

УДК 331.45:621.311.4-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА УСЛОВИЯ ТРУДА ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Бедретдинов Р.Ш.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

В статье выполнен анализ возможного воздействия электрооборудования цифровой трансформаторной подстанции (ЦТП) 10/0,4 кВ на условия труда обслуживающего персонала. Шум, электромагнитное поле и опасность поражения электрическим током – основные факторы, влияющие на производительность труда и здоровье человека. Дано описание источников вредного воздействия ЦТП. Проведена оценка уровня шума на рабочем месте. Выполнен расчет напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых электрооборудованием. Определен емкостной ток, проходящий через человека в землю, вблизи действующей электроустановки переменного тока. Расчеты проведены для сухих трансформаторов мощностью 400 кВА и тиристорных регуляторов напряжения, установленных в нейтрали первичных обмоток трансформатора. Результаты исследований показали, что работа ЦТП не ухудшает условий труда обслуживающего персонала. Полученные значения шума и электромагнитного поля не превышают нормируемых значений согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» и СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, шум, электромагнитное поле, магнитное поле, электрический ток, вредное воздействие, условия труда

STUDY THE IMPACT OF DIGITAL TRANSFORMER SUBSTATION WORKING CONDITIONS CREW

Sosnina E.N., Masleeva O.V., Pachurin G.V., Bedretdinov R.S.

*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev»,
Nizhny Novgorod, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

This article gives an analysis of the possible impact of digital electrical transformer substation (TSC) 10/0,4 kV on the working conditions of staff. Noise, electromagnetic fields and the risk of electric shock – the main factors affecting the productivity and health. The description of the sources of the harmful effects of TSC. The estimation of the noise level in the workplace. The calculation of the electric and magnetic fields produced by electrical equipment. Defined capacitive current passing through the human into the ground near the existing electrical alternating current. The calculations were performed for dry-type transformers 400 kVA and thyristor voltage regulators of the neutral primary windings of the transformer. The results showed that the work of TSC does not worsen working conditions of staff. The obtained values of noise and electromagnetic fields do not exceed standardized values according to SN 2.2.4/2.1.8.562-96 «Noise in the workplace, in residential and public buildings and residential areas» and SanPiN 2.2.4.1191-03 «Electromagnetic fields in working conditions».

Keywords: transformer substation, noise, electromagnetic field, magnetic field, electric current, adverse effects, working conditions

Разработка и внедрение цифровых трансформаторных подстанций (ЦТП) [1] требует решения ряда проблем, одной из которых является оценка воздействия ЦТП на условия труда обслуживающего персонала. Опытный образец ЦТП 10/0,4 кВ функционирует в составе системы электроснабжения НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Силовая часть опытного образца ЦТП состоит из двух силовых трансформаторов: марки ТСЗ-400/10 (трансформатор трехфазный сухой защищенного исполнения) и ТСЗН-400/10 (трансформатор трехфазный сухой защищенного исполнения с расщепленной обмоткой высокого напряжения и устройством автоматического регулирования напряжения под нагрузкой (АРПН) – блоком тиристоров для бесконтактного

переключения регулировочных отводов трансформатора).

Согласно ГОСТ 12.0.003-74* ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» к основным вредным и опасным факторам, влияющим на производительность труда и здоровье человека, относятся: шум, электрическое и магнитное поле промышленной частоты, опасность поражения электрическим током.

Шум ЦТП

Шум от работы силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации на промышленных предприятиях и в жилых районах, неблагоприятно воздействует на здоровье человека, вызывая: снижение слуховой чувствительности; изменение функции

пищеварения; сердечно-сосудистую недостаточность; нейроэндокринные расстройства; раздражительность; головные боли, бессонницу; головокружение; повышенную утомляемость; снижение памяти; стресс.

Так как тиристорные коммутаторы обеспечивают мягкую коммутацию без экстратов и при своей работе не оказывают шумового воздействия, то основным источником шума на ТП являются силовые трансформаторы. В работе [2] проведен расчет уровня шума для двухтрансформаторной подстанции. На рис. 1 приведена зависимость уровня шума от удаленности расчетной точки до источника шума с разных сторон ТП.

Результаты расчета показали, что суммарный уровень шума от ТП как внутри, так и вне помещения не превышает допустимых пределов [3].

Электромагнитное поле

В процессе эксплуатации высоковольтных установок происходит воздействие электромагнитного поля промышленной частоты, которое вызывает у работающих нарушение функционального состояния центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, что проявляется в виде повышенной утомляемости, головных болей, из-

менения кровяного давления, сердцебиения и аритмии.

Основными источниками электромагнитного поля промышленной частоты на ЦТП являются силовые трансформаторы, тиристорные коммутаторы и высоковольтные кабельные линии. В работе проведено исследование и сравнительная оценка влияния электромагнитного поля ЦТП с существующими ТП. Расчет напряженности электрического (Е) и магнитного (Н) полей проведен для трех возможных вариантов состава трансформаторного оборудования (рис. 2):

- два сухих трансформатора ТСЗ-400/10;
- трансформатор ТСЗН-400/10 с тиристорным регулятором КТ-400/10 и трансформатор ТСЗ-400/10;
- два трансформатора ТСЗН-400/10 с тиристорными регуляторами КТ-400/10.

Вариант с двумя трансформаторами ТСЗН и тиристорными коммутаторами является наиболее полным с точки зрения состава оборудования, поэтому выполнены исследования влияния электромагнитного поля именно для этого случая, по результатам которого проведена оценка напряженности электрического и магнитного полей для двух оставшихся вариантов. Расчетная структурная схема ЦТП показана на рис. 3.

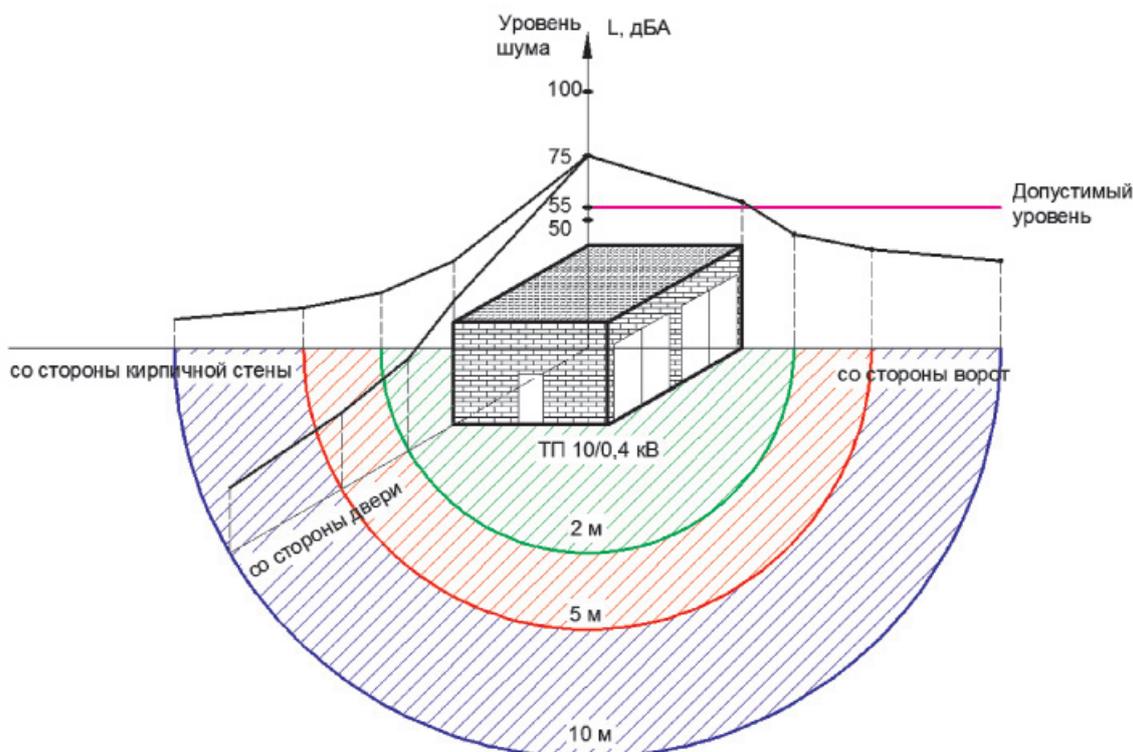


Рис. 1. Зависимость уровня шума от удаленности расчетной точки до источника шума с разных сторон ТП

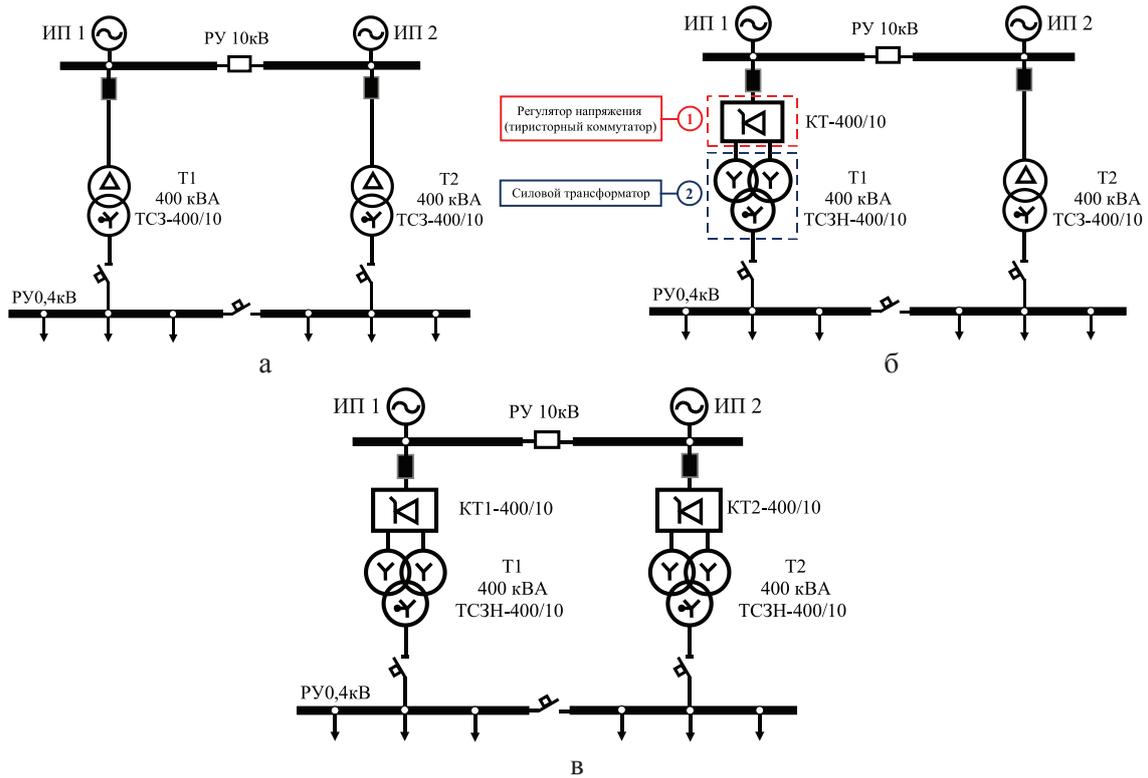


Рис. 2. Варианты схем компоновки трансформаторного оборудования:
 а – два сухих трансформатора ТСЗ-400/10; б – трансформатор ТСЗН-400/10 с тиристорным регулятором КТ-400/10 и трансформатором ТСЗ-400/10;
 в – два трансформатора ТСЗН-400/10 с тиристорными регуляторами КТ-400/10

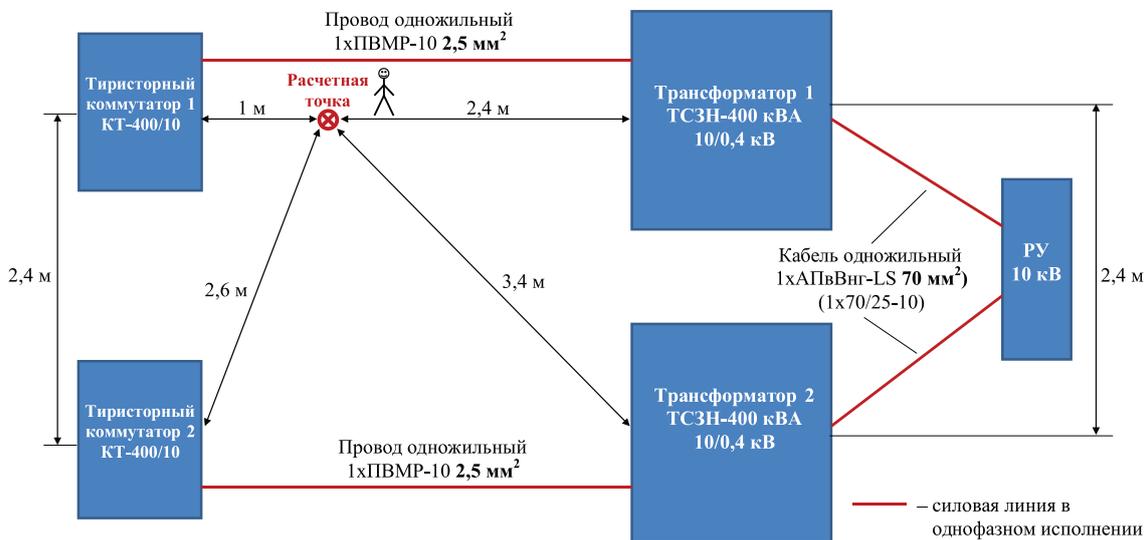


Рис. 3. Структурная схема расположения

Два силовых трансформатора напряжением 10/0,4 кВ и мощностью 400 кВА получают питание по одножильным кабельным линиям $3 \times (1 \times \text{АПВнг-LS } 70 \text{ мм}^2)$ от распределительного устройства (РУ) 10 кВ. Силовые трансформаторы и тиристорные комму-

таторы соединены между собой с помощью проводов ПВМР-10 2,5 мм². Каждая фаза тиристорного коммутатора расщеплена на шесть проводов (рис. 4). Максимальное рабочее напряжение в цепи тиристорного коммутатора составляет 900 В.

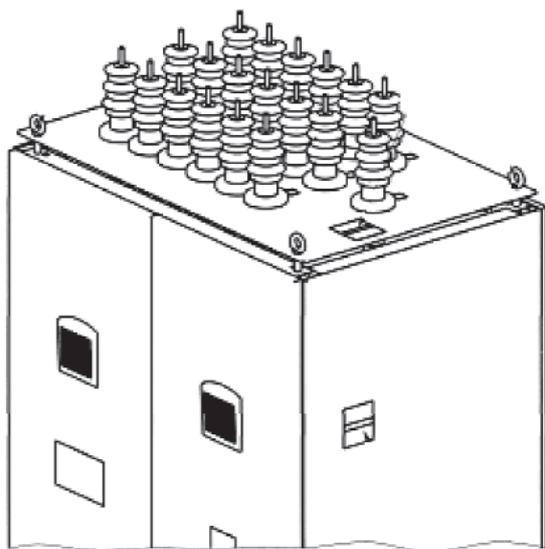


Рис. 4. Фрагмент шкафа тиристорного коммутатора

Характеристика кабеля АПВнг-LS 10 кВ: круглая многопроволочная уплотнённая токопроводящая жила из алюминия; экран по жиле из экструдированного электропроводящего сшитого полиэтилена; изоляция из сшитого полиэтилена; экран по изоляции из экструдированного электропроводящего сшитого полиэтилена; разделительный слой электропроводящей ленты; экран из медных проволок, скреплённых медной лентой; разделительный слой из стеклоленты; оболочка из негорючего ПВХ-пластиката; наружный диаметр кабеля 26,5 мм; диаметр жилы 9,44 мм; расстояние между фазами 0,5 м; расчетный ток 22 А.

Характеристика провода ПВМР-10 10 кВ: внутренний проводник из медной проволоки; изоляция из кремнийорганической резины; наружный диаметр провода 12,5 мм; диаметр проводника 1,78 мм; расстояние между фазами 0,2 м; в фазе 6 проводов; расчетный ток 15,6 А. Радиус расщепленного провода ПВМР-10 по электрическим параметрам [5] эквивалентен одиночному проводу с радиусом:

$$r_s = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус провода (0,98 мм); r – среднее расстояние между проводами (12,5 мм); n – число проводов в фазе.

По формуле (1) эквивалентный радиус провода составляет 10,85 мм.

Расстояния от расчетной точки до трансформаторного оборудования указаны на рис. 4. Рабочая точка выбрана исходя из расстояния, на котором будет происходить обслуживание шкафа тиристорного коммутатора. Если человек будет стоять в метре от

тиристорного коммутатора 1, то расстояние до тиристорного коммутатора 2 составит 2,6 м, а до трансформаторов 2,4 и 3,4 м соответственно. Высота шкафа тиристорного коммутатора составляет 2602 мм, поэтому на высоте 2,8 м напряженность электрического поля для трансформаторного оборудования максимальна. Согласно СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» [4] расчетная высота составляет 1,8 м (на этой высоте находится голова человека).

Напряженность электрического поля [5] определяется по следующей формуле:

$$E = \frac{CU}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left[\frac{1}{H^2 + X_1^2} - \frac{0,5}{H^2 + X_2^2} - \frac{0,5}{H^2 + X_3^2} \right], \quad (2)$$

где C – ёмкость единицы длины кабеля; Ф/м; U – номинальное напряжение, кВ; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; X_1 – расстояние от первой фазы до расчетной точки, м; X_2 – расстояние от второй фазы до расчетной точки, м; X_3 – расстояние от третьей фазы до расчетной точки, м; H – высота от расчетной точки до точки с максимальной напряженностью ($H = 2,8 - 1,8 = 1$ м).

С помощью формулы (3) определяется ёмкость единицы длины проводника:

$$C = \frac{24 \cdot 10^{-12}}{\lg\left(\frac{2 \cdot D_0}{d}\right)}, \quad (3)$$

где d – диаметр провода, м; D_0 – расстояние между фазами, м.

Результаты расчета напряженности электрического поля приведены в табл. 1.

Оценку воздействия магнитного поля, создаваемого трансформаторным оборудованием, можно осуществить на основе коэффициентов пропорциональности [6] между рабочим током проводников и максимальным значением напряженности магнитного поля:

$$H = \gamma \cdot I, \quad (4)$$

где γ – коэффициент пропорциональности между рабочим током проводника и напряженностью магнитного поля (для напряжения 10 кВ $\gamma = 0,0893$); I – рабочий ток проводника, А.

В табл. 2 приведены результаты расчета напряженности магнитного поля.

Таблица 1

Результаты расчета напряженности электрического поля

Параметр	Трансформаторное оборудование			
	Тиристорный коммутатор 1	Тиристорный коммутатор 2	Трансформатор 1	Трансформатор 2
C , Ф/м	$18,96 \cdot 10^{-12}$	$18,96 \cdot 10^{-12}$	$11,85 \cdot 10^{-12}$	$11,85 \cdot 10^{-12}$
X_1 , м	1	2,41	2,4	3,06
X_2 , м	1,02	2,6	2,45	3,4
X_3 , м	1,02	2,97	2,45	3,76
E , кВ/м	0,001740	0,005597	0,006502	0,029150

Таблица 2

Результаты расчета напряженности магнитного поля

Параметр	Трансформаторное оборудование			
	Тиристорный коммутатор 1	Тиристорный коммутатор 2	Трансформатор 1	Трансформатор 2
γ	0,0893	0,0893	0,0893	0,0893
I , А	15,6	15,6	22	22
H , А/м	1,3931	1,3931	1,9646	1,9646

Таблица 3

Сравнение расчетных значений величин напряженности электрического и магнитного полей с предельно допустимыми уровнями электромагнитного поля

Номер варианта	Состав оборудования	E , кВ/м	H , А/м
1	Трансформаторы Т1, Т2	0,0357	3,9292
2	Трансформаторы Т1, Т2 и тиристорный коммутатор КТ1	0,0374	5,3223
3	Трансформаторы Т1, Т2 и тиристорные коммутаторы КТ1, КТ2	0,0430	6,7154
Предельно допустимый уровень (ПДУ)		5	80

Согласно [4] допустимый уровень напряженности электрического поля промышленной частоты на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м. Предельно допустимое значение напряженности магнитного поля при 8-часовом пребывании в зоне воздействия [4] составляет 80 А/м при общем воздействии (на все тело). В табл. 3 приведено сравнение расчетных значений величин напряженности электрического и магнитного полей для различных вариантов состава трансформаторного оборудования с предельно допустимыми уровнями электромагнитного поля.

Анализ результатов показал, что расчетные величины напряженности электромагнитного поля значительно ниже допустимых величин.

Емкостной ток, проходящий через человека в землю

Через тело человека, находящегося вблизи действующих электроустановок,

в области создаваемого ими электрического поля, постоянно проходит в землю емкостной ток. Оценка воздействия емкостного тока на организм человека отсутствует.

Выражение для емкостного тока, проходящего через тело человека [7], находящегося в электрическом поле промышленной частоты и стоящего на полу в токопроводящей обуви, выглядит следующим образом:

$$I_h = k \cdot E, \quad (5)$$

где k – постоянный множитель ($k = 12$ Ф·м/с).

В табл. 4 приведены результаты расчета емкостного тока, проходящего через человека.

Емкостной ток, проходящий через человека в землю для различных вариантов состава трансформаторного оборудования, приведен в табл. 5.

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие предельно допустимый уровень емкостного тока, проходящего через человека в землю.

Таблица 4

Результаты расчета емкостного тока, проходящего через человека

Параметр	Трансформаторное оборудование			
	Тиристорный коммутатор 1	Тиристорный коммутатор 2	Трансформатор 1	Трансформатор 2
E , кВ/м	0,001740	0,005597	0,006502	0,029150
I_h , мкА	20,880	67,164	78,024	349,8

Таблица 5

Емкостной ток, проходящий через человека в землю для различных вариантов состава трансформаторного оборудования

Номер варианта	Состав трансформаторного оборудования	E , кВ/м	I_h , мкА
1	Трансформаторы Т 1, Т 2	0,0357	427,824
2	Трансформаторы Т 1, Т 2 и тиристорный коммутатор КТ 1	0,0374	448,704
3	Трансформаторы Т 1, Т 2 и тиристорные коммутаторы КТ 1, КТ 2	0,0430	515,868

Выводы

В работе проведены исследования основных вредных и опасных факторов ЦТП, влияющих на производительность труда и здоровье человека. Получены численные значения напряженности электрического и магнитного полей, емкостного тока, проходящего через человека, вблизи действующего трансформаторного оборудования ЦТП. Сравнительный анализ результатов исследования показал, что ЦТП, наравне с существующими ТП, не оказывают вредного воздействия на здоровье человека и не ухудшают условий труда обслуживающего персонала. Воздействие электромагнитного поля более чем в 10 раз ниже нормативных значений. Кроме того, следует учесть, что обслуживающий персонал проводит ежедневный плановый осмотр электрооборудования ЦТП в течение 10–15 минут, в то время как предельно допустимые уровни указаны для 8-часового пребывания в зоне воздействия. Таким образом, специальных мероприятий по снижению воздействия ЦТП на условия труда обслуживающего персонала не требуется.

Список литературы

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 412 с.
2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 488 с.
3. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 19 февраля 2003 г. № 10.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Утверждено Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 36.
5. Соснина Е.Н. К вопросу о безопасности силовых трансформаторов / Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин, Р.Ш. Бедретдинов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1023–1026.

6. Соснина Е.Н. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности / Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, С.М. Дмитриев, А.И. Чивенков, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 8–13.

7. Степанов И.М. Исследование электромагнитных полей в электроустановках высокого напряжения и разработка мер по снижению их интенсивности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.12: защищена 26.02.2009. – Новосибирск, 2009. – 149 с.

References

1. Aleksandrov G.N. Peredacha jelektricheskoj jenerгии . 2-e izd. SPb.: Izd-vo Politehn. Un-ta, 2009. 412 p.
2. Dolin P.A. Osnovy tehniky bezopasnosti v jelektroustanovkah: uceb. posobie dlja vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Jenergoatomizdat, 1984. 488 p.
3. SanPiN 2.2.4.1191-03. Jelektromagnitnye polja v proizvodstvennyh uslovijah. Utverzhdeny Postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossijskoj Federacii ot 19 fevralja 2003 g. no. 10.
4. SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Shum na rabocnih mestah, v pomeshhenijah zhilyh, obshhestvennyh zdaniy i na territorii zhiloy zastrojki. Utverzhdeno Postanovleniem Goskomsanepidnadzora Rossii ot 31 oktjabrja 1996 g. no. 36.
5. Sosnina E.N. K voprosu o bezopasnosti silovyh transformatorov / E.N. Sosnina, O.V. Masleeva, G.V. Pachurin, R.Sh. Bedretdinov // Fundamentalnye issledovanija. 2013. no. 10. pp. 1023–1026.
6. Sosnina E.N. Opytnaja cifrovaja transformatornaja podstancija s aktivno-adaptivnoj sistemoj upravlenija i avtomaticheskim pлавnym regulirovanijem naprjazhenija i moshhnosti / E.N. Sosnina, A.B. Loskutov, S.M. Dmitriev, A.I. Chivenkov, A.A. Loskutov // Promyshlennaja jenergetika. 2013. no. 12. pp. 8–13.
7. Stepanov I.M. Issledovanie jelektromagnitnyh polej v jelektroustanovkah vysokogo naprjazhenija i razrabotka mer po snizheniju ih intensivnosti: diss. ...kand. tehn. nauk: 05.14.12: zashishhena 26.02.2009. Novosibirsk, 2009. 149 p.

Рецензенты:

Лоскутов А.Б., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроснабжение и электроэнергетика», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Кузьмин Н.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобильный транспорт», Институт транспортных систем, г. Нижний Новгород.