

# Магнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи: нормирование, расчет, проектирование

**А.М. Абдурахманов**, директор дирекции по проектированию и реализации инновационных проектов,  
канд. техн. наук<sup>1</sup>

**К.А. Зимин**, начальник центра реализации инновационных проектов<sup>1</sup>

**Н.Б. Рубцова**, зав. отделом, д-р биолог. наук, профессор<sup>2</sup>

**В.Н. Рябченко**, главный технолог АСУ, д-р техн. наук, профессор<sup>1</sup>

**А.Ю. Токарский**, ведущий эксперт<sup>1</sup>, рук. группы<sup>2</sup>, д-р техн. наук, доцент

<sup>1</sup> ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы»

<sup>2</sup> ФГБУ «Научно-исследовательский институт медицины труда» РАМН

e-mail: tokar48@mail.ru

## Ключевые слова:

воздушные и кабельные линии электропередачи, магнитное поле, предельно допустимые уровни, эллиптическая поляризация, санитарный разрыв, охранный зона.

Рассмотрены нормативные документы и указаны предельно допустимые уровни напряженности (индукции) магнитного поля (МП), создаваемого линиями электропередачи. Дан алгоритм расчета напряженности поля, показано, что многофазные источники создают поле эллиптической поляризации, наибольшее действующее значение напряженности которого находится на большой оси эллипса, а расчет результирующего значения по составляющим с применением теоремы Пифагора приводит к погрешности с увеличением реального значения до 41%. На примере линий 500 кВ показаны различия результатов применения этих расчетных методов. Для кабельной линии 500 кВ рассмотрены варианты снижения напряженности МП до допустимых уровней при различных способах ее прокладки.

## 1. Введение

Обеспечение электромагнитной безопасности населения при воздействии электромагнитных полей (ЭМП) частотой 50 Гц составляет значительную проблему, особенно в части воздействия магнитной составляющей (МП), в связи с повышением риска потери здоровья [1]. Воздействию электромагнитных полей промышленной частоты (ПЧ) (50, а в некоторых странах 60 Гц) в различной степени подвергается каждый человек практически ежедневно. Эти поля окружают все действующие установки, участвующие в генерировании, передаче и использовании электрической энергии: электротехническое оборудование электростанций и подстанций, линии электропередачи и распределительные сети в городах и сельских населенных пунктах, промышленное электрооборудование, внутридомовая и внутриквартирная электропроводка,

различные электробытовые приборы. ЭМП ПЧ следует признать самым распространенным неблагоприятным фактором среды обитания человека.

Электромагнитная ситуация на открытых территориях, в жилых зданиях, расположенных вблизи воздушных и кабельных линий электропередачи (ВЛ и КЛ), имеет свои особенности. Это обусловлено тем, что ее интенсивность зависит от многих факторов: класса напряжения, конструкции (для КЛ и ВЛ), габаритов для ВЛ, нагрузки на линию, расстояния до дома, от этажа здания. На интенсивность магнитных полей на открытых территориях и внутри зданий влияет наличие вблизи ВЛ и КЛ протяженных металлических коммуникаций (электроконтактной сети, кабелей, трубопроводов и т.д.), поскольку МП, возникающее вследствие наведения токов на магистрали, распространяется на значительное расстояние [1].

Сложившаяся в нашей стране система обеспечения защиты человека от неблагоприятного влияния ЭМП, в том числе от неблагоприятного влияния ЭМП ПЧ, основана на трех принципах.

*Защита временем.* Она применяется в случаях, когда отсутствует возможность уменьшить интенсивность воздействия ЭМП до предельно допустимых уровней (ПДУ). Этот принцип реализован в гигиенических нормативах ЭМП ПЧ для условий как производственных, так и воздействия на население.

*Защита расстоянием.* Это наиболее эффективный метод. Для условий производственных воздействий он заключается в выведении работающих из зоны повышенного воздействия ЭМП. Он реализуется посредством применения механизации, автоматизации производственных процессов, использования дистанционного управления, манипуляторов, размещения рабочих мест с учетом направления и свойств излучателя. Для условий воздействия на население он реализуется путем максимального удаления мест проживания (постоянного пребывания) населения от источника ЭМП. В частности, для обеспечения защиты населения от ЭП, создаваемых воздушными линиями электропередачи, организуются санитарно-защитные зоны (в настоящее время они называются «санитарные разрывы»).

*Защита с помощью специальных средств.* Средства защиты могут быть коллективными и индивидуальными. В качестве средств коллективной защиты для условий производственных воздействий используются устройства, ограничивающие поступление электромагнитной энергии на рабочие места (экранирование). Для индивидуальной защиты от ЭП ПЧ применяют защитные экраны, экранирующие комплекты, которые не защищают человека от воздействия МП. Основной характеристикой любого средства защиты является степень ослабления ЭП, выражающаяся в коэффициенте экранирования.

Охрана здоровья лиц, профессионально связанных с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП ПЧ, и населения, подвергающегося их воздействию, обеспечивается путем введения гигиенических регламентов, устанавливающих ПДУ электрической и магнитной составляющих ЭМП. Исполнять требования регламентов обязаны все организации вне зависимости от формы собственности.

Гигиеническая регламентация производственных воздействий ЭМП ПЧ осуществляется в соответствии со следующими нормативными документами:

СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» регламентирует условия производственных воздействий ЭП и МП ПЧ;

ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. «Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напря-

женности и требования к проведению контроля на рабочих местах» регламентирует условия производственных воздействий только ЭП ПЧ.

Согласно СанПиН 2.2.4.1191-03 и ГОСТ 12.1.002-84, ПДУ напряженности ЭП на рабочем месте составляет от 5 кВ/м до 25 кВ/м в зависимости от времени (всей рабочей смены до 10 мин). Пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается. По СанПиН 2.2.4.1191-03 ПДУ производственных воздействий МП ПЧ устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия по значениям напряженности (индукции) и составляют для случая воздействия на все тело от 80 А/м (100 мкТл) в течение всего рабочего дня до 1600 А/м (2000 мкТл) для пребывания не более 1 ч за смену.

Защита населения от ЭМП ПЧ осуществляется в соответствии с СанПиН 2.1.2.2801-10 «Изменения и дополнения № 1 к СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях»» и ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 «Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях». ПДУ ЭП для условий воздействия на население составляют от 0,5 кВ/м (внутри зданий и сооружений) до 1,0 кВ/м (на территории населенных мест). ПДУ МП внутри жилых помещений (и приравненных к ним зданий) составляет 5 мкТл (4 А/м), для нежилых помещений тех же зданий и территории жилой застройки ПДУ — 10 мкТл (8 А/м), а для населенной местности вне зоны жилой застройки — 20 мкТл (16 А/м).

Для защиты населения от ЭП ПЧ СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» устанавливает по обе стороны вдоль трассы ВЛ санитарные разрывы:

- 20 м — для ВЛ напряжением 330 кВ;
- 30 м — для ВЛ напряжением 500 кВ;
- 40 м — для ВЛ напряжением 750 кВ;
- 55 м — для ВЛ напряжением 1150 кВ.

С внедрением в настоящее время систем КЛ напряжением 110–500 кВ возрастает необходимость предупреждения возможного неблагоприятного влияния генерируемых МП 50 Гц на население, в первую очередь детей (в связи с отнесением с 2002 г. МП ПЧ к категории «2b» — потенциальных канцерогенов по лейкозам для детей). Прокладываемые КЛ напряжением 110, 220, 330 и 500 кВ, не генерируя в окружающую среду высокоинтенсивные ЭП частотой 50 Гц, выступают мощным источником МП частотой 50 Гц, что является фактором риска.

КЛ, согласно действующему санитарному законодательству, не имеют санитарно-защитной зоны,

а охранная зона (по ГОСТ 12.1.051-90 ССБТ «Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В», п. 2.2 «Охранная зона вдоль подземных кабельных линий электропередачи») устанавливается в виде участка земли, ограниченного параллельными вертикальными плоскостями, отстоящими по обе стороны линии на расстоянии по горизонтали 1 м от крайних кабелей. В связи с вышеизложенным необходимо решать вопросы обеспечения электромагнитной безопасности в зоне прохода не только ВЛ, но и КЛ напряжением 110–500 кВ, в том числе в отношении проектируемых линий.

## 2. Методика расчета напряженности магнитных полей воздушных и кабельных линий электропередачи

Однопроводная ВЛ с током  $\dot{I}$ , провод (рис. 1) которой расположен на высоте  $h$  (для КЛ в земле  $h$  имеет отрицательное значение) по оси  $Y$  и на расстоянии  $a$  от начала координат по оси  $X$ , создает в точке  $D$  окружающего пространства МП, величина напряженности которого определяется по закону полного тока  $\dot{H} = \dot{I} / (2\pi r)$ , где

$$r^2 = (a-x)^2 + (y-h)^2.$$

Из подобия треугольников  $DBA$  и  $H_X H_Y H$  получим:

$$\frac{H_X}{H} = \frac{BD}{r} = \frac{y-h}{r}, \quad \frac{H_Y}{H} = \frac{BA}{r} = \frac{a-x}{r}.$$

Если ВЛ состоит не из одного, а из  $N$  проводов с токами  $\dot{I}_i$ , то с учетом последних выражений составляющие  $\dot{H}_{Xi}$  и  $\dot{H}_{Yi}$  напряженности МП, создаваемые каждым проводом  $i$ , определяются по формулам:

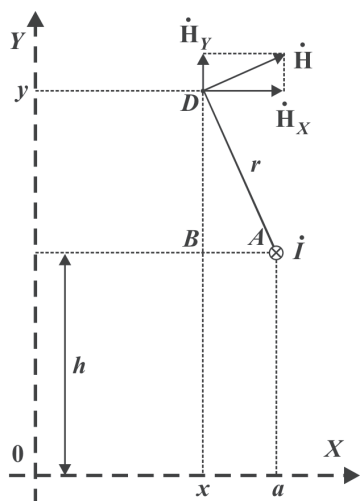


Рис. 1. Напряженность МП однопроводной ВЛ

$$\dot{H}_{Xi} = \frac{\dot{I}_i}{2\pi} \frac{y-h_i}{(a_i-x)^2 + (y-h_i)^2},$$

$$\dot{H}_{Yi} = \frac{\dot{I}_i}{2\pi} \frac{a_i-E}{(a_i-x)^2 + (y-h_i)^2}.$$

Полные значения составляющих напряженности МП в точке  $D$  определяются сложением одноименных составляющих:

$$\dot{H}_{XD} = \sum_{i=1}^N \dot{H}_{Xi}; \quad \dot{H}_{YD} = \sum_{i=1}^N \dot{H}_{Yi}.$$

Если все токи  $\dot{I}_i$  имеют одинаковый аргумент (начальный фазный угол), то поляризация напряженности МП будет линейной и модуль полного вектора  $\dot{H}_D$  находят по выражению для теоремы Пифагора

$H_D = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2}$ . Если аргументы токов  $\dot{I}_i$  не одинаковы, то поляризация МП будет эллиптической.

Если для мгновенных значений  $h_{XD}(t)$  и  $h_{YD}(t)$  напряженности МП в произвольной точке  $D$  описываются выражениями:

$$h_{XD}(t) = \sqrt{2} H_{XD} \sin(\omega t + \varphi_{XD}) \text{ и}$$

$$h_{YD}(t) = \sqrt{2} H_{YD} \sin(\omega t + \varphi_{YD}),$$

то, поделив их на  $\sqrt{2}$ , получим выражения для действующих значений:

$$H_{XD}(t) = H_{XD} \sin(\omega t + \varphi_{XD}) \text{ и}$$

$$H_{YD}(t) = H_{YD} \sin(\omega t + \varphi_{YD}).$$

При  $\varphi_{XD} - \varphi_{YD} = \pm n\pi/2$ , где  $n$  — целое четное число или 0, поляризация МП линейная, при

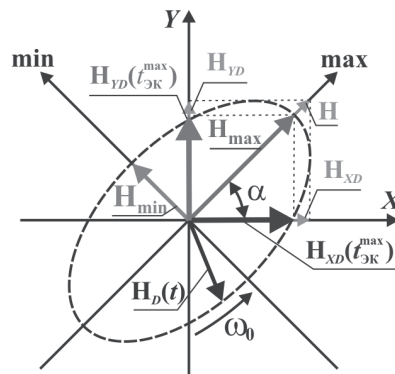


Рис. 2. Эллиптическая поляризация МП в точке  $D$

$\varphi_{XD} \neq \varphi_{YD}$  — эллиптическая, а при  $H_{XD} = H_{YD}$  и  $\varphi_{XD} - \varphi_{YD} = \pm \pi/2$ , где  $n$  — целое нечетное число, — круговая. При эллиптической поляризации [2–5] результирующий вектор  $\mathbf{H}_D(t)$  вращается в пространстве по эллипсу (рис. 2) с переменной угловой скоростью  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{H_{XD} H_{YD} \sin(\varphi_{YD} - \varphi_{XD})}{H_{XD}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_{XD}) + H_{YD}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_{YD})}$$

Прохождение вектором  $\mathbf{H}_D(t)$  экстремумов, т.е. наибольшего  $H_{\max}$  и наименьшего  $H_{\min}$  положений, происходит в момент времени  $t_{\text{ЭК}}$ :

$$t_{\text{ЭК}} = \frac{1}{2\omega} \arctg \left[ (-1) \frac{H_{XD}^2 \sin(2\varphi_{XD}) + H_{YD}^2 \sin(2\varphi_{YD})}{H_{XD}^2 \cos(2\varphi_{XD}) + H_{YD}^2 \cos(2\varphi_{YD})} \right],$$

причем между положениями  $H_{\max}$  при  $t_{\text{ЭК}}^{\max}$  и  $H_{\max}$  при  $t_{\text{ЭК}}^{\min}$  для частоты  $f = 50$  Гц и  $\omega = 2\pi f$  проходит 0,005 с. Коэффициент эллипсности поляризации МП  $K_{\text{Э}} = H_{\min} / H_{\max}$ .

Изменение во времени модуля результирующего вектора напряженности МП определяют по уравнению:

$$H_D(t) = \sqrt{H_{XD}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_{XD}) + H_{YD}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_{YD})}$$

Подставляя в последнее выражение  $t_{\text{ЭК}}^{\max}$  и  $t_{\text{ЭК}}^{\min}$ , получаем значения  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , соответственно.

Если, пренебрегая изменениями во времени, определять действующее значение напряженности

МП по выражению  $H = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2}$ , то мы получим величину  $H$ , которая всегда будет больше  $H_{\max}$  (см. рис. 2).

Значения  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  можно определить по выражению, приведенному в [6]:

$$H_{\max/\min} = \sqrt{\frac{1}{2}(H_{XD}^2 + H_{YD}^2) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(H_{XD}^2 + H_{YD}^2)^2 - 4H_{XD}^2 H_{YD}^2 \sin^2(\varphi_{YD} - \varphi_{XD})}}, \quad (1)$$

либо на комплексной плоскости по алгоритму, данному в [5].

#### МП воздушных линий электропередачи

МП воздушных линий электропередачи рассмотрим на примере ВЛ 500 кВ, размещенной на промежуточной опоре с горизонтальным расположением фаз (рис. 3). Фазы ВЛ 500 кВ выполнены тремя проводами марки АС-400/51 с шагом расщепления  $d = 0,4$  м (радиус расщепления  $R_p = 0,231$  м). Расстояние между центрами средней и крайних фаз  $b = 11,5$  м. Минимальный габарит до земли  $h_r = 11$  м. Величины фазных токов следующие:  $\dot{I}_A = 1$  кА,  $\dot{I}_B = 1e^{-j120^\circ}$  кА и  $\dot{I}_C = 1e^{-j240^\circ}$  кА.

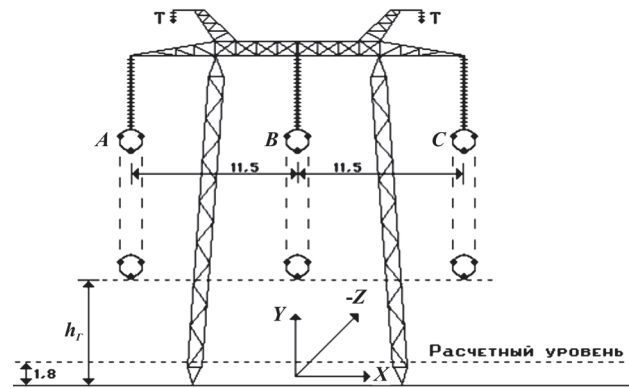


Рис. 3. Схема ВЛ 500 кВ

На рис. 4 показано распределение напряженности МП, создаваемого токами ВЛ 500 кВ на уровне 1,8 м над поверхностью земли в поперечном сечении линии: действующих значений по большей и меньшей оси эллипса поляризации  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , а также действующего значения  $H$ , полученного по выражению

$H = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2}$ . Расчет проводился по программе «ЭМП ВЛ» [7].

На границе санитарного разрыва, отстоящего от оси ВЛ 500 кВ на расстоянии  $x = b + d/2 + 30 = 41,7$  м, напряженность МП составляет  $H_{\max} = H = 1,8$  А/м. Это значительно меньше ПДУ 8 А/м для зоны жилой застройки.

Наибольшее значение напряженности  $H_{\max}$  под ВЛ 500 кВ составляет  $H_{\max} = 15,7$  А/м при  $x = \pm 7,1$  м, а напряженность МП, полученная по выражению

$H = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2}$ , дает значение  $H = 17,6$  А/м. Наибольшее значение напряженности  $H_{\min} = 10,1$  А/м достига-

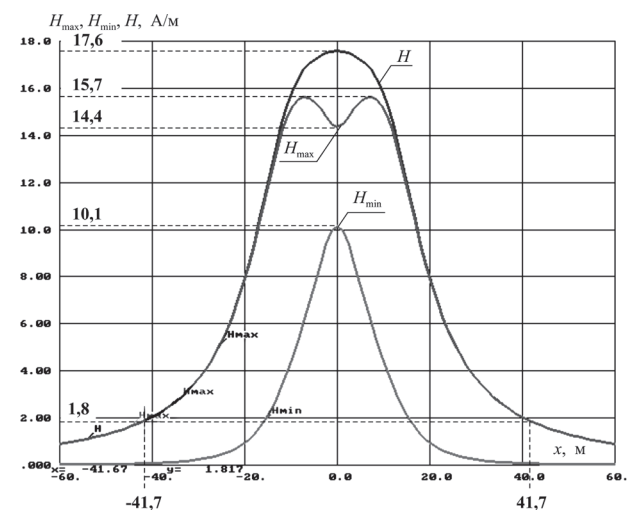


Рис. 4. Распределение МП ВЛ 500 кВ с  $h_r = 11$  м на уровне 1,8 м над землей

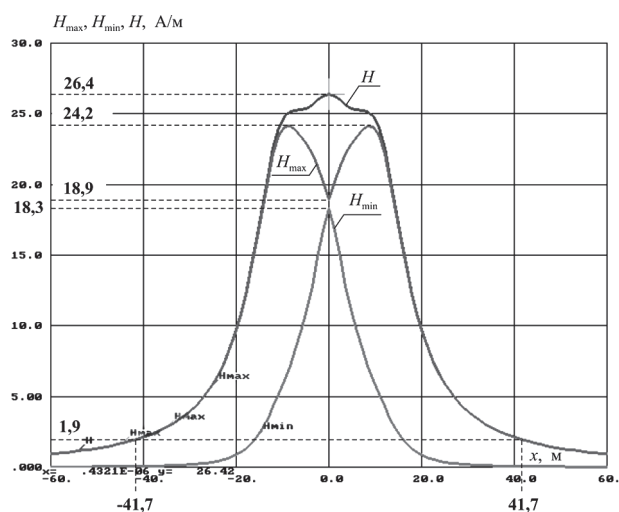


Рис. 5. Распределение напряженности МП, создаваемого токами ВЛ 500 кВ с габаритом  $h_r = 8$  м на уровне 1,8 м над поверхностью земли

ется на оси линии при  $x = 0$  м, когда  $H_{\max} = 14,4$  А/м и коэффициент эллипсности поляризации МП  $K_{\ominus} = 0,70$ . На оси линии погрешность  $H$  относительно  $H_{\max}$  составляет 22%. Для населенной местности напряженность МП под ВЛ и над КЛ имеет ПДУ 16 А/м и, если он соблюдается для  $H_{\max}$ , то для  $H$  превышен на 1,6 А/м.

Чем выше значение  $K_{\ominus}$ , тем больше различие между  $H_{\max}$  и  $H$ . На рис. 5 показано распределение напряженности  $H_{\max}$ ,  $H_{\min}$  и  $H$  МП, создаваемого теми же токами той же ВЛ 500 кВ на уровне 1,8 м над поверхностью земли, но при минимальном габарите  $h_r = 8$  м.

Такой габарит допускается при прохождении ВЛ 500 кВ по ненаселенной и труднодоступной местности, где ПДУ под линией составляет 80 А/м.

В данном случае на оси ВЛ при  $x = 0$  м  $H_{\max} = 18,9$  А/м,  $H_{\min} = 18,3$  А/м,  $K_{\ominus} = 0,97$  и  $H = 26,4$  А/м.  $H$  превышает  $H_{\max}$  на 7,5 А/м, или на 39,7%. Наибольшее значение  $H_{\max} = 24,2$  А/м достигается при  $x = \pm 8,5$  м. На границе санитарного разрыва при  $x = \pm 41,7$  м  $H_{\max} = H = 1,9$  А/м.

Наибольшее превышение реального значения напряженности МП в расчете по выражению для теоремы Пифагора происходит при круговой поляризации поля, когда  $H_{\max} = H_{\min}$  и  $K_{\ominus} = 1,0$ . В этом случае

$$H = \sqrt{2}H_{\max} \text{ и превышение } H \text{ над } H_{\max} \text{ составляет } 41,4\%.$$

#### МП кабельных линий электропередачи

Кабели КЛ, благодаря наличию изоляции токоведущей жилы, могут располагаться в непосредственной близости друг от друга. В земле кабели КЛ расположены либо в плоскости горизонтальной или вертикальной, либо треугольником. При пересече-

нии коммуникаций и проезжей части дорог каждый кабель размещается в полиэтиленовой трубе (ПЭ). Кабели каждой фазы соединяются вдоль КЛ с помощью муфт. Как правило, кабели и муфты в местах кабельных соединений расположены в плоскости горизонтально. Глубина прокладки КЛ составляет 1,5–2,5 м. Как уже говорилось выше, КЛ размещаются в охранной зоне (ОЗ), где ПДУ МП составляет 16 А/м для населенной местности. На границе ОЗ, находящейся на расстоянии 1 м от крайнего кабеля [8], напряженность МП не должна превышать ПДУ 8 А/м для зоны жилой застройки. Рассмотрим также границу охранной зоны (санитарного разрыва), находящуюся на расстоянии 2 м от крайнего кабеля.

МП кабельной линии рассмотрим на примере двух параллельных цепей КЛ 500 кВ, подключенных к одним шинам как в ее начале, так и в конце. Это означает, что токи в одноименных жилах каждой цепи имеют одинаковые значения. КЛ 500 кВ выполнена кабелем Suedkabel марки 2XS(FL)2Y 1×2500RMS/300 290/500 кV с наружным диаметром 150 мм, в местах муфтового соединения используются муфты Suedkabel марки SENDVCB 362/420/550 с наружным диаметром 510 мм.

При пересечении с коммуникациями каждый кабель КЛ 500 кВ прокладывается в ПЭ-трубе диаметром 280 мм с толщиной стенки 20,6 мм. Модуль фазного тока КЛ 500 кВ равен 1 кА для каждой цепи. Нагрузка КЛ симметричная.

На рис. 6 показана схема расположения двух цепей КЛ 500 кВ, проложенных в земле треугольником на глубине  $h = 2,0$  м, расстояние между центрами цепей  $b = 1,0$  м. На рис. 7а дано распределение расчетных значений напряженности  $H_{\max}$ , а на рис. 7б — напряженности  $H$  МП, создаваемого токами КЛ 500 кВ на уровнях 0 м, 0,5 м, 1,5 м и 1,8 м над поверхностью земли.

Как отмечалось ранее, значения  $H$ , полученные без учета изменения во времени составляющих



Рис. 6. Расположение двух цепей КЛ 500 кВ треугольником в земле



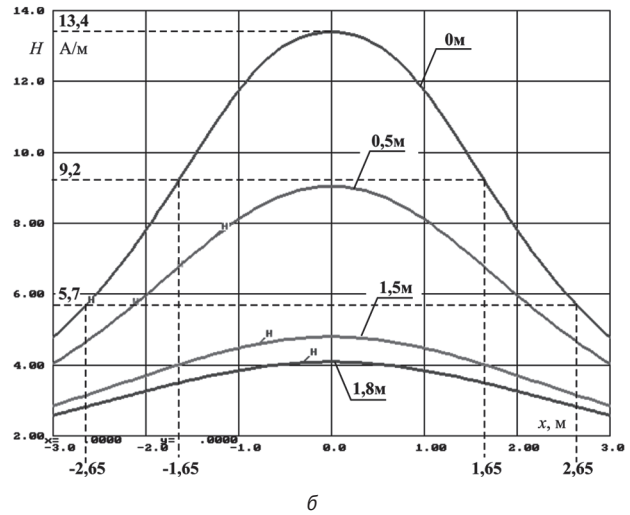
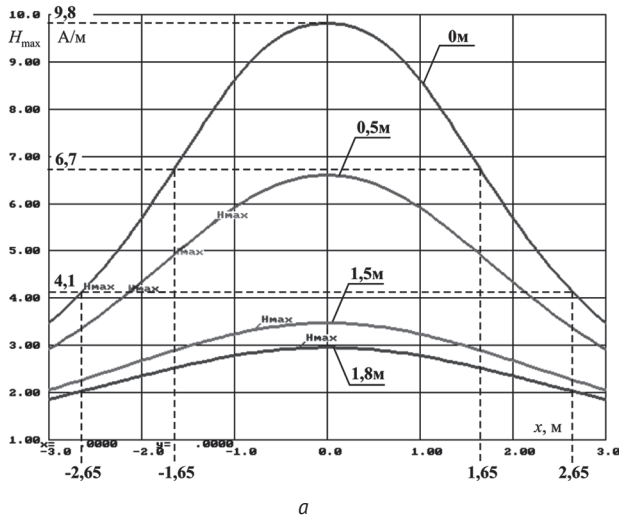


Рис. 7. Распределение напряженности  $H_{\max}$  (а) и  $H$  (б) МП, создаваемого токами КЛ 500 кВ, проходящей в земле треугольником

$H_{XD}(t)$  и  $H_{YD}(t)$ , больше значений  $H_{\max}$ . Для напряженности  $H_{\max}$  на всех расчетных уровнях ПДУ 16 А/м в ОЗ и ПДУ 8 А/м на границе ОЗ 1 м ( $x = \pm 1,715$  м) и тем более 2 м ( $x = \pm 2,715$  м) соблюдаются, а для напряженности  $H$  на поверхности земли на границе 1 м ПДУ 8 А/м превышен. Это может привести к ложному выводу о необходимости прокладки КЛ на большей глубине.

На рис. 8 дана схема прокладки КЛ 500 кВ в ПЭ-трубах, расположенных треугольником на глубине  $h = 2,0$  м с расстоянием между центрами цепей  $b = 1,0$  м. На рис. 9а дано распределение расчетных значений напряженности  $H_{\max}$ , а на рис. 9б — напряженности  $H$  МП, создаваемого токами КЛ 500 кВ на уровнях 0 м, 0,5 м 1,5 м и 1,8 м над поверхностью земли.

При расположении кабелей в ПЭ-трубах треугольником расстояние между осями кабелей увеличи-

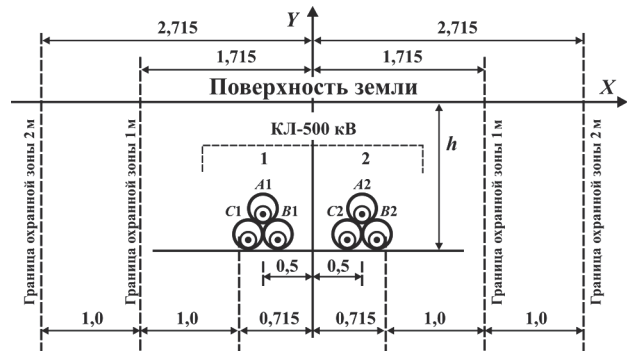


Рис. 8. Расположение двух цепей КЛ 500 кВ в трубах треугольником

вается до значения наружного диаметра трубы, что в сравнении с простым размещением кабелей треугольником приводит к снижению компенсации МП и увеличению результирующей напряженности поля

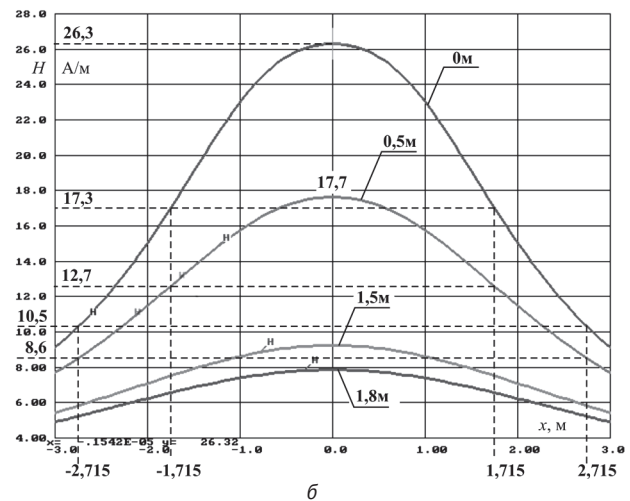
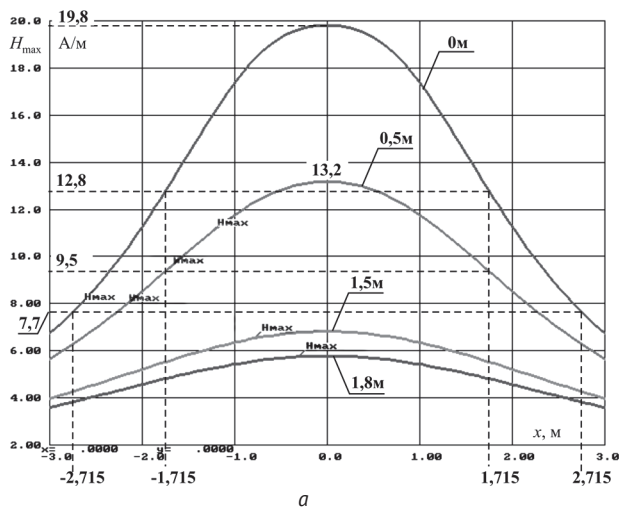


Рис. 9. Распределение напряженности  $H_{\max}$  (а) и  $H$  (б) МП, создаваемого токами КЛ 500 кВ, проходящей в ПЭ-трубах треугольником

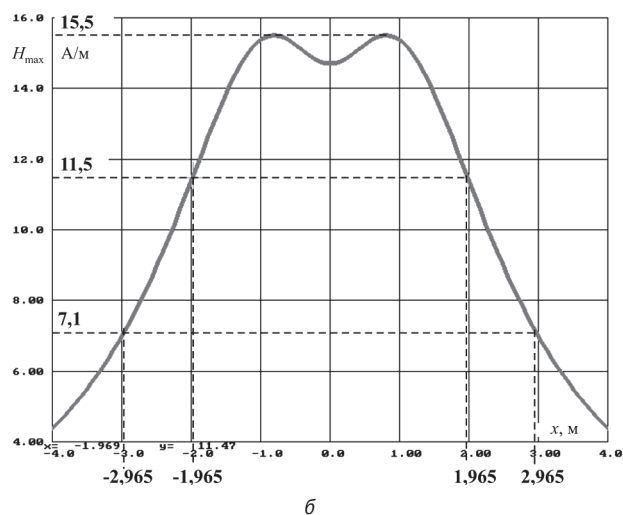
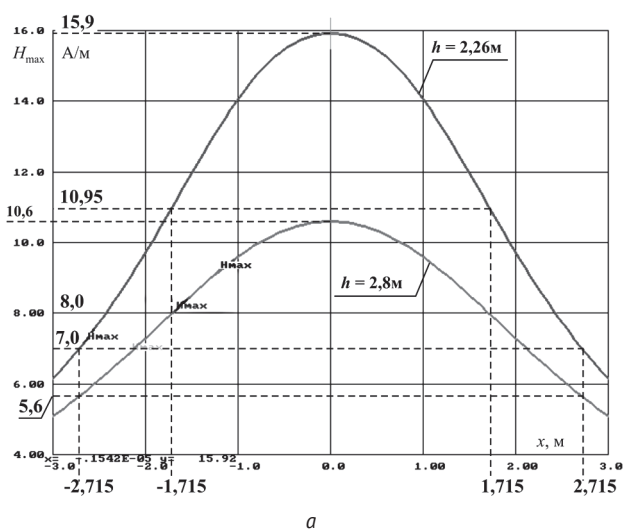


Рис. 10. Распределение напряженности  $H_{\max}$  МП, создаваемого на поверхности земли токами КЛ 500 кВ в ПЭ трубах для  $b = 1,0$  м с  $h = 2,26$  и  $2,8$  м (а) и для  $b = 1,5$  м с  $h = 2,0$  м (б)

в окружающем пространстве. Для поверхности земли (см. рис. 9а, кривая 0 м) напряженность  $H_{\max}$  превышает ПДУ 16 А/м в охранной зоне и ПДУ 8 А/м на границе ОЗ 2 м возможно при глубине  $h = 2,26$  м, но при этом на границе 1 м ПДУ 8 А/м превышает. Соблюдение ПДУ 16 и 8 А/м на границах 1 и 2 м для  $b = 1,0$  м возможно при  $h = 2,8$  м (рис. 10а). Для глубины  $h = 2,0$  м возможно соблюдение ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м только на границе ОЗ 2 м при  $b \geq 1,5$  м (рис. 10б).

При расчете напряженности МП по выражению для  $H$  ПДУ 16 А/м в охранной зоне и ПДУ 8 А/м на границе ОЗ 1 и 2 м превышены на уровнях 0 и 0,5 м, а соблюдаются только на уровнях 1,5 и 1,8 м (см. рис. 9б).

Снижение уровня напряженности  $H_{\max}$  МП над двумя цепями КЛ 500 кВ возможно при увеличении как глубины прокладки  $h$ , так и расстояния между

центрами цепей  $b$ . Для значения  $b = 1,0$  м соблюдение ПДУ 16 А/м в охранной зоне и ПДУ 8 А/м на границе ОЗ 2 м возможно при глубине  $h = 2,26$  м, но при этом на границе 1 м ПДУ 8 А/м превышает. Соблюдение ПДУ 16 и 8 А/м на границах 1 и 2 м для  $b = 1,0$  м возможно при  $h = 2,8$  м (рис. 10а). Для глубины  $h = 2,0$  м возможно соблюдение ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м только на границе ОЗ 2 м при  $b \geq 1,5$  м (рис. 10б).

Добиться соблюдения ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м на границах ОЗ 1 и 2 м можно при одновременном увеличении расстояний  $b$  и  $h$ , например при  $b = 1,2$  м и  $h = 2,75$  м (рис. 11а),  $b = 1,5$  м и  $h = 2,60$  м,  $b = 1,7$  м и  $h = 2,55$  м и  $b = 2,0$  м и  $h = 2,45$  м (рис. 11б).

Если расчеты проводить по напряженности  $H$  без учета временных параметров МП, то соблюдение ПДУ

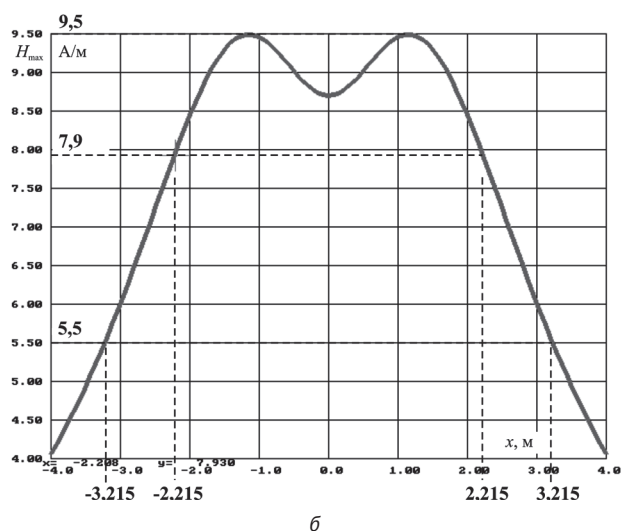
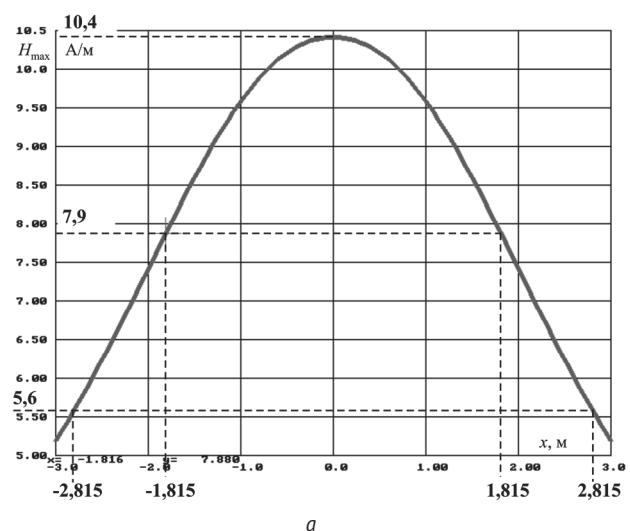


Рис. 11. Распределение напряженности  $H_{\max}$  МП, создаваемого на поверхности земли КЛ 500 кВ при прокладке в трубах с  $b = 1,2$  м,  $h = 2,75$  м (а) и  $b = 2,0$  м,  $h = 2,45$  м (б)

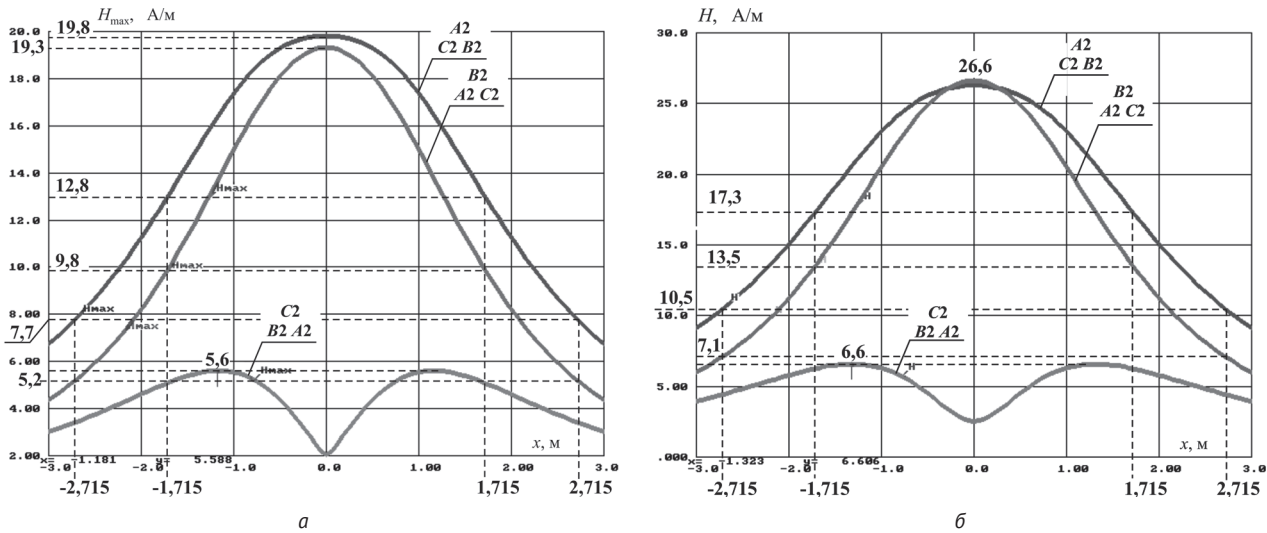


Рис. 12. Распределение напряженности МП, создаваемого на поверхности земли КЛ 500 кВ при прокладке в трубах с  $b = 1,0$  м и  $h = 2,0$  м с чередованием кабелей фаз правой цепи  $A_2 B_2 C_2$  и  $C_2 B_2 A_2$ , рассчитанных для  $H_{max}$  (а) и для  $H$  (б)

16 А/м в ОЗ и 8 А/м на границе ОЗ 2 м будет возможно при  $b = 1,0$  м и  $h \geq 2,7$  м, а ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м на границе ОЗ 1 м — при  $b = 1,0$  м и  $h \geq 3,4$  м. Соблюдение ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м на границе ОЗ 2 м при  $h = 2,0$  м возможно при  $b \geq 3,2$  м.

Добиться соблюдения ПДУ 16 и 8 А/м без увеличения расстояний  $b = 1,0$  м и  $h = 2,0$  м для двух цепей КЛ 500 кВ можно при изменении чередования фаз кабелей одной из цепей. До сих пор рассматривался симметричный вариант чередования кабелей фаз двух

цепей КЛ 500 кВ  $A_1$  левой цепи и  $A_2$  правой.  $C_1 B_1$   $C_2 B_2$

Если оставить без изменения чередование левой цепи рассматриваемой КЛ, а правой изменить на  $C_2$ , то  $B_2 A_2$

напряженность МП резко уменьшится. На рис. 12а показано распределение напряженности  $H_{max}$  МП, создаваемого на поверхности земли токами КЛ 500 кВ

с чередованием фаз  $A_1$  левой цепи, а правой  $A_2$ ,  $C_1 B_1$   $C_2 B_2$

$B_2$  и  $C_2$ .  
 $A_2 C_2$   $B_2 A_2$

При чередовании кабелей фаз правой цепи  $C_2$   $B_2 A_2$

напряженность МП на поверхности земли не превышает  $H_{max} = 5,6$  А/м как в ОЗ, так и за ее пределами. Однако для рассмотренной конструкции нельзя допускать ошибки в чередовании фаз, так как при чередова-

нии кабелей фаз правой цепи  $B_2$  эффект компенсации МП практически отсутствует (см. рис. 12а).  $A_2 C_2$

На рис. 12б показаны кривые распределения напряженности  $H$  МП, создаваемого на поверхности земли

токами КЛ 500 кВ с чередованием фаз  $A_1$ , а также  $C_1 B_1$

$A_2$   $B_2$   $C_2$   $C_2 B_2$ ,  $A_2 C_2$  и  $B_2 A_2$ , рассчитанные без учета временных параметров составляющих по осям координат.

Наибольшие уровни напряженности МП создают муфтовые соединения кабелей с горизонтальным расположением кабелей и муфт. На рис. 13 показана схема муфтового соединения двух цепей КЛ, а на рис. 14 приведен разрез 1-1 муфтового соединения двух цепей КЛ 500 кВ.

К месту муфтового соединения кабели подходят треугольником в земле или трубах, а для соединения переходят в положения, показанные на рис. 14. Оси кабелей и муфт расположены в земле на глубине  $h_m = 1,925$  м.

На рис. 15 дано распределение напряженностей  $H_{max}$  и  $H_{min}$  на поверхности земли над муфтовым соеди-

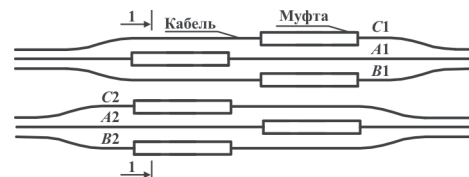


Рис. 13. План-схема муфтового соединения двух цепей КЛ



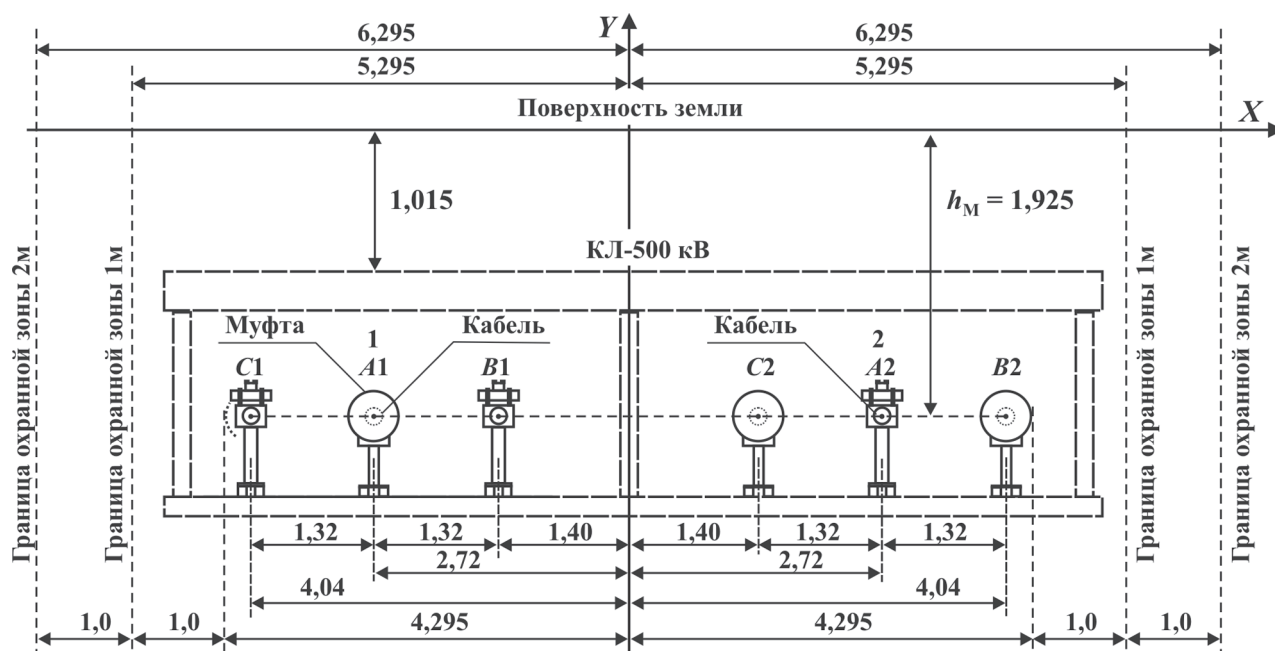


Рис. 14. Разрез 1-1 муфтового соединения двух цепей КЛ 500 кВ

нением КЛ 500 кВ. Наибольшее значение  $H_{\min} = 24,9$  А/м достигается при  $x = \pm 2,86$  м,  $H_{\max} = 59,7$  А/м и  $K_{\text{Э}} = 0,42$ . На границе ОЗ 2 м  $H_{\min} = 2,2$  А/м,  $H_{\max} = 27,6$  А/м и  $K_{\text{Э}} = 0,08$ . Наибольшее значение  $K_{\text{Э}} = 0,89$  находится на оси ординат ( $x = 0$  м), когда  $H_{\min} = 12,5$  А/м, а  $H_{\max} = 14,1$  А/м. Таким образом, наибольшая разница между значениями напряженности МП, рассчитанными для  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , будет в центре муфтового соединения, а наименьшая — на его краях.

На рис. 16 дано распределение напряженности МП над муфтовым соединением КЛ 500 кВ на уровнях 0 м, 0,5 м, 1,5 м и 1,8 м, рассчитанного для  $H_{\max}$  (а) и  $H_{\min}$  (б).

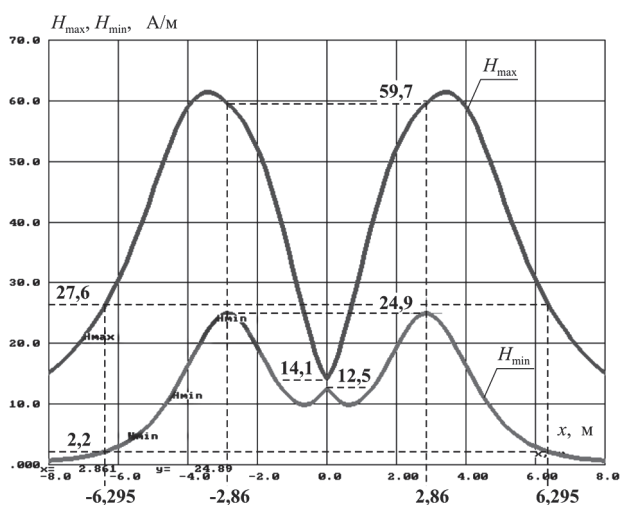


Рис. 15. Распределение  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  на поверхности земли над муфтовым соединением КЛ 500 кВ

Для рассмотренного муфтового соединения двух цепей КЛ 500 кВ ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м даже на границе ОЗ 2 м ( $x = \pm 6,295$  м) многократно превышены на всех уровнях и оно должно либо прокладываться на глубине 8 м и более, либо закрываться дорогостоящим ферромагнитным экраном.

Однако мы рассматриваем двухцепную КЛ, для которой токи в одноименных кабелях фаз всегда одинаковы. Это значит, что для снижения уровней МП компоновка кабелей и муфт соединений каждой цепи треугольником с изменением чередования фаз в треугольнике одной из цепей может оказаться эффективной. Такая компоновка муфтового соединения КЛ 500 кВ показана на рис. 17.

Кабели и муфты каждой цепи располагаются в вершинах равносторонних треугольников со стороной 0,6 м. Расстояние между центрами цепей 1,5 м. Кабели и муфты левой цепи имеют чередование

$A1$ , а правой — чередование  $C2$ . Глубина рас-  
 $C1 B1$   $B2 A2$

положения центров муфты  $A1$  и кабеля  $C2$   $h_B$  — верхний уровень, а центров кабелей  $C1$ ,  $B1$  и муфт  $B2$ ,  $A2$   $h_H$  — нижний уровень. На рис. 18а даны кривые распределения напряженности МП, создаваемого на поверхности земли треугольным муфтовым соединением двух цепей КЛ 500 кВ с указанным чередованием кабелей и муфт цепей для габаритов  $h_B = 1,405$  м,  $h_H = 1,925$  м;  $h_B = 1,605$  м,  $h_H = 2,125$  м и  $h_B = 1,905$  м,  $h_H = 2,425$  м, рассчитанного по  $H_{\max}$  рис. 18б для габаритов  $h_B = 1,405$  м,  $h_H = 1,925$  м;  $h_B = 1,605$  м,

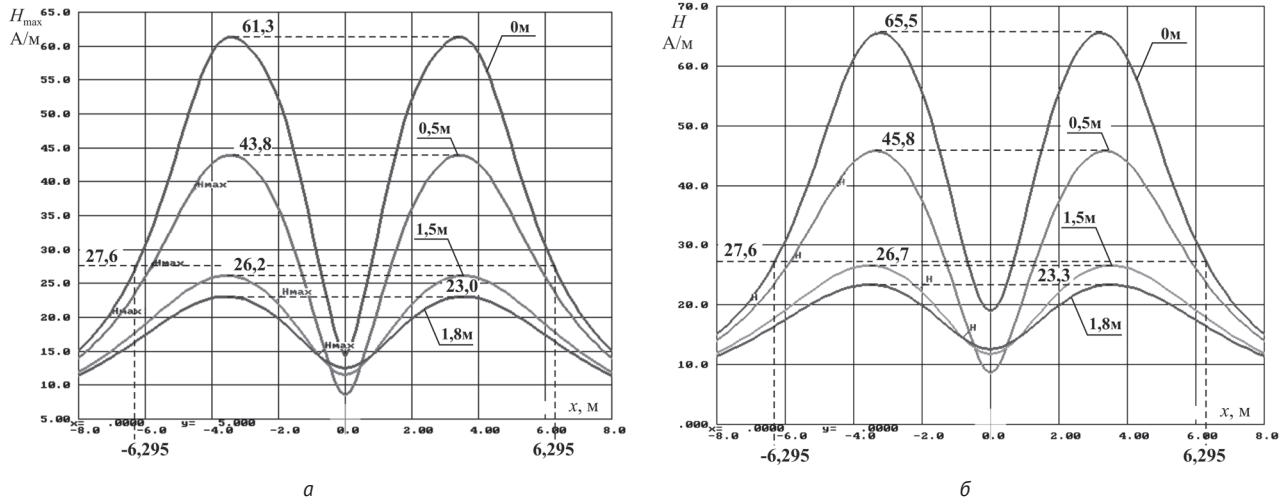


Рис. 16. Распределение напряженности МП над муфтовым соединением КЛ 500 кВ на уровнях 0 м, 0,5 м, 1,5 м и 1,8 м, рассчитанного для  $H_{\max}$  (а) и  $H$  (б)

$h_H = 2,125$  м и  $h_B = 2,055$  м,  $h_H = 2,575$  м, рассчитанного по  $H$ .

Рассмотренное треугольное муфтовое соединение двух цепей КЛ 500 кВ с габаритами  $h_H = 1,925$  м,  $h_B = 1,605$  м дает превышение ПДУ 16 А/м в ОЗ. При габаритах  $h_B = 1,605$  м,  $h_H = 2,125$  м соблюдаются ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м на границе ОЗ 2 м, однако на границе ОЗ 1 м ПДУ 8 А/м превышает. Соблюдение ПДУ в ОЗ и на ее границах 1 и 2 м достигается для габаритов  $h_B = 1,905$  м,  $h_H = 2,425$  м при расчете по  $H_{\max}$  и  $h_B = 2,055$  м,  $h_H = 2,575$  м при расчете по  $H$ .

Разница значений напряженностей МП  $\Delta H = H - H_{\max}$  наименьшая на оси ординат при  $x = 0$  м и увеличива-

ется с удалением от нее. Это объясняется увеличением коэффициента эллипсности  $K_{\text{э}}$  поляризации МП: при  $x = 0$  м  $H_{\max} = 21,3$  А/м,  $H_{\min} = 4,9$  А/м и  $K_{\text{э}} = 0,23$ , при  $x = \pm 1,6$  м  $H_{\max} = 17,0$  А/м,  $H_{\min} = 7,5$  А/м (наибольшее значение  $H_{\min}$ ) и  $K_{\text{э}} = 0,44$ , а при  $x = \pm 4,0$  м  $H_{\max} = 5,0$  А/м,  $H_{\min} = 3,8$  А/м и  $K_{\text{э}} = 0,76$ .

Треугольное муфтовое соединение двух цепей одной КЛ 500 кВ с рассмотренным изменением чередования фаз позволяет при незначительном (0,2–0,5 м) увеличении глубины прокладки добиться полного соблюдения ПДУ в охранной зоне КЛ и на ее границах. Это позволяет избежать установки на них дорогостоящих ферромагнитных экранов.

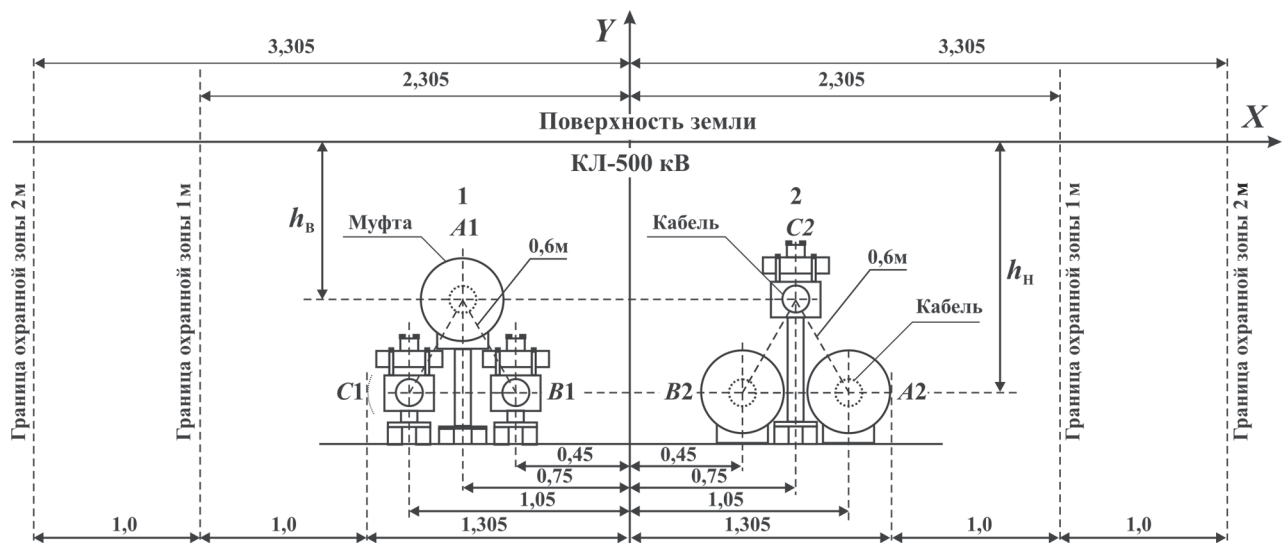


Рис. 17. Расположение треугольником кабелей и муфт двух цепей КЛ 500 кВ с чередованием  $A1$   $C1$   $B1$  кабелей фаз и муфт левой цепи и  $C2$   $B2$   $A2$  правой при стороне равностороннего треугольника 0,6 м и расстоянии между центрами цепей 1,5 м

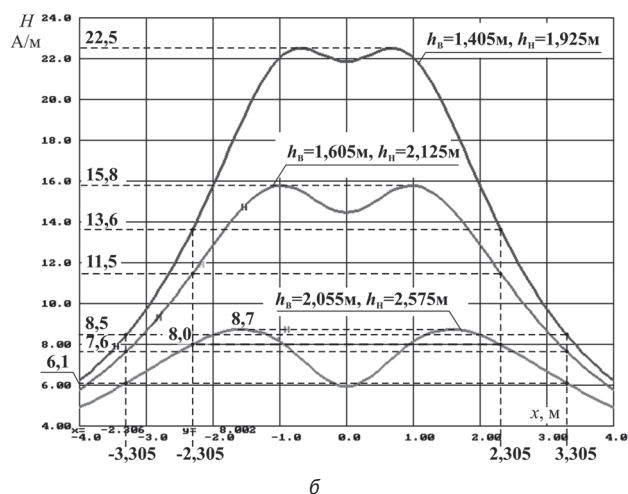
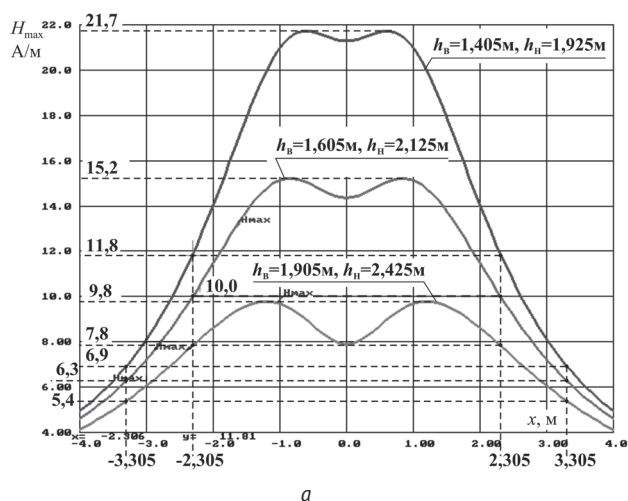


Рис. 18. Распределение напряженности МП, создаваемого на поверхности земли треугольным муфтовым соединением двух цепей КЛ 500 кВ с чередованием кабелей и муфт цепей  $A1$  и  $C2$ ,  $C1 B1$   $B2 A2$ , рассчитанного по  $H_{\max}$  (а) и по  $H$  (б)

### 3. Заключение

Сравнение двух методик расчета уровней МП, создаваемых ВЛ и КЛ, показывает, что расчет действующего значения напряженности МП по выражению

$$H = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2}$$

без учета временных параметров  $H_{XD}(t)$  и  $H_{YD}(t)$  — и ЭП по аналогичному выражению — справедлив для линейной поляризации поля, создаваемого однофазными источниками с одинаковой частотой, в данном случае ПЧ. У МП, создаваемого многофазными, в том числе трехфазными, источниками, поляризация эллиптическая и вектор напряженности  $H_D$  в точке  $D$  пространства описывает эллипс, проходя экстремумы  $H_{\max}$  по большой и  $H_{\min}$  по малой его оси с разницей во времени 0,005 с. Поэтому одновременное совмещение векторов  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , являющихся выражением одного и того же вектора  $H_D$ , но в разные моменты времени, неправомерно и приводит к ошибке. Но если определить напряженность в точке  $D$  по выражению для теоремы Пифагора, то с учетом (1) получается

$$\sqrt{H_{\max}^2 + H_{\min}^2} = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2} = H. \text{ Это показывает, что}$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Седунов В.Н., Демин С.А., Токарский А.Ю. Электромагнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи как фактор риска для здоровья населения // Безопасность в техносфере. — 2011. — № 11. — С. 18–25.
2. Токарский А.Ю., Кацман С.Е. Пространственно-временные характеристики вектора напряженности электрического поля линий электропередачи переменного

напряжения // Моделирование и автоматизация электрических систем. — Рига: Рижск. политехн. ин-т, 1981. — С. 53–60.

неправомерно использовать вторую часть последнего уравнения для расчета действующего значения напряженности МП эллиптической поляризации, при котором погрешность в сторону увеличения от истинного значения напряженности может достигать 41,4%.  
Представленные выше данные показывают, что добиться одновременного соблюдения ПДУ 16 А/м в ОЗ и 8 А/м на ее границе 1 м можно только при значительной глубине прокладки КЛ, когда напряженность МП на этой границе становится равной 8 А/м, а в ОЗ намного меньше 16 А/м. Такое неоправданное заглубление КЛ не только дорого и трудоемко, но и отрицательно сказывается на работе и обслуживании самой КЛ. ОЗ служит для охраны КЛ от человека и его деятельности. Логично ввести с обеих сторон для КЛ 110 — 500 кВ санитарные разрывы шириной 2 м, при которых удачно сочетается соблюдение ПДУ 16 и 8 А/м, предназначенных для защиты человека от МП КЛ. Применение муфтовых соединений с расположением кабелей и муфт в углах равностороннего треугольника и правильное измененное чередование фаз при незначительном увеличении глубины их прокладки дает возможность соблюдать все ПДУ без установки ферромагнитных экранов.

3. Дикой В.П., Токарский А.Ю. Особенности расчета и измерения трехмерных магнитных полей, создаваемых электроустановками // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Экология энергетики 2000». М.: Изд. МЭИ, 2000. — С. 415–418.

4. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Иостсон Ю.А., Мисриханов М.Ш. Методы расчета и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты // Тр. ИГЭУ. — Вып. IV. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — С. 215–223.
5. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. — М.: Наука, 2010. — 868 с.
6. Кац Р.А., Перельман Л.С. Расчёт электрического поля трехфазной линии электропередачи // Электричество. — 1978. — № 1. — С. 16–19.
7. Мисриханов М.Ш., Иостсон Ю.А., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Электромагнитные параметры воздушных линий электропередачи (ЭМП ВЛ). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613744, 27.10.2006 // Программы для ЭВМ, базы данных и топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и торговым знакам. — № 1 (58). — М.: ФГУ ФИПС, 2007.
8. ГОСТ 12.1.051-90 ССБТ «Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В».

## Overhead and Underground Power Lines' Magnetic Fields: Rationing, Calculation, Design

**A.M. Abdurakhmanov**, Director of Innovative Projects' Design and Implementation Management, Ph.D. of Engineering, OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System

**K.A. Zimin**, Chief of Innovative Projects' Realization Center, OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System

**N.B. Rubtsova**, Head of Department, Doctor in Biology, Professor, FSBI Research Institute of Occupational Health of RAMS

**V.N. Ryabchenko**, Chief Technologist of ACS, Doctor of Engineering, Professor, OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System

**A.Yu. Tokarsky**, Leader Expert (OJSC Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System), Team Leader (FSBI Research Institute of Occupational Health of RAMS), Doctor of Engineering, Associate Professor

*Normative documents related to magnetic field (MF) created by power lines have been considered and maximum permissible levels of MF intensity (induction) have been specified. The field intensity calculation algorithm is given. It is shown that multiphase sources create an elliptic polarization field, which intensity's greatest operating value is on ellipse's big axis, and calculation of resultant value on components with Pythagorean theorem application leads to an error with real value increase to 41%. Distinctions of results of these calculation methods' application have been shown on the example of 500 kV lines. Options of MF intensity decrease to admissible levels have been considered for 500 kV underground power line at various ways of its laying.*

**Keywords:** overhead and underground power lines, magnetic field, maximum permissible levels, elliptic polarization, sanitary gap, security zone.

### Объявление

#### о начале проведения открытого конкурса на право получения лицензионного доступа к базам данных международных индексов научного цитирования

Министерство образования и науки Российской Федерации сообщает о начале конкурсного отбора Государственной публичной научно-технической библиотекой (ГПНТБ) России российских научных и научно-образовательных организаций на право получения лицензионного доступа к крупнейшим реферативным и наукометрическим базам данных международных индексов научного цитирования — Web of Science и Scopus.

Ежедневно обновляемые базы данных Web of Science и Scopus включают списки всех библиографических ссылок, встречающихся в публикации, что позволяет в краткие сроки получить самую полную библиографию по интересующей теме.

Документы для участия в Конкурсе необходимо представить до 24 мая 2014 г.

Информация о порядке и условиях проведения конкурсного отбора организаций размещена на сайте ГПНТБ России по электронному адресу [www.gpntb.ru](http://www.gpntb.ru).