УДК 621.311:537.871.3

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОХРАННОЙ ЗОНЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

И. В. Белицын

В статье рассматривается вопросы, связанные с охранной зоной воздушных линий электропередач различного класса напряжений. Предложен новый подход к определению охранной зоны, который отражает как конструктивные особенности линий электропередач, так и медико-биологические требования. Приведено распределение напряженности электрического поля на высоте 1,8 м от поверхности земли, полученное экспериментально.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, воздушная линия электропередачи, охранная зона.

Эксплуатация воздушных линий электропередач (ВЛЭП) связана с появлением вокруг нее переменного электромагнитного поля (ЭМП) которое влияет на объекты, находящиеся в непосредственной близости к ним.

С одной стороны для уменьшения этого влияния применяется защита расстоянием, а именно, создается охранная зона. Границы охранных зон для ВЛ различных классов напряжений приведены в [1], причем критерием их выбора является защита лиц от поражения электрическим током при выполнении работ вблизи токоведущих частей, находящихся под напряжением свыше 1000 В.

Охранные зоны вдоль ВЛЭП устанавливаются в виде воздушного пространства над землей, ограниченного параллельными вертикальными плоскостями, отстоящими по обе стороны линии на расстоянии от крайних проводов по горизонтали, указанном в таблице 1.

Таблица 1 – Расстояния от крайних проводов для определения охранных зон

Напряжение линии, кВ	Расстояние, м
До 20	10
Св. 20 " 35	15
" 35 " 110	20
" 110 " 220	25
" 220 " 500	30
" 500 " 750	40
" 750 " 1150	55

Таким образом, в этом нормативном документе никак не отражается влияние ЭМП на здоровье человека при определении размеров охранных зон. Кроме этого в таблице 1 приводятся расстояния охранных зон только для ВЛЭП переменного тока, однако, в России и других сртанах существуют и проектируются ВЛ постоянного тока, причем сооружение таких линий является одним из перспективных методов повышения пропускной способности линий.

Другой подход заключается в нормировании напряженности электрического поля промышленной частоты 50 Гц. В частности, на территории зоны жилой застройки значение напряженности не должно превышать 1 кВ/м. В населенной местности вне зоны жилой застройки, а также на территории огородов и садов – 5 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 – 20 кВ/м.

В СанПиН 2.2.4.1191-03 и ГОСТ 12.1.002-84 под напряженностью электрических и магнитных полей, создаваемых двух- и более фазными электроустановками, понимаются действующие (эффективные) значения напряженностей E_{max} и H_{max}, где E_{max} и H_{max} – действующие значения напряженностей по большей полуоси эллипса или эллипсоида.

Возникшее противоречие между двумя подходами можно снять, если ввести новое понятие охранной зоны – площади земельного участка, на территории которого напряженность электрического поля не превышает допустимых значений.

Для определения площади охранной зоны необходимо как можно более точно определять параметры ЭМП, в частности, напряженности электрического поля. Для этого был произведен анализ факторов, влияющих на параметры ЭМП [2], получены математические модели и алгоритмы расчета его параметров с учетом влияния металлических опор стрел провеса проводов и тросов [3, 4, 5, 6].

Для точного расчета электрического поля необходимо знать число пролетов, участ-

вующих в расчете. Для этого получим выражение для определения напряженности электрического поля, создаваемого единственным проводом одного пролета над землей. При этом сделаем ряд допущений: заряд распределен равномерно по всей длине проводника с известной линейной плотностью τ; влияние всех тел, кроме земли, на ЭМП не учитываем; поверхность земли идеально плоская.

Воспользуемся принципом суперпозиции и методом зеркальных изображений.

Грунт земли можно рассматривать как несовершенный диэлектрик с проводимостью γ. Кроме этого, если рассматривать вязкостные процессы при поляризации, то в общем случае относительная диэлектрическая проницаемость земли является комплексной величиной [7]. Так как проводимость грунта велика, то мнимая часть диэлектрической проницаемости земли на несколько порядков превышает действительную часть, что дает основание использовать метод зеркальных отражений, считая землю идеальным проводником.

Напряженность от заряда с элементарного участка провода dl

$$d\overline{E}_{+} = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\overline{r}, \qquad (1)$$

где ε_0 =8,85·10-12 Ф/м – электрическая постоянная;

$dq = \tau dl$ – элементарный заряд;

r – расстояние от точечного заряда до произвольной точки M(X,Y,Z) (рисунок 1).

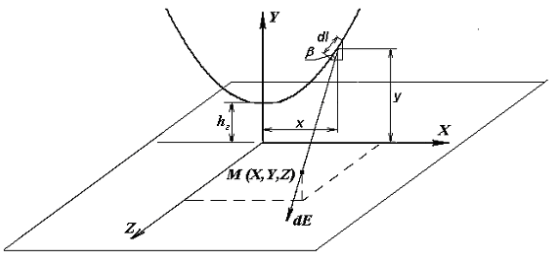


Рисунок 1 – К определению напряженности от одного пролета в пространстве

Напряженность от зеркального изображения элементарного заряда

$$d\overline{E}_{-} = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r'^3}\overline{r}', \qquad (2)$$

где r′ – расстояние от изображения точечного заряда до произвольной точки M:

$$r' = \sqrt{(X-x)^2 + (Y+y)^2 + (Z-z)^2}.$$

Элементарный отрезок провода определим через элементарное приращение dx и угол касательной к графику в этой точке β

$$dl = \frac{dx}{\cos\beta}. \qquad (3)$$

Данное выражение действительно для любых точек провода, поскольку у параболы нет точек, касательная к которым составляла бы угол 90 градусов

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\beta}}. \qquad (4)$$

Угловой коэффициент касательной $tg\beta = \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x=x}$, т. е. с учетом уравнения параболы, которому подчиняется стрела провеса, получим:

$$tg\beta = 2kx. \qquad (5)$$

Будем считать, что заряд равномерно распределен вдоль проводов ВЛЭП с линейной плотностью τ, тогда, учитывая выражения (16-18), получим

$$dq = \tau\sqrt{1+(2kx)^2}\,dx. \qquad (6)$$

Проекции напряженности от всего провода найдем интегрированием по всей длине провода: на 0X

$$E_X = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\left(\frac{\sqrt{1+(2kx)^2}(X-x)}{\left((X-x)^2+(Y-kx^2-h_{\tilde{a}})^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\sqrt{1+(2kx)^2}(X-x)}{\left((X-x)^2+(Y+kx^2+h_{\tilde{a}})^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)dx; \qquad (7)$$

на 0Y

$$E_Y = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\left(\frac{\sqrt{1+(2kx)^2}(Y-kx^2-h_{\tilde{a}})}{\left((X-x)^2+(Y-kx^2-h_{\tilde{a}})^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\sqrt{1+(2kx)^2}(Y+kx^2+h_{\tilde{a}})}{\left((X-x)^2+(Y+kx^2+h_{\tilde{a}})^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)dx; \qquad (8)$$

на 0Z

$$E_Z = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\left(\frac{\sqrt{1+(2kx)^2}\,(Z-z)}{\left((X-x)^2+\left(Y-kx^2-h_{\tilde{a}}\right)^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}-\right.$$

$$\left.-\frac{\sqrt{1+(2kx)^2}\,(Z-z)}{\left((X-x)^2+\left(Y+kx^2+h_{\tilde{a}}\right)^2+(Z-z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)dx. \qquad (9)$$

Модуль напряженности в произвольной точке

$$E(M)=\sqrt{E_X^2+E_Y^2+E_Z^2}\,. \qquad (10)$$

По полученным выражениям построим характерные зависимости напряженности электрического поля от координат точки наблюдения, при этом в качестве исходных данных примем длину пролета lгаб=300 м, линейную плотность заряда на проводе τ=3,72 мкКл/м, провод подвешен на высоте H=25 м, нормированный габарит hг=8 м.

На рисунке 2 показаны зависимости напряженности электростатического поля $E(X,const,const)$ от расстояния вдоль одного пролета X, на постоянной высоте Y=1,8 м, в зависимости от расстояния до плоскости провеса провода Z, при условии, что стрела провеса вертикальна и ее координата z=0 .

На рисунке 3 показаны зависимости напряженности электрического поля $E(const,const,Z)$ от расстояния до плоскости провода Z на постоянной высоте 1,8 м, в зависимости от расстояния вдоль одного пролета X, при условии, что стрела провеса вертикальна и ее координата z=0.

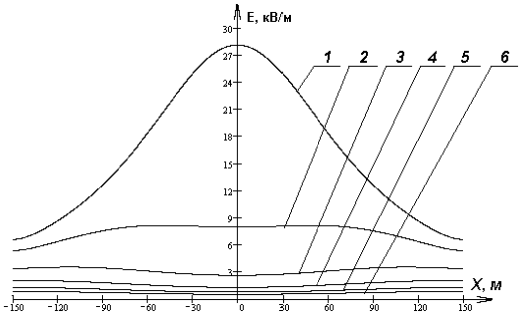


Рисунок 2 – Напряженность электрического поля вдоль одного пролета в зависимости от расстояния до плоскости провода на высоте 1,8 м:
1) Z=0 м; 2) Z=10 м; 3) Z=20 м;
4) Z=30 м; 5) Z=40 м; 6) Z=50 м

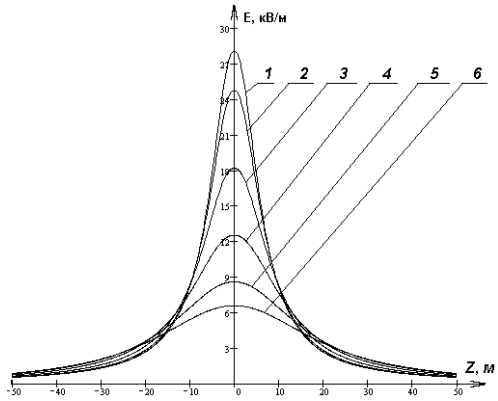


Рисунок 3 – Напряженность электрического поля от расстояния до плоскости провода, в зависимости от расстояния вдоль одного пролета на высоте 1,8 м:
1) X=0 м; 2) X=30 м; 3) X=60 м;
4) X=90 м; 5) X=120 м; 6) X=150 м

До сих пор мы рассматривали поле, создаваемое проводом на протяжении только одного пролета, в действительности электрическое поле создается электрическими зарядами, расположенными на проводе всех пролетов ВЛЭП. Возникает проблема – сколько пролетов необходимо учитывать при расчете напряженности электрического поля?

Определим высоту над поверхностью земли, на которой будем проводить сравнение напряженностей от разного количества пролетов ВЛЭП. Очевидно, что чем меньше значение напряженности от одного пролета, тем большее влияние будут оказывать другие пролеты. Поэтому расчетной высотой выбираем поверхность земли (Y=0).

Напряженность, создаваемая всем проводом, будет иметь только нормальную составляющую

$$E_n=\frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\frac{H+kx^2}{\left((H+kx^2)^2+(X-x)^2\right)^{3/2}}\times$$

$$\times\sqrt{1+4k^2x^2}\,dx. \qquad (11)$$

Для построения зависимостей напряженности электрического поля на поверхности земли будем использовать те же исходные данные, соответствующие ВЛ напряжением 500 кВ, а именно, линейная плотность заряда на проводе τ=3,72 мкКл/м, габаритный пролет 300 м, $k=7{,}56\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$. Поскольку каждый пролет создает электрическое поле, то результирующая напряженность определяется согласно принципу суперпозиции

$$E(X) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0} \sum_{i=-N}^{N} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{H + kx^2}{\left((H + kx^2)^2 + (X + i \cdot l_{\text{àà}á} - x)^2\right)^{3/2}} \sqrt{1 + 4k^2x^2}\, dx. \quad (12)$$

На рисунке 4 показано несколько кривых распределения напряженности электрического поля под пролетом ВЛ в случае учета электрического поля нескольких смежных пролетов.

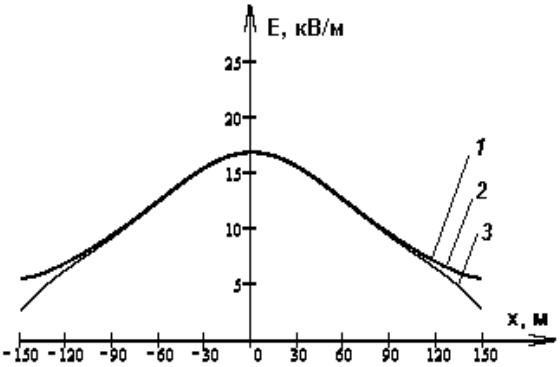


Рисунок 4 – Продольная эпюра распределения напряженности от ВЛ 500 кВ при учете 1) пяти пролетов; 2) трех пролетов; 3) одного пролета

Как видно из графика, учет более трех пролетов (двух смежных) практически не влияет на точность расчетов. В качестве эталонных значений напряженности электрического поля $E_{\acute{y}\grave{o}}$, примем значения, полученные при учете влияния двадцати одного пролета (десяти смежных). Относительную погрешность ε при этом рассчитаем как

$$\varepsilon = \frac{E_{\acute{y}\grave{o}} - E}{E_{\acute{y}\grave{o}}} 100\,\%, \quad (13)$$

где E – напряженность, вычисленная по (11) для N<10 пролетов.

На рисунке 5 показана относительная погрешность определения напряженности поля в зависимости от расстояния от оси симметрии, в зависимости от количества смежных пролетов.

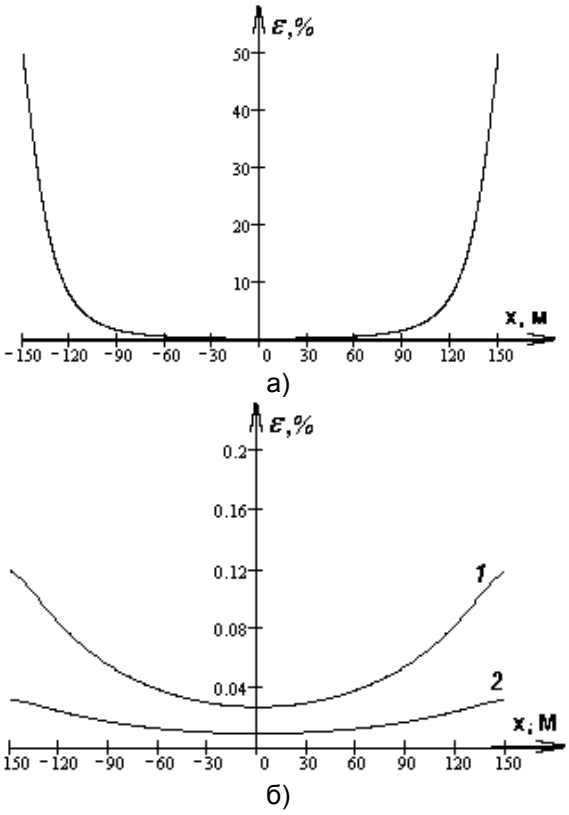
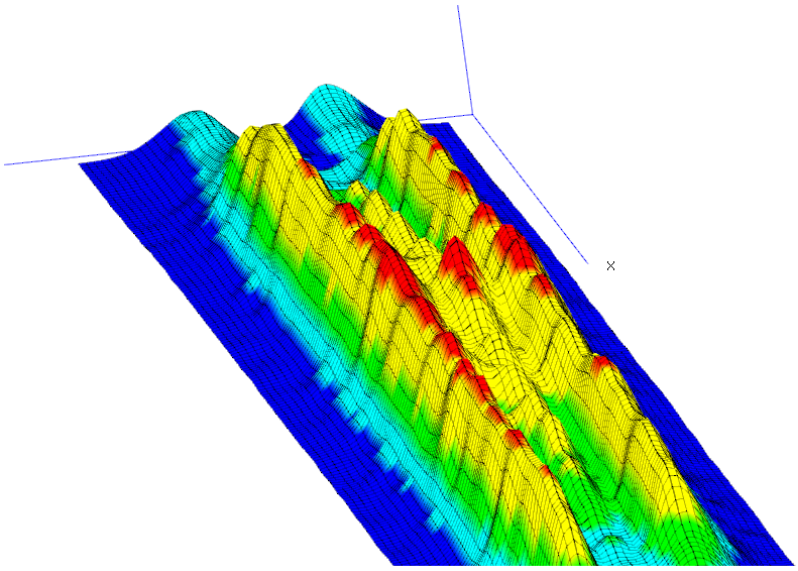


Рисунок 5 – Относительная погрешность при учете а) одного пролета; б) 1 – трех пролетов, 2 – пяти пролетов

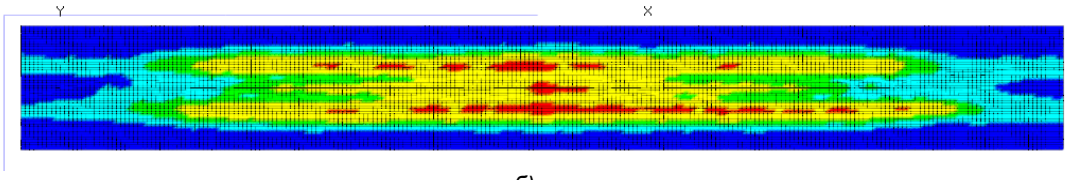
Для подтверждения правильности результатов полученной математической модели на рисунках 6 и 7 показаны некоторые данные, полученные в результате полевых экспериментов, в виде изогеометрических сплайнов. Данные получены на действующей линии 500 кВ Заря – Алтай. Для интерпретации цветов на графиках необходимо пользоваться таблицей 2.

Таблица 2 – Уровни напряженности электрического поля

	>35
	25-35
	15-25
	5-15
	0-5

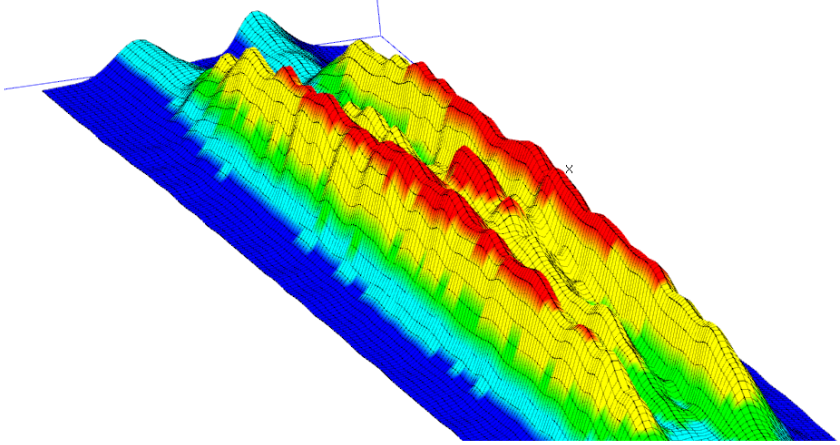


а)

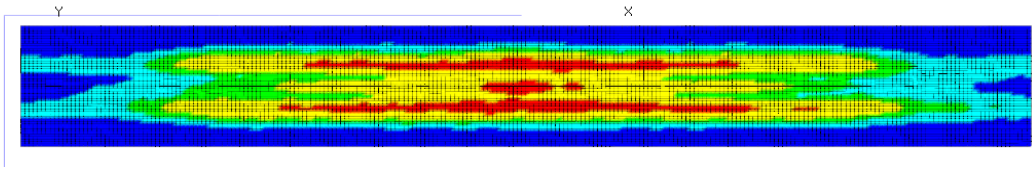


б)

Рисунок 6 – График напряженности электрического поля в пролете ВЛ (10.01.09 t=–18,6 °С, влажность=83 %)
а) вид в 3D, б) вид сверху



а)



б)

Рисунок 7 – График напряженности электрического поля в пролете ВЛ (20.10.08 t=–3 °С, влажность=58 %)
а) вид в 3D, б) вид сверху

ВЫВОДЫ:

- учитывая влияние одного пролета, минимальная погрешность 0,28 % при расчете поля наблюдается возле оси симметрии;
- учитывая влияние одного пролета, максимальная погрешность достигает 50 % наблюдается возле координаты точки подвеса провода;
- для инженерных расчетов при точности $\approx$5 % влияние одного пролета, можно учитывать один пролет на 75 % его длины;
- при учете влияния двух смежных пролетов погрешность становится пренебрежимо малой $\approx$0,12 %, поэтому во всех расчетах, связанных с определением напряженности электрического поля и его моделированием, без потери точности можно учитывать только три пролета, которые в дальнейшем будем называть расчетными;
- полученные в результате натурного эксперимента данные подтверждают полученные ранее математические модели;
- получение средних значений напряженности электрического поля, как же как и охранных зон возможно только на основе стохастического подхода, например имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.1.051-90 «Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В»

2. Хомутов, О. И. Вероятностный подход к оценке факторов, влияющих на работу электроустановок [Текст] / О. И. Хомутов, И. В. Белицын, Е. О. Мартко, А. В. Макаров, Р. С. Старухин // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – № 4. – С. 215–224.

3. Белицын, И. В. Эллиптическое электрическое и магнитное поле электроустановок и метод их расчета [Текст] / И. В. Белицын, А. В. Макаров, Б. С. Компанеец, Р. С. Старухин // Естественные и технические науки. – М., – 2006. – № 6. – С. 45–48.

4. Белицын, И. В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. метод их расчета и нормирования [Текст] / И. В. Белицын, А. В. Макаров // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Изд-во ТПТУ, – № 4. – 2008. – С. 61–65.

5. Белицын, И. В. Алгоритм расчета электрического поля ВЛЭП на основе метода эквивалентных зарядов [Текст] / И. В. Белицын, А. В. Макаров // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, – 2007. – № 4. – С. 134–141.

6. Расчет электрического поля линии электропередачи (elpole) [Текст] : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008614992 / О. И. Хомутов, И. В. Белицын, Р. С. Старухин; правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова». – № 2008614025; заявл. 02.09.2008 г.

7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2003. – 317 с.

Белицын И. В., *к.п.н., доцент, E-mail: b_i_w@mail.ru, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +7 (3852) 47-90-41.*