

ЭЛЛИПТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. МЕТОД ИХ РАСЧЕТА И НОРМИРОВАНИЯ

И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

E-mail: b_i_w@mail.ru

Показан подход к созданию критериев нормирования воздействия электромагнитных полей на человека. На основе анализа полей, создаваемых электроустановками промышленной частоты, получены аналитические выражения для расчета эллиптических полей. В качестве нового критерия обосновано и предложено использовать действующее значение напряженности электромагнитных полей. Приведено сравнение критериев для оценки напряженности электромагнитных полей для конкретного объекта электроэнергетики – ВЛЭП 500 кВ.

Одной из проблем, связанных с функционированием электрических установок, является воздействие электрических и магнитных полей на окружающую среду и, в частности, на человека [1]. На сегодняшний день в РФ разработан комплекс нормативных документов, ограничивающих параметры электрических магнитных полей как переменных, так и постоянных, их обзор приведен в [2]. В данной работе будут рассмотрены параметры переменного электромагнитного поля (ЭМП), создаваемые электроустановками переменного тока промышленной частоты. Причем электрическая и магнитная составляющая ЭМП могут рассматриваться отдельно друг от друга.

Для контроля уровня электромагнитной обстановки вокруг электроустановки в нормативных документах [3, 4] заявлены напряженность электрического и магнитного поля. Для двух- и более фазных электроустановок под ними понимается действующие (эффективные) значения напряженностей $E_{\max}$ и $H_{\max}$ по большей полуоси эллипса или эллипсоида. Однако в литературе не нашел освещения вопрос аналитического расчета этих величин. Поэтому на практике, при создании компьютерных программ для расчета эллиптических и эллипсоидальных полей, используют перебор различных значений времени в периоде одного колебания напряжения промышленной частоты. В результате такого перебора и получают максимальное значение полуоси эллипсоида. Данный метод расчета нельзя признать ни рациональным, ни оптимальным, поэтому задача аналитического расчета полуосей эллипсоидального или эллиптического электрического (магнитного) поля является актуальной.

Все промышленные электроустановки имеют трехмерное пространственное описание, поэтому и поля ими создаваемые также будут описываться в трехмерном пространстве.

Предположим, что электрическое (магнитное) поле, создаваемое какой-либо электроустановкой, например, воздушной линией электропередачи (ВЛЭП) или распределительным устройством может быть представлено в виде проекций на независимые координаты, так в декартовых координатах

$$\begin{cases} E_x = A \sin(\omega t + \alpha), \\ E_y = B \sin(\omega t + \beta), \\ E_z = C \sin(\omega t + \gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где A, B, C – амплитудные значения напряженности переменного поля по осям x, y, z ; α, β, γ – начальные значения фаз колебаний вдоль тех же осей, ω – циклическая частота колебания напряженности электрического поля, которая совпадает с частотой основной гармоники напряжения промышленной частоты $\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314 \text{ с}^{-1}$.

Перейдем от параметрической формы записи к канонической.

Преобразуем систему (1), воспользовавшись формулами сложения к виду

$$\begin{cases} \frac{E_x}{A} = \sin \omega t \cos \alpha + \cos \omega t \sin \alpha, \\ \frac{E_y}{B} = \sin \omega t \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta, \\ \frac{E_z}{C} = \sin \omega t \cos \gamma + \cos \omega t \sin \gamma. \end{cases} \quad (2)$$

Последовательно выразив $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$, избавимся от параметра ωt

$$\cos \omega t = \frac{BE_x \cos \beta - AE_y \cos \alpha}{AB \sin(\alpha - \beta)}. \quad (3)$$

Произведем подстановку (3) в первое уравнение системы (2).

$$\sin \omega t = \frac{AE_y \sin \alpha - BE_x \sin \beta}{AB \sin(\alpha - \beta)}. \quad (4)$$

Произведем подстановку (3) и (4) в последнее уравнение системы (2) и преобразуем выражение:

$$\frac{E_x \sin(\gamma - \beta)}{A} + \frac{E_y \sin(\alpha - \gamma)}{B} + \frac{E_z \sin(\beta - \alpha)}{C} = 0.$$

Последнее выражение представляет собой уравнение плоскости z' , в которой расположена кривая, описываемая вектором напряженности электрического поля $\vec{E}$. Чтобы однозначно задать кривую, воспользуемся выражениями (3) и (4), а также основным тригонометрическим тождеством и запишем

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{E_x \sin(\gamma - \beta)}{A} + \frac{E_y \sin(\alpha - \gamma)}{B} + \frac{E_z \sin(\beta - \alpha)}{C} = 0 \\ & \frac{A^2 E_y^2 + B^2 E_x^2 - 2ABE_x E_y \cos(\alpha - \beta)}{A^2 B^2 \sin^2(\alpha - \beta)} = 1. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Эта система уравнений однозначно задаёт эллипс, лежащий в плоскости z' . Для описания эллипсоида в параметрической форме записи необходимо использование двух параметров в системе, подобной (1). Физически это говорило бы об источнике поля, в котором одновременно существует только две частоты напряжения (тока), т. е. кроме основной гармоники промышленной частоты должна присутствовать еще одна частота.

Определим большую и малую полуоси эллипса. Очевидно, что напряженность в этих направлениях достигает максимального и минимального значения соответственно, поэтому для их нахождения достаточно исследовать функцию напряженности электрического поля или ее квадрата на экстремум. Учитывая систему уравнений (1), запишем:

$$f(\omega t) = E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2 = A^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + B^2 \sin^2(\omega t + \beta) + C^2 \sin^2(\omega t + \gamma). \quad (5)$$

В точках, в которых напряженность принимает наибольшее и наименьшее значения, выполняется условие

$$\frac{df(\omega t)}{d(\omega t)} = 0.$$

Определим значение ωt , при котором выполняется это условие:

$$\sin 2\omega t (A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma) + \cos 2\omega t (A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma) = 0.$$

Заранее известно, что чередование экстремальных значений в эллипсе происходит через $\pi/2$.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\omega t_1 &= -\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma}; \\ \omega t_1 &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma} \right) + \\ &+ \pi n, n \in Z. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma} \right).$$

Поскольку большая и малая полуоси эллипса смещены относительно друг друга на $\pi/2$, то можно записать выражения для полуосей эллипса

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{A^2 \sin^2(\varphi + \alpha) + B^2 \sin^2(\varphi + \beta) + C^2 \sin^2(\varphi + \gamma)}; \\ b &= \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi + \alpha) + B^2 \cos^2(\varphi + \beta) + C^2 \cos^2(\varphi + \gamma)}. \end{aligned}$$

Вид поляризации в плоскости поляризации z' электромагнитного поля удобно характеризовать с помощью коэффициента поляризации

$$\zeta = \frac{E_{x'}}{E_{y'}} = \frac{A'}{B'} e^{-j\theta},$$

где $E_{x'}$ и $E_{y'}$ — проекции напряженности электрического на ортогональные оси в плоскости поляризации z' ; A' , B' — амплитудные значения напряженности ЭМП, θ — разность между начальными фазами колебаний напряженности электрического поля на осях плоскости поляризации.

Если коэффициент поляризации является комплексным значением, то поле имеет эллиптическую поляризацию. При этом, если коэффициент поляризации является мнимым числом, то оси эллипса совпадают с осями координат. Другим частным случаем может быть круговая поляризация, если $z = \pm j$, при условии равенства амплитуд A' и B' . Если ζ — действительное число, то электромагнитная волна будет поляризована линейно, такая поляризация всегда будет наблюдаться вблизи поверхности земли, которую можно считать проводящей поверхностью. Знак мнимой части определяет направление вращения вектора $\vec{E}$ в плоскости поляризации: «плюс» соответствует правой поляризации (вращение вектора напряженности для наблюдателя, смотрящего в направлении прихода волны, происходит по часовой стрелке), «минус» — левой (вращение вектора $\vec{E}$ происходит против часовой стрелки).

Итак, установлено, что электрическое или магнитное квазистационарное поле, создаваемое вокруг электроустановок, является эллиптическим, а не эллипсоидальным, поэтому необходимо внести уточнение в [4] для определения напряженности электрического и магнитного поля. Найдены аналитические выражения для определения полуосей эллипса электрического (магнитного) поля, которые можно использовать для расчета параметров электрических и магнитных полей при проектировании различных электроустановок на предмет электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности проектируемой электроустановки.

Допустимое время пребывания человека в электрических и магнитных полях промышленной частоты, создаваемых электроустановками, зависит от их параметров и может быть выбрано одноразово или накоплено дробно в течение рабочего дня. Его можно записать как

$$t = NT,$$

где T — период колебаний тока или напряжения основной гармоники, N — целое число полных колебаний, в течение которых человек находится в зоне влияния электрического или магнитного поля.

В течение одного периода напряженность электрического поля изменяется от минимального до максимального значения дважды, поэтому возникает вопрос — каким значением напряженности оперировать на этом интервале времени.

По нормативным документам [3, 4] при оценке воздействия электрических и магнитных полей на человека происходит замена действительного изме-

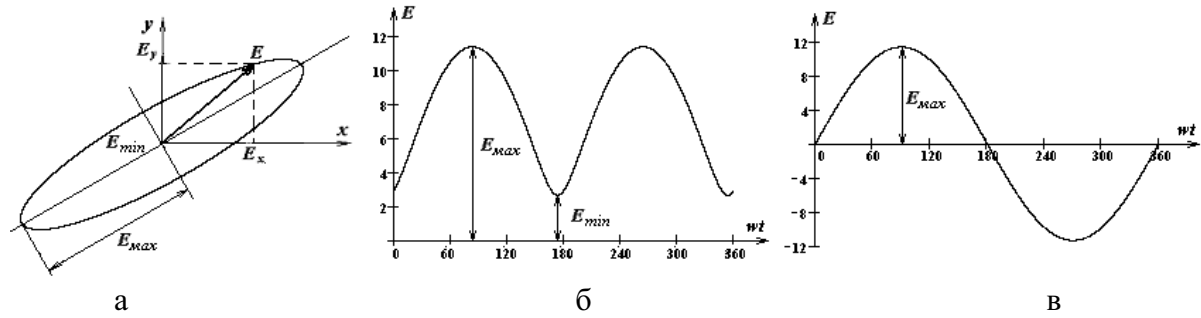


Рис. 1. Эллиптически поляризованное электрическое поле ($A=10$, $B=6$, $\alpha=0$, $\beta=30^\circ$): а) кривая, описываемая вектором напряженности в расчетной точке; б) реальная зависимость напряженности от времени в расчетной точке; в) замена реальной зависимости «эквивалентной» синусоидой

нения параметров поляризованных волн с несинусоидальной зависимостью от времени на гармоническую функцию с амплитудой, равной большей полуоси эллипса, описываемого вектором напряженности в расчетной точке, рис. 1. Таким образом, в основе современных понятий о нормировании воздействия полей на человека лежит интегральный параметр электрического и магнитного поля.

Однако для характеристики электрических и магнитных полей в течение одного периода логичнее использовать непосредственно интегральные характеристики параметров поляризованных полей, в нашем случае напряженности, а не интегральные характеристики замены реального поля (рис. 1, в), поскольку при таком подходе никак не учитывается вид поляризации.

В качестве таких характеристик могут быть приняты среднее значение напряженности за период

$$E_{cp} = \frac{\int_0^T E dt}{T} = \frac{\int_0^{2\pi} E dwt}{2\pi}. \quad (6)$$

или действующее (среднеквадратичное) значение напряженности

$$E_o = \sqrt{\frac{\int_0^T E^2 dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} E^2 dwt}{2\pi}}. \quad (7)$$

Путем преобразования последнего выражения действующее значение определяется как

$$E_o = \sqrt{\frac{A^2 + B^2 + C^2}{2}}.$$

В выражениях (6) и (7) E — напряженность электрического поля, определяемая по (5). Выше было показано, что эллиптическое поле можно привести к двум независимым координатам в плоскости поляризации волны, поэтому в дальнейшем продолжим рассмотрение поляризации электрической (магнитной) волн в этой плоскости, индексы « e » в дальнейшем будем опускать.

Интеграл выражения вида (6)

$$\int \sqrt{A^2 \sin^2(wt + \alpha) + B^2 \sin^2(wt + \beta) + C^2 \sin^2(wt + \gamma)} dt$$

не может быть выражен через элементарные функции. Поэтому для вычисления средней напряженности используются формулы приближенного вычисления определенных интегралов на основе методов Ньютона-Котеса, Симпсона, Гаусса и др. [5, 6]. Произведем сравнение предложенных двух интервальных параметров, а именно, отношение среднего значения E_{cp} к действующему значению напряженности эллиптического поля E_o в зависимости от параметров поляризации электрической волны соотношению амплитуд колебаний вектора напряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta - \alpha$, показанных на рис. 2.

Из представленных графиков следует, что при круговой поляризации среднее и действующее значения совпадают; наибольшее превышение действующего значения напряженности над средним значением в 1,091111 раза наблюдается при линейной поляризации.

Использование действующих значений в качестве интегральной характеристики электрических и магнитных полей более целесообразно, поскольку оно учитывает не только постоянную составляющую поля, но и переменные составляющие.

Сравним результаты расчета интегральной характеристики — напряженности ЭП, рассчитанные по (7) E_o и напряженности электрического поля эффективного значения синусоиды, имеющей амплитуду, равную большей полуоси эллипса, описываемого вектором напряженности в расчетной точке E_{max} , т. е. определим отношение E_o/E_{max} . Сравнение произведем от вида и формы поляризации поля, а именно, по соотношению амплитуд колебаний вектора напряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta - \alpha$. Результаты сравнения показаны на рис. 3.

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

- при линейной поляризации действующее и эффективное значения большей полуоси эллипса значения совпадают;
- максимального расхождения значения E_o и E_{max} достигают при круговой поляризации поля, при этом $E_o/E_{max} = \sqrt{2}$.

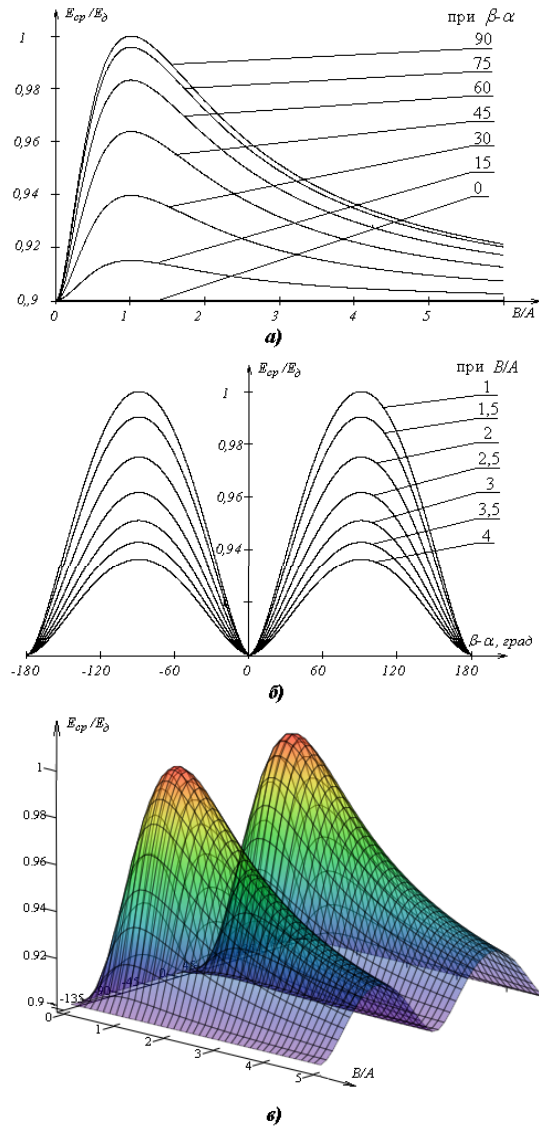


Рис. 2. Зависимость E_{cp}/E_0 от параметров эллиптического поля: а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta - \alpha = \text{const}$; б) от разности начальных фаз $\beta - \alpha$, при $B/A = \text{const}$; в) эллиптического поля B/A и $\beta - \alpha$

В заключение рассмотрим и сравним параметры электрического поля, создаваемого проводами ВЛЭП переменного тока. По существующим в настоящее время методам расчета напряженности электрического (магнитного) поля, создаваемой ВЛЭП, провода фаз располагаются горизонтально поверхности земли на некоторой эквивалентной высоте H_{cp} . В этом случае поле можно рассматривать как плоскопараллельное.

Приведем пример сравнения действующего значения E_0 и действующего значения напряженности, равной большой полуоси эллипса напряженности электрического поля E_{max0} , для ВЛЭП, выполненной промежуточными опорами, с горизонтальным расположением проводов, типа ПБ 1, при симметричной нагрузке всех фаз ВЛЭП. Опоры с горизонтальным расположением проводов обычно используются на напряжение 500 кВ и выше.

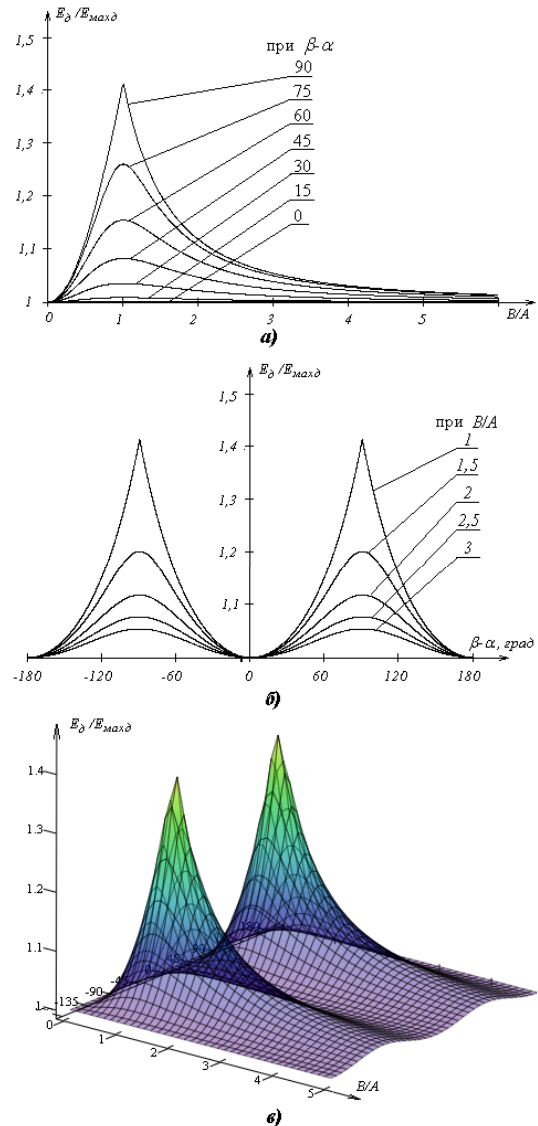


Рис. 3. Зависимость E_0/E_{max0} от параметров эллиптического поля: а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta - \alpha = \text{const}$; б) от разности начальных фаз $\beta - \alpha$, при $B/A = \text{const}$; в) эллиптического поля B/A и $\beta - \alpha$

При сравнении примем эквивалентную высоту расположения проводов фаз над поверхностью земли, равную 12 м. Напряженность будем рассчитывать на высоте 1,8 м от поверхности земли.

Очевидно, что численные значения параметров электрического (магнитного) поля будут зависеть от распределения заряда на проводах, тока в них. В общем случае эти параметры для одной и той же ВЛЭП могут изменяться в зависимости от нагрузки линии, климатических условий и других факторов, поэтому рассмотрим приведенные параметры полей, а именно напряженности электрического поля, к величине линейного заряда на проводах τ

$$E'_{max0} = \frac{E_{max}}{\tau} 2\pi\epsilon_0; \quad E'_0 = \frac{E_0}{\tau} 2\pi\epsilon_0;$$

$$E'_{cp} = \frac{E_{cp}}{\tau} 2\pi\epsilon_0.$$

Аналогично можно рассматривать приведенные значения вектора магнитной индукции (напряженности магнитного поля) к значению тока в линии.

В результате приведенное действующее значение максимальной напряженности поля $E'_{\max}$ и приведенное действующее значение напряженности E'_0 будут зависеть только от точек подвеса проводов и координат расчетных точек, в которых определяются интегральные параметры поля, т. е. полностью определяются геометрической структурой ВЛЭП.

Для численного определения во сколько раз действующее значение напряженности эллиптического электрического поля превышает действующее значение наибольшей полуоси эллипса поляризации, введем коэффициент завышения

$$\xi = \frac{E_0}{E_{\max}} = \frac{E'_0}{E'_{\max}}.$$

Графики зависимости приведенных значений напряженности электромагнитного поля от координаты x представлены на рис. 4. Для графического представления распределения коэффициента завышения от высоты расчетной точки над поверхностью земли построены графики, рис. 5.

Из графиков можно сделать следующие выводы:

- более близкими между собой, на большом интервале изменения координаты x , являются E'_0 и $E'_{\max}$;
- под проводами ВЛЭП и в непосредственной близости от нее — ближней зоне, коэффициент завышения не постоянен и имеет сложную зависимость от координаты x , в остальной зоне — дальней этот коэффициент остается постоянным и равным $\xi=1$;

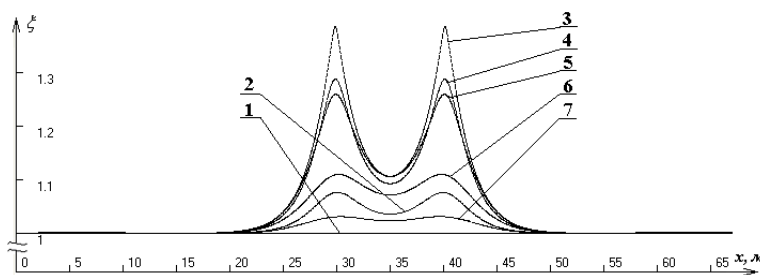


Рис. 5. Распределение коэффициента завышения от высоты над горизонтальной поверхностью земли: 1) 0 или 12; 2) 2; 3) 4; 4) 5; 5) 6; 6) 8; 7) 10 м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихончук В.С., Зуев В.Г., Коваленко И.Г. Электромагнитные, магнитные, электрические поля и электрический ток // Реакции организма человека на воздействие опасных и вредных производственных факторов (метрологические аспекты). Справочник. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — Т. 2. — С. 128–146.
2. Белицын И.В., Урвачев С.А. Анализ системы санитарно-гигиенического нормирования электростатических полей и электромагнитных полей промышленной частоты и в России // Измерение, контроль, информатизация: Матер. VII Междунауч. научно-техн. конф. — Барнаул, 2006. — С. 140–143.
3. ГОСТ 12.1.002-84. Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые

- дальней зоне с коэффициентом $\xi=1$ соответствует расстояние от крайних проводов не более 3 м.
- на определенной высоте, для данного случая ($h=5$ м), зависящей от расстояния между проводами и их высотой подвеса, коэффициент завышения достигает максимального значения $\xi=1,41$, что объясняется круговой поляризацией электрического поля.
- непосредственно у поверхности земли ($h=0$ м) и на высоте подвеса проводов ($h=12$ м) коэффициент завышения не зависит от координаты x и равен $\xi=1$, что объясняется линейной поляризацией.

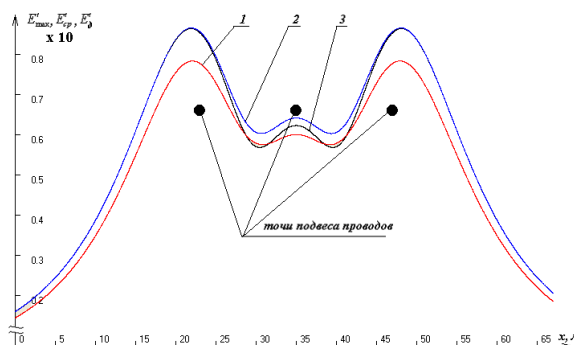


Рис. 4. Распределение приведенного значения напряженности электромагнитного поля для высоты 1,8 м, при расстоянии между проводами 12 м и $H_{cp}=12$ м: 1) $E'_{cp}=f(x)$; 2) $E'_d=f(x)$; 3) $E'_{\max d}=f(x)$

Таким образом, на конкретном примере показано, что реальные действующие значения напряженности ЭП превышают значения, предложенные ГОСТом [3], а это, в свою очередь, влияет на время нахождения обслуживающего персонала в зоне влияния электроустановки.

уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 7 с.

4. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. — М.: Энас, 2003. — 38 с.
5. Васильева А.Г. Дифференциальные и интегральные уравнения, вариационное исчисление в примерах и задачах. 2-е изд. / А.Н. Тихонов, А.Г. Васильева. — М.: Физматлит, 2005. — 432 с.
6. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. — 728 с.

Поступила 14.11.2006 г.