

Датчик напряженности электрического поля Земли

Е.А. Коровин¹, В.А. Ефимов², Д.А. Денисенков¹, О.А. Крисанова¹, А.А. Рудь¹,
С.В. Чернышев¹

¹Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального 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

В данной работе представлены основные технические решения, реализованные при создании электростатического флюксметра, обозначены направления дальнейшего совершенствования прибора. Предложен вариант автономного устройства хранения и ретрансляции данных напряженности электрического поля.

The article presents the main technical solutions which implemented with creation of electrostatic flux meter. It is denoted the directions for further improvement of the device. The option is suggested of the offline storage device and retransmission findings of tensions the electric field.

Введение

Электрическое поле Земли, является неотъемлемым фактором в общей системе геофизических полей. С ним связано протекание многих природных явлений, как в толще атмосферы, так и непосредственно у поверхности Земли [1]. Данные о напряженности электрического поля Земли востребованы как в исследовательских целях, так и при решении задач раннего предупреждения об опасности возникновения грозных очагов, а так же в системах обеспечения подготовки и запуска ракет-носителей [2].

В настоящее время измерения напряженности электрического поля Земли на сети Росгидромета производятся с помощью прибора «Поле-2», разработанного в ГГО им. А.И. Воейкова в 70-х годах прошлого столетия. Данный прибор значительно уступает по техническим и эксплуатационным характеристикам своим зарубежным аналогам «EFS 1001», «CS110», «EFM550» и «EFM-100». В данной работе представлены технические решения, определяющие алгоритм функционирования датчика напряженности электрического поля Земли, построенного на современной элементной базе с применением цифровой обработки сигналов.

Особенности устройства датчика напряженности электрического поля

Основой представленного в работе [2] прибора является электростатический генератор, модулирующий внешнее электрическое поле частотой 360 Гц. Данный прибор состоит из аналоговой и цифровой частей. Особенностью прибора является то, что практически вся обработка сигнала является цифровой. В аналоговом тракте осуществляется лишь преобразование тока измерительной пластины в напряжение и ограничение полосы входного сигнала антиэлайзинговым фильтром. Данное техническое решение позволило устранить часть недостатков приборов с аналоговой обработкой.

Вместе с тем часть проблем, связанных с аналоговой частью, остались нерешенными. Так, одним из требований при сборке данного прибора, является точная настройка оптического датчика, которая должна обеспечить формирование импульса синхронизации по максимуму входного сигнала. Погрешность настройки согласно [3]

не должна превышать 10-15 градусов. С учетом того, что за один оборот крыльчатки формируется 6 периодов входного сигнала, угловой сектор одного периода составит величину $360/6=60$ градусов. В результате максимальное значение погрешности установки углового положения крыльчатки относительно вала бесколлекторного мотора составит $60*15/360=2,5$ градуса. Очевидно, что настройка механической части такого прибора является довольно трудоемкой процедурой.

С изменением внешней температуры, более чем на 20^0 С, в приборе наблюдается фазовый сдвиг синхронизирующих импульсов относительно начального положения. Это связано с особенностями устройства оптической системы, включающей оптопару и чередующиеся маркеры на валу бесколлекторного мотора. При изменении температуры наблюдаются искажения фронтов электрических сигналов оптической системы. Это приводит к температурным вариациям показаний прибора. Для устранения данного эффекта необходимо вводить индивидуальную для каждого экземпляра прибора температурную калибровочную характеристику.

Применение во флюксметре бесколлекторного мотора швейцарской фирмы тахоп позволяет обеспечить высокую надежность прибора и низкий уровень электромагнитных помех в полосе пропускания измерительного тракта. Управление электромотором осуществляется посредством рекомендованного фирмой тахоп контроллера DEC 24/1. Требуемая частота вращения устанавливается однократно, путем выбора номинала соответствующего резистивного делителя. Обратная связь, а значит и контроль параметров электромотора со стороны микроконтроллера, осуществляющего управление прибором, отсутствует. Кроме того, диапазон рабочих температур контроллера DEC 24/1 составляет $-20^0...+50^0$ С, что не соответствует диапазону

$-40^0...+50^0$ С, заявленному в технических характеристиках флюксметра. Обеспечение требуемого диапазона температур достигается установкой в корпусе прибора датчика температуры и нагревательного элемента. Контроллер управления флюксметра через заданные промежутки времени производит измерение температуры внутри прибора, и осуществляет включение нагревательного элемента по достижении последней нижнего предела температурного диапазона контроллера электромотора. С учетом наличия режима поддержания требуемой температуры внутри прибора, общее потребление электрической энергии будет зависеть от внешней температуры и может принимать значения, различающиеся на порядок. Сам нагревательный элемент выполнен на отдельной печатной плате и требует наличия соответствующих крепежей.

Аналоговая и цифровая части прибора, с целью снижения взаимного влияния, выполнены в виде отдельных печатных плат, располагаемых одна над другой. Таким образом, электронная часть прибора выполнена в виде четырех отдельных блоков, располагаемых внутри герметичного корпуса. Электрическое соединение блоков, с целью увеличения надежности, реализовано без использования разъемов.

Представленная выше конструкция была в значительной степени переработана. В первую очередь, из схемы был исключен контроллер бесколлекторного мотора DEC 24/1. Программа микроконтроллера, реализующего функции цифровой обработки сигнала и управления флюксметром, была дополнена функцией управления электромотором. Данное техническое решение имеет ряд существенных преимуществ. А именно:

- снимаются ограничения по нижней температурной границе -20^0 С;
- программная реализация контроллера управления бесколлекторным мотором может быть адаптирована для работы с электромоторами различных производителей (можно применять бесколлекторные моторы отечественного производства);

- возможность оперативного контроля параметров электродвигателя (потребляемый ток, текущие обороты и т.п.).

Аналоговая и цифровая части нового прибора размещаются на одной печатной плате (Рис 1.).

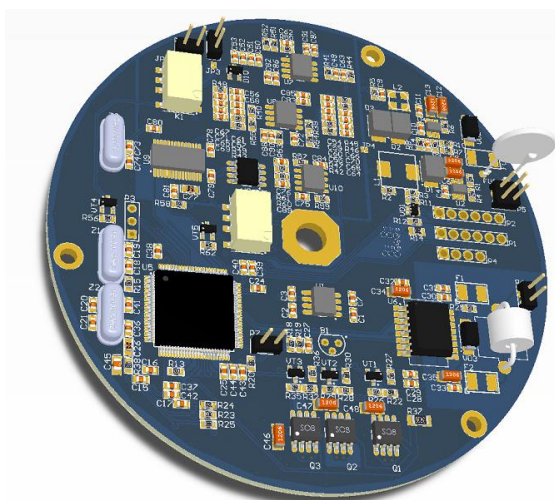


Рис. 1. Внешний вид электронной части флюксметра

Минимизация воздействия шумов цифровой части схемы на аналоговый тракт обеспечивается отдельным питанием и локализацией аналоговой части схемы. Силовая часть контроллера бесколлекторного мотора и интерфейс связи RS-485 расположены на максимально возможном удалении от входного преобразователя ток-напряжение.

Схема нового прибора дополнена модулем цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), позволяющего формировать сигналы заданной формы (Рис. 2). Подключение выхода ЦАП на вход аналогового тракта позволяет осуществить оперативный контроль температурных вариаций коэффициента усиления. Коммутируя выход ЦАП на экранирующую пластину, можно реализовать компенсационный метод измерения электрического поля [4]. В данном случае изменение потенциала экранирующей пластины аналогично изменению потенциала дополнительной сетки.

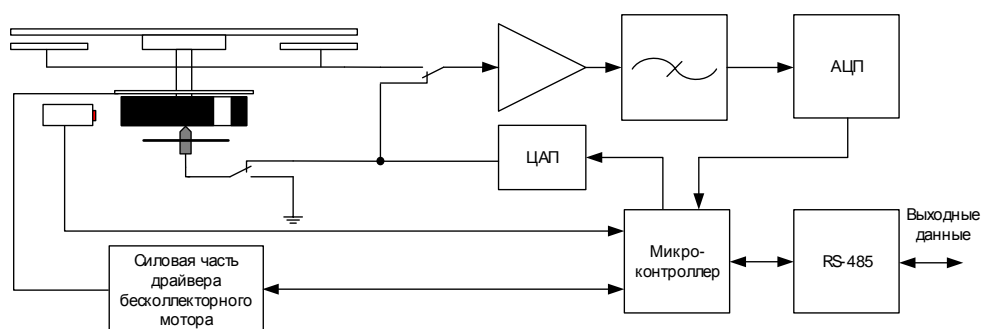


Рис. 2. Структурная схема прибора

В алгоритм работы прибора заложена возможность управления отдельными функциями (выбор формы и уровня сигнала ЦАП, коммутация сигнала ЦАП, управление электродвигателем) путем подачи внешних команд через интерфейс RS-485. Это позволяет реализовать дополнительные алгоритмы самокалибровки прибора без модификации встроенного программного обеспечения.

Структура выходных данных нового прибора дополнена информацией о текущих параметрах электродвигателя (частота вращения и ток в цепи статора) и самодиагностики

(ошибки инициализации, сбой синхронизации оптической системы, ошибки аналого-цифрового преобразователя, ошибки аналогового тракта).

Аналоговый тракт флюксметра оставлен в неизменном виде. Учитывая достаточно пологий спад АЧХ (30 dB по напряжению на октаву), для тактирования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) была выбрана более высокая частота дискретизации - 1620 Гц. Это позволило в значительной степени (около 25 dB) снизить влияние внеполосных помех относительно первоначального варианта и исключить из процедуры настройки прибора поиск максимума выходного сигнала.

Цифровые отсчеты с выхода АЦП поступают в микроконтроллер для получения данных о знаке и амплитуде действующего на прибор электрического поля. Применение схемы обработки (Рис. 3), реализованной в варианте прибора, рассмотренного в работе [2], имеет существенный недостаток. Операция взятия входного сигнала по модулю $|X_n|$ эквивалентна операции умножения на опорный сигнал, но менее требовательна к вычислительным ресурсам. Вместе с тем, при наличии на входе прибора электрического поля помех с напряженностью, превышающей напряженность поля Земли, использование данной операции приводит к значительным ошибкам.

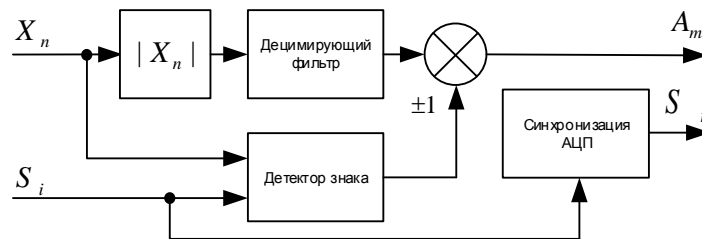


Рис. 3. Упрощенная схема обработки цифрового сигнала

Применение в приборе более производительного микроконтроллера позволило осуществить цифровую обработку сигнала согласно схеме, представленной на Рис. 4.

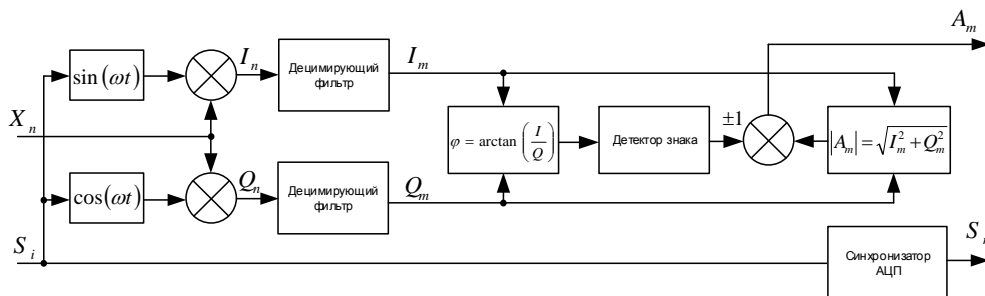


Рис. 4. Схема обработки цифрового сигнала

Два опорных сигнала $U_i = \sin(\omega t)$ и $U_q = \cos(\omega t)$ с равной частотой $f = 360$ Гц, хранятся в памяти микроконтроллера в виде пары массивов длиной 9. Выбор значений из данных массивов для умножения входного сигнала на опорный синхронизирован с сигналом оптической системы. После умножения, сигналы I_n и Q_n поступают на децимирующие фильтры, в которых производится подавление внеполосных частотных составляющих сигнала. Далее производится определение амплитуды входного сигнала:

$$|A_m| = \sqrt{I_m^2 + Q_m^2}. \quad (1)$$

Для вычисления знака используется выражение:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_m}{Q_m}\right). \quad (2)$$

Угол φ , в условиях отсутствия помех, может принимать два значения, определяемых угловым положением маркера на валу бесколлекторного мотора, относительно лопастей крыльчатки, и направлением силовых линий действующего на входе прибора электрического поля. Эти значения связаны между собой выражением $\varphi_+ = \pi + \varphi_-$. Так как угловое положение маркера относительно крыльчатки фиксировано, угол φ зависит только от знака действующего на прибор поля. При настройке прибора на его вход действует поле с известным знаком. Значение угла φ , вычисленное в этих условиях, записывается в долговременную память микроконтроллера, и используется в дальнейшем для определения знака электрического поля. Так, если при воздействии на вход прибора тестового поля, определено значение φ_+ , то в рабочем режиме данному направлению силовых линий электрического поля соответствуют значения φ , лежащие в диапазоне

$$-\frac{\pi}{2} + \varphi_+ < \varphi < \frac{\pi}{2} + \varphi_+. \quad (3)$$

Знак меняется на противоположный при условии

$$-\frac{3\pi}{2} + \varphi_+ < \varphi < \frac{3\pi}{2} + \varphi_+. \quad (4)$$

Применение такой схемы обработки сигнала позволяет в значительной степени упростить процедуру настройки механической части прибора, реализовать подавление всех внеполосных помех, а также устранить влияние температурной нестабильности оптической системы синхронизации и, соответственно не включать в алгоритм работы флюксметра процедуру коррекции выходных данных по соответствующей калибровочной характеристике.

В результате усовершенствования конструкции электростатического флюксметра получен качественно новый прибор. Проверка прибора в климатической камере подтвердила верность технических решений. Отклонение показаний флюксметра не превышало 2% в диапазоне температур $-60 \dots +60^\circ \text{C}$. Два прибора, установленные на метеоплощадке и функционирующие без сбоев в течении одного года, позволяют сделать предварительные выводы о высокой надежности устройства.

Довольно часто измерения в условиях поля, деформированного рельефом или зданиями. Показания прибора в этом случае отражают лишь относительные значения напряженности поля. Для получения абсолютных значений, находят коэффициент редукиции [5], на который необходимо умножать относительные значения. Учет редукиционного множителя можно реализовать путем установки требуемого коэффициента усиления аналогового тракта флюксметра. Такой подход позволит расширить динамический диапазон измерений. В ближайшей перспективе предполагается реализация функции регулировки коэффициента усиления аналогового тракта путем отправки соответствующей команды управления от внешнего устройства.

Информация о текущем состоянии поля может быть получена непосредственно от датчика с использованием вычислительной машины с интерфейсом RS-485 и специализированного программного обеспечения. В случае автономной работы датчика, прием данных, их хранение и передачу на сервер можно реализовать с использованием специализированного устройства, в состав которого входят модемы беспроводных систем связи, навигационный приемник, карта памяти для хранения данных, интерфейс связи с флюксметром и контроллер управления (Рис. 5).

Приемник навигационной системы необходим для автоматического определения координат прибора (координаты позволят идентифицировать на сервере данные нескольких приборов).

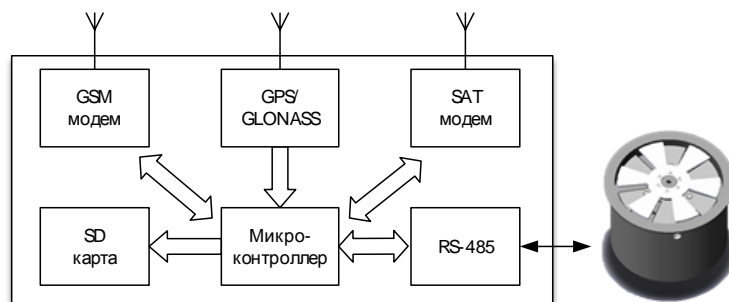


Рис. 5. Схема устройства сбора, хранения и передачи данных

Тип беспроводного модема определяется наличием соответствующих систем связи в районе установки флюксметра. Это может быть GSM, либо спутниковый модем для проведения измерений в отдаленных районах. Устройство сбора, хранения и передачи данных должно иметь небольшие размер, массу, обеспечивать непрерывную работу в условиях низких температур и обладать низким энергопотреблением.

Данное устройство позволит в автоматическом режиме ретранслировать данные о напряженности электрического поля потребителям. Доступ к информации о напряженности электрического поля Земли в различных районах может быть реализован через глобальную сеть интернет.

Выводы

Представленные технические решения позволили в значительной степени повысить надежность, улучшить помехозащищенность, снизить потребляемую мощность, упростить конструкцию и процесс калибровки датчика напряженности электрического поля Земли. Разработка устройства сбора, хранения и передачи данных позволит производить измерения поля в автоматическом режиме, что может быть актуально в случае включения прибора в состав автоматических метеостанций. Доступ потребителей как к текущей, так и архивной информации может быть обеспечен при использовании серверов, подключенных к сети интернет.

Литература

1. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы – М.: Гостехиздат, 1957.
2. Ефимов В.А., Готюр И.А., Щукин Г.Г. Измеритель напряженности электрического поля Земли с применением цифровых методов обработки сигнала. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4 (20). С. 36-42.
3. 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.
4. 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.
5. Тверской, П.Н. Атмосферное электричество / Проф. П.Н. Тверской. – Л. : Гидрометеиздат, 1949. – 252 с. – Библиогр.: с. 252.