

# ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ИСКАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕЛОМ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАЗЛИЧНОМ ПОЛОЖЕНИИ РУК В ПРОСТРАНСТВЕ

*И.С. Окраинская*

Показана возможность защиты персонала от вредного воздействия электрического поля применением мобильных устройств контроля уровня электрического поля, размещаемых в непосредственной близости от тела человека. Приведены результаты численного моделирования изменения искажения внешнего равномерного электрического поля телом человека при различных рабочих позах, связанных с движением прямых и согнутых рук. Расчет проводился в инженерном пакете конечно-элементного анализа Ansys. Показано, что при подъеме рук происходит снижение коэффициента искажения электрического поля в точке, расположенной в 2 см вертикально вверх над головой человека. При этом изменение напряженности электрического поля при подъеме одной прямой руки на угол от 0 до 180° составляет 37 % относительно значения, полученного для 0°, а при подъеме двух выпрямленных рук – около 63 %. Изменение коэффициента искажения электрического поля при подъеме согнутых рук на угол от 0 до 100° относительно туловища составляет не более 13 %. Полученные данные необходимы для проектирования мобильных устройств контроля уровня электрического поля, размещаемых в защитной каске на голове человека.

*Ключевые слова:* электрическое поле, коэффициент искажения электрического поля, тело человека, рабочая поза.

## Введение

Электроустановки сверхвысокого напряжения являются источником мощного электрического поля частотой 50 Гц, неравномерно распределенного в пространстве. Напряженность электрического поля в отдельных точках открытого распределительного устройства достигает 30 кВ/м, что существенно превышает предельно допустимый уровень даже для кратковременного воздействия [1]. Обслуживание этих электроустановок связано с необходимостью постоянного перемещения работника в этом поле во время осмотров оборудования и проведения оперативных переключений. Экранирующие устройства, которыми оборудуются электроустановки, лишь частично защищают персонал, а применение индивидуальных экранирующих костюмов создает дополнительные неудобства для персонала, связанные с затратами времени на переодевание и некоторым дискомфортом или даже перегревом в теплое время года. Гораздо более эффективным и удобным было бы использование «защиты временем». Этот метод предполагает контроль приведенного времени пребывания работника в зоне влияния электрического поля (области пространства, где напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м) [2]. Это время ( $T_{пр}$ ) эквивалентно по биологическому эффекту пребыванию в электрическом поле ниже границы нормируемой напряженности.

$$T_{пр} = 8 \left( \frac{t_{E_1}}{T_{доп E_1}} + \frac{t_{E_2}}{T_{доп E_2}} + \dots + \frac{t_{E_n}}{T_{доп E_n}} \right), \quad (1)$$

где  $t_{E_1}, t_{E_2}, \dots, t_{E_n}$  – время нахождения в зоне электрического поля с напряженностью  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , ч;

$T_{доп E_1}, T_{доп E_2}, \dots, T_{доп E_n}$  – предельно допустимое время пребывания в зонах с напряженностью  $E_1, E_2, \dots, E_n$ .

Контроль приведенного времени пребывания, в свою очередь, предполагает измерение напряженности электрического поля в точке нахождения человека и времени, проведенного в этой точке. Современная элементная база позволяет создавать устройства для такого контроля, имеющие достаточно малый вес, объем и энергопотребление, чтобы их применение на производстве не создавало бы дополнительных неудобств для работника и было бы экономически оправдано.

Основной проблемой при создании таких устройств является то, что тело человека состоит из тканей, имеющих высокую проводимость, и, как любой проводник, вызывает искажение электрического поля. Действующий нормативный документ [2] устанавливает предельно допустимые уровни для неискаженного телом человека электрического поля. Следовательно, встает проблема соотношения показаний мобильного устройства и напряженности поля в свободном пространстве.

Наиболее удобным местом для размещения датчика такого мобильного устройства является каска (рис. 1).

Работник, допущенный к выполнению работ на открытом распределительном устройстве или вблизи линии электропередачи, всегда в обязательном порядке обеспечивается каской вне зависимости от характера работы и времени года. В этом случае датчик мобильного устройства размещается на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности головы человека в зоне существенного искажения электрического поля.



а)



б)

Рис. 1. Устройство контроля уровня воздействия электрического поля на работника (разработка авторов): а – приемная часть устройства, содержащая датчик; б – основная часть устройства

### Моделирование искажения электрического поля телом человека

Электромагнитное поле промышленной частоты удовлетворяет условию квазистационарности поля, при выполнении которого можно пренебречь превращением одних типов полей в другие и рассматривать отдельно влияние на объекты электрического и магнитного полей.

Решение любой задачи по расчету электрических полей может быть произведено аналитически или с использованием численных методов.

Геометрия тела человека, рассматриваемого в качестве одного из элементов расчетной схемы, делает задачу слишком сложной для использования аналитических методов. Поэтому в данной работе был использован численный метод расчета электрических полей.

В настоящее время существует множество численных методов расчета электрического поля. В их число входит метод конечных элементов. Его популярность обусловлена приемлемой точностью решения, возможностью описания криволинейных границ области любой сложности, легкостью учета граничных условий различных типов и расчета поля с объемным зарядом, а также автоматическим расчетом значений потенциала во всех узлах и, следовательно, быстротой вычисления потенциала и напряженности в любой точке расчетной области.

Расчетная трехмерная модель задачи (рис. 2) включает область воздушной среды в виде параллелепипеда, в которой формируется внешнее по отношению к человеку равномерное вертикальное электрическое поле. Параллелепипед имеет размеры: длина и ширина – 2 м, высота – 3 м. Внутри этой области размещается трехмерная модель тела человека. Ноги модели тела человека могут либо находиться на одном уровне с нижней гранью расчетной области, либо отделяться от нее специальной вставкой, имеющей различную толщину и диэлектрические свойства, а также по форме соответствующей нижней части стопы модели тела человека. Эта вставка предназначена для моделирования обуви (см. рис. 2).

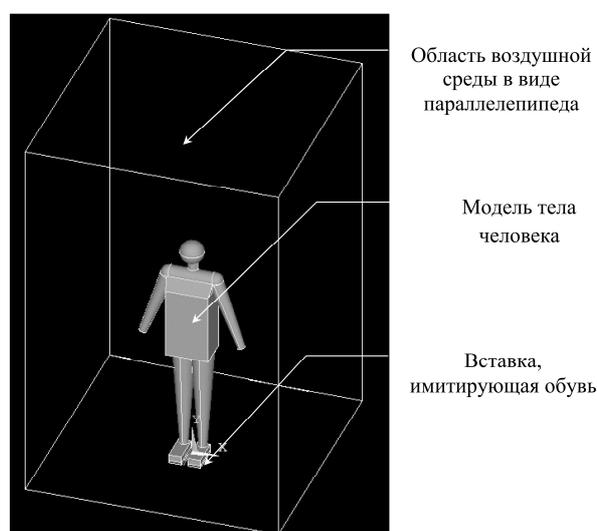


Рис. 2. Расчетная область

Подробное описание модели, анализ влияния на степень искажения электрического поля телом человека антропометрических характеристик модели, изменение степени искажения электрического поля в случае наличия связи с землей или изоляции модели тела человека от земли при помощи вставки, имитирующей обувь, а также сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента приведено в [3]. Расчет проводился в инженерном пакете конечно-элементного анализа Ansys.

### Результаты расчета изменения степени искажения электрического поля телом человека при различном положении рук в пространстве

Степень искажения электрического поля оценивалась по величине коэффициента искажения электрического поля, определяемого по формуле

$$K_{иск} = \frac{E_{иск.поля}}{E_{неиск.поля}}, \quad (1)$$

где  $E_{иск.поля}$  – модуль вектора напряженности электрического поля над головой человека, иска-

женного его телом;  $E_{\text{неиск.поля}}$  – модуль вектора напряженности внешнего равномерного электрического поля до введения тела человека (неискаженного). Коэффициент искажения рассчитывался на разном расстоянии от верхней точки головы человека.

Помимо антропометрических характеристик и параметров обуви влияние на искажение электрического поля телом человека будет оказывать рабочая поза и, в частности, положение рук в пространстве. Были проведены расчеты изменения степени искажения электрического поля в зависимости от положения в пространстве одной или обеих рук модели тела человека. Расчет проводился для модели со средними параметрами роста, размера грудной клетки и головы (табл. 1 и 2).

Модель построена объединением простых геометрических фигур. В ней исключены из рассмотрения такие детали как пальцы рук и ног человека, уши, глаза, губы, нос и прочие подробности в отображении головы, так как их описание существенно усложнило бы и без того достаточно сложную геометрию модели, а также, по мнению автора, не привело бы к повышению точности расчета.

На рис. 3 приведены изображения модели тела человека при подъеме одной (рис. 3, а–г) или двух (рис. 3, д–ж) прямых рук.

Результаты расчета коэффициента степени искажения электрического поля телом человека при изменении положения в пространстве его рук представлены в табл. 3. Расчет выполнен для точ-

ки, находящейся на расстоянии 2 см вверх по вертикали от поверхности головы.

На основании данных табл. 3 можно отметить, что по мере подъема одной или двух рук вверх коэффициент искажения уменьшается, причем наибольшее изменение происходит при подъеме двух рук.

Количественное изменение коэффициента искажения электрического поля при движении рук модели относительно положения, при котором руки опущены вертикально вниз, приведено в табл. 4.

Согласно этим данным изменение коэффициента искажения электрического поля при подъеме одной руки на угол от 0 до 180° составляет до 37 % относительно значения, полученного для 0°, а при подъеме двух рук – до 63 % как для человека, ноги которого имеют непосредственную связь с землей, так и для человека, изолированного от земли обувью.

Следует отметить, что на территории открытого распределительного устройства в режиме нормальной эксплуатации оборудования, то есть в то время, когда все оборудование находится под напряжением, крайне редко выполняются работы, требующие вертикального подъема вверх сразу двух рук работника и длительность их мала. Автор считает, что погрешность, вносимая различным положением рук в пространстве, не будет оказывать существенного влияния на оцениваемое прибором индивидуального учета приведенное время нахождения в электрическом поле.

Таблица 1

Изменяемые вертикальные размеры тела человека

№	Наименование измерения	Значение измерения, соответствующее телу человека среднего размера
1	Рост, мм	1720
2	Вертикальный размер туловища, мм	610
3	Высота плеча, мм	1424
4	Высота промежности, мм	816

Таблица 2

Неизменяемые размеры тела человека в модели

№	Наименование измерения	Параметры модели тела человека
1	Радиус поперечного сечения шеи, мм	40
2	Радиус верхней части грудной клетки, представленной половиной цилиндра, мм	60
3	Радиус плечевого сустава, представленного сферой, мм	61
4	Длина руки, мм	600
5	Радиус верхней части руки, представленной усеченным конусом, мм	59
6	Радиус нижней части руки, представленной усеченным конусом, мм	30
7	Радиус нижней части ноги, представленной усеченным конусом, мм	40
8	Длина стопы, представленной параллелепипедом, мм	240
9	Ширина стопы, представленной параллелепипедом, мм	150
10	Высота стопы, представленной параллелепипедом, мм	50

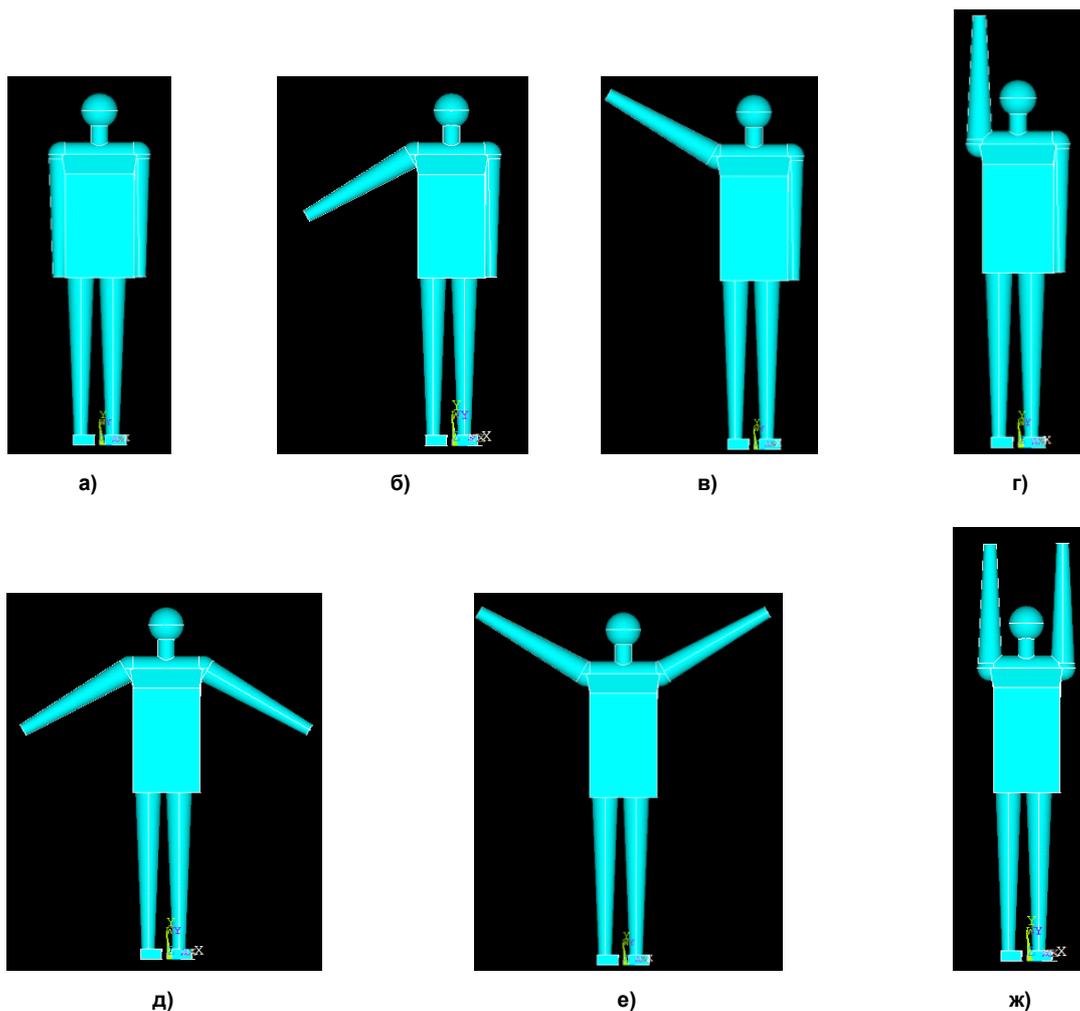


Рис. 3. Модели тела человека: а – с опущенными вдоль тела руками; б – с одной рукой, поднятой под углом  $60^\circ$ ; в – с одной рукой, поднятой под углом  $120^\circ$ ; г) с одной рукой, поднятой под углом  $180^\circ$ ; д) с двумя руками, поднятыми под углом  $180^\circ$ ; е) с двумя руками, поднятыми под углом  $60^\circ$ ; ж) с двумя руками, поднятыми под углом  $120^\circ$

Таблица 3  
 Результат расчета коэффициента искажения электрического поля на расстоянии 2 см от поверхности головы человека при подъеме прямых рук на различный угол

Угол подъема руки, градус	Коэффициент искажения электрического поля ( $K_{иск}$ )			
	Человек заземлен		Человек изолирован от земли	
	Поднимается одна рука	Поднимаются обе руки	Поднимается одна рука	Поднимаются обе руки
0	10,5	10,5	9,1	9,1
20	10,0	10,3	9,0	8,9
40	9,9	9,9	8,9	8,7
60	9,8	9,8	8,7	8,5
80	9,6	9,3	8,7	8,1
100	9,4	9,0	8,3	7,5
120	9,1	8,4	8,0	7,1
140	8,7	7,6	7,6	6,4
160	8,0	6,2	7,0	5,4
180	6,6	3,9	5,7	3,4

Таблица 4

Изменение коэффициента искажения электрического поля над головой человека при подъеме одной или двух прямых рук относительно положения, при котором руки опущены вертикально вниз

Угол подъема руки, градус	Изменение коэффициента искажения электрического поля ( $\Delta K_{иск}$ ), %			
	Человек заземлен		Человек изолирован от земли	
	Поднимается одна рука	Поднимаются обе руки	Поднимается одна рука	Поднимаются обе руки
20	4,76	1,90	1,10	2,20
40	5,71	5,71	2,20	4,40
60	6,67	6,67	4,40	6,59
80	8,57	11,43	4,40	10,99
100	10,48	14,29	8,79	17,58
120	13,33	20,00	12,09	21,98
140	17,14	27,62	16,48	29,67
160	23,81	40,95	23,08	40,66
180	37,14	62,86	37,36	62,64

Таблица 5

Результат расчета коэффициента искажения электрического поля на расстоянии 2 см от поверхности головы человека при подъеме согнутых в локтях рук на различный угол относительно туловища

Угол подъема рук, градус	Коэффициент искажения электрического поля ( $K_{иск}$ )	Изменение коэффициента искажения электрического поля ( $\Delta K_{иск}$ ), %
0	10,02	–
20	9,93	0,97
40	9,76	2,64
60	9,53	4,91
80	9,08	9,44
100	8,73	12,92

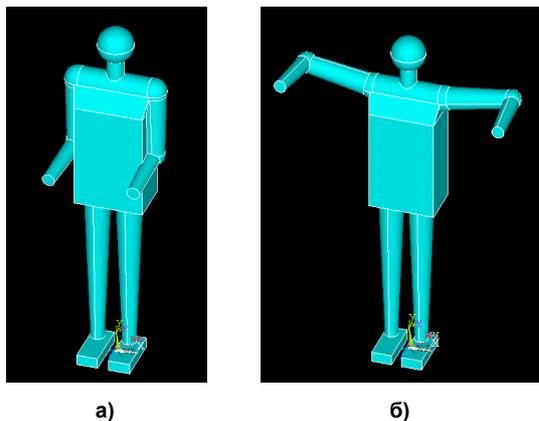


Рис. 4. Модели тела человека: а – с согнутыми в локтях и опущенными вдоль тела руками; б – с двумя руками, согнутыми в локтях и поднятыми относительно туловища на угол 100°

Значительно чаще при выполнении оперативным персоналом работ на территории открытого распределительного устройства встречается рабочая поза с согнутыми руками (рис. 4). Был выполнен расчет изменения коэффициента искажения при подъеме согнутых рук на угол до 100° относительно туловища (рис. 4, табл. 5). Подъем согну-

тых под углом 90° рук на больший угол не является физиологичным.

Расчет проводился для человека, ноги которого имеют непосредственный контакт с землей. Согласно полученным данным, изменение коэффициента искажения электрического поля при подъеме согнутых рук на угол от 0 до 100° составляет не более 13 % относительно значения, полученного для рук, опущенных вниз.

#### Заключение

Численное моделирование искажения электрического поля телом человека позволило получить следующие результаты.

При подъеме рук происходит снижение коэффициента искажения электрического поля в точке, расположенной на расстоянии 2 см вертикально вверх над головой человека. При этом изменение напряженности электрического поля при подъеме одной прямой руки на угол от 0 до 180° составляет до 37 % относительно значения, полученного для рук, опущенных вниз, а при подъеме двух выпрямленных рук – до 63 %. Изменение коэффициента искажения электрического поля при подъеме согнутых рук на угол от 0 до 100° относительно туловища составляет не более 13 %.

### Литература

1. Общая характеристика напряженности электрического поля на ОРУ 500 кВ / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, А.В. Бабин и др. // *Электрические станции*. – 2006. – № 1. – С. 45–48.

2. СанПиН 2.2.4.1191-03 Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях. – М.: Мини-

стерство здравоохранения Российской Федерации, 2003. – 17 с.

3. Искажение электрического поля телом человека / И.С. Окраинская, А.И. Сидоров, С.П. Гладышев, Ш.Н. Хусайнов // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика»*. – 2012. – № 16 (275). – С. 47–55.

**Окраинская Ирина Сергеевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679626, e-mail: okrainskaya@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 16 сентября 2013 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2014, vol. 14, no. 1, pp. 35–40**

---

## CHANGE OF COEFFICIENT OF ELECTRIC FIELD DISTORTION BY HUMAN BODY AT VARIOUS POSITION OF ARMS IN SPACE

*I.S. Okrainskaya, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, okrainskaya@yandex.ru*

The article deals with personnel protection from electric field damaging effect by using of mobile devices that control electric field level and are placed just beside of human body. The author is giving the results of numerical simulation of how external regular electric field is distorted by human body at various working poses associated with movements of extended and bent arms. The calculation was performed in engineering package of finite element analysis Ansys. The article states that lifting up arms decreases electric field distortion coefficient at the point located in 2 cm upward vertically above the head. At that, lifting up one extended arm at 0...180° angle changes electric field intensity by 37 % relative to value for 0°, and lifting up both extended arms changes intensity by 63 %. Lifting up bent arms at 0..100° angle relative to body changes coefficient of electric field distortion by 13 % max. Findings are essential for designing of mobile devices that control electric field level and are built into protective helmets.

*Keywords: electric field, coefficient of distortion, human body, working pose.*

### References

1. Okrainskaya I.S., Sidorov A.I., Tryapitsyn A.B., Babin A.V., Goldshtein M.I., Blinkova L.L., Syzrantseva E.A. General Characteristic of Electric Field Intensity of 500 kV Outdoor Switchgears, *Power Technology and Engineering*, 2006, vol. 40, no 2, pp. 127–130.

2. SanPin 2.2.4.1191-03 *Electromagnitnye polya v proisvodstvennykh usloviyach* [Sanitary Rules and Norms. 2.2.4.1191-03 Electromagnetic Fields in Industry Conditions]. Moscow, the Ministry of Health of the Russian Federation, 2003. 17 p.

3. Okrainskaya I.S., Sidorov A.I., Gladyshev S.P., Khusainov Sh.N. [Distortion of Uniform Electric Field by Human Body]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, iss. 17, no. 16 (275), pp. 47–55. (in Russ.)

*Received 16 September 2013*