

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

И.В. Белицын, А.В. Макаров

В статье предложен аналитический метод расчета эллиптического электрического поля, предложены критерии для его нормирования. Проведен анализ эллиптического поля для самых распространенных типов подвеса проводов на опорах воздушных линий электропередач.

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 России разработан комплекс нормативных документов, ограничивающих параметры электрических магнитных полей как переменных, так и постоянных, их обзор дан в [2]. В данной работе будут рассмотрены параметры переменного электромагнитного поля ЭМП, создаваемого 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} , где E_{max} и H_{max} - действующие значения напряженностей 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

$$\begin{cases} \frac{E_x}{A} = \sin \omega t \cos \alpha + \cos \omega t \sin \alpha \\ \frac{E_y}{B} = \sin \omega t \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta \\ \frac{E_z}{C} = \sin \omega t \cos \gamma + \cos \omega t \sin \gamma. \end{cases} \quad (1')$$

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

$$\begin{aligned} \sin \omega t &= \frac{E_x}{A \cos \alpha} - \tan \alpha \cos \omega t; \\ \frac{E_y}{B} &= \frac{E_x \cos \beta}{A \cos \alpha} - \cos \omega t \tan \alpha \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta; \\ \cos \omega t &= \frac{BE_x \cos \beta - AE_y \cos \alpha}{AB \sin(\alpha - \beta)}. \end{aligned} \quad (2)$$

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

После подстановки (2) в первое уравнение системы (1'), получим

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

Произведем подстановку (2) и (3) в последнее уравнение системы (1').

$$\frac{E_z}{C} = \frac{AE_y \sin(\alpha - \gamma) + BE_x \sin(\gamma - \beta)}{AB \sin(\alpha - \beta)};$$

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

Преобразуя последнее выражение, получим

$$\frac{E_x \sin(\gamma - \beta)}{A} + \frac{E_y \sin(\alpha - \gamma)}{B} + \frac{E_z \sin(\beta - \alpha)}{C} = 0. \quad (4)$$

Последнее выражение представляет собой уравнение плоскости z' , в которой расположена кривая, описываемая вектором напряженности электрического поля $\vec{E}$. Чтобы однозначно задать кривую, воспользуемся выражениями (2) и (3), а также основным тригонометрическим тождеством

$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$, после преобразований получим

$$\frac{A^2 E_y^2 + BE_x^2 - 2ABE_x E_y \cos(\alpha - \beta)}{A^2 B^2 \sin^2(\alpha - \beta)} = 1.$$

Следовательно, можно записать:

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

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:

$$f(\omega t) = E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2 =$$

$$= A^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + B^2 \sin^2(\omega t + \beta) + C^2 \sin^2(\omega t + \gamma). \quad (6)$$

Найдем производную функции

$$\frac{df(\omega t)}{d(\omega t)} = 2A^2 \sin(\omega t + \alpha) \cos(\omega t + \alpha) +$$

$$2B^2 \sin(\omega t + \beta) \cos(\omega t + \beta) +$$

$$+ 2C^2 \sin(\omega t + \gamma) \cos(\omega t + \gamma);$$

$$\frac{df(\omega t)}{d(\omega t)} = 2A^2 (\sin \omega t \cos \alpha + \cos \omega t \sin \alpha) \times$$

$$\times (\cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha) +$$

$$+ 2B^2 (\sin \omega t \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta) \times$$

$$\times (\cos \omega t \cos \beta - \sin \omega t \sin \beta) +$$

$$+ 2C^2 (\sin \omega t \cos \gamma + \cos \omega t \sin \gamma) \times$$

$$\times (\cos \omega t \cos \gamma - \sin \omega t \sin \gamma);$$

После преобразований

$$f'(\omega t) = A^2 (\sin 2\omega t \cos 2\alpha + \cos 2\omega t \sin 2\alpha) +$$

$$B^2 (\sin 2\omega t \cos 2\beta + \cos 2\omega t \sin 2\beta) +$$

$$+ C^2 (\sin 2\omega t \cos 2\gamma + \cos 2\omega t \sin 2\gamma).$$

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

$$\frac{df(\omega t)}{d(\omega t)} = 0. \quad (7)$$

Определим значение ωt , при котором выполняется условие (7)

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

$$\cos 2\omega t (A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma) = 0. \quad (8)$$

Для получения полного аналитического решения существует подстановка, позволяющая превратить в рациональное алгебраическое уравнение любое уравнение вида $R(\sin t; \cos t) = 0$, т.е. и уравнение (8)

$$\sin 2\omega t = \frac{2tg^2 \frac{2\omega t}{2}}{1 + tg^2 \frac{2\omega t}{2}}; \quad \cos 2\omega t = \frac{1 - tg^2 \frac{2\omega t}{2}}{1 + tg^2 \frac{2\omega t}{2}}.$$

Однако ее использование не целесообразно, поскольку 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

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma} \right). \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{A^2 (\sin(\varphi + \alpha))^2 + B^2 (\sin(\varphi + \beta))^2 + C^2 (\sin(\varphi + \gamma))^2}; \\ b &= \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi + \alpha) + B^2 \cos^2(\varphi + \beta) + C^2 \cos^2(\varphi + \gamma)}. \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\zeta = \frac{E_{x'}}{E_{y'}} = \frac{A'}{B'} e^{-j\theta}. \quad (11)$$

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

ризации.

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 $\zeta = \pm j$, 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. Знак 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).

Выражения, аналогичные (1-11) можно записать и для переменного магнитного поля. В этом случае в них под амплитудными значениями следует понимать максимальные значения вектора напряженности магнитного поля вдоль осей координат.

Итак, установлено, 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 или магнитного поля, которые можно использовать для расчета параметров электрических и магнитных полей при проектировании различных электроустановок на предмет электромагнитной со-

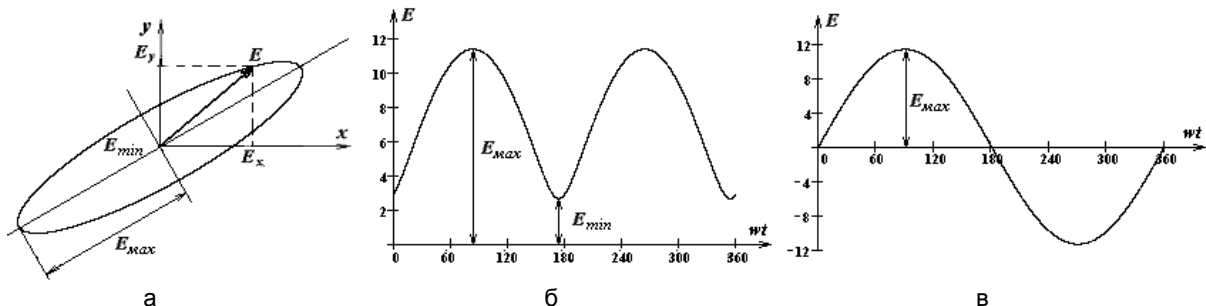


Рис. 1. Эллиптически поляризованное электрическое поле ($A=10$, $B=6$, $\alpha=0$, $\beta=30^\circ$): а) кривая, описываемая вектором напряженности в расчетной точке; б) реальная зависимость напряженности от времени в расчетной точке; в) замена реальной зависимости «эквивалентной» синусоидой

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

вместимости и электромагнитной безопасности проектируемой электроустановки.

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

$$t = NT, \quad (12)$$

где T – период колебаний тока или напряжения основной гармоники, N – целое число полных колебаний, в течении 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 изменения 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. 1в), поскольку при таком подходе никак не учитывается вид поляризации.

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

$$E_{cp} = \frac{\int_0^T E dt}{T} = \frac{\int_0^{2\pi} E dwt}{2\pi} \quad (13)$$

или действующее (среднеквадратичное) значение напряженности

$$E_\delta = \sqrt{\frac{\int_0^T E^2 dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} E^2 dwt}{2\pi}}. \quad (14)$$

Путем преобразования последнего выражения действующее значение определяется как

$$E_\delta = \sqrt{\frac{A^2 + B^2 + C^2}{2}}. \quad (14')$$

В выражениях (13) и (14) E – напряженность электрического поля, определяемая по (6). 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 «'» в дальнейшем будем опускать.

Интеграл выражения (13) вида

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

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_δ в зависимости от параметров поляризации электрической волны соотношению амплитуд колебаний вектора напряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta - \alpha$ показаны 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 $1/0,9 \approx 1,11$ 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 полей.

Сравним результаты расчета интегральной характеристики – напряженности ЭП, рассчитанные по (14) E_δ и напряженности напряженностью электрического поля эффективно значения синусоиды, имеющей амплитуду, равную большей полуоси эллипса, описываемого вектором напряженности в расчет-

ной точке $E_{махд}$, т.е. определим отношение $E_d/E_{махд}$. Сравнение произведем от вида и формы поляризации поля, а именно, по соотношению амплитуд колебаний вектора на-

пряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta-\alpha$. Результаты сравнения показаны на рис. 3.

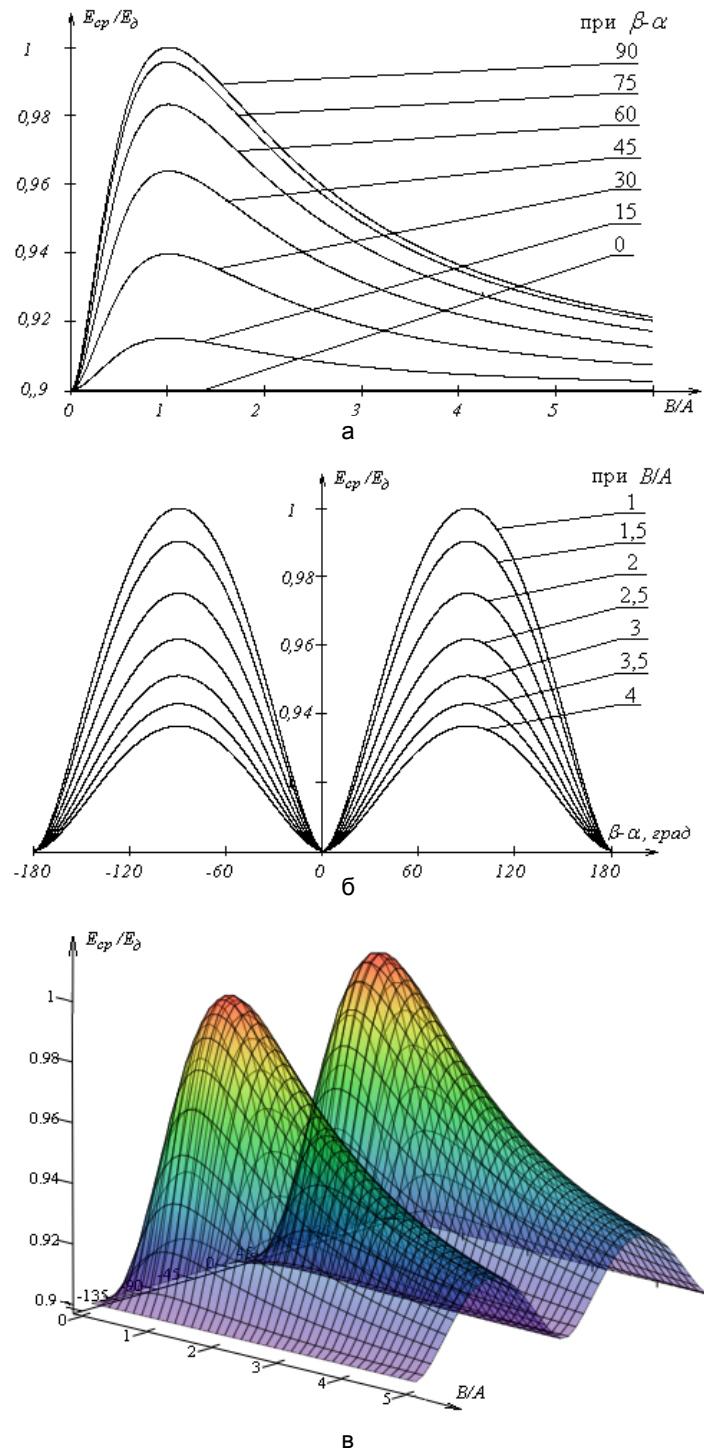


Рис. 2. Зависимость E_{cp}/E_d от параметров эллиптического поля: а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta-\alpha - \text{const}$; б) от разности начальных фаз $\beta-\alpha$, при $B/A - \text{const}$; в) эллиптического поля B/A и $\beta-\alpha$

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

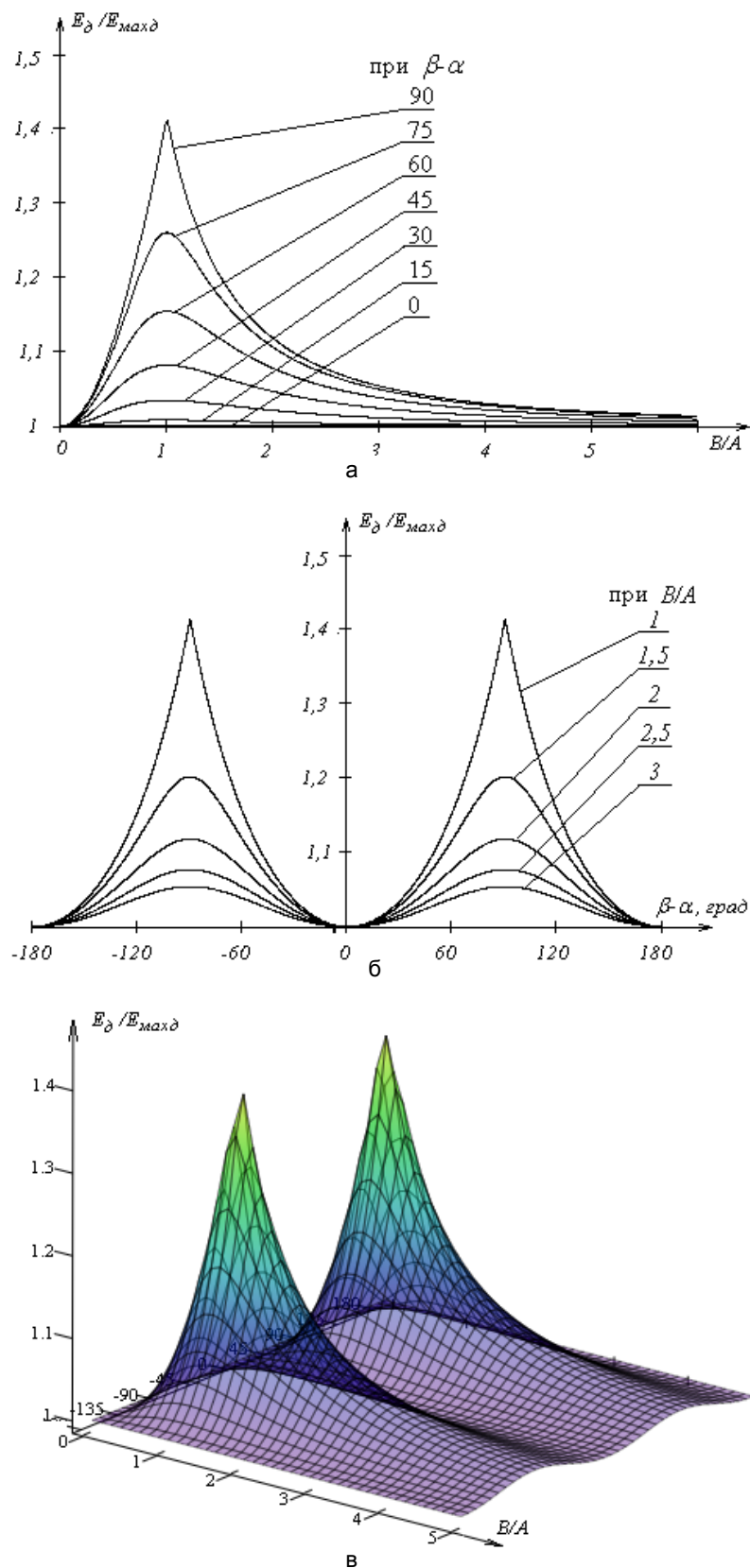


Рис. 3. Зависимость E_d/E_{maxd} от параметров эллиптического поля: а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta - \alpha = \text{const}$; б) от разности начальных фаз $\beta - \alpha$, при $B/A = \text{const}$; в) эллиптического поля B/A и $\beta - \alpha$

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

- при линейной поляризации действующее и эффективное значения большей полуоси эллипса совпадают;

- максимального расхождения значения E_∂ и $E_{\max\partial}$ достигают при круговой поляризации поля, при этом $E_\partial/E_{\max\partial} = \sqrt{2}$.

В заключение рассмотрим и сравним параметры электрического поля, создаваемое проводами ВЛЭП переменного тока. По существу 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.

Общий вид расчетной схемы замещения реальной ВЛЭП переменного тока, с различными эквивалентными высотами фаз (A, B, C) и их изображениями (A', B', C'), для определения параметров электрического и магнитного поля, показан на рис. 4.

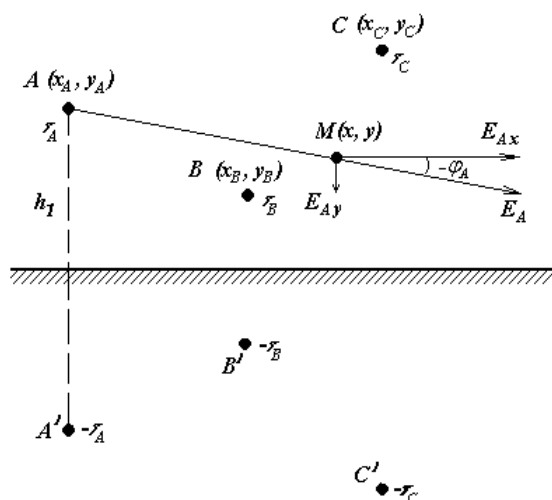


Рис. 4. Расчетная схема для определения параметров ЭМП, создаваемого ВЛЭП переменного тока

Очевидно, что численные значения параметров электрического и 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

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

$$E'_{cp} = \frac{E_{cp}}{\tau} 2\pi\epsilon_0. \quad (15)$$

Тогда приведенные действующие значения максимальной напряженности поля $E'_{\max}$ и приведенные действующие значения напряженности E'_∂ будут зависеть, только от точек подвеса проводников 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

$$\xi = \frac{E_\partial}{E_{\max}} = \frac{E'_\partial}{E'_{\max}}. \quad (16)$$

В качестве примеров приведем сравнения действующего значения E_∂ и действующего значения напряженности, равной большей полуоси эллипса напряженности электрического поля $E_{\max\partial}$, для ВЛЭП, выполненной промежуточными опорами, с тремя часто встречающимися расположением проводов, а именно, с горизонтальным, по вершинам треугольника, и для двухцепной ВЛ. В первых двух случаях при симметричной нагрузке всех фаз ВЛЭП линейный электрический заряд с точностью не превышающей 10% можно считать равным на всех фазах, влияние грозозащитных тросов в пределах такой погрешности не учитывается. В третьем случае заряд на средних проводах превышает заряд на нижних проводах на 25%. Однако, во всех случаях заряд на всех фазах будем считать равным друг другу по модулю, поскольку при значительном расхождении электрических параметров фаз применяется транспозиция проводов. Напряженность во всех трех случаях будем рассчитывать на высоте 1,8 м от горизонтальной поверхности земли.

Горизонтальное расположение проводов, обычно используется на напряжение 500 кВ и выше. В качестве примера возьмем опору типа ПБ 1. При сравнении примем эквивалентную высоту расположения проводов фаз над поверхностью земли, равную 12 м.

Графики зависимости приведенных значений напряженности электромагнитного по-

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

ля от координаты x представлены на рисунках 5.

Для графического представления распределения коэффициента завышения от

высоты расчетной точки над поверхностью земли построены графики представленные на рисунке 6.

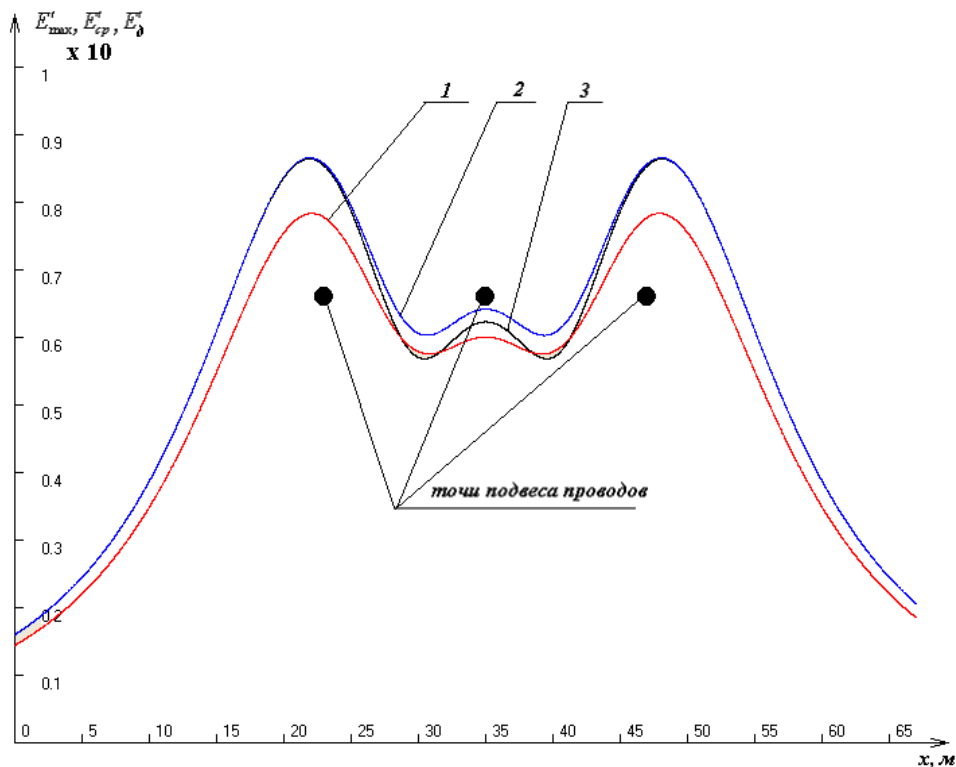


Рис. 5. Распределение приведенного значения напряженности электромагнитного поля для высоты 1,8 м, при расстоянии между проводами 12 м и $H_{cp} = 12$ м: 1) $E'_{cp} = f(x)$; 2) $E'_o = f(x)$; 3) $E'_{\max o} = f(x)$

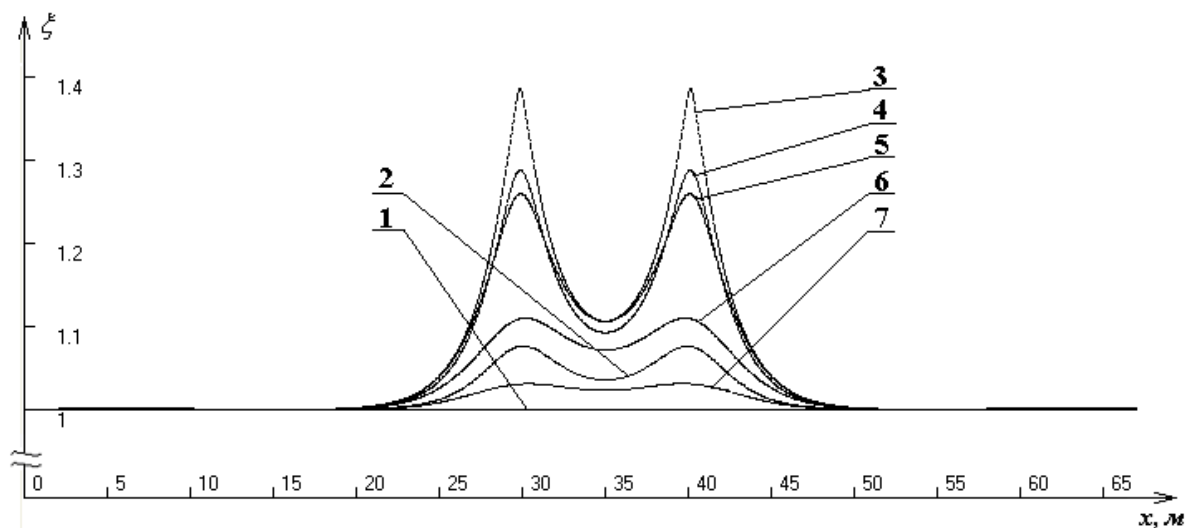


Рис. 6. Распределение коэффициента завышения от высоты над горизонтальной поверхностью земли: 1) $h=0$ или 12 м; 2) $h=2$ м; 3) $h=4$ м; 4) $h=5$ м; 5) $h=6$ м; 6) $h=8$ м; 7) $h=10$ м

Из графиков можно сделать следующие выводы:

- более близкими между собой, на большем интервале изменения координаты x , являются E'_o и $E'_{\max o}$;

- под проводами ВЛЭП и в непосредственной близости от нее - ближней зоне, коэффициент завышения не постоянен и имеет сложную зависимость от координаты x , в ос-

тальной зоне - дальней этот коэффициент остается постоянным и равным $\xi = 1$;

- 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.

Для определения среднего значения напряженности электрического поля, в котором может находиться тело человека, находяще-

гося непосредственно под проводами, необходимо знать характер распределения коэффициента завышения в диапазоне его роста (двух метров). Данные зависимости представлены на рис. 7.

Расположение проводов в вершинах треугольника может встречаться ВЛЭП напряжением от 35 до 330 кВ. В качестве примера возьмем промежуточную одноцепную свободностоящую опору ПС330-3. При сравнении примем эквивалентную высоту расположения проводов двух нижних фаз над поверхностью земли, равную 12 м, третьей фазы 19,5 м. Расстояния от оси опоры до проводов первой фазы 5,8 м; второй – 8,3 м; третьей 4,8 м.

Графики зависимости приведенных значений напряженности электромагнитного поля от координаты x представлены на рис. 8.

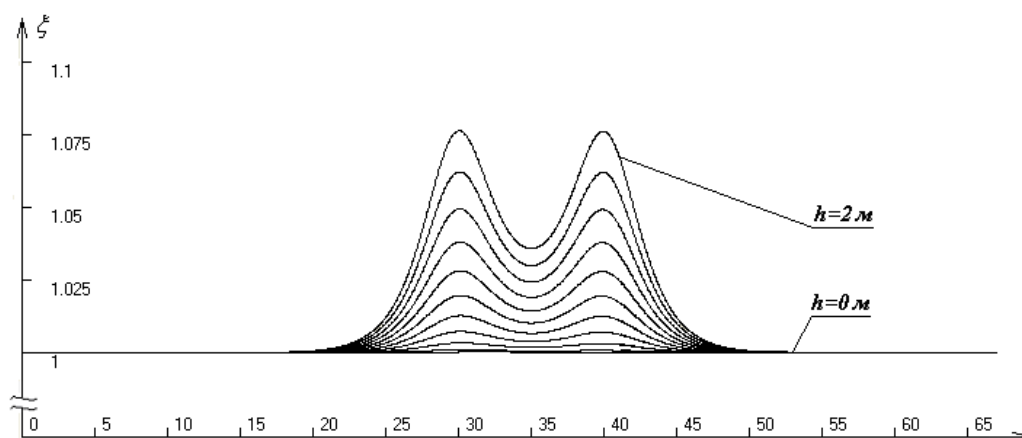


Рис. 7. Коэффициента завышения в зависимости от x , при различных высотах h над поверхностью земли $h \in [0, 2]$ м, с интервалом 20 см

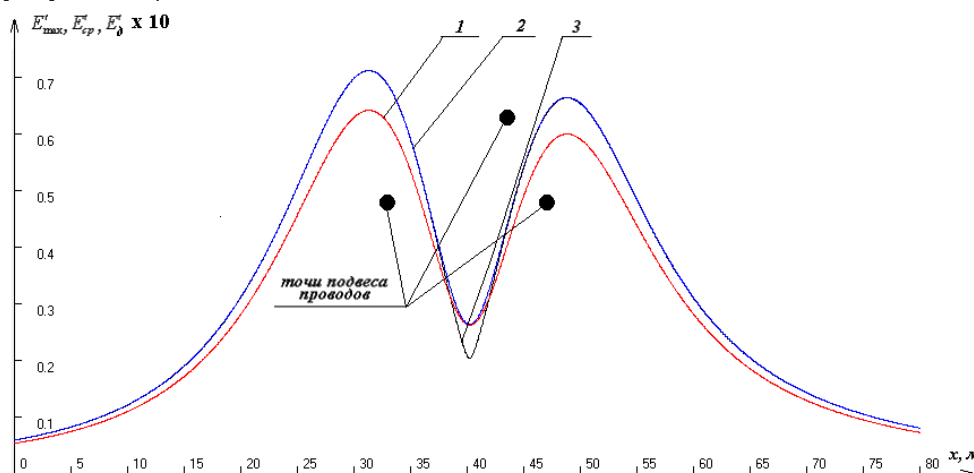


Рис. 8. Распределение приведенного значения напряженности электромагнитного поля для высоты 1,8 м, при расположении проводов в вершинах треугольника: 1 - $E'_{cp} = f(x)$; 2 - $E'_δ = f(x)$; 3 - $E'_{maxδ} = f(x)$

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

Для графического представления распределения коэффициента завышения от высоты расчетной точки над поверхностью земли построены графики представленные на рис. 9.

Характер распределения коэффициента завышения в диапазоне двух метров от поверхности земли представлены на рис. 10.

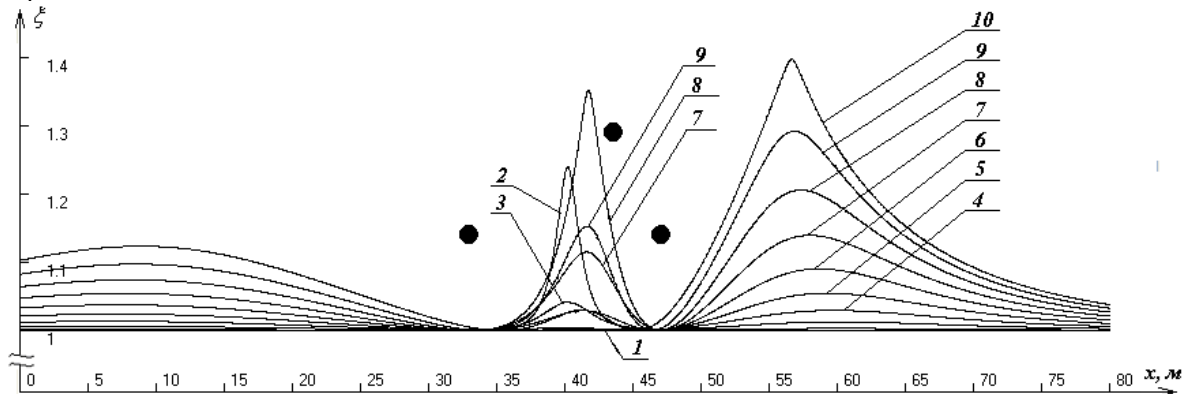


Рис. 9. Распределение коэффициента завышения от высоты над горизонтальной поверхностью земли, при расположении проводов в вершинах треугольника: 1) $h=0$ м; 2) $h=2$ м; 3) $h=4$ м; 4) $h=6$ м; 5) $h=8$ м; 6) $h=10$ м; 7) $h=12$ м; 8) $h=14$ м; 9) $h=16$ м; 10) $h=18$ м

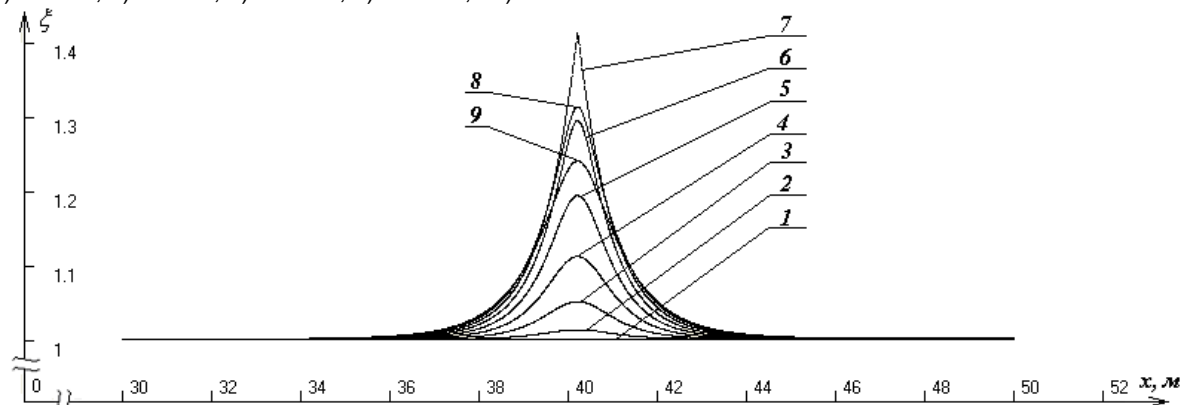


Рис. 10. Коэффициента завышения в зависимости от x , при различных высотах h над поверхностью земли $h \in [0, 2]$ м, с интервалом 25 см, при расположении проводов в вершинах треугольника

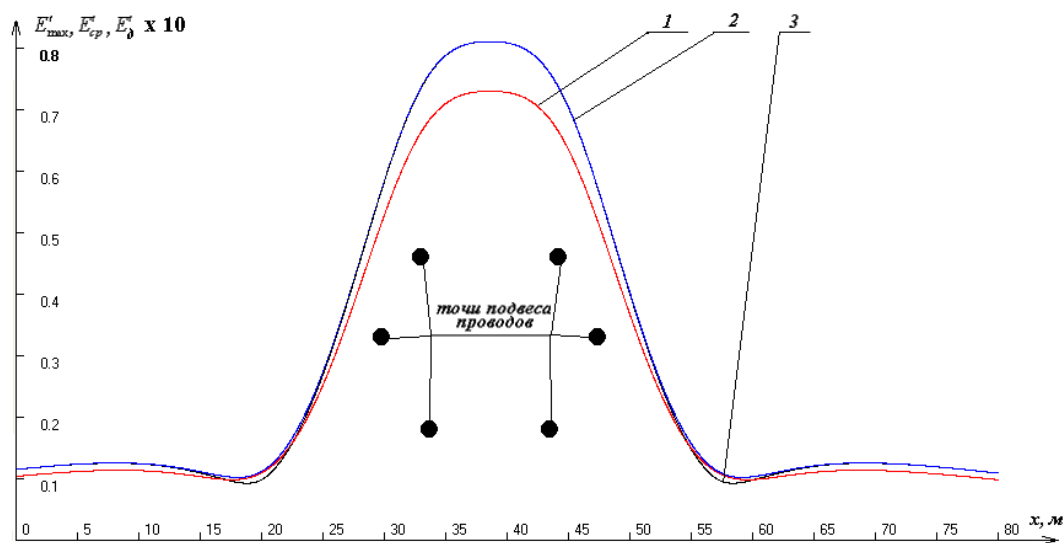


Рис. 11. Распределение приведенного значения напряженности электромагнитного поля для высоты 1,8 м, при расположении проводов «бочка»: 1) $E'_{cp} = f(x)$; 2) $E'_o = f(x)$; 3) $E'_{max o} = f(x)$

Двухцепные опоры применяются на ВЛЭП напряжением от 35 до 330 кВ. Для опор такого типа характерным является расположение проводов по типу «обратная елка» или «бочка». В качестве примера возьмем промежуточную двухцепную свободностоящую опору ПС330-2 с расположением проводов «бочка».

Эквивалентная высота расположения проводов фаз над поверхностью земли примем, равную 12 м; 18,5 м и 26 м. Расстояния от оси опоры до проводов фаз 5,6 м; 8,8 м;

третьей 4,9 м. Графики зависимости приведенных значений напряженности электромагнитного поля от координаты x представлены на рис. 11. Для графического представления распределения коэффициента завышения от высоты расчетной точки над поверхностью земли построены графики, представленные на рис. 12.

Характер распределения коэффициента завышения в диапазоне двух метров от поверхности земли представлены на рис. 13.

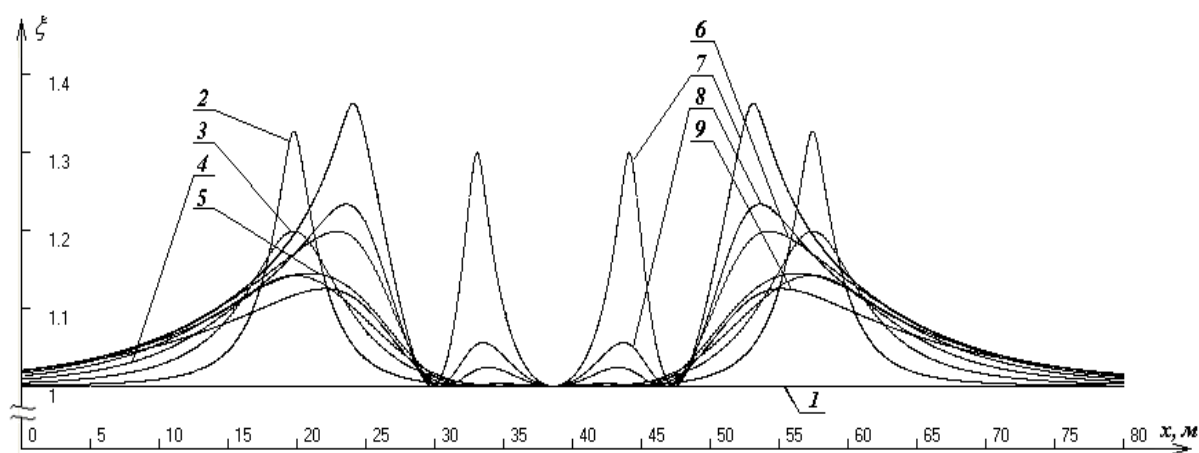


Рис. 12. Распределение коэффициента завышения от высоты над горизонтальной поверхностью земли, при расположении проводов «бочка»: 1) $h=0$ м; 2) $h=3$ м; 3) $h=6$ м; 4) $h=9$ м; 5) $h=12$ м; 6) $h=15$ м; 7) $h=18$ м; 8) $h=21$ м; 9) $h=24$ м

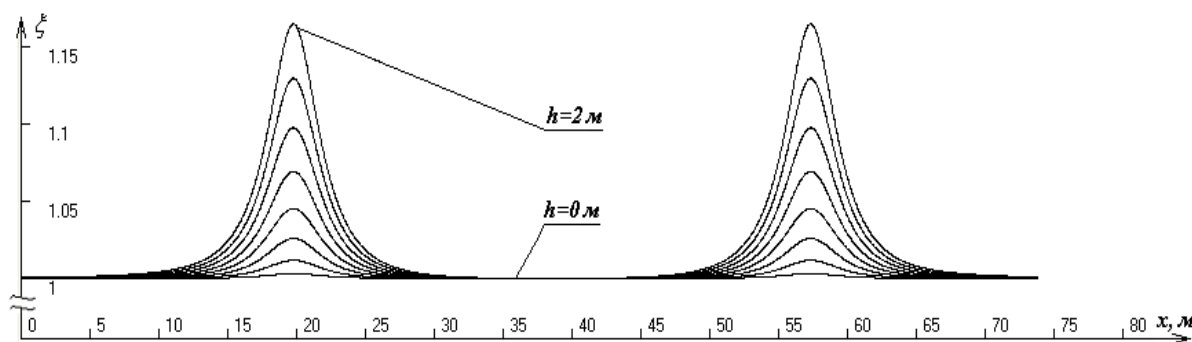


Рис. 13. Коэффициента завышения в зависимости от x , при различных высотах h над поверхностью земли $h \in [0, 2]$ м, с интервалом 25 см, расположении проводов «бочка»

Из них следует, что на данных высотах коэффициент завышения при определенной координате x , изменяется на одну и ту же величину, при изменении высоты - на одно и тоже значение. 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 нахож-

дения обслуживающего персонала в зоне влияния электроустановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 177 с.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛЭП ДЛЯ ТИПОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ОПОРАХ

2. Белицын И.В., Урвачев С.А. Анализ системы санитарно-гигиенического нормирования электростатических полей и электромагнитных полей промышленной частоты и в России Материалы международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» г. Барнаул, 2006 г. - С. 140 – 143.

3. ССБТ. "Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и

требования к проведению контроля на рабочих местах". ГОСТ 12.1.002-84.

4. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191-03.

5. Марон И.А. Дифференциальное и интегральное исчисление в примерах и задачах (функции одной переменной). - М.: Наука, 1970. – 400 с.

6. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Т. 1.-М.: Наука, 1970.–456 с.