

Усовершенствованный прибор напряженности электрического поля

Е.А. Коровин¹, И.Е. Юсупов², И.А. Готюр¹, И.С. Самойлова¹, Г.Г. Щужкин^{1,3}

¹ Военно-космическая академия имени Александра Федоровича Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13
E-mail: evgen_korovin@mail.ru.

² Санкт-Петербургский госуниверситет, г. С.-Петербург
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
E-mail: igor_yusupov@mail.ru.

³ Муромский институт (филиал) ФГБОУ «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264, Муром, Владимирская область, ул. Орловская, д.23.
E-mail: mivlgu.ru.

Представлены результаты работ по совершенствованию конструкции электростатического флюксметра «Рябина», позволившие в значительной степени повысить защищенность прибора от внешних воздействующих факторов, увеличить ресурс и упростить техническое обслуживание.

Ключевые слова: измеритель напряженности электрического поля, флюксметр, электрическое поле атмосферы.

Advanced electric field mill

Е.А. Korovin¹, I.E. Yusupov², I.A. Gotur¹, I.S. Samoiliva¹, G.G. Shchukin^{1,3}

¹ *Mozhaisky Military Space Academy.*

² *St Petersburg University.*

³ *Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov.*

The results of work on improving the design of the «Ryabina» electrostatic fluxmeter are presented, which made it possible to significantly increase the protection of the device from external influencing factors, increase the service life and simplify maintenance.

Keywords: electric field mill, fluxmeter, atmospheric electric field.

Введение

Наблюдения за атмосферным электричеством с целью изучения глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1, 2], электрической структуры облаков [3] и сверхкраткосрочного прогнозирования гроз [4, 5] основываются на измерениях напряженности атмосферного электрического поля. Эти измерения в основном проводятся вблизи земной поверхности приборами напряженности поля (ПНП), именуемыми в отечественной литературе флюксметрами [6-8]. Напряженность электрического поля атмосферы зависит от множества факторов, таких как электрический потенциал ионосферы, проводимость воздуха и наличие аэрозолей, формирующих заряженные области, движение окружающих измерительный прибор предметов, электризация облаков и т.д. Оценить индивидуальное влияние этих факторов на величину напряженности электрического поля бывает затруднительно, а в большинстве случаев не представляется возможным. Для устранения влияния несущественных для исследования глобальной электрической цепи факторов

измерения проводят в условиях т.н. «хорошей погоды», характеризующихся отсутствием сильного ветра и облачности. При этом максимальные значения измеряемой величины напряженности электрического поля с учетом коэффициента редукции не превышают 1000 В/м. Чувствительность прибора должна быть не хуже 1 В/м [9].

Одним из практических применений ПНП является обеспечение сверхкраткосрочного прогнозирования гроз. Возможность заблаговременного (до возникновения первого молниевых разряда) выявления опасного явления погоды обусловлена значительным влиянием на градиент потенциала вблизи земной поверхности заряженных областей конвективной облачности. При прохождении, либо формировании грозных облаков в непосредственной близости от места измерения электрического поля, а также в результате электрического пробоя воздуха (молниевых разрядах), напряженность поля может колебаться в значительных пределах. Диапазон измеряемых ПНП значений напряженности поля в данном случае должен быть не менее ± 30 кВ/м. Разрешающая способность датчика для решения задач сверхкраткосрочного прогнозирования не столь важна и в некоторых приборах не превышает величину 40 В/м [10].

ПНП «Рябина»

В целях обеспечения возможности наблюдения за атмосферным электричеством на кафедре геофизического обеспечения ВКА имени А.Ф.Можайского был создан ПНП «Рябина», обладающий удовлетворительными характеристиками как для изучения ГЭЦ, так и прогнозирования гроз [8] (рис.1). Электростатический флюксометр «Рябина» за шесть лет эксплуатации позволил собрать значительное количество данных и провести ряд важных экспериментов. Вместе с тем были выявлены слабые места конструкции, снижающие надежность прибора и препятствующие осуществлению технического обслуживания. В нескольких экземплярах ПНП проявилась недостаточная защищенность от жидких осадков, приводящая к попаданию воды на электронную плату и последующему гарантированному выходу прибора из строя. Особенности расположения щеточного узла (между электромотором и электронной платой) способствуют к попаданию графитовой (проводящей) пыли на изоляторы измерительной пластины, снижая их электрическое сопротивление, а также оптический датчик положения крыльчатки, снижая его чувствительность. Со временем это приводит к значительным ошибкам измерений. Соосное с валом электродвигателя расположение электрощетки периодически является причиной возникновения шумовой составляющей в выходных данных ПНП.



Рис. 1. Внешний вид ПНП «Рябина»



Рис. 2. Пыль и насекомые в

электростатическом генераторе

Условия функционирования ПНП предполагают естественное оседание пыли на изоляторах, измерительной и экранирующей пластинах электростатического генератора. Часто под измерительную пластину забираются насекомые, создавая утечку тока на корпус прибора (рис. 2). Пыль и насекомые являются дополнительным источником погрешности измерения и периодически должны удаляться. Чистка может производиться после снятия пластин и изоляторов путем частичной разборки прибора, являющейся трудоемким процессом, реализуемой квалифицированным инженером в условиях лаборатории. После каждой чистки в обязательном порядке проводится калибровка прибора, предполагающая наличие калибровочного стенда. Это в значительной степени затрудняет эксплуатацию ПНП «Рябина».

Усовершенствованная конструкция ПНП

На основе опыта эксплуатации и обслуживания «Рябины» была разработана усовершенствованная конструкция ПНП, позволяющая снизить трудозатраты на техническое обслуживание и требования к обслуживающему персоналу, повысить надежность прибора, унифицировать процесс проведения пусконаладочных работ. Для защиты внутренних частей прибора от попадания жидких осадков в конструкцию включен защитный колпак в виде полусферы с изогнутой трубой (рис.3) для варианта крепления ПНП к мачте, и полого цилиндра с крышкой и треногой для установки на плоской площадке (рис.4). Оба варианта имеют механизм защелки, упрощающий процедуру снятия и установки прибора при осуществлении технического обслуживания. Кроме обеспечения высокой защищенности от жидких осадков, вне зависимости от варианта исполнения защитного колпака, работы по установке ПНП в большинстве случаев не требуют создания дополнительных креплений и могут осуществляться сотрудниками эксплуатирующей организации.



Рис. 3. Вариант конструкции крепления ПНП на мачту

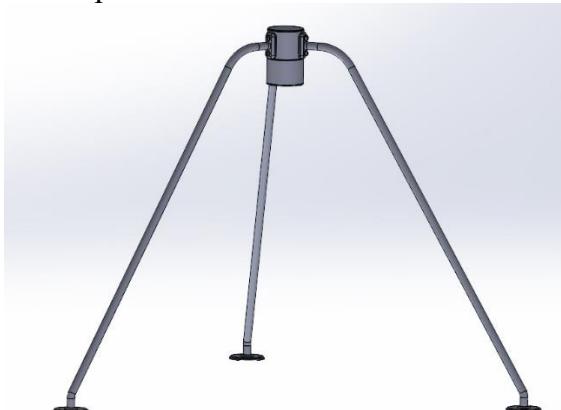


Рис. 4. Вариант конструкции крепления ПНП для установки на площадке

Уменьшение шума скользящего контакта, а также исключение попадания графитовой пыли на изолятор и оптический датчик положения экранирующей пластины достигаются применением щеточного узла, располагаемого непосредственно под измерительной пластиной, за пределами внутренних элементов прибора (рис.5). Для этого вал используемого в ПНП «Рябина» бесколлекторного электродвигателя (maxon EC 32flatmotor) был удлинен. Качественный контакт обеспечивается двумя графитовыми щетками, установленными перпендикулярно валу двигателя. Графитовая пыль не попадает внутрь прибора, а через отверстие в изоляторе выбрасывается наружу.

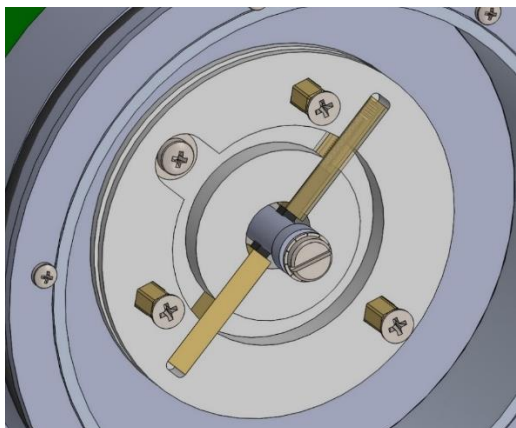


Рис. 5. Внешний вид щеточного узла

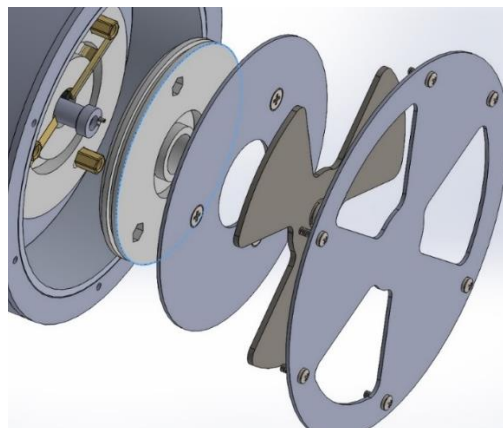


Рис. 6. Конструкция обслуживаемого электростатического генератора

Задача упрощения процедуры чистки пластин и изолятора решена изменением конструкции электростатического генератора (Рисунок 6). Доступ к изолятору обеспечивается путем снятия маски, экранирующей и измерительной пластин. Снятие/установка элементов электростатического генератора не требует высокой квалификации персонала и специализированного инструмента. Все процедуры производятся двумя отвертками (с прямым и крестовым наконечниками). Коррекция калибровочной характеристики при корректной сборке прибора не требуется.

Кроме глубокой переработки конструкции ПНП «Рябина», с целью удешевления прибора и увеличения ресурса, был изменен материал некоторых деталей. В частности, вращающаяся экранирующая пластина (крыльчатка) ПНП «Рябина» была изготовлена из нержавеющей стали путем лазерной резки. Требуемые для обеспечения заданной чувствительности прибора обороты вращения крыльчатки составляли 3600 об/мин. Конструкция соединения крыльчатки с валом электродвигателя не позволяла реализовать балансировку, вращающиеся лопасти постепенно разбивали подшипник. Относительно большая масса крыльчатки из нержавеющей стали и высокие обороты вращения снижали ресурс электродвигателя. В добавок к этому вращающаяся с высокой скоростью крыльчатка создавала значительный уровень акустического шума.

Изготовление крыльчатки на алюминии позволило несколько снизить нагрузку на подшипник. Дополнительно были уменьшены обороты вращения. Это, кроме снижения нагрузки на подшипник, сделало ПНП бесшумным. Однако снижение скорости вращения крыльчатки ведет к пропорциональному снижению уровня полезного сигнала на выходе электростатического генератора. Уровень собственного шума прибора (сумма шумов аналогового тракта и аналого-цифрового преобразователя) в данном случае является определяющим параметром при выборе требуемого для измерения малых значений электрического поля отношения сигнал/шум. При выборе скорости вращения стоит так же отметить важность учета частоты сетевых наводок с основной гармоникой 50 Гц и побочными в диапазоне до 2-3 кГц, которые не должны пересекаться с частотой преобразования ПНП, определяемой как произведение числа лопастей крыльчатки на частоту вращения. В ПНП «Рябина» частота преобразования составляла значение 360 Гц ($6 \cdot 60$ об/с).

В усовершенствованной конструкции было принято решение снизить частоту вращения в 3 раза. Кроме того, в целях упрощения изготовления и повышения прочностного числа лопастей крыльчатки уменьшено с шести до трех. Таким образом частота преобразования снизилась в 6 раз до 60 Гц. Эта частота лежит между первой и второй гармониками сетевой наводки и в нормальных условиях эксплуатации

потенциально позволяет проводить измерения в полосе до 35 Гц. С учетом сохранения геометрических размеров измерительной и экранирующей пластин уровень полезного сигнала на выходе электростатического генератора уменьшился в 6 раз, что потенциально снижает чувствительность прибора, но, как выяснилось в результате испытаний, оказался достаточным для обеспечения требуемых характеристик ПНП.

Электронная часть ПНП «Рябина» с минимальными доработками была установлена в усовершенствованный датчик. В целях упрощения из схемы были исключены цифро-аналоговый преобразователь, элементы коммутации входа усилителя тока (УТ) и щеточного узла, предназначенные для физической компенсации контактной разности потенциалов, реализуемой в усовершенствованном ПНП программно. Интерфейс подключения и формат выходных данных оставлены без изменений с целью обеспечения обратной совместимости пользовательского программного обеспечения. Структурная схема прибора представлена на рисунке 7.

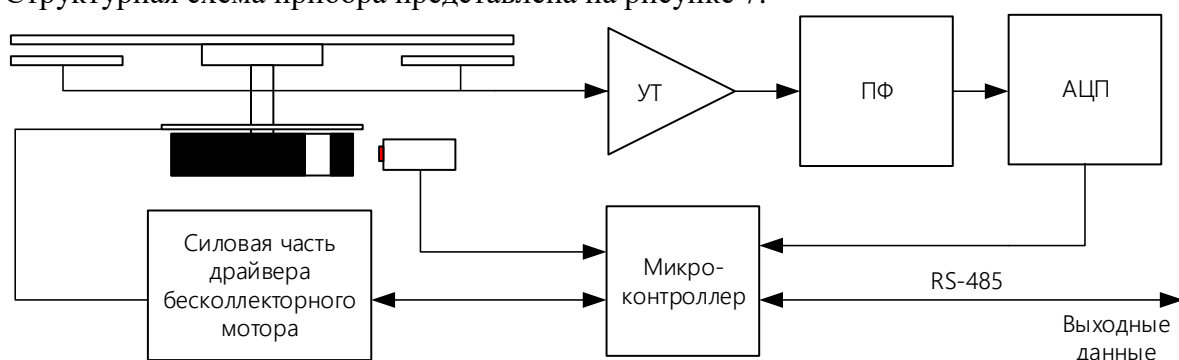


Рис. 7. Структура электронной части ПНП

Входной аналоговый полосовой фильтр (ПФ) для подавления составляющих входного сигнала выше половины частоты Найквиста, снижения влияния сетевой наводки и усиления полезной составляющей на частоте преобразования 60 Гц путем замены номиналов пассивных компонентов, без изменения схемы был перестроен (Рис. 8).

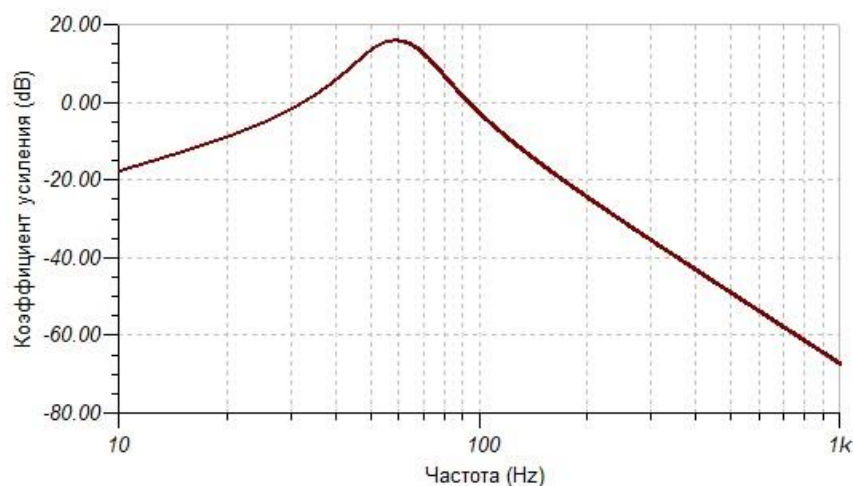


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра

Незначительной переработке было подвергнуто встроенное программное обеспечение ПНП. Снижение частоты преобразования и перестройка аналогового полосового фильтра позволили уменьшить частоту дискретизации АЦП с 1620 Гц до 180 Гц. Это привело к снижению уровня шумов АЦП (ad7734) более чем в 2 раза. Перенос полезной составляющей входного сигнала на нулевую частоту реализован так

же как в ПНП «Рябина», путем умножения на квадратурные составляющие с частотой 60 Гц с последующей фильтрацией и децимацией для ограничения полосы входного сигнала значением 5 Гц. Для получения выходных данных с частотой 10 Гц используются два децимирующих фильтра с коэффициентом децимации 3 и один с коэффициентом 2.

В результате испытаний усовершенствованного ПНП в калибровочном стенде были подтверждены основные характеристики. Диапазон измеряемых значений электрического поля +/- 30 кВ/м при частоте следования выходных данных 10 значений в секунду. Несмотря на шестикратное, за счет снижения частоты вращения крыльчатки и уменьшения числа лопастей крыльчатки, снижение амплитуды полезного сигнала электростатического генератора, чувствительность прибора обеспечивает разрешающую способность 1 В/м. Применения нового щеточного узла позволило устранить побочные шумы.

Выводы

На основе выявленных особенностей конструкции ПНП «Рябина» создан новый, отличающийся удобством эксплуатации, простотой технического обслуживания и значительно большей надежностью прибор. Реализация представленных решений позволяет проводить долговременные непрерывные наблюдения за атмосферным электричеством при решении как научных, так и прикладных задач.

Доклад подготовлен при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378, <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>

Литература

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
2. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. Т. 180. № 5. С. 527–534. 2010.
3. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т.29, №8. С. 647-653.
4. 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.
5. Murphy, M.J., R.L. Holle, and N.W.S. Demetriades (2008), Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations, paper presented at 20th International Lightning Detection Conference, Vaisala Inc., Tucson, AZ, U.S.
6. CS110 Electric field meter. Instruction manual. Campbell Scientific, Inc. P. 12. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs110.pdf>
7. EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor. Installation/Operators Guide. BOLTEK CORPORATION. P. 53. http://www.boltek.com/EFM-100_Manual_03102015.pdf
8. Аджиева А.Х., Коровин Е.А., Чернышев С.В., Щукин Г.Г., Кулиев Д.Д. Измеритель напряженности электрического поля атмосферы // Приборы и техника эксперимента. 2017. №5. -С. 125-129.
9. Bennet A.J. Measurement of atmospheric electricity during different meteorological conditions: a Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. University of Reading, Department of Meteorology, 2007.
10. EFM550 Thunderstorm Electric Field Mill. Datasheet. Vaisala Inc. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/EFM550-Datasheet-B210372EN-J.pdf>