

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ. МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ермоленко А.В., Бирюков С.В.

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, пр. Мира, 11), e-mail: iitomsk@mail.ru

В статье рассмотрен один из возможных вариантов проведения аттестации измерителей напряженности электрического поля с эллиптической поляризацией. Главным критерием при создании устройства служит погрешность, которая должна быть в рамках требований эталонного электрического поля по государственной поверочной схеме для средств измерений напряженности электрического поля. Предлагается концепт устройства для поверки измерителей напряженности электрического поля, а также описываются конструктивные особенности предлагаемой установки. Приведен расчет одного из возможных вариантов пространственного представления создаваемого электрического поля. Используются интегральные характеристики параметров поляризованных полей, а именно – напряженности. В качестве таких характеристик были приняты среднее значение напряженности за период. Произведено сравнение двух интервальных параметров.

Ключевые слова: электрическое поле, напряженность, государственная поверочная схема, средство измерения, погрешность, вектор напряженности.

DEVICE FOR CALIBRATION OF ELECTRIC FIELD INTENSITY METERS WITH ELLIPTICAL POLARIZATION. METHOD FOR CALCULATION OF ELLIPTICAL ELECTRIC FIELD

Ermolenko A.V., Biryukov S.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia (644050, Omsk, Mira, 11), e-mail: iitomsk@mail.ru

The article discusses one of the possible options for certification of electric field intensity meters with elliptical polarization. The main criterion for a device is an error which must be within the requirements of the standard electric field on State verification schedule for means of measuring of electric field. The article proposes a concept device for verification of electric field intensity meter and describes the design features of the proposed device. The calculation of a possible embodiment of spatial representations of the electric field created. Integral characteristics of the parameters of polarized fields are used, namely electric field intensity. The average value of electric field intensity for the period was taken as such a characteristic. The article also provides a comparison of the two interval parameters.

Keywords: Electric field, electric field intensity, state verification scheme, means of measuring, inaccuracy, vector of intensity.

Введение

В настоящее время наиболее универсальным видом энергии стало электричество, обеспечивающее потребности практически всех отраслей. Рост промышленности требует значительного повышения уровня напряжений для передачи электроэнергии больших мощностей. Для уменьшения потерь при передаче электроэнергии на большие расстояния растут уровни напряжений. При этом возникает ряд проблем, связанных с возрастающим воздействием на окружающую среду и человека низкочастотных электрических полей, создаваемых как самими энергетическими установками, так и воздушными линиями электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжения. В этой же связи в последнее время стали рассматриваться электрические поля, генерируемые электрифицированным

транспортом, которые дают основной вклад в электрическое окружение плотно населенной городской среды.

Несмотря на большие наработки, сделанные как у нас в стране, так и за рубежом, и потребности промышленности в средствах и методах измерений, область электрических полей промышленной частоты на сегодняшний день оказалась не прикрытой ни средствами градуировки и поверки, ни стандартами, регламентирующими методики проведения измерений. Существующие методы и средства измерений напряженности электрического поля непригодны для измерения полей промышленной частоты вблизи и на поверхности электротехнического оборудования с требуемой точностью, в связи с внесением в электрическое поле значительных искажений. Это говорит о необходимости проведения исследовательских работ и обеспечения промышленности, науки, экологии и других областей знаний необходимыми средствами и методами поверки измерителей напряженности электрического поля промышленной частоты [6].

Предмет исследования

Известно, что вектор напряженности электрического поля многофазных энергетических систем промышленной частоты вращается в пространстве по эллипсу, проходя через максимальное и минимальное значения. При этом происходит изменение амплитуды и фазы вектора как во времени, так и в пространстве. В общем случае годограф радиус-вектора напряженности вращающегося электрического поля представляет собой эллипс (рисунок 1).

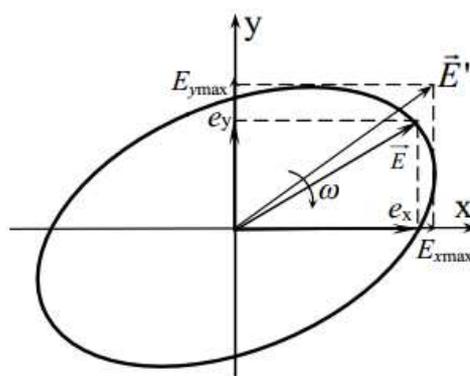


Рисунок 1. Годограф вектора напряженности электрического поля (общий случай)

Необходимо разработать установку для поверки средств измерения напряженности для электрических полей с эллиптической поляризацией, форма которой будет напоминать так называемую «белчью клетку», примерный внешний вид и конструкция устройства представлены на рисунке 2.

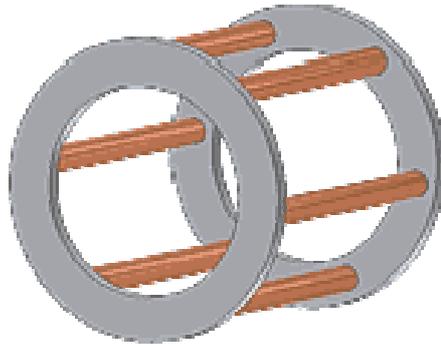


Рисунок 2. Конструкция устройства

Необходимо разработать и провести математические расчеты для построения установки, которая будет создавать электрическое поле с заданной величиной градиента составляющих напряженности. Особенностью такого поля является то, что вектор напряженности электрического поля изменяет не только свою амплитуду, но и направление.

Устройство представляет собой некоторое количество проводников, выполненных в форме трубок, расположенных параллельно друг другу, образуя цилиндрическую поверхность. Количество проводников будет кратно трем, по числу фаз переменного тока, подаваемого на трубчатые проводники. Общее количество проводников будет рассчитываться так, чтобы погрешность поля была в рамках требований эталонного электрического поля по государственной поверочной схеме.

Если, к примеру, будет использоваться «беличья клетка» с шестью проводниками, то на каждый из проводников будет подаваться переменный ток таким образом, чтобы каждый последующий проводник имел сдвиг по фазе на 120 градусов, т.е. в установке будет происходить последовательное чередование трех фаз, которые будут создавать вращающееся электрическое поле, в котором максимальное значение вектора напряженности электрического поля будет двигаться по спирали вдоль трубчатых проводников с электрическим током, делая полный оборот внутри устройства.

Габариты установки, в отличие от аналогов, будут значительно меньше, что позволит определять не только основную погрешность поверяемых приборов, но и дополнительные погрешности, например, от изменения температуры, поскольку установка не потребует создания большеобъемной камеры тепла и холода.

Расчет эллиптического электрического поля

Данная установка будет иметь трехмерное пространственное описание, поэтому и создаваемое ею поле также будет описываться в трехмерном пространстве.

Предположим, что электрическое поле, создаваемое данной установкой, может быть представлено в виде проекций на независимые координаты, тогда 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:

$$\begin{cases} \frac{E_x}{A} = \sin\omega t \cos\alpha + \cos\omega t \sin\alpha, \\ \frac{E_y}{B} = \sin\omega t \cos\beta + \cos\omega t \sin\beta, \\ \frac{E_z}{C} = \sin\omega t \cos\gamma + \cos\omega t \sin\gamma, \end{cases} \quad (2)$$

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

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

Произведем подстановку уравнения (3) в первое уравнение системы (2).

$$\sin\omega t = \frac{AE_y \sin\alpha - BE_x \sin\beta}{AB \sin(\alpha - \beta)} \quad (4)$$

Произведем подстановку полученных выражений (3) и (4) в последнее уравнение системы (2) и преобразуем выражение:

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

Данное выражение представляет собой уравнение плоскости z' , в которой расположена кривая, описываемая вектором напряженности электрического поля \vec{E} . Чтобы однозначно задать кривую, воспользуемся выражениями (3) и (4), а также основным тригонометрическим тождеством, и запишем:

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

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).

Определим большую и малую полуоси эллипса. Для их нахождения достаточно исследовать функцию напряженности электрического поля или ее квадрата на экстремум. Учитывая систему уравнений (1), запишем:

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

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

В тех точках, в которых напряженность принимает наибольшее и наименьшее значения, выполняется условие $\frac{df(\omega t)}{d(\omega t)} = 0$

Определим значение ωt , при котором выполняется это условие:

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

Заранее известно, что чередование экстремальных значений в эллипсе происходит через интервальный период равный $\pi/2$.

$$tg 2\omega t_1 = -\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma},$$

$$\omega t_1 = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta + C^2 \sin 2\gamma}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta + C^2 \cos 2\gamma} \right) + \pi n, n \in Z.$$

Обозначим

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

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

$$a = \sqrt{A^2 \sin^2(\varphi + \alpha) + B^2 \sin^2(\varphi + \beta) + C^2 \sin^2(\varphi + \gamma)};$$

$$b = \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi + \alpha) + B^2 \cos^2(\varphi + \beta) + C^2 \cos^2(\varphi + \gamma)}.$$

Вид поляризации в плоскости поляризации z' электрического поля удобно характеризовать с помощью коэффициента поляризации: $\zeta = \frac{E_{x'}}{E_{y'}} = \frac{A'}{B'} e^{-j\theta}$,

где $E_{x'}$ и $E_{y'}$ – проекции напряженности электрического на ортогональные оси в плоскости поляризации z' ; A' , B' – амплитудные значения напряженности электрического поля, θ – разность между начальными фазами колебаний напряженности электрического поля на осях плоскости поляризации [1].

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 $z = \pm j$, при условии равенства амплитуд A' и B' . Знак мнимой части определяет направление вращения вектора \vec{E} в плоскости поляризации: «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).

Для характеристики электрических и магнитных полей в течение одного периода логичнее использовать непосредственно интегральные характеристики параметров

поляризованных полей, в нашем случае напряженности. В качестве таких характеристик могут быть приняты среднее значение напряженности за период

$$E_{cp} = \frac{\int_0^T E dt}{T} = \frac{\int_0^{2\pi} E dwt}{2\pi} \quad (6)$$

или действующее (среднеквадратичное) значение напряженности

$$E_{\partial} = \sqrt{\frac{\int_0^T E^2 dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} E^2 dwt}{2\pi}} \quad (7)$$

Путем преобразования последнего выражения действующее значение определяется

как $E_{\partial} = \sqrt{\frac{A^2+B^2+C^2}{2}}$.

В выражениях (6) и (7) E – напряженность электрического поля, определяемая по (5). 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 вида (6)

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

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. [4, 7]. Произведем сравнение предложенных двух интервальных параметров, а именно – отношение среднего значения E_{cp} к действующему значению напряженности эллиптического поля E_{∂} в зависимости от параметров поляризации электрической волны соотношению амплитуд колебаний вектора напряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta-\alpha$, показанных на рисунке 3.

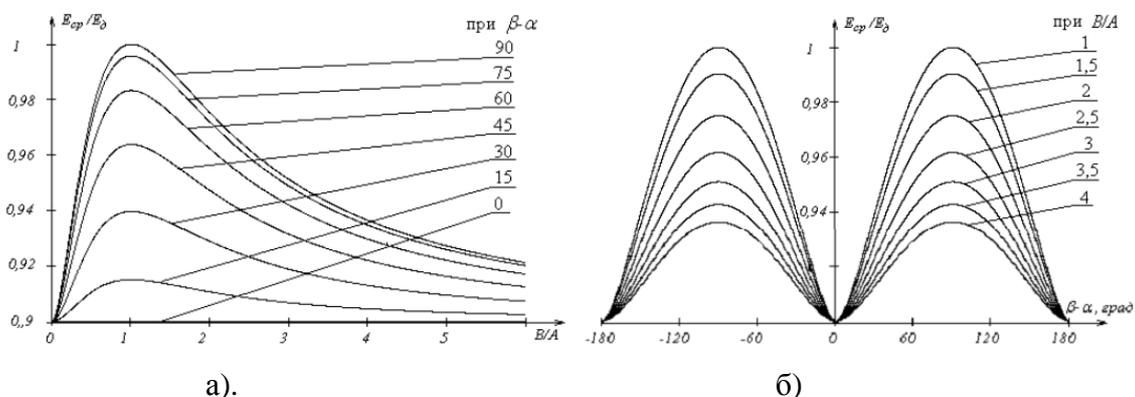


Рисунок 3. Зависимость E_{cp}/E_{∂} от параметров эллиптического поля:

а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta-\alpha = \text{const}$;

б) от разности начальных фаз $\beta-\alpha$, при $B/A = \text{const}$.

Из представленных графиков следует, что при круговой поляризации среднее и действующее значения совпадают; наибольшее превышение действующего значения напряженности над средним значением в 1,09-1,11 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.

Сравним результаты расчета интегральной характеристики – напряженности электрического поля, рассчитанные по (7) E_d и напряженности электрического поля эффективного значения синусоиды, имеющей амплитуду, равную большей полуоси эллипса, описываемого вектором напряженности в расчетной точке E_{maxd} , т. е. определим отношение E_d/E_{maxd} . Сравнение произведем от вида и формы поляризации поля, а именно – по соотношению амплитуд колебаний вектора напряженности на независимых координатах B/A и разности начальных фаз колебаний $\beta-\alpha$. Результаты сравнения показаны на рисунке 4[1].

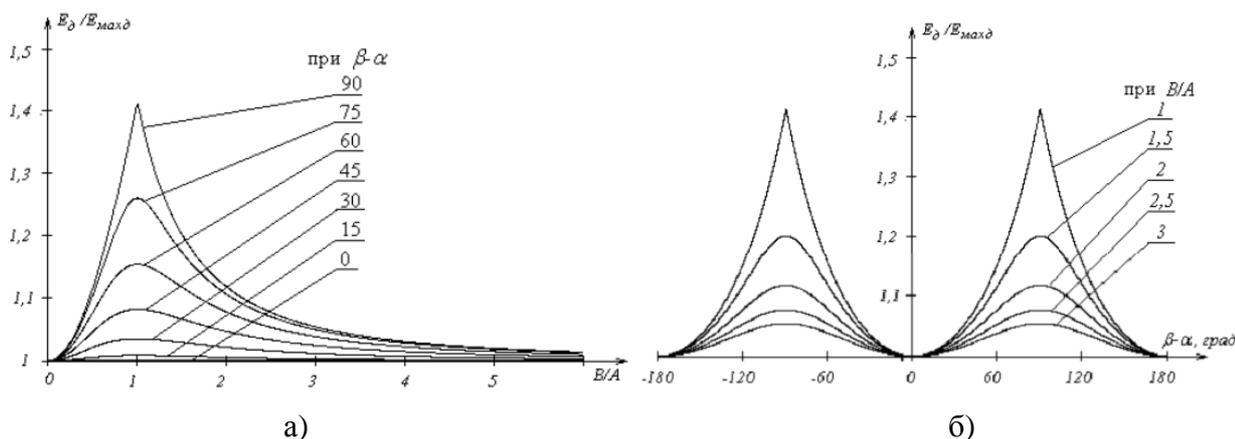


Рисунок 4. Зависимость E_d/E_{maxd} от параметров эллиптического поля:

- а) от отношения амплитуд B/A , при $\beta-\alpha = \text{const}$;
- б) от разности начальных фаз $\beta-\alpha$, при $B/A = \text{const}$.

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

- при линейной поляризации действующее и эффективное значения большей полуоси эллипса значения совпадают;
- максимального расхождения значения E_d и E_{maxd} достигают при круговой поляризации поля, при этом $E_d/E_{maxd} = \sqrt{2}$.

Список литературы

1. Белицын И.В., Котырло Т.В., Макаров А.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования // Известия ТПУ. – 2008. – № 4. – С.61-65.
2. Бирюков С.В. Построение измерителя напряженности электрического поля по результатам математического моделирования / С.В. Бирюков, А.С. Шиликов // Измерение, контроль, информатизация (ИКИ-2001): Материалы II международной научно-технической конференции. – Барнаул: АТГУ, 2001. – С.57-60.
3. Бирюков С.В. Физические основы измерения параметров электрических полей: Монография. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 112 с.
4. Васильева А.Г. Дифференциальные и интегральные уравнения, вариационное исчисление в примерах и задачах. – 2-е изд. / А.Н. Тихонов, А.Г. Васильева. – М.: Физматлит, 2005. – 432 с.
5. ГОСТ Р 8.564—96. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0-20 кГц. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 5 с.
6. Колмогорова С.С. Конструктивные особенности сферического датчика и его взаимодействие с электрическими полями различных источников / С.С.Колмогорова, С.В.Бирюков // Омский научный вестник. – Омск: ОмГТУ, 2012. – № 2 (110). – С. 229-234.
7. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 728 с.

Рецензенты:

Бубнов А.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электрическая техника» ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Никонов А.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», г. Омск.