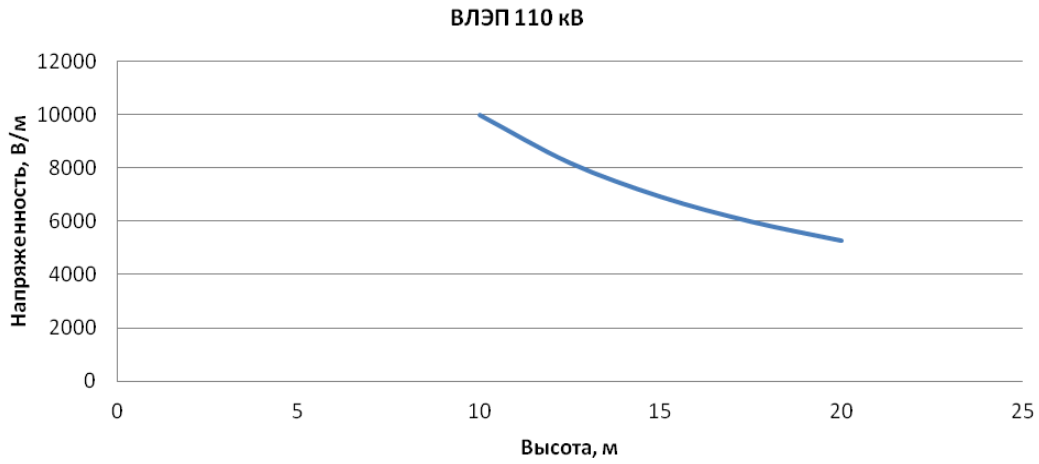


Рис. 3. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 110 кВ.

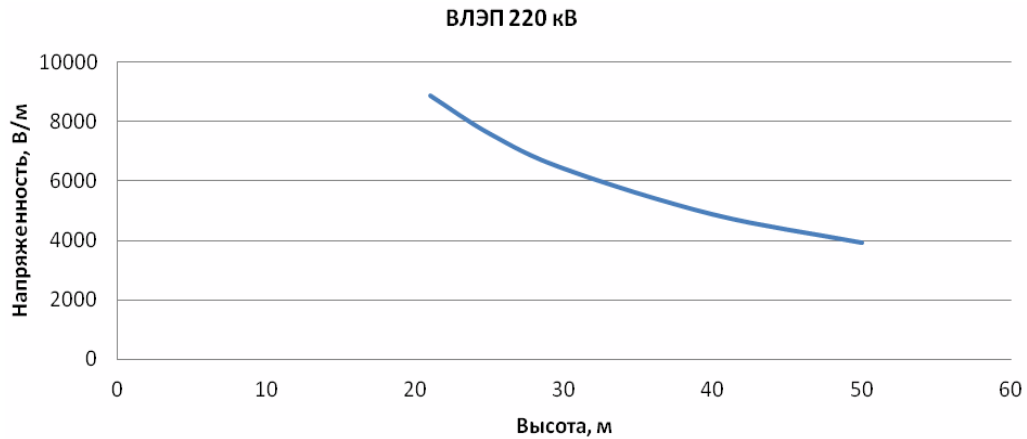


Рис. 4. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 220 кВ.



Рис. 5. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 35 кВ от расстояния.

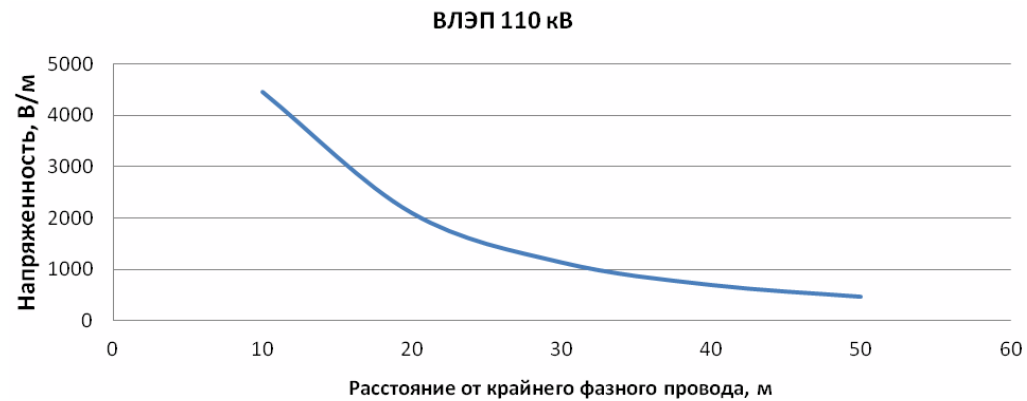


Рис. 6. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 110 кВ от расстояния.



Рис. 7. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 220 кВ от расстояния.

Выводы. На основе проведенных расчетов напряженности электрического поля воздушных линий напряжением 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ методом зеркальных отображений были построены графики зависимости напряженности электрического поля от высоты воздушных линий над уровнем земли и от расстояния крайних фазных проводов до точки на поверхности земли. Полученные результаты будут полезны при оценке возможности расположения индивидуальных строительных жилищ и домов в соответствии с нормами безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чехов В. И. Экологические аспекты передачи электроэнергии / В. И. Чехов. – М. : МЭИ, 1991. – 44 с.
2. Сподобаев Ю. М. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. – М. : Радио и связь, 2000. – 240 с.
3. Федорович Г. В. Экологический мониторинг электромагнитных полей / Г. В. Федорович. – М., 2004. – 140 с.
4. ДБН В.2.5-27-2006 Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
5. Теоретические основы электротехники : в 3 т. / [К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин]. – СПб. : Питер, 2003. – Т. 3. – 377 с.
6. Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники : сборник задач / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2006. – 512 с.
7. Аполлонский С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / С. М. Аполлонский. – СПб. : Лань, 2012. – 592 с.