

УДК 621.317.32

**В.Г. Баженов¹, Н.А. Якимчук^{2,3}, С.В. Грузин¹,
И.С. Пидлисна⁴**

*¹Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”, г. Киев*

*²Институт прикладных проблем экологии,
геофизики и геохимии, г. Киев*

*³Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле
ИГН НАН Украины, г. Киев*

*⁴Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
г. Киев*

МЕТОД И АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Приведены краткий обзор и анализ основных методов измерения напряжённости электрического поля. Рассмотрены цифровой метод и разработанная на его базе аппаратура для измерения и беспроводной передачи информации с целью дальнейшей обработки, регистрации, визуализации и документирования на компьютере.

Ключевые слова: измерение, напряжённость электрического поля, динамический метод, цифровые технологии, микроконтроллер, АЦП, GPS, беспроводная передача данных, автошкала, компьютер.

Задача измерения напряжённости электрических полей возникает в различных отраслях промышленности, связанных с производством или с широким использованием синтетических материалов, в которых может накапливаться статическое электричество, что может привести к серьёзным последствиям. Это стало особенно актуальным в связи с бурным развитием технологий морских нефтеперевозок (производство крупнотоннажных танкеров): накопление статического электричества при транспортировке нефти приводило к экологическим катастрофам.

Рост энерговооружённости промышленности обусловил построение линий электропередач (ЛЭП), уровни передач напряжений на которых уже превышают 1000 кВ. Это привело к необходимости изучения вопросов воздействия низкочастотных полей как на человека, так и на окружающую среду, создаваемых самими энергетическими установками и воз-

душными ЛЭП. Решение данных вопросов также невозможно без средств измерения напряжённости электрических полей низкой частоты.

Указанные задачи в основном связаны с измерениями очень высоких значений электрической напряжённости или с измерениями электрических полей переменной промышленной частоты. Для решения таких задач используются специфические методы и аппаратура.

Вопросы измерения электростатических полей в атмосфере интересуют учёных с давних времён. Используя механические электроскопы, такими измерениями занимались ещё М.В. Ломоносов и Г.В. Рихман в середине XVIII в.

При измерениях напряжённости электростатических полей в атмосфере было установлено, что в значительной степени эта величина определяется не только временем дня или ночи либо высотой над земной поверхностью, на которой производятся измерения, но и местоположением точки измерения на земном шаре. Научные дискуссии о природе происхождения атмосферного электричества ведутся учёными по настоящее время. Первоначально выдвигалась гипотеза о том, что происхождение электростатических полей обусловлено движением облаков. Однако на основе экспериментов Лемонье было установлено, что электрические явления имеют место и в безоблачной атмосфере. Действительно, наличие облаков в атмосфере может существенно изменить результаты измерений “электричества хорошей погоды”. В работах [4, 5, 11] отмечается, что атмосферное электричество зависит от приземного ионизирующего воздействия космических лучей и радона, а также от погодных изменений. Это дало повод знаменитому английскому физику Томсону предположить, что в будущем погоду будут предсказывать с помощью электрометра.

Расширение географии измерений атмосферного электричества и увеличение их интенсивности привели к установлению его связи с геомагнитными аномалиями земной коры. Это позволило геофизикам использовать его для решения задач поиска и разведки полезных ископаемых, а также инженерной геологии.

Однако несмотря на некоторое сходство измерений электрической напряжённости в атмосфере при изучении явлений атмосферного электричества и при решении задач поиска, имеются очень существенные различия в требованиях к аппаратуре измерений, которые изложены ниже.

I. При измерениях явлений атмосферного электричества:

- аппаратура является стационарной, устанавливается в одной точке;
- аппаратура устанавливается на удалении от людей и строений на специальных площадках с выкошенной травой;
- измерения выполняются не непрерывно, а через определённые интервалы времени в течение суток.

II. При решении задач поиска:

- аппаратура должна быть мобильной – соответственно иметь малую массу, автономное питание и низкое энергопотребление, поскольку не исключается её использование на радиоуправляемом беспилотном летательном аппарате или оператором во время передвижения и выполнения измерений; для минимизации влияния оператора на процесс измерения во время движения предполагается измеритель удерживать на небольшом удалении от оператора и от земли (не менее 0,5 м) на специальной штанге;
- измеритель напряженности должен быть быстродействующим, поскольку оператор может двигаться довольно быстро (беспилотный летательный аппарат);
- для документирования результатов измерения необходимо иметь данные о координатах точек измерения, т. е. обязательно должен быть модуль GPS или ГЛОНАСС либо совмещенный модуль GPS/ГЛОНАСС;
- учитывая необходимость оперативного проведения поиска на заданных участках местности, необходимо полностью автоматизировать процесс регистрации результатов измерений электрического поля параллельно с процессом регистрации координат местности, что возможно при создании цифрового измерителя электрического поля;
- использование модулей беспроводной связи позволит производить автоматически комплексную регистрацию и документирование результатов измерения с помощью ноутбука на удалении от оператора или от летательного аппарата; при этом создаются предпосылки для максимальной миниатюризации измерительного модуля и максимальной минимизации факторов, влияющих на процесс измерения.

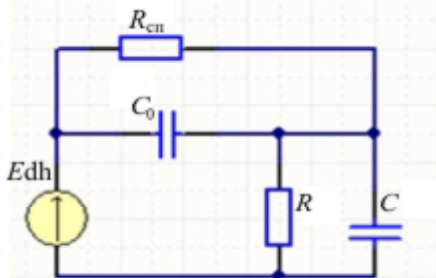


Рис. 1. Эквивалентная схема измерительного преобразователя: C_0 – собственная емкость зонда (или пластин) измерителя напряжённости электрического поля; C – емкость измерительной схемы; R_{cp} – сопротивление среды, обусловленное ионными токами среды; R – сопротивление измерительной схемы; E_{dh} – источник напряжения, обусловленный напряженностью E электрического поля

В результате проведенного обзора, а также анализа научно-технической литературы и патентов [1, 3, 4, 7, 8] установлено, что имеется два основных метода измерения напряженности электрического поля – статический и динамический, или ротационный.

Для экспресс-анализа рассматриваемых методов предлагается упрощенная эквивалентная схема измерительного преобразователя (рис. 1).

Статический метод измерения наиболее простой, он возник с появлением механических электрометров

Для анализа схемы в этом случае ёмкостью зонда C_0 можно пренебречь. Тогда измеряемое напряжение на входе измерителя по окончании переходных процессов, связанных с зарядом емкости C токами проводимости среды (ионными токами), определяется из выражения

$$U_R = \frac{E_{dh} \cdot R}{R + R_{cp}}. \quad (1)$$

К сожалению, это напряжение на входе измерительной цепи, согласно второму закону коммутации [2], появится не сразу, через время $t = 4R_{cp} C$ оно достигнет 98 % U_R [4] (если считать E_{dh} как скачок напряжения).

Оценка данного времени даёт неутешительные результаты. Например, известно [5, 11], что сопротивление воздуха, обусловленное ионными токами, составляет 10^{16} Ом. Предположим, что при использовании механического электрометра сопротивление R определяется сопротив-

лением изоляторов, к которым крепится зонд, и может быть равно 10^{14} Ом, емкость $C = 1$ пФ. Предположим также, что зонд находится на высоте 1 м, напряжённость $E = 100$ В/м. Тогда из выражения (1) следует, что для $U_R = 100/101$ В, т. е. практически $U_R = 1$ В, а время измерения $t = 4R_{cp} C = 4 \cdot 10^4$ с.

На основании рассмотренного примера можно сделать выводы. Во-первых, при использовании электронных измерительных схем для получения нормальной чувствительности на входе необходимо использовать специальные схемы электронных усилителей заряда с большим R , что приводит к значительным сложностям. Во-вторых, что самое главное, при измерении статического электричества смириться с таким временем измерения очень трудно. В связи с указанным применяют специальные зонды (коллекторы) [3, 4], которые кроме своей основной функции ещё увеличивают проводимость среды вокруг себя. Это коллекторы с радиоактивными изотопами, пламенные коллекторы, работающие за счет коронного разряда и др. Время измерения с использованием таких коллекторов значительно меньше и может колебаться от 10 до 60 с [4]. Поэтому измерители электрической напряжённости, реализующие статический принцип измерения используются только для измерения электрической напряжённости переменных полей промышленной частоты. Эти измерители устроены очень просто, могут иметь малые габариты и измерять напряженность в нескольких плоскостях одновременно.

Для анализа работы измерительного преобразователя электрической напряжённости переменной частоты в эквивалентной схеме (рис. 1) с достаточной степенью точности можно пренебречь резистором R_{cp} . Будем учитывать только емкость C_0 зонда (чаще всего это пластины). Таким образом, за счет переменного электрического поля на пластинах индуцируются заряды с частотой сети, что приводит к появлению переменного тока в измерительной цепи. Можно показать, например, что если емкость зонда составит 20 пФ, то на частоте сети 50 Гц сопротивление $Z_c = 159 \cdot 10^6$ Ом, т. е. значительно меньше R_{cp} , и чувствительность таких измерителей напряженности переменного электрического поля увеличивается на несколько порядков. Особо следует отметить, что подобные измерители реализуются на электронных компонентах. Увеличение чувствительности измерителей позволяет проводить измерение переменных электрических полей с частотой сети и очень затрудняет их исполь-

зование при измерении постоянных электрических полей вследствие помех с частотой сети. Как показывает опыт, при наличии рядом с таким измерителем сетевой электропроводки его использование для измерения напряжённости постоянных полей без специальных схем защиты от наводок с частотой сети практически невозможно.

Динамический метод измерения электрической напряжённости поля предполагает модуляцию постоянного электрического поля с преобразованием его из постоянного в переменное путём, например, попеременного экспонирования и экранирования измерительных пластин. Таким образом, принцип работы измерительного преобразователя будет такой же, как для поля переменной частоты (в эквивалентной схеме рис. 1 источник напряжения будет переменным). Известно [6, 9], что под действием электрической напряжённости E в открытой пластине, являющейся частью конденсатора C_0 , с площадью S будет наводиться (индуцироваться) заряд, равный

$$Q = \frac{E \cdot S}{4\pi}.$$

Если площадь пластины будет неизменной ($S = \text{const}$), то ток в резисторе R , согласно известному уравнению

$$i = \frac{dQ}{dt},$$

будет отсутствовать.

Согласно блок-схеме преобразователя ротационного типа (рис. 2), заземлённая пластина 1 попеременно экранирует и экспонирует две пары измерительных пластин 3 , подключенных ко входам дифференциального усилителя 4 . Соответственно, в пластинах меняется индуцированный заряд, что вызывает переменный ток в резисторах R , условно определяемых двумя дифференциальными входами усилителя 4 . Нетрудно показать, что за период вращения T заземлённой пластины 1 ток изменит своё направление 4 раза. Таким образом, динамический способ измерения позволяет выполнять одно полноценное измерение напряжённости электрического поля за время не более $1/2$ периода вращения двигателя, что на несколько порядков может превышать быстродействие измерений статическими методами (даже с использованием радиоактивных коллекторов).

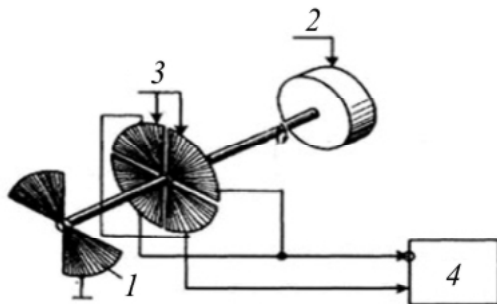


Рис. 2. Блок-схема измерительного преобразователя ротационного типа. Объяснения в тексте

С учетом изложенного (а именно высокого быстродействия измерений, высокой чувствительности) для реализации поставленных выше требований для измерителя напряжённости электрических полей представляется целесообразным использовать динамический метод измерения.

На основе этого метода измерения электрической напряжённости поля разработан и изготовлен цифровой мобильный измеритель [10], в соответствии с поставленными выше требованиями (рис. 3, 4).

Главная особенность измерителя заключается в том, что он является цифровым, т. е. аналоговый сигнал с измерительного преобразователя преобразуется в код с помощью 12-разрядного АЦП, управля-

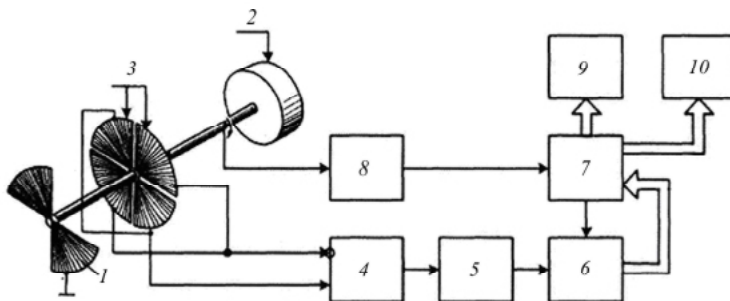


Рис. 3. Функциональная схема цифрового измерителя электрической напряжённости: 1 – экранирующая (заземлённая) пластина; 2 – электродвигатель; 3 – две пары измерительных пластин; 4 – дифференциальный усилитель; 5 – фильтр; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – микроконтроллер; 8 – датчик синхросигнала положения пластины; 9 – цифровой дисплей; 10 – модуль беспроводной передачи цифровой информации



Рис. 4. Внешний вид компактного цифрового измерителя электрической напряжённости поля

емого микроконтроллером по специальному алгоритму. Алгоритм обработки следующий. Первоначально по синхросигналу с датчика положения заземлённой пластины δ , соединённого с одним из входов микроконтроллера 7, фиксируется положение пластины в пространстве, рассчитывается период её обращения, а также моменты запуска АЦП 6 микроконтроллером 7 (см. рис. 3). Известно, что фиксация положения экранирующей пластины необходима для определения полярности напряжённости. Алгоритм расчета моментов запуска АЦП вытекает из анализа графиков формы сигнала (рис. 5) на выходе измерительного преобразователя, а также аналитических выражений, описывающих их [1]:

$$U_R = \frac{2\varepsilon E_0 S_0 R}{T \left(1 - \frac{2RC_m''}{T}\right)} \times \left(1 + \frac{2}{1 + \frac{2RC_m''}{T}} \frac{\left[1 + \frac{C_m''}{C'} \left(1 - \frac{2t}{T}\right)\right]^{\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} \left[\left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} - 1\right]}{\left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} - \left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{\left(1 + \frac{T}{2RC_m''}\right)}} \right) \quad (2)$$

$$\text{При } \frac{T}{2RC_m} = 1$$

$$U_R' = \frac{\varepsilon E_0 S_0}{2C_m} \left\{ \frac{2 \ln \left(1 + \frac{C_m''}{C'} \right)}{1 - \left(1 + \frac{C_m''}{C'} \right)^{-2}} - 2 \ln \left[1 + \frac{C_m''}{C'} \left(1 - \frac{2t}{T} \right) \right] - 1 \right\},$$

$$\text{где } \frac{2t}{T} = v; \quad \frac{T}{2RC_m} = \rho; \quad \frac{C_m''}{C'} = m; \quad U_R = U_1; \quad U_R' = U_1'.$$

На графиках рис. 5, нормированных по осям X и Y , а также в аналитических выражениях, которые описывают работу измерительного преобразователя, реализующего ротационный способ, учтены не только токи индукции, наводимые зарядами пластин, но и конвекционные (ионные) токи в атмосфере. Можно заметить, что увеличение амплитуды сигнала преобразователя и уменьшение времени измерения пропорциональны частоте вращения $1/T$ экранирующей пластины. Однако напряжение, снимаемое с измерительных пластин, при уменьшении периода вращения принимает сложную форму (рис. 5, кривая $p = 0,01$).

Представляется целесообразным использовать выборки (запускать АЦП) сигнала только в районе положительных и отрицательных пиков сигнала, а амплитуду сигнала рассчитывать как разность усреднённых значений этих пиков. Это позволяет существенно увеличить коэффициент преобразования измеряемого параметра, снизить требования к алгоритмам фильтрации сигнала, уменьшить объём используемой оперативной памяти. Кроме того, расчет амплитуды выходного сигнала как разности положительных и отрицательных пиков существенно снижает требования к дрейфу операционного усилителя. Как следует из выражения (2), амплитуда сигнала зависит от частоты вращения и, таким образом, изменение этой частоты может привести к погрешностям. Поэтому результат измерения периода вращения используется алгоритмом работы микроконтроллера для непрерывной коррекции результата измерения электрической напряжённости. Представление результатов измерения в виде цифрового кода позволяет использовать цифровые тех-

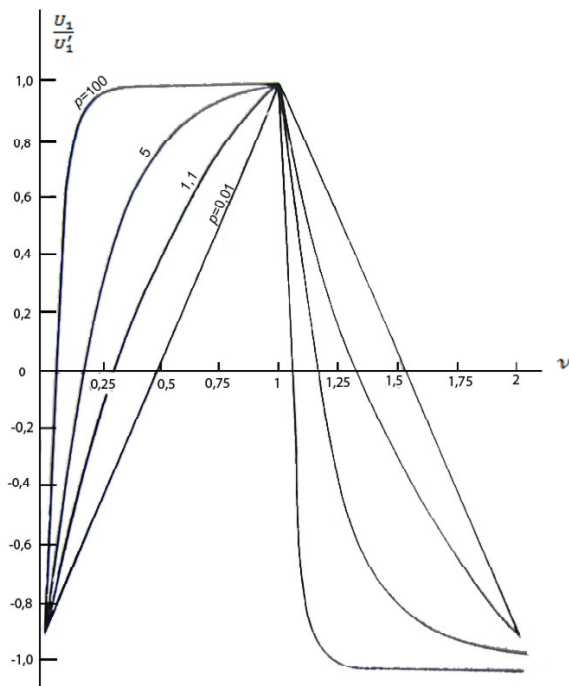


Рис. 5. Форма сигнала на выходе измерительного преобразователя

нологии беспроводной передачи информации, что кроме увеличения мобильности устройства за счет отсутствия необходимости хранения, дальнейшей обработки, регистрации и визуализации данных, существенно уменьшает ошибки измерения при влиянии окружающих факторов. Использование микроконтроллера со встроенными АЦП и усилителем с регулируемым коэффициентом усиления позволило, кроме приведенного выше реализовать измеритель напряжённости электрического поля с автоматическим выбором предела измерений до ± 10 кВ. Измеряемую напряжённость электрического поля можно непрерывно регистрировать и визуализировать на мониторе компьютера (рис. 6), при этом фиксируются данные и о координатах измерения с модуля GPS. С помощью известных программ вся информация может быть представлена на мониторе в виде карты распределения линий одинаковой напряжённости электрического поля на местности. При визуализации информации (рис. 6) по осям Y и X используется автошкала, что дает возможность макси-

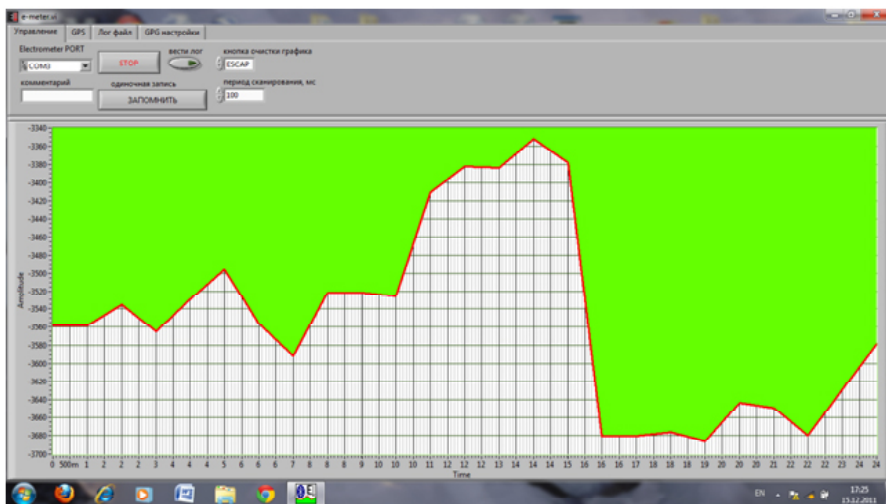


Рис. 6. Вид панели компьютера с примером представления регистрируемой информации об изменении напряжённости поля

мально визуализировать полученную информацию на весь экран монитора, т. е. в зависимости от уровня и времени полученного сигнала автоматически изменяется масштаб как по оси Y , так и по оси X таким образом, чтобы максимальный уровень полученного за время исследований сигнала был представлен на всю шкалу.

Таким образом, использование цифровых технологий обработки сигналов, последних достижений в области микроэлектроники по обработке цифровых данных и их беспроводной передаче на расстояние дало возможность разработать и реализовать новые алгоритмы выполнения и регистрации измерений электрического поля и изготовить аппаратуру, соответствующую поставленным выше требованиям для решения задач поиска и разведки полезных ископаемых. При этом регистрацию результатов измерений можно выполнять на стандартном компьютере, который может оставаться неподвижным. С помощью компьютера результаты обрабатываются, регистрируются, накапливаются и документируются в заданном формате. Микроминиатюризация ведущими производителями микросхем модулей GPS или ГЛОНАСС либо совмещенных модулей GPS/ГЛОНАСС позволяет встраивать их непосредственно в измерители напряжённости, существенно не изменяя габаритов модулей и энергопотребления.

1. Аксельрод В.С. Методы и средства измерения напряжённости и потенциала электрического поля / В.С. Аксельрод, В.А. Мондрусов К.Б. Щигловский // Труды Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии. – Л.: Судостроение, 1974. – № 9. С. 80–97.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1967. – 775 с.
3. Илюкович А.М. Техника электрометрии / А.М. Илюкович. – М.: Энергия, 1976. – 399 с.
4. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества / И.М. Имянитов. – М.: Гостехиздат, 1957. – 483 с.
5. Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели / В.В. Кузнецов // Сб. докл. – Петропавловск-Камчат.: ИКИР ДВО РАН. – 2004. – С.165–196.
6. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Ч. 2 / Г.С. Ландсберг. – М.:Физматгиз, 1961. – 448 с.
7. Ложников В.Я. О классификации измерительных преобразователей, основанных на физических эффектах / В.Я. Ложников // Измерительные преобразователи: Межвуз. сб. науч. тр. – Омск: ОмПИ, 1975. – С. 146–161.
8. Мошков А.Г. Измерение параметров электростатического поля / А.Г. Мошков, Л.Г. Гросс // Измерит. техника. – 1978. – № 5. – С. 61–63.
9. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, Д.С. Демирчан. – Л.: Энергия, 1967. – 522 с.
10. Пат. 78688 Україна, МПК(2006.01)G01R29/12. Цифровий спосіб вимірювання напруженості електричного поля / В.Г. Баженов, М.А. Якимчук, С.В. Грузин; Укр.-№201211683; Заяв.09.10.2012. Опубл. 25.03.2013. Бюл. № 6.
11. Эпов М.И. Естественные электрические токи в земле – обзор научно-технической информации [Электронный ресурс] / М.И.Эпов // Отчет по договору №407-01 от 27.02.2007 г. Ин-т нефтегаз. геологии и геофизики СО РАН.

Метод і апаратура для вимірювання напруженості електричних полів при геолого-геофізичних дослідженнях В.Г. Баженов, М.А. Якимчук, С.В. Грузин, І.С. Підлісна

Наведено короткий огляд та аналіз основних методів вимірювання напруженості електричного поля. Розглянуто цифровий метод та апаратуру, розроблену на його основі, для вимірювання та бездротової передачі інформації з метою її подальшої обробки, реєстрації, візуалізації та документування на комп'ютері.

Ключові слова: вимірювання, напруженість електричного поля, динамічний метод, цифрові технології, мікроконтроллер, АЦП, GPS, бездротова передача даних, автошкала, комп'ютер.

Method and equipment for electric fields strength measurements in the geological and geophysical investigations V.G. Bazhenov, N.A. Yakymchuk, S.V. Gruzin, I.S. Pidlisna

An article shows a brief review and analysis of main electric field strength measurement methods. The digital method and measuring equipment developed on its basis with ability of information wireless transmission for further processing, registration, visualization and documentation on computer are considered. Description of mobile measuring device and interface of control program with a sample of data are also shown.

Keywords: measurement, electric field strength, dynamic method, digital technology, microcontroller, ADC, GPS, wireless data transmission, auto scale, computer.