

ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Исследование степени неоднородности электромагнитного поля предполагает оценку, необходимую для определения типа поля и дальнейшую типологическую классификацию, с целью установления зависимостей и определения применимости существующих и разрабатываемых сенсоров при исследовании параметров электромагнитных полей. Задачей исследования является разработка методологии определения неоднородности поля, так как ранее решения такой задачи не было. Классификация и количественная оценка степени неоднородности позволит выявить информативные параметры, необходимые при проектировании новых сенсоров электромагнитных полей.

Ключевые слова: электрическое поле, неоднородность электрического поля, методология определения неоднородности, точечный заряд, вектор напряженности, степень неоднородности электрического поля, многокомпонентный сенсор.

Вопрос точного измерения напряженности электрического поля интересует специалистов в различных областях промышленности, медицины, биологии, а также в смежных с ними областях науки и техники.

Задача исследования неоднородности поля и его количественная оценка актуальны.

Решение такой задачи позволит грамотно использовать уже существующие сенсоры и приборы на их основе, а также позволит модернизировать старые и создать новые сенсоры, учитывающие неоднородность исследуемых полей.

Анализ научно-технической и патентной литературы [1], проведенный с начала семидесятых годов прошлого века, а также согласно данным по утвержденным типам СИ Росстандарта [2] показал практическое отсутствие информации по вопросу количественной оценки степени неоднородности электромагнитных полей. В основном в технической литературе используются качественные оценки неоднородности поля [3]. Например, однородное поле, неоднородное поле, поле с высокой степенью неоднородности, слабо неоднородное поле и другие.

На данный момент предварительный поиск по патентной и научно-технической литературе показал, что подобных исследований по оценке неоднородности электромагнитных полей нет. Однако, имея методологию оценки влияния неоднородности полей на результат взаимодействия сенсоров с электромагнитными полями, позволит разрабатывать многокомпонентные сенсоры, применимые не только в различных средах, но и в полях различной степени неоднородности.

Согласно расположенным чувствительным элементам сенсора (рис. 1), в пространстве электромагнитного поля на поверхности дифференциально расположенных чувствительных элементов возникают переменные напряжения. Они пропорциональны соответственно разности и сумме полных потоков вектора напряженности электрического поля [4, 5].

Атмосферный воздух является самым распространенным диэлектрическим «материалом» для создания внешней изоляции энергетического оборудования и электрических аппаратов. Разрядное напряжение воздушного промежутка зависит от конфигурации электрического поля между электродами и давления, температуры и влажности воздуха. В связи с этим знание процессов, сопровождающих нарушение электрической прочности воздуха, является важным.

В реальных условиях [6] носители зарядов распределены по поверхностям различных форм, так что при одном и том же расстоянии между высоковольтными электродами — источниками поля и точкой измерения «пространственное изменение» градиента потенциала всегда будет меньше, чем в поле точечного заряда (рис. 2).

Так как максимальное изменение поля и, соответственно, максимальная неоднородность поля будут в направлении расположенного источника (в нашем случае (рис. 2) в направлении оси z), поэтому для сравнения неоднородности различных полей достаточно использовать величину $\partial E_z / \partial z$ [7], характеризующую максимальное изменение поля в одном из координатных направлений, например, вдоль оси z . Однако более удобно в качестве оценки неоднородности ЭП при измерении поля

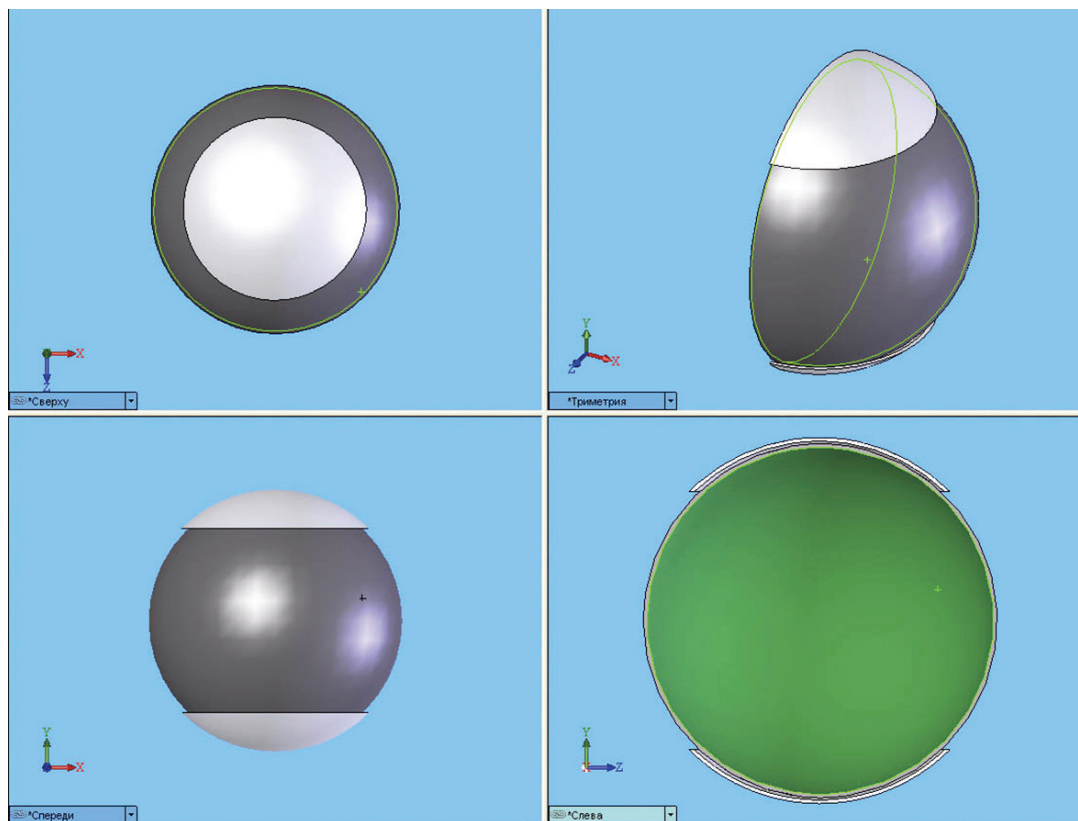


Рис. 1. Однокомпонентный датчик напряженности электрического поля с дифференциально расположенными чувствительными элементами в виде сферических сегментов, имеющих радиус R. Модели выполнены в САПР SolidWorks

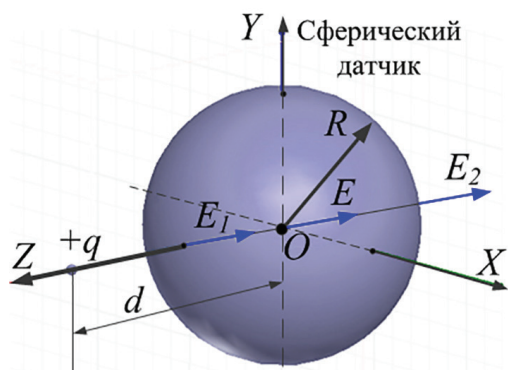


Рис. 2. Пояснения к выводу математического выражения для измерения степени неоднородности электрического поля

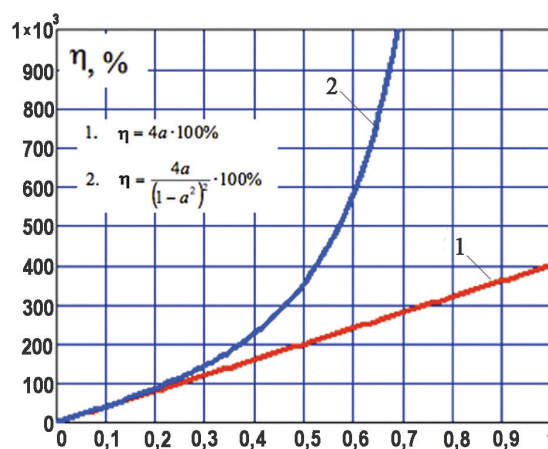


Рис. 3. Графики зависимости степени неоднородности электрического поля от параметра a по формулам (4) и (6)

пространственно протяженными телами использовать такой показатель, как степень неоднородности поля η [7]. Его можно представить как относительное изменение поля, помноженное на коэффициент, пропорциональный протяженности L исследуемого объема в направлении максимального его изменения:

$$\eta = \left| \frac{\partial E_z}{E_z} \right| \cdot L \quad (1)$$

Применим этот показатель к рассматриваемой модели неоднородного поля точечного заряда. На-

пряженность поля точечного заряда в некоторой точке поля определяется соответствующим выражением [8]

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon \cdot z^2} \quad (2)$$

а его изменение в направлении оси z

$$\frac{dE}{dz} = -2 \frac{q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{d^3} = -2E \cdot \frac{1}{d} \quad (3)$$

где d — расстояние от центра исследуемого объема поля до точечного заряда по оси z. Тогда степень

неоднородности поля точечного заряда в направлении оси z с учетом (1–3) будет

$$\eta = 2 \frac{L}{d} = 4 \frac{R}{d} = 4a, \quad (4)$$

где R — эквивалентный радиус пространства исследуемого объема поля; на рис. 2 этот объем выделен пунктиром; $a = R/d$ — параметр, оценивающий близость центра исследуемого объема к источнику поля.

Точное выражение для степени неоднородности поля можно получить, если перейти от дифференциалов dz в выражении (1) к конечным величинам Δz . Тогда с учетом сказанного степень неоднородности поля на протяженности L вдоль оси z можно представить как

$$\eta = \left| \frac{\frac{\Delta E}{\Delta z}}{\frac{\Delta E}{E}} \right| L = \left| \frac{\Delta E}{E} \right|, \quad (5)$$

где ΔE — изменение поля на протяженности $L = 2R$ исследуемого объема вдоль оси z ; $\Delta z = 2R$ — приращение протяженности поля.

Тогда получаем уточненную формулу:

$$\eta = \left| \frac{\Delta E}{E} \right| = \frac{4a}{(1-a^2)^2}. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены графики зависимости степени неоднородности поля от параметра a по приближенной (4) и точной (6). Анализируя графики, видно, что совпадение этих графиков идет до величины показателя $a = 0,2$, при котором степень неоднородности ЭП уже 100 % во всем исследуемом объеме поля. Согласно полученному графику зависимости, по мере приближения к источнику поля (в нашем случае точечному заряду $+q$) степень его неоднородности резко возрастает и при $a = 0,7$ достигает 1000 %.

В реальных условиях эксплуатации электромагнитных сенсоров для получения истинной картины поля рационально проводить измерение степени его неоднородности [9].

Возьмем дифференциальный однокоординатный электроиндукционный сферический датчик напряженности ЭП с двумя чувствительными элементами в виде сферических сегментов, которые расположены на диаметрально-противоположных полюсах сферы (рис. 1).

Полные потоки ψ_1 и ψ_2 вектора напряженности ЭП через первый и второй чувствительные элементы датчика будут определяться соотношениями:

$$\begin{cases} \psi_1 = k_1 E \cos \theta + k_2 \Delta E \\ \psi_2 = k_1 E \cos(\theta + \pi) + k_2 \Delta E \end{cases},$$

где E — напряженность измеряемого ЭП в центре датчика; ΔE — составляющая напряженности ЭП, вызванная его неоднородностью; θ — угол между направлением вектора напряженности ЭП и координатной осью датчика. Далее сложим и вычтем эти уравнения и, соответственно, получим

$$\begin{cases} \psi_1 + \psi_2 = 2k_2 \Delta E \\ \psi_1 - \psi_2 = 2k_1 E \cos \theta \end{cases}. \quad (7)$$

Согласно выражению (7), сумма вектора напряженности ЭП через чувствительные элементы датчика будет пропорциональна составляющей, которая вызвана неоднородностью поля, а их разность — напряженности самого измеряемого поля E в центре сенсора (рис. 2). Пусть ориентируем датчик по направлению поля по оси Z , а также возьмем полученные ранее уравнения (7) и, согласно (5), найдем степень неоднородности ЭП

$$\eta = k \cdot \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где η — степень неоднородности электрического поля в процентах; k — коэффициент пропорциональности. Он учитывает форму и размеры чувствительных элементов сенсора, а также размеры сенсора и расстояние от его центра до источника поля, а именно параметром a .

Таким образом, возможен метод измерения степени неоднородности ЭП в объеме датчика и в результате дальнейших исследований предполагается выявить и классифицировать типологию неоднородности электромагнитных полей. Это позволит проектировать универсальные многокомпонентные сенсоры (оптимизированные электродные системы), учитывающие и этот параметр, необходимые для улучшения метрологических характеристик высокоточных сенсоров электромагнитных полей.

Библиографический список

1. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Обзор существующих датчиков и средств измерения напряженности электростатического поля. Омск: ОмГТУ, 2011. 22 с. Деп. в ВИНТИ 22.11.2011, № 504-В2011.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: <http://www.fundmetrology.ru/> (дата обращения: 16.03.2017).
3. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Конструктивные особенности сферического датчика и его взаимодействие с электрическими полями различных источников // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 251–254.
4. Пат. № 2190232 Российская Федерация, МКИ G 01 R 29/08, G 01 R 29/14. Способ измерения параметров электрического поля / Бирюков С. В. № 2001110156/09; заявл. 13.04. 01; опубл. 27.09. 02, Бюл. № 27.
5. Бирюков С. В. Метод измерения степени неоднородности электрического поля // Методы и средства измерений: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. Н. Новгород: Изд-во МВВО АТН РФ, 2001. С. 31–32.
6. Kolmogorov A. S., Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields // Proceedings: XI International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics 2017). 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239464.
7. Ремезов А. Н. Медицинская и биологическая физика. М.: Высшая школа, 1999. 616 с.
8. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.
9. Бирюков С. В. О возможности измерения степени неоднородности электрического поля // Известия вузов. Сер. Электромеханика. 2003. № 5. С. 21–24.

КОЛМОГорова Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, кафедра «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 4216-9920

AuthorID (РИНЦ): 916641

КОЛМОГОРОВ Аркадий Сергеевич, ведущий инженер ООО «Автоматика-сервис», г. Омск.**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» ОмГТУ.

SPIN-код: 9384-0078

AuthorID (РИНЦ): 189467

Адрес для переписки: lightsun@mail.ru

Для цитирования

Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Бирюков С. В. Измерение степени неоднородности электрического поля // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 45–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-45-48.

Статья поступила в редакцию 15.02.2018 г.

© С. С. Колмогорова, А. С. Колмогоров, С. В. Бирюков

УДК 621.31

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54

А. И. АНТОНОВ¹
Ю. М. ДЕНЧИК²
Д. А. ЗУБАНОВ¹
Н. В. ЗУБАНОВА²
А. А. РУППЕЛЬ¹

¹Омский институт
водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

²Сибирский государственный
университет водного транспорта,
г. Новосибирск

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

В статье описаны процессы, связанные с появлением несимметрии трехфазной системы напряжения. Описан активный эксперимент на выбранном объекте исследования с несимметричными резкопеременными нагрузками. Обработаны результаты эксперимента с помощью программы для ЭВМ и проведен анализ обработки данных результатов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент несимметрии напряжения, электромагнитная помеха, резкопеременная нагрузка, электромагнитная обстановка, перегрузки по фазам.

В настоящее время происходит всё более интенсивная электрификация различных регионов Российской Федерации, связанная с нарастанием темпов их освоения. Одним из факторов предъявляемых требований к системам электроснабжения является повышение качества функционирования электрических сетей общего назначения [1]. Качество функционирования определяется степенью соответствия технических средств требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 32144-2013. Многие системы электроснабжения по ряду причин характеризуются некачественной электроэнергией, в результате чего обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. В связи с этим возникают кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) в системах электроснабжения. Данные ЭМП раз-

личаются по показателям качества электрической энергии (ПКЭ) [1].

Одним из основных факторов обеспечения электроэнергетической эффективности предприятий является удовлетворение значений ПКЭ установленным нормам. Соответствие этих значений является необходимым условием безопасного применения электрооборудования [2]. Несоответствие норм показателей КЭ может привести к порче дорогостоящего оборудования, нарушениям производственных циклов, выпуску некачественной продукции. Своевременное обнаружение отклонений показателей КЭ от нормы позволяет предотвратить данные негативные последствия.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия трехфазной системы напряжений является одним из видов искажения электрической сети [3]. Основ-