

Компенсация контактной разности потенциалов в электростатических флюксметрах

Е.А. Коровин¹, В.А. Ефимов², Г.Г. Щукин¹, Д.А. Денисенков¹, С.В. Чернышев¹

¹Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, E-mail: evgen_korovin@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", E-mail: vladefimov48@mail.ru

Представлены результаты исследований влияния контактной разности потенциалов, обусловленной конструктивными особенностями электростатических флюксметров, на точность оценок измерения градиента электрического поля Земли. Предложен вариант конструкции прибора, позволяющей в рабочем режиме определять значение и оперативно компенсировать контактную разность потенциалов.

The results of studies of the influence of the contact potential difference due to the structural features of field mills on the accuracy of estimates of the measurement of the gradient of the electric field are presented. A variant of the device design allowing to determine the value in the operating mode and to quickly compensate the contact potential difference is proposed.

Введение

Напряженность электрического поля, оцениваемая на уровне поверхности Земли, зависит от множества различных факторов как природного, так и техногенного характера. Анализ данных об электрическом поле Земли позволяет предсказывать землетрясения [2], опасные атмосферные явления [5], определять наличие в атмосфере радона [3] и аэрозолей [4]. В вариациях поля находят отражение приливные эффекты, солнечная активность, процессы, протекающие в глобальной электрической цепи.

Погрешности измерения напряженности электрического поля Земли

В качестве приборов, используемых для оценивания градиента потенциала электрического поля, применяются электростатические флюксметры [1]. Технические характеристики современных флюксметров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики измерителей вертикальной составляющей электрического поля Земли

Прибор	Диапазон измерений	Погрешность измерений
Поле-2	± 5000 В/м	$\pm 10\%$
EFM550	± 10000 В/м	$5\% \pm 50$ В/м
EFS 1000	± 20000 В/м	$1\% \pm 6$ В/м
CS110	± 212000 В/м	$5\% \pm 60$ В/м
EFM-100	± 20000 В/м	$5\% \pm 50$ В/м
Рябина	± 30000 В/м	$2\% \pm 10$ В/м

Для выявления или прогнозирования явлений, оказывающих влияние на значение градиента электрического поля, применяются приборы, обеспечивающие соответствующие точность и диапазон измерений. Так, для наблюдений за унитарной вариацией, как правило используют узкополосные (0.5-1 Гц) приборы с высокой разрешающей способностью (0.1-1 В/м), и диапазоном измеряемых значений ± 5000 В/м. В данном случае важна точность измерений, вариации градиента поля, выходящие

за диапазон, в обработке данных не учитываются. При анализе грозовой деятельности применяют флюксометры с полосой пропускания от 5 Гц, разрешающей способностью 1-50 В/м и диапазоном измеряемых значений градиента поля $\pm 10 \dots 210$ кВ. Данные этих приборов позволяют определить приближение грозовых облаков, а при наличии сети датчиков, координаты молниевых разрядов [6]. Существуют и универсальные приборы, удовлетворяющие в большинстве случаев потребностям соответствующих измерений. Основным фактором, ограничивающим возможности применения современных флюксометров при решении исследовательских задач, является недостаточная точность, обусловленная конструктивными особенностями приборов.

В общем случае измеренное электростатическим флюксометром значение напряженности поля определяется выражением:

$$E_{\text{изм}} = \frac{k_{\text{пр}}}{k_{\text{р}}} (E_{\text{д}} k_{\text{уст}} + E_{\text{кр}}) \quad (1)$$

где $k_{\text{р}}$ – вычисляемый коэффициент редукции;

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования прибора;

$E_{\text{д}}$ – истинное значение напряженности поля на уровне поверхности Земли;

$k_{\text{уст}}$ – коэффициент, обусловленный краевыми эффектами;

$E_{\text{кр}}$ – напряженность поля, обусловленная контактной разностью потенциалов (КРП).

Погрешность измерений включает в себя три составляющие. Первая обусловлена зависимостью коэффициента преобразования измерительного тракта $k_{\text{пр}}$ от условий эксплуатации, определяется из технических характеристик прибора и составляет, как правило, 1-10% от измеряемой величины. Вторая составляющая определяется точностью установки коэффициента редукции $k_{\text{р}}$. Третья составляющая погрешности $E_{\text{кр}}$ является аддитивной и вызвана наличием КРП между экранирующей пластиной и корпусом прибора. Из выражения (1) видно, что составляющие погрешности прибора, в зависимости от значения напряженности электрического поля, вносят различный вклад в результат измерений. Первую и вторую из них можно учесть при настройке прибора и в процессе его установки. Третья составляющая является случайной и может менять свое значение в зависимости от температуры, относительной влажности и качества скользящего контакта. Вклад данной составляющей в общую погрешность имеет порядок 10...100 В/м.

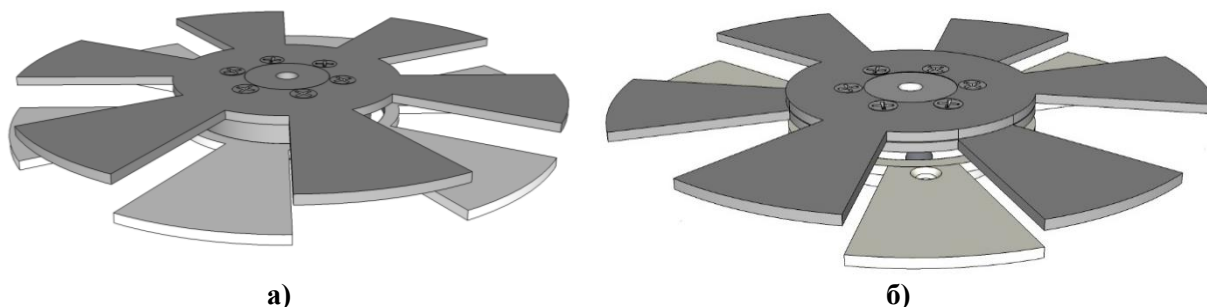
В подавляющем большинстве применений требования по точности оценок не превышают 5% от истинного значения. И в первом приближении современные флюксометры вполне соответствуют данным требованиям. При наблюдении за значениями поля >200 В/м общая погрешность измерений будет определяться в основном первой и второй составляющими погрешности. При измерении же малых (<120 В/м) значений градиента вклад КРП может привести к нецелесообразности проведения измерений. С учетом заявленных производителем характеристик (таблица 1), при использовании прибора CS110 общая погрешность измерения малых полей, в лучшем случае, составит 6%.

В процессе эксплуатации флюксометра «Поле-2», для устранения влияния КРП, прибор периодически приводится к «0» путем экранирования обтюратора от внешнего поля. При этом измерения внешнего поля временно прекращаются, а сама процедура не является автоматизированной и требует определенных действий от обслуживающего персонала. В приборах иностранного производства учесть влияние соответствующей погрешности не представляется возможным. Минимизация влияния КРП на результаты измерений достигается путем установки прибора таким образом, чтобы увеличить $k_{\text{уст}}$.

При этом расчетный коэффициент редукции $k_p = k_{уст}$. Согласно (1) влияние $E_{кр}$ на результаты уменьшится в $k_{уст}$ раз.

Компенсация контактной разности потенциалов

Вместе с тем, известны подходы [8] к определению текущего значения и компенсации влияния КРП. Вариант конструкции, описанной в патенте на изобретение «Прецизионный флюксометр» [10], был реализован на платформе флюксометра «Рябина» [7]. При этом, шестилопастная измерительная пластина обтюлятора была заменена на трехлопастную, а экранирующая изготовлена из двух, расположенных на разных уровнях пластин (рис.1).



а) б)
Рис. 1. Обтюратор флюксометра: а) – штатная конструкция, б) – конструкция с двухуровневой экранирующей пластиной

Для обеспечения беспрепятственного прохождения гармоники с частотой 180 Гц аналоговый полосовой фильтр был заменен на фильтр нижних частот с полосой 400 Гц. Выделение из спектра входного сигнала гармоники с частотой 180 Гц производилось аналогично выделению полезного сигнала на частоте 360 Гц. Структура передаваемых данных была дополнена соответствующими полями.

В результате серии экспериментов с модифицированным прибором были выявлены существенные особенности реализации алгоритма компенсации КРП. Согласно модели процесса преобразования измеряемого градиента поля в электрический сигнал [10] наличие КРП на скользящем контакте приводит к появлению в сигнале электростатического генератора составляющей на частоте 180 Гц. При этом амплитуда гармоники должна быть пропорциональна значению КРП. В результате измерений было определено, что амплитуда гармоники на частоте 180 Гц зависит не только от значения КРП, но и от величины напряженности внешнего электрического поля. Действительно, с учетом близкого к нулю входного сопротивления преобразователя ток-напряжение, подключенного непосредственно к измерительной пластине:

$$i = \frac{dQ}{dt}, \quad (1)$$

где i – измеряемый ток;

Q – заряд измерительной пластины.

Значение Q можно определить для 3-х случаев:

1. Измерительная пластина находится под воздействием внешнего поля:

$$Q_1 = E_d S, \quad (2)$$

где E_d – оцениваемое (действующее на входе прибора) значение напряженности поля;

S – площадь измерительной пластины.

2. Измерительная пластина закрыта от внешнего поля близкорасположенными лопастями экранирующей пластины:

$$Q_2 = (E_d - E_d k_1 + \Delta E_1) S, \quad (3)$$

где k_1 – константа, определяемая конструкцией прибора;

ΔE_1 – напряженность поля, создаваемая экранирующей пластиной, определяемая отношением значением КРП к расстоянию между экранирующей и измерительной пластинами.

3. Измерительная пластина закрыта от внешнего поля удаленными лопастями экранирующей пластины:

$$Q_3 = (E_d - E_d k_2 + \Delta E_2)S. \quad (4)$$

Функции $Q(t)$ и $i(t)$, с учетом конструкции обтюлятора (Рис. 1. б), при условии $k_2 \gg k_1$, будут иметь вид, представленный на Рис. 2.

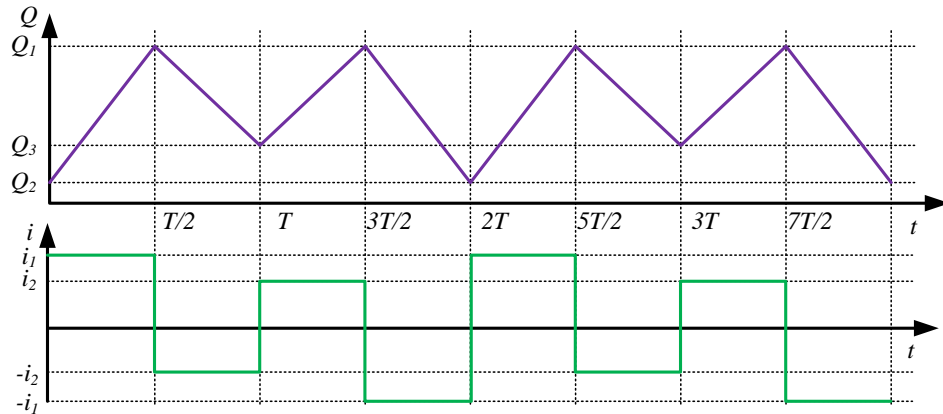


Рис. 2. Функции заряда и тока

Ток измерительной пластины поступает на преобразователь ток-напряжение и далее на фильтр нижних частот. Форма напряжения на выходе фильтра представлена на Рис. 3.

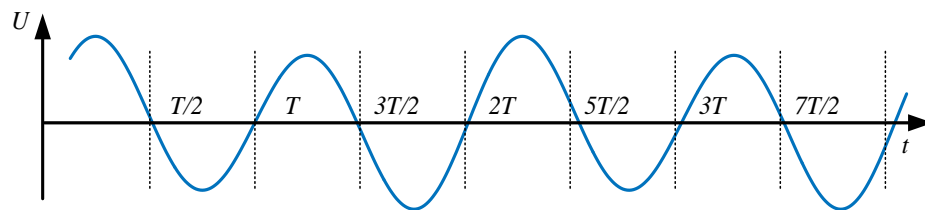


Рис. 3. Напряжение на выходе ФНЧ

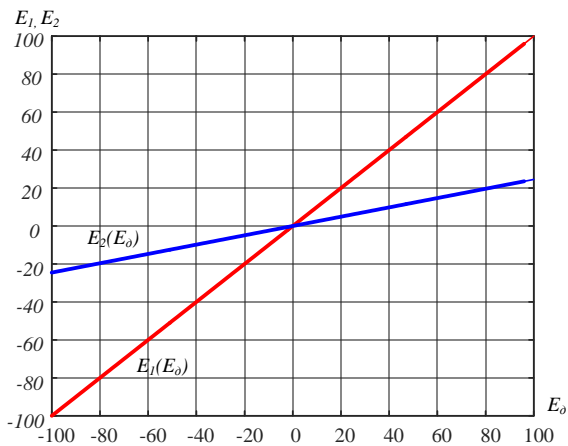
Амплитуды гармоник на частотах $1/T$ и $1/2T$ определяются из выражений:

$$E_1 = \left(E_d - \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2 - E_d(k_1 + k_2)}{2} \right) S k_{пр}, \quad (5)$$

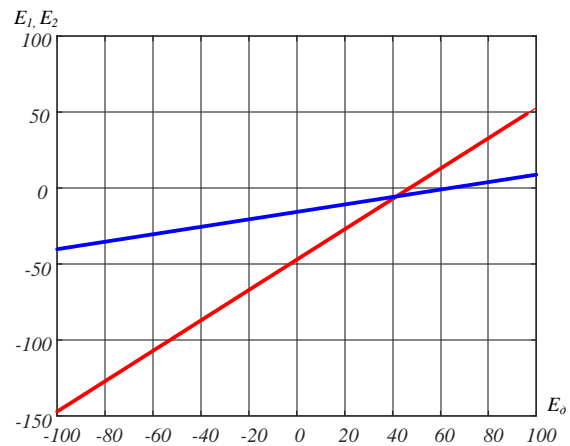
$$E_2 = \left(\frac{E_d(k_2 - k_1) + \Delta E_1 - \Delta E_2}{2} \right) S k_{пр}, \quad (6)$$

где $k_{пр}$ – константа, определяющая коэффициент преобразования прибора.

Функции $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ имеют вид прямых, проходящих при $\Delta E_1 = 0$ и $\Delta E_2 = 0$ через начало прямоугольной системы координат (Рис. 4. а).



а)



б)

Рис. 4. Зависимости $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ при отсутствии а) и при наличии б) КРП

В случае присутствия потенциала на экранирующей пластине ($\Delta E_1 \neq 0$ и $\Delta E_2 \neq 0$), прямые не проходят через начало системы координат (Рис. 4. б). Тангенс угла наклона прямой $E_1(E_d)$ устанавливается при калибровке подбором соответствующего значения $k_{пр}$ и всегда равен 1. Угол между прямыми $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ определяется конструктивными особенностями прибора и может быть вычислен в процессе калибровки.

Координаты точки пересечения прямых $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ также лежат на прямой, проходящей через начало системы отсчета. Тангенс угла наклон данной прямой $\gamma = \frac{x_{п}}{y_{п}}$ является величиной, не зависящей от значения измеряемого поля и КРП. Данный коэффициент также определяется на этапе калибровки, путем вычисления координат точки пересечения $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$:

$$x_{п} = \frac{c_2 - c_1}{A_1 - A_2}; \quad (6)$$

$$y_{п} = -\frac{c_1 A_2 - c_2 A_1}{A_1 B - B A_2}, \quad (7)$$

где $A_1 = E_{1(min)} - E_{1(max)}$ разность минимального и максимального показаний прибора, полученных при воздействии $E_{д(min)}$ и $E_{д(max)}$;

$A_2 = E_{2(min)} - E_{2(max)}$ разность минимального и максимального значений амплитуды гармоника на частоте $1/2T$, полученных при воздействии $E_{д(min)}$ и $E_{д(max)}$;

$B = E_{д(min)} - E_{д(max)}$ разность минимального и максимального значений напряженности поля, формируемого в ходе калибровки прибора;

$$C_1 = E_{д(min)} E_{1(max)} - E_{д(max)} E_{1(min)};$$

$$C_2 = E_{д(min)} E_{2(max)} - E_{д(max)} E_{2(min)}.$$

Очевидно, что при отсутствии КРП $E_1(E_d) = E_d$. Наличие составляющих ΔE_1 и ΔE_2 приводит к нарушению данного равенства. Измеряя одновременно значения $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ и используя вычисленные при калибровке угол наклона $E_2(E_d)$ и значение $\gamma = \frac{x_{п}}{y_{п}}$, в оперативном режиме можно найти величину погрешности $E_{кр} = E_1(E_d) - E_d$, обусловленной КРП.

Погрешность оценок электрического поля, вызванная $E_{кр}$ может быть компенсирована при нахождении координат точки пересечения прямых $E_1(E_d)$ и $E_2(E_d)$ (Рис. 5.):

$$E_{кр} = y_{п} + x_{п}. \quad (8)$$

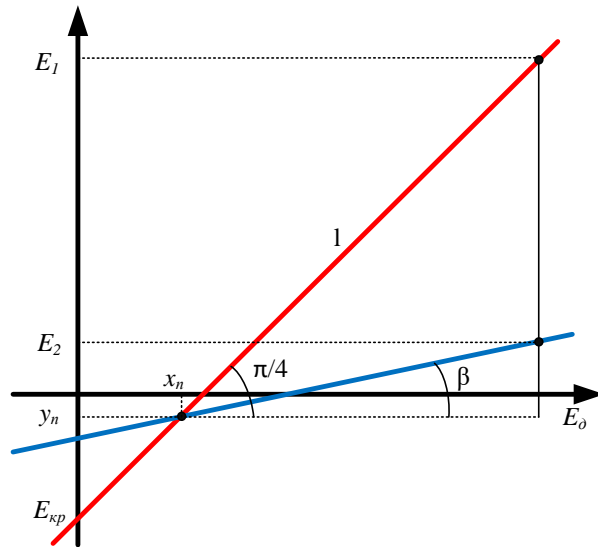


Рис. 5.

Значение y_{Π} определяется выражением:

$$y_{\Pi} = \frac{l}{\sqrt{2}} - E_1 = \frac{(E_1 - E_2)\cos(\beta)}{\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)}. \quad (9)$$

Величина x_{Π} может быть найдена после определения y_{Π} :

$$x_{\Pi} = y_{\Pi} \gamma \quad (10)$$

При практической реализации данного подхода значения угла наклона $E_2(E_d)$, $k_{\text{пр}}$ и $\gamma = \frac{x_{\Pi}}{y_{\Pi}}$ после калибровки записывались в долговременную память микроконтроллера, реализующего обработку сигнала. Дополнительно в алгоритм работы прибора была включена функция вычисления значения $E_{\text{кр}}$ согласно (8). В ходе проводимых экспериментов влияние погрешности прибора, определяемой наличием КРП, было снижено до значения 3 В/м.

Выводы

Путем незначительных конструктивных изменений и применения соответствующих алгоритмов обработки доказана принципиальная возможность контроля величины КРП и её компенсации. Спроектированные соответствующим образом приборы позволят в значительной степени повысить точность оценок электрического поля Земли в рамках решения как научных, так и прикладных задач.

Литература

1. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы – М.: Гостехиздат, 1957.
2. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт Р., Чернева Н.В., Швецов Б.М. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 1-9.
3. Фирстов П.П., Пономарев Е.А., Чернева Н.В., Бузевич А.В. Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск - Камчатского геодинимического полигона //Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский. 2006. №1(7). С. 102-109.

4. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М, Пхалагов Ю.А., Смирнов С.В., “Суточные вариации напряженности электрического поля в дымах от лесных пожаров”, Доклады Академии наук, 453:2 (2013), 207-210.
5. Верхулевский К.М. Системы обнаружения и прогнозирования грозовых явлений производства компании "Boltek"/К. М. Верхулевский // Метеорология и гидрология , 2015.-№7.-С.93-104.
6. Aranguren, D., J. Montanyá, G. Solá, V. March, D. Romero, and H. Torres (2009), On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain, J. Electrostat., 67, 507–512.
7. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Денисенков Д.А., Крисанова О.А., Рудь А.А., Чернышев С.В. Датчик напряженности электрического поля Земли // Материалы VI Всероссийской научной конференции Армандовские чтения. - 2016. - С. 254-259.
8. Ефимов В.А., Полушин П.А., Грунская Л.В. Измерение электрической составляющей геофизических полей. Монография – Palmarium Academic Publishing, ISBN 978-38473-9306-1, 2013, 146 с.
9. Алехин С.Г., Ефимов В.А., Полушин П.А., Готюр И.А., Жуков В.Ю., Костромитинов А.В., Кулешов Н.В., Рудь А.А., Щукин Г.Г., Караваев Д.М., Михайловский Ю.П., Андреев-Красносельский А.А. Компенсационный электростатический флюксметр. Патент 2501029 С1 Россия МПК G01R 29/12/ Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского МО РФ, опубликовано 10.12.13 г., Бюллетень №34.
10. Патент РФ № 2013112016/28, 18.03.2013. Ефимов В.А., Полушин П.А., Грунская Л.В. Прецизионный флюксметр // Патент России № 130716. 2013. Бюл. № 21.