МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

На тему Разработка динамического электрометра с микропроцессорным управлением

Исполнитель Краснов Сергей Викторович

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

_____

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«___» _____ 20___ г.

Санкт-Петербург 2016

Содержание

Введение 3
1 Элементы атмосферного электричества 5
1.1 Основные параметры электрического поля атмосферы 5
1.2 Генерация электрического поля облаками 6
1.3 Глобальная электрическая токовая цепь 8
1.4 Связь напряжённости электрического поля с потенциалом солнечной модуляции ГКЛ 11
1.5 Связь напряжённости поля с интенсивностью осадков 12
2 Измерения атмосферного электрического поля 15
2.1 Метод разности потенциалов 15
2.2 Метод Пельтье 15
2.3 Метод коллекторов 15
2.4 Метод Вильсона 15
3 Цифровой флюксметр 18
3.1 Микроконтроллер Arduino Nano 18
3.2 WiFi модуль ESP 8266 24
3.3 Интегрированная среда разработки Arduino IDE 29
3.4 Конструкция флюксметра 33
3.5 Калибровка флюксметра 34
4 Анализ результатов измерений напряжённости электрического поля 36
4.1 Описание условий проведения полевых измерений 36
4.2 Результаты измерений уровня собственных шумов 36
4.3 Анализ данных о влиянии облачности на значение напряжённости электрического поля 37
Заключение 41
Приложение А 42
Список использованных источников 45

Введение

О существовании атмосферного электрического поля известно давно. Уже в 18 веке проводились исследования явлений атмосферного электричества такими учёными как Ломоносов, Рихтер, Делибар, Франклин, Лемонье. Тогда великие умы в основном были сконцентрированы на изучении гроз и молний, поскольку считалось, что образование поля происходит в период непогоды, что подразумевает под собой грозовую облачность в качестве генераторов, поддерживающих поле. Чуть позже, знаменитый британский физик Томсон Лорд Кельвин высказал предположение о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Возможно, что, при пробуждении интереса учёных к атмосферному электрическому полю, и при верности его слов, действительно прогнозы погоды будут проще; т.к. на сегодняшний день, этот параметр не учитывается, поэтому данная выпускная квалификационная работа, посвящённая исследованию атмосферного электричества, является актуальной.

Спустя два столетия, несмотря на угасающий интерес к этой теме, была выявлена ещё одна составляющая образования атмосферного электричества это галактические космические лучи и солнечные космические лучи. [1] Это значит, что атмосферное электрическое поле может происходить при хорошей погоде. Таким образом, стала понятна связь электрического поля с интенсивностью галактических космических лучей: после эффекта Форбуша напряжённость атмосферного электрического поля падает, но через несколько дней возвращается к прежним значениям. Так же, формирование электрического поля происходит благодаря ионизации излучением естественных радиоактивных источников почвы, и возникновению зарядов за счёт фазовых переходов в воде.

Цель работы заключается в разработке регистрирующего устройства напряжённости поля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

провести обзор основных параметров атмосферного электрического поля и методов их измерения;

разработать конструкцию флюксметра;

реализовать флюксметр в виде микропроцессорного устройства беспроводной передачей данныз измерений;

провести серию измерений напряжённости электрического поля;

осуществить анализ данных измерений, для выявления особенностей и взаимной зависимости электрических и атмосферных параметров погоды.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка используемых источников. В первой главе представлены общие характеристики электрического поля атмосферы. Во второй описаны методы измерений напряжённости атмосферного электрического поля. В третьей рассказывается о методах создания цифрового флюксметра, а так же особенности конструкции устройста. В четвертой главе проанализированы данные, полученные при помощи установки. В заключении подведены итоги проделаной работы, выявлены её перспективы. Так же в конце, представлен список используемых источников.

1 Элементы атмосферного электричества

1.1 Основные параметры электрического поля атмосферы

Основные параметры электрического поля атмосферы Уже достаточно давно известно о существовании электрического поля в атмосфере Земли. Электрическое поле атмосферы практически всегда вертикально, направлено вдоль Z-компоненты от ионосферы к Земле - E. Говоря о годовом ходе атмосферного электрического поля, то оно уменьшается летом и возрастает зимой. Так же известно, что электрическое поле атмосферы увеличивается в горах, но, в целом, уменьшается с высотой. Электрическое поле обладает уникальной особенностью, которую необходимо выделить среди других. Величина E практически постоянна для различных регионов Земли и в различное время года E = - 130 В/м. Сезонные изменения величины E летом и днем, и т.п., только подчеркивают эту особенность атмосферного электричества [1]. Любая модель атмосферного электричества вызывает сомнение, коль скоро она не найдёт логичное объяснение этому факту. Однако многолетние наблюдения за распределением гроз по поверхности Земли, говорят совсем об обратном: количество гроз и их расположение на Земле, меняется день ото дня, причём, иногда - на порядок.

В двадцатых годах прошлого века Симпсон, Маучли и Свердруп обнаружили так называемую унитарную вариацию, или «кривую Карнеги», атмосферного электрического поля E, то есть синхронные изменения напряженности поля величины E, в целом по Земле. Ещё в 1920 году Вильсон высказал предположение, что унитарная вариация E вызвана грозами, которые приводят к заряжению Земли и высоких слоёв атмосферы, зарядами разных знаков. Эти идеи в будущем развили Уиппл и Скрейз, которые предположили, что двухсуточный ход поля подобен суточному ходу площади поверхности материков Земли, занятой грозами. Эта модель объяснения унитарной вариации атмосферного электрического поля признана до сих пор. Принято считать, что все проявления атмосферного электричества, такие как унитарная вариация, корреляции его с галактическими космическими лучами (ГКЛ), о чём будет рассказано ниже, и метеоусловиями, связаны с электрическим полем «хорошей погоды».

1.2 Генерация электрического поля облаками

Опыты показывают, что вблизи земной поверхности есть достаточно сильное электрическое поле, которое при отсутствии облаков направленно сверху вниз (это «нормальное» поле) и имеет порядок 100 В/см. При этом возможны колебания около этого значения с амплитудой, которая не превышает десятков вольт на метр. Несмотря на это, при наличии облачности, данные колебания могут достигать больших значений (до 104 В/см) и приводить к изменению не только величины поля, но даже и направлению на противоположное [1]. К примеру, прохождение облака над данной местностью, может сопровождаться, и как правило, сопровождается уменьшением градиента потенциала, который в случае облаков с большой вертикальной мощностью меняет знак, а это соответствует изменению нормального направления поля на обратное (снизу вверх).

Все эти факты подтверждаются рядом других фактов, установленных Симпсоном, и другими исследователями, при помощи специально сконструированного ими прибора для записи величины и направления электрического поля в атмосфере (так называемый альтиэлектрограф) и характеризующих распределение поля с высотой до 8 км, однако точность этого прибора оставляло желать лучшего.

Таким образом, в присутствии облаков, поле атмосферы искажается. Причём так, что под облаком оно ослабевает, и принимает обратное значение, внутри же облака оно сохраняет нормальное направление (сверху вниз), при этом средняя напряжённость его примерно в 100 раз больше, чем у поверхности земли при ясном небе (то есть порядка 104 В/см), и над облаком поле имеет обратное нормальному направление, и напряжённость меньше, чем внутри облака.

В отсутствие облаков, поверхность земли имеет отрицательный заряд, а положительный заряд, который компенсирует отрицательный, находится в атмосфере. Про происхождение этих зарядов и их связь с поляризацией до недавнего времени было неизвестно, однако будет рассказано ниже.

Можно сказать, что электрическое поле атмосферы над земной поверхностью сводится к результирующему полю облаков и имеет вид, изображённый на рисунке 1.1. Под облаком аномальное движение за счёт заряженной положительно поверхности земли, при этом площадь «аномальной» зоны чуть больше площади самого облака. Вне пределов рассматриваемой зоны электрическое поле имеет

нормальное направление. Его силовые линии берут начало на верхней кромке облака с положительным зарядом. Сначала они направляются вверх или вбок, затем облака заворачивают к земной поверхности, опускаясь в вертикальном направлении.

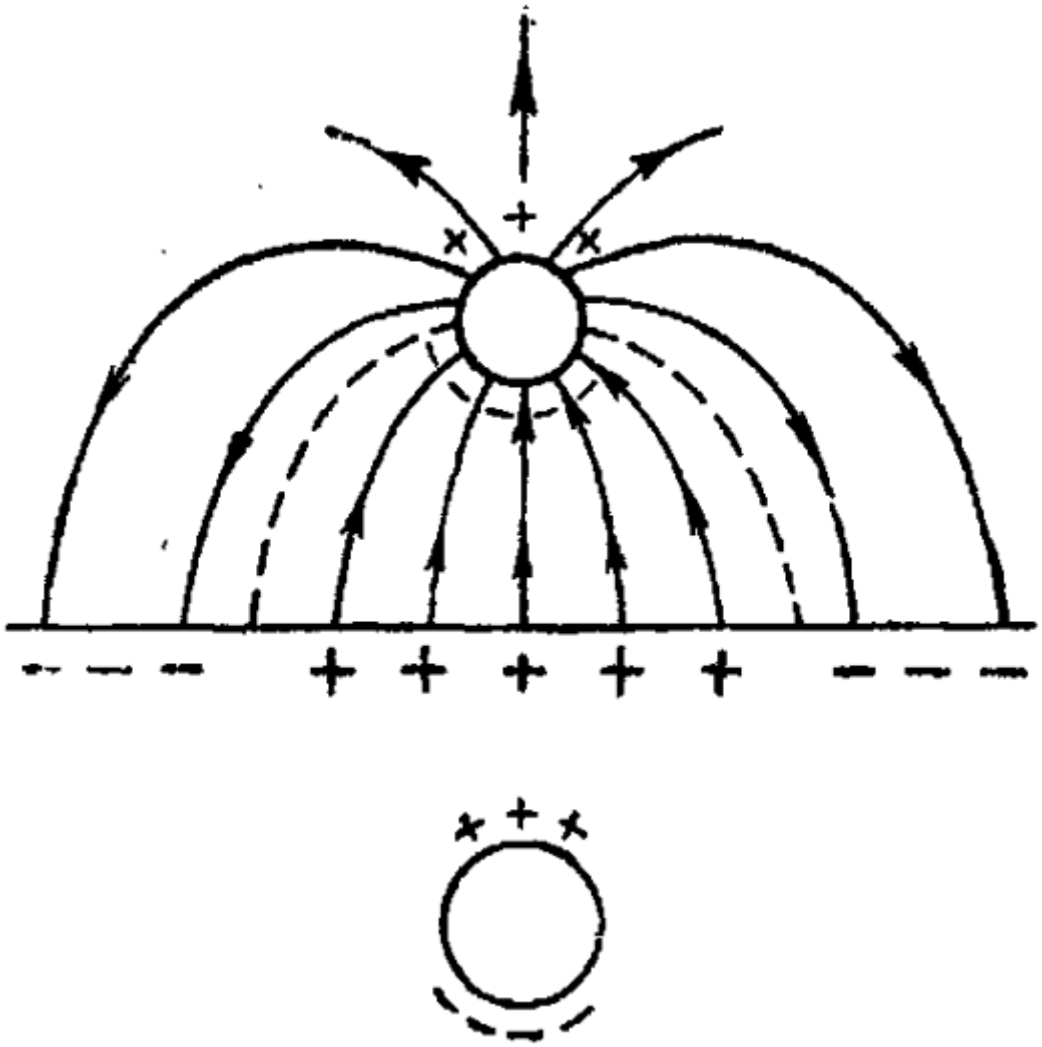

Рисунок 1.1 — Поле облака и его отражения в поверхности земли

Рисунок 1.1 - Поле облака и его отражения в поверхности земли

Электрическое поле безоблачной атмосферы над поверхностью земли обуславливается тем же образом, что и внутри облаков, то есть электрической поляризацией последних, благодаря влиянию земной поверхности, на которой имеются заряды противоположного знака, однако явления в атмосфере Земли осложняются рядом других обстоятельств.

1.3 Глобальная электрическая токовая цепь

Глобальная атмосферно-электрическая цепь определяет в атмосфере баланс электрических токов, условия поддержания электрического поля, а также структуру электрических полей и токов. Многолетние данные измерений электрических характеристик атмосферы вблизи поверхности земли прямо указывают на существование электрического поля напряженностью порядка 102 В/м и электрического тока плотностью порядка 10-12 А/м^2 [1]. Эти параметры определяются в условиях так называемой хорошей погоды, то есть, при отсутствии в данном районе Земли облаков, ветров, или метелей. Измерения электрического поля «хорошей погоды» вблизи земной поверхности позволяют оценить некоторый эффективный заряд Земли, который составляет 105 К. Поскольку атмосфера Земли обладает электропроводностью, то очевидно, что при отсутствии источников электрического поля, электрическое поле в атмосфере исчезает примерно за 10 мин. Согласно современным представлениям, основным источником электрического поля в тропосфере и стратосфере являются грозовые облака. Грозовые облака выступают в роли токовых генераторов. Возможно, что грозовые облака не единственные генераторы, поддерживающие электрическое поле атмосферы, поскольку ещё не до конца выяснена роль генераторов, действующих в верхних слоях атмосферы, облаков слоистых форм, конвективного токового генератора, действующего в пограничном слое атмосферы. Отметим так же, что в областях существования грозовых облаков текут токи, заряжающие атмосферу, в областях, свободных от грозовых облаков, текут токи разрядки.

Основные уравнения, описывающие глобальную токовую цепь, имеют следующий вид [1]:

$$rot\ (E) = -\frac{\mu 0 H}{dt}, \tag{1}$$

$$rot\ (H) = -\frac{j + \mathcal{E}0E}{dt}, \tag{2}$$

$$div(E) = -\frac{\rho}{\mathcal{E}0}, \tag{3}$$

$$div(H) = 0, \tag{4}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = 0, \tag{5}$$

где E - напряженность электрического поля, H - напряженность магнитного поля, ρ - плотность электрического заряда, j — плотность электрического тока, $\mathcal{E}0$, $\mu 0$ - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

В условиях, когда T » L ($\mathcal{E}0\mu 0$), T » $2\pi\mu 0L2$ (T - характерный временной масштаб, L - характерный пространственный масштаб), система уравнений сводится к следующей системе:

$$rot\ (E) = 0, \tag{6}$$

$$div(E) = -\frac{\rho}{\mathcal{E}0}, \tag{7}$$

$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right) + div(j) = 0. \tag{8}$$

Важно отметить, эта система фактически описывает все электрические процессы в нижних слоях атмосферы, исключая только быстропеременные процессы, которые протекают при молниевых разрядах. Последнее уравнение для плотности электрического заряда есть следствие уравнения для $rotH$, если от него взять операцию div. Выражение для плотности электрического тока записывается в следующем виде:

$$j = \lambda + +dt + d\rho + s, \tag{9}$$

где v – гидродинамическая скорость движения среды, dt – коэффициент турбулентной диффузии, js — плотность электрического тока, создаваемая i-м источником. Последний член, входящий в выражение, описывает источники тока в атмосфере, которыми являются грозы, в частности. Второй и третий члены существенны в пограничном слое атмосферы.

Если выполнено условие T » $\mathcal{E}0$ / $\lambda = t\lambda$, то в этом случае током смещения $\mathcal{E}0dE/dt$ можно пренебречь и тогда система уравнений превращается в стационарную:

$$div(j) = 0, \tag{10}$$

$$rot\ (E) = 0, \tag{11}$$

$$div(E) = \frac{\rho}{\mathcal{E}0}. \tag{12}$$

При всём при этом, важную роль в исследовании электрических процессов в атмосфере играет её электропроводящие свойства. Ионный состав атмосферы в нижнем слое довольно-таки сложен. Имеется целый спектр ионов, которые представляют собой комплексы молекул, которые несут заряд, равный элементарному заряду (заряд электрона е). Атмосферные ионы различаются химической природой входящих в них молекул, коэффициентом диффузии, подвижностью. Можно выделить примерно пять групп ионов в зависимости от их радиуса [1]:

лёгкие (малые) ионы ($r < 6.6 \cdot 10^{-10}$ м);

лёгкие промежуточные ионы ($r < 810 \cdot 10^{-10}$ м);

тяжёлые (большие) промежуточные ионы ($r < 2.5 \cdot 10^{-8}$ м);

ионы Ланжевена ($r < 5.7 \cdot 10^{-8}$ м);

ультра тяжёлые ионы ($r > 5.7 \cdot 10^{-9}$ м).

Согласно современным представлениям, основной вклад в электропроводность нижних слоёв атмосферы вносят лёгкие ионы. Электропроводность в этой части земной атмосферы формируется под влиянием радиоактивного излучения поверхности Земли, радиоактивных примесей, содержащихся в воздухе, а так же космического излучения. По мере удаления от земной поверхности она растёт и её зависимость от высоты может быть представлена в виде:

$$\lambda = \lambda 0 exp\alpha\left[(r – r0)\right], \tag{13}$$

где $r0$ — радиус Земли; $\alpha^{-1} = 6400$ м.

Кроме высотных изменений λ в атмосфере наблюдаются широтные изменения, связанные с зависимостью интенсивности ГКЛ от широты, значения которой на полюсе и экваторе различаются между собой в два раза.

1.4 Связь напряжённости электрического поля с потенциалом солнечной модуляции ГКЛ

Обратившись к справочным данным по величине коэффициента объемной рекомбинации , обнаруживается, что величина α изменяется в пределах: 10^{-16} – 10^{-12} м^3 c^{-1}. Согласно данным, приведенным в [9] скорость рекомбинации положительных ионов с электронами α 10^{-12} м^3 c^{-1} , при этом коэффициент рекомбинации между ионами меньше α 10^{-16} м^3 c^{-1}. Если предположить, что процесс ион ионной рекомбинации превалирует над ион-электронной, то ГКЛ по-видимому, не могут обеспечить необходимый приток зарядов.

Однако экспериментально установлено, что ионизация атмосферного воздуха космическими лучами q происходит в соответствии с линейным уравнением ионного баланса: $q =$. Обычно используют квадратичное уравнение: $q = N^2$. Тут αм^3 – коэффициент объемной рекомбинации, β – коэффициент линейной рекомбинации. Данные коэффициенты различаются по величине и по размерности. Эта зависимость указывает на то, что в действительности связь между концентрацией ионов в атмосфере и потоком космических лучей является более сильной, чем это ранее предполагалось. ГКЛ оказывают решающее влияние на формирование атмосферного электрического поля. Обратим внимание на рисунок 1.2, на котором видна корреляция между потоком ГКЛ и плотностью электрического тока проводимости.

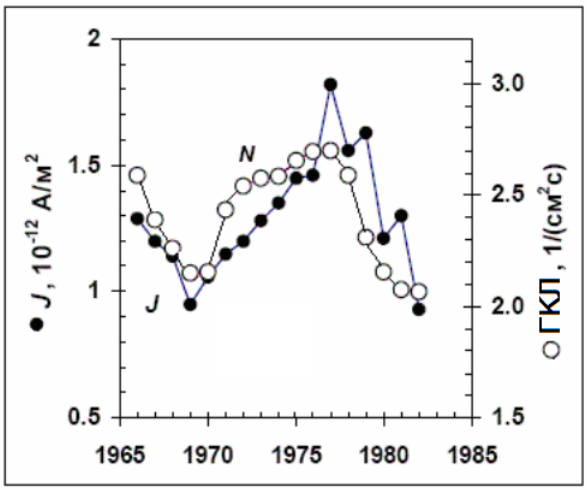

Рисунок 1.2 — Временной ход плотности атмосферного тока j и потока ГКЛ на средних широтах [1]

Стоит учесть, что уменьшение плотности потока ГКЛ и тока проводимости j соответствуют периодам максимальной активности Солнца (69-70 и 80-82 гг.), а их синхронное увеличение - минимальной (76-77 гг.).

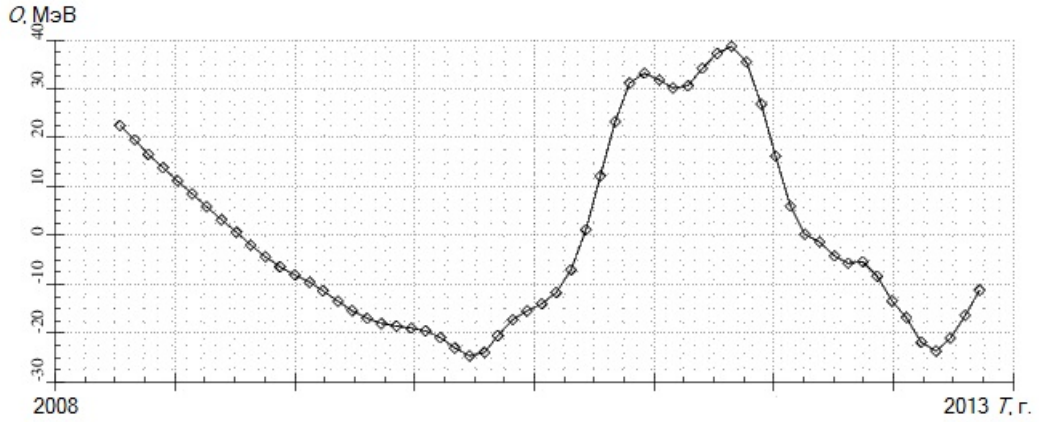

Рисунок 1.3 — Отклонение от нормы потенциала солнечной модуляции O

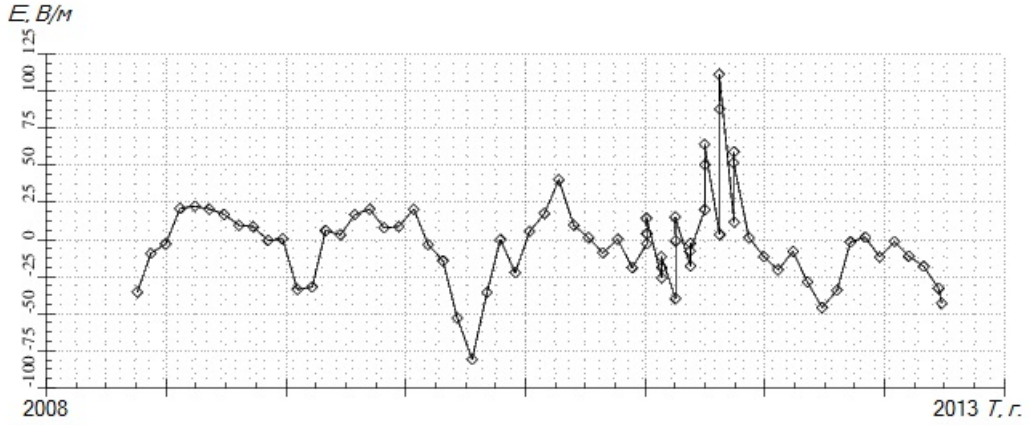

Рисунок 1.4 — Напряжённость электрического поля атмосферы

Согласно данным солнечной модуляции космических лучей регистрируемой наземными нейтронными мониторами и ионизационными камерами [14], представленным на рисунках 1.3 и 1.4, так же видно, что вариации этих двух параметров совпадают с течением времени, что подтверждает связь напряжённости атмосферного электрического поля с потоком ГКЛ.

1.5 Связь напряжённости поля с интенсивностью осадков

Поскольку облачность оказывает влияние на напряжённость атмосферного электрического поля, то смело можно предположить, что не только водяные капли

в облаке определяют напряжённость. Имеет смысл сопоставить выпавшие осадки с показаниями флюксметра. В ходе работы, была налажена связь с британским университетом Ридинга, который предоставил данные флюксметра и осадков за 2009-2013 годы [13]. Прокоррелировав дынные, получаем прямую зависимость, представленную на рисунках 1.5, 1.6.

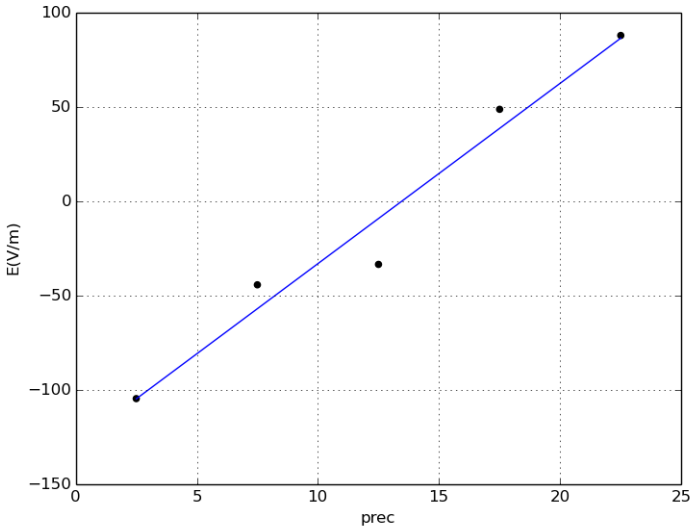

Рисунок 1.5 — Корреляция за зимний период (r=0.98) с 2009 по 2013 годы на абсерватории Ридинг (Великобритания)

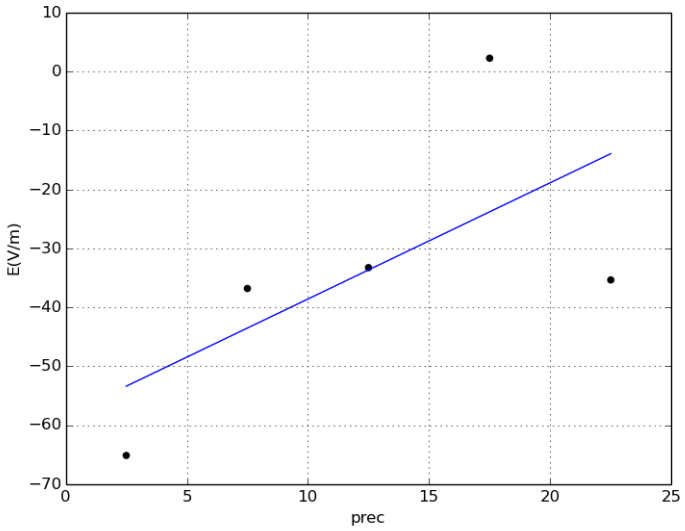

Рисунок 1.6 — Корреляция за летний период (r=0.65) с 2009 по 2013 годы на абсерватории Ридинг (Великобритания)

Видно, что чем больше осадков выпадало, тем большие вариации напряжённости поля возникали.

Исходя из вышеперечисленного, можно заключить, что напряжённость электрического поля является уникальным для метеорологии параметром, который стоит учитывать при оценке погоды.

2 Измерения атмосферного электрического поля

2.1 Метод разности потенциалов

Сей метод относится к группе методов, основанных на использовании соотношения: $E = -dV/dh$. Измеряются потенциалы V на разных высотах h.

2.2 Метод Пельтье

Используя метод Пельтье, понадобится проводник в виде шара, подвешенный на высоте h, и соединенный с электрометром. На проводнике за счёт индукции происходит разделение и накопление зарядов Q. Зная ёмкость шара C, и измерив Q, определяется потенциал $V : Q = -\mathrm{C}V$.

2.3 Метод коллекторов

Данный метод состоит в автоматическом измерении потенциала электрометрами одновременно в нескольких местах. Коллектора при этом обычно используются: механические, распылительные, пламенные, радиоактивные. Так же, характеризуются: ёмкостью, кажущимся сопротивлением, временем релаксации, степенью изоляции и прочим.

2.4 Метод Вильсона

Этот метод базируется на использовании уравнения $E = V/n = 4$, где E – напряжённость электрического поля атмосферы, V – его потенциал, n – нормаль поля, – поверхностная плотность заряда Земли. Для использования этого метода разработана схема датчика, представленная на рисунке 2.1, где А – вращающийся модулятор, Б – датчик, подключённый к электрометру, и изолированный от корпуса флюксметра.

Принцип действия прибора не сложен. При вращении модулятора А, сенсорная пластина Б предстает то открытой для проникновения атмосферного электрического поля, то закрытой. Причём, при открытом положении, на нижней части пластины образуется положительный заряд с плотностью , а на остальной части прибора распределяется отрицательный заряд. Таким образом, электрометр

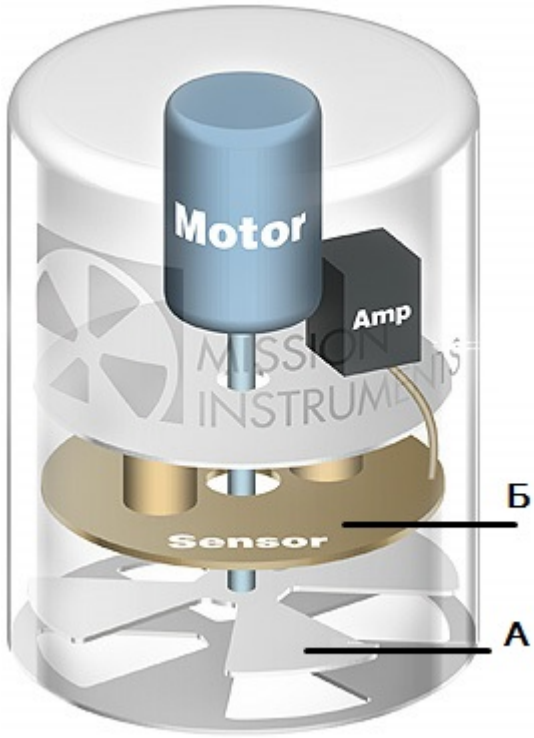

Рисунок 2.1 — Схема динамического флюксметра

даст отклонение, которое является относительной мерой плотности . А благодаря уравнению E = 4 без особого труда можно сосчитать напряженность атмосферного электрического поля E. Благодаря вращающемуся модулятору, сигнал становится пульсирующим, и его можно легко зарегистрировать.

Поскольку, это устройство относится к разряду электрических измерений, то его можно использовать для измерения и регистрации напряженности электрического поля атмосферы в широком динамическом диапазоне с повышенной чувствительностью проводя метеорологические, геофизические, радиофизические исследования, равно как и для оценки экологического состояния атмосферы и поверхности Земли.

Известно, что вертикальная составляющая напряженности электрического поля атмосферы у поверхности Земли (E) при условии хорошей погоды (отсутствие гроз, каких-либо осадков, облачности и т.д.) составляет величину около минус 130 В/м и может меняться в пределах нескольких (порой десятков) киловольт на метр по абсолютному значению, в зависимости от наличия тех или иных атмосферных процессов или явлений [1]. При этом, наиболее интенсивные спектральные компоненты вариации напряженности атмосферного электрического поля обнаруживаются среди частот от 0 до 0.06 Гц [2]. Однако некоторые

геофизические процессы могут сопровождаться незначительными вариациями напряженности электрического поля атмосферы с амплитудой порядка единиц и долей милливольт на метр [3]. В связи с этим, получить информацию о вариациях атмосферного электрического поля с малой амплитудой, особенно при наличии сильных источников электрического поля, к примеру, кучевой облачности, атмосферного фронта и т.д., может быть затруднено по причине недостаточной чувствительности или ширины динамического диапазона измерителя.

Подобные приборы производят многие фирмы, например Vaisala. Однако его можно сделать и собственными руками. Для этого, в качестве электрометра используем АЦП микроконтроллера Arduino Nano. Остальные части устройства создадим из подручных средств, согласно рисунку 1.1. В Arduino Nano запишем программу (скетч), благодаря которой будет происходить считывание данных с сенсорной пластины устройства, подача электрического тока на вращающий двигатель, а так же передача данных через WiFi модуль ESP8266 на сервер thingspeak.com [4]. Таким образом, при наличии вблизи динамического электрометра точки доступа в Интернет, можно получать данные дистанционно, или же использовать в работе, например, переносной метеорологической станции.

Таким образом, для измерения напряжённости атмосферного электрического поля лучше всего пользоваться методом Вильсона, постольку поскольку, у этого метода больше достоинств, чем недостатков, среди которых:

1) возможность создания микроконтроллерного устройства с доступным интерфейсом;

2) наличие возможности непрерывных измерений;

3) компактная и малозатратная конструкция флюксметра.

Подводя итог, стоит отметить что существует множество методов регистрации напряжённости, и лучшим является метод Вильсона, который и предстоит реализовать с помощью микроконтроллера Arduino IDE.

3 Цифровой флюксметр

3.1 Микроконтроллер Arduino Nano

Стоит начать с того, что Arduino — торговая марка аппаратно-программных средств для построения простых систем автоматики и робототехники, ориентированная на непрофессиональных пользователей. Программная часть состоит из бесплатной программной оболочки (Arduino IDE) для написания программ, их компиляции и программирования аппаратуры. Аппаратная же часть представляет собой набор смонтированных печатных плат, продающихся как официальным производителем, так и сторонними производителями. Полностью открытая архитектура системы позволяет свободно копировать или дополнять линейку продукции Arduino. Так же, Arduino может использоваться как для создания автономных объектов автоматики, так и подключаться к программному обеспечению на компьютере через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы.

Под торговой маркой Arduino выпускается несколько плат с микроконтроллером и платы расширения (так называемые шилды). Большинство плат с микроконтроллером снабжены минимально необходимым набором обвязки для нормальной работы микроконтроллера (стабилизатор питания, кварцевый резонатор, цепочки сброса и т. п.).

Arduino и Arduino-совместимые платы спроектированы таким образом, чтобы их можно было при необходимости расширять, добавляя в устройство новые компоненты. Эти платы расширений (см. рисунок 3.1) подключаются к Arduino посредством установленных на них штыревых разъёмов (см. рисунок 3.2). Существует ряд плат с унифицированным конструктивом, допускающим конструктивно жесткое соединение процессорной платы и плат расширения в стопку через штыревые линейки. Помимо этого, выпускаются платы уменьшенных габаритов (например, Nano, Lilypad) и специальных конструктивов для задач робототехники. Независимыми производителями также выпускается большая гамма всевозможных датчиков и исполнительных устройств, в той или иной степени совместимых с базовым конструктивом Arduino [10].

В концепцию Arduino не входит корпусной или монтажный конструктив. Разработчик выбирает метод установки и механической защиты плат самосто-

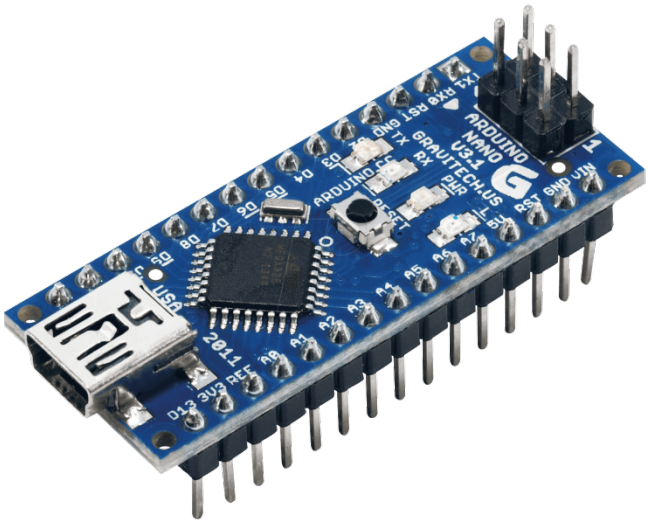

Рисунок 3.1 — Микроконтроллер Arduino Nano

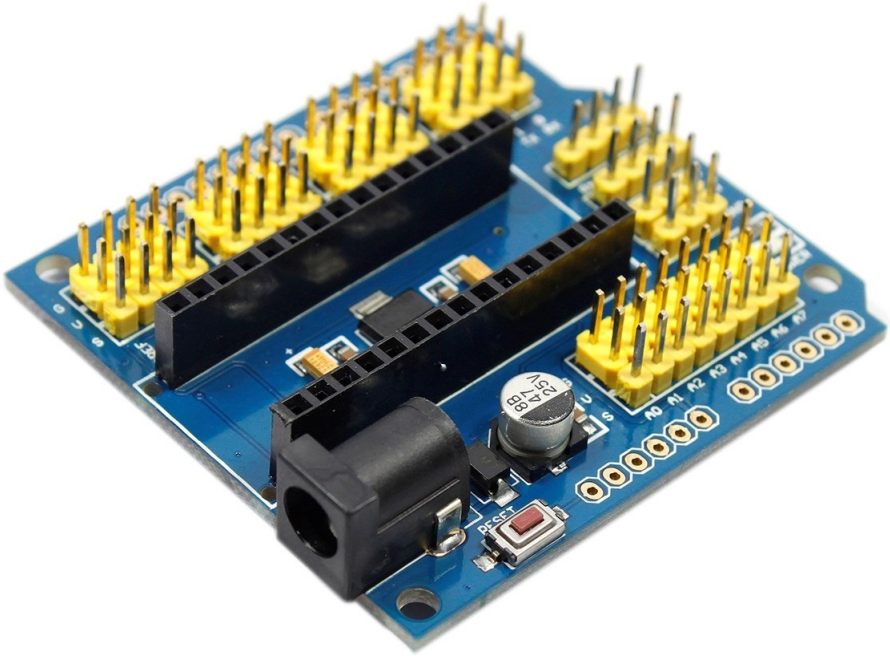

Рисунок 3.2 — Расширяющая плата для Arduino nano и Arduino UNO

ятельно. Сторонними производителями выпускаются наборы робототехнической электромеханики, ориентированной на работу совместно с платами Arduino.

Микроконтроллеры для Arduino отличаются наличием предварительно прошитого в них загрузчика (bootloader). С помощью этого загрузчика пользователь загружает свою программу в микроконтроллер без использования традиционных отдельных аппаратных программаторов. Загрузчик соединяется с компьютером через интерфейс USB (если он есть на плате) или с помощью отдельного переход-

ника UART-USB. Поддержка загрузчика встроена в Arduino IDE и выполняется нажатием на одну клавишу.

На случай затирания загрузчика или покупки микроконтроллера без загрузчика разработчики предоставляют возможность прошить загрузчик в микроконтроллер самостоятельно. Для этого в Arduino IDE встроена поддержка нескольких популярных дешевых программаторов, а большинство плат Arduino имеет штыревой разъем для внутрисхемного программирования (ICSP для AVR, JTAG для ARM).

В Arduino IDE от компании, базирующейся на сайте arduino.cc, встроена возможность создания своих программно-аппаратных платформ. Этой возможностью пользуются сторонние компании, добавляющие в Arduino IDE свои наборы плат и компиляторов-загрузчиков к ним. Компания на сайте arduino.org не поддерживает такую возможность.

В линейке устройств Arduino в основном используются микроконтроллеры Atmel AVR ATmega328, ATmega168, ATmega2560, ATmega32U4, ATTiny85 с частотой тактирования 16 или 8 МГц. В старых же изделиях применялись ATmega8, ATmega1280 и другие. Так же, есть также платы на процессоре ARM Cortex M.

При создании устройства, регистрирующего вариации атмосферного электрического поля, лучше всего использовать плату Arduino Nano с микроконтроллером ATmega328, поскольку её проще изолировать от возможных осадков в корпусе.

Если говорить о характеристиках платы, то рабочее напряжение составляет 5 В. Так же имеется 14 цифровых входов/выходов, 6 из которых могут использоваться как входы широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Помимо этого, у Nano есть 8 аналоговых входов. Постоянный ток через вход/выход – 40 мА. Флеш-память платы 32 кБ, при этом 2 кБ используются для загрузчика, о котором шла речь чуть выше. Оперативная память платы (ОЗУ) 12 кБ. Электрически стираемое перепрограммируемое ПЗУ (EEPROM или ЭСППЗУ) 1 кб. Тактовая частота 16 МГц. И наконец, размеры платы 1.85x4.2 см.

Arduino Nano может получать питание через подключение Mini-B USB, или от нерегулируемого 6-20 В (вывод 30), или регулируемого 5 В (вывод 27), внешнего источника питания. Автоматически выбирается источник с самым высоким напряжением.

Микросхема FTDI FT232RL получает питание, только если сама платформа запитана от USB. Таким образом при работе от внешнего источника (не USB), будет отсутствовать напряжение 3.3 В, генерируемое микросхемой FTDI, при этом светодиоды RX и TX мигают только при наличии сигнала высокого уровня на выводах «0» и «1».

Микроконтроллер ATmega328 имеет 32 кБ для хранения кода программы. Так же ATmega328 – 2 кБ ОЗУ и 1 Кб EEPROM, которая читается и записывается с помощью библиотеки EEPROM.

Каждый из 14 цифровых выводов Nano, используя функции pinMode(), digitalWrite(), и digitalRead(), может настраиваться как вход или выход. Выводы работают при напряжении в 5 В. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор (стандартно отключен) 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА. Некоторые выводы имеют особые функции:

последовательная шина: 0 (RX) и 1 (TX). Выводы используются для получения (RX) и передачи (TX) данных TTL. Данные выводы подключены к соответствующим выводам микросхемы последовательной шины FTDI USB-to-TTL; внешнее прерывание: 2 и 3. Данные выводы могут быть сконфигурированы на вызов прерывания либо на младшем значении, либо на переднем или заднем фронте, или при изменении значения. Подробная информация находится в описании функции attachInterrupt();

ШИМ: 3, 5, 6, 9, 10, и 11. Любой из выводов обеспечивает широтно-импульсную модуляцию с разрешением 8 бит при помощи функции analogWrite();

SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Посредством данных выводов осуществляется связь SPI, которая, хотя и поддерживается аппаратной частью, не включена в язык Arduino;

LED: 13. Встроенный светодиод, подключенный к цифровому выводу 13. Если значение на выводе имеет высокий потенциал, то светодиод горит.

Как уже упоминалось, на платформе Nano установлены 8 аналоговых входов, с разрешением в10 бит каждый, то есть можно принимать 1024 различных значения (от 0 до 1023). Несмотря на то, что выводы обычно имеют диапазон измерения до 5 В относительно «земли», есть возможность изменить верхний предел используя функцию analogReference() до 1.1 В. Некоторые выводы имеют

дополнительные функции. Так A4 (SDA) и A5 (SCL) предназначены для связи по прототипу ISC (TWI) для работы с которыми используется библиотека Wire.

Дополнительная пара выводов платформы:

AREF. Опорное напряжение для аналоговых входов, которое используется с функцией analogReference(). RESET. Низкий уровень сигнала на выводе перезагружает микроконтроллер. Применяется как правило для подключения кнопки перезагрузки на плате расширения, закрывающей доступ к кнопке самой платы Arduino Nano, или прошивки других плат, когда работа самого микроконтроллера не нужна.

В Arduino Nano установлено небольшое количество устройств для осуществления связи другими устройствами Arduino или микроконтроллерами, а так же, с компьютером. ATmega328 поддерживает последовательный интерфейс UART TTL (5 В), с имеющимися каналами для вывода: 0 (RX) и 1 (TX). Микросхема FTDI FT232RL, которая установлена на плате, направляет данный интерфейс посредством USB, а драйверы FTDI , что включены в программу Arduino, предоставляют из себя виртуальный COM порт программе на компьютере. Слежение за сигналом последовательной шины (Serial Monitor) программы Arduino позволяет нам как посылать, так и получать текстовые данные при подключении к платформе. Светодиоды RX и TX на платформе мигают, когда происходит передача данных через микросхему FTDI или USB подключение, однако не при использовании последовательной передачи через выводы 0 и 1.

При помощи библиотеки SoftwareSerial можно осуществить последовательную передачу данных через любой из цифровых выводов Arduino Nano.

ATmega328 поддерживает интерфейсы I2C и SPI. Так же в Arduino была включена библиотека Wire, чтобы было удобнее использовать шины I2C.

Платформа программируется через использование програмного обеспечения Arduino IDE. В меню « Tools > Board » находится « Arduino Diecimila, Duemilanove или Nano w/ ATmega168 » или « Arduino Duemilanove или Nano w/ ATmega328 », согласно используемому микроконтроллеру.

Микроконтроллеры ATmega168 и ATmega328 производятся с сразу записанным загрузчиком, который значительно облегчает запись новых программ, чтобы не использовать внешние программаторы. Связь осуществляется оригинальным протоколом STK500.

Так же, имеется возможность не использовать загрузчик и запрограммировать микроконтроллер через выводы блока ICSP, внутрисхемное программирование.

Стоит упомянуть, что Arduino Nano разработана таким образом, чтобы перед записью нового кода перезагрузка осуществлялась самой программой, а не нажатием кнопки на платформе. Одна из линий FT232RL, управляющих потоком данных (DTR), подключена к выводу перезагрузки микроконтроллера ATmega328 через конденсатор 100 нФ. Активация данной линии, т.е. подача сигнала низкого уровня, перезагружает микроконтроллер. Программа Arduino, используя данную функцию, загружает код одним нажатием кнопки Upload в самой среде программирования. Подача сигнала низкого уровня по линии DTR скоординирована с началом записи кода, что сокращает таймаут загрузчика.

Функция имеет еще одно применение. Перезагрузка Nano происходит каждый раз при подключении к программе Arduino IDE на компьютере с ОС Mac X или Linux (через USB). Следующие полсекунды после перезагрузки работает загрузчик. Во время программирования происходит задержка нескольких первых байтов кода во избежание получения платформой некорректных данных (всех, кроме кода новой программы). Если производится разовая отладка скетча, записанного в платформу, или ввод каких-либо других данных при первом запуске, необходимо убедиться, что программа на компьютере ожидает в течение секунды перед передачей данных [15].

Контроллерный модуль Arduino Nano имеет небольшие размеры, что удобно для установки в малогабаритные приборы, вроде флюксметра, но значительно осложняет макетирование схем и отладку работы приборов. Плата расширения для Arduino Nano разработана для облегчения подключения и позволяет исправить этот недостаток, соединением одной платы с другой. Внешний вид платы представлен на рисунке 3.3.

С помощью платы расширения облегчается подключение различных датчиков и исполнительных устройств, так как помимо одного канала, имеется три: сигнал, напряжение (5 В), «земля». На плате расположены кнопка сброса и индикатор включения питания. Технология изготовления обеспечивает работоспособность при токовой нагрузке вызываемой электродвигателями.

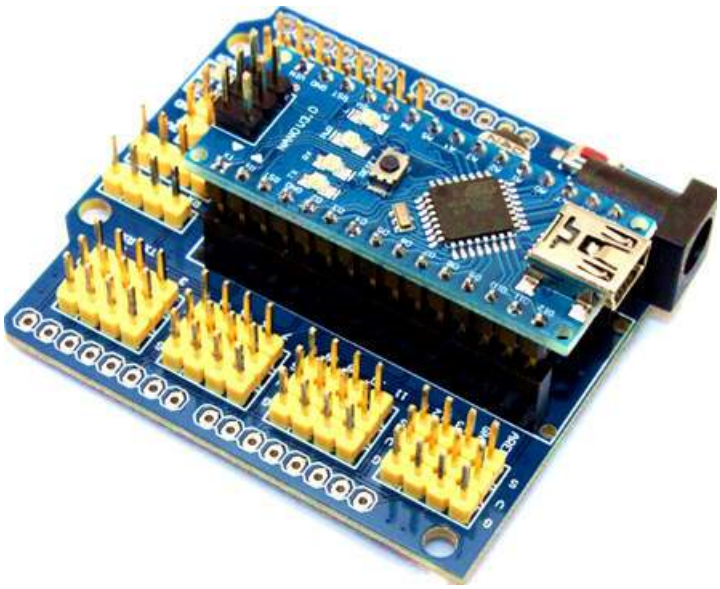

Рисунок 3.3 — Расширяющая плата, и подключенная к ней Arduino Nano

Модуль имеет круглый соединитель для подключения питания. Обеспечивается подключение периферии к питанию 5 В и следующим сигналам Arduino Nano:

14 цифровых входов-выходов с контактами питания;

8 аналоговых входов с контактами питания;

Интерфейсы UART и I2C с контактами питания;

Вход опорного напряжения АЦП [6].

3.2 WiFi модуль ESP 8266

Сторонние разработчики портировали в Arduino поддержку популярного WiFi микроконтроллера ESP8266. Благодаря этому, стало возможно компилировать и загружать прошивку для ESP8266 со своими скетчами и поддержкой WiFi можно прямо из Arduino ide, получая одноплатную схему с поддержкой сети Wi-Fi.

ESP8266 это микроконтроллер, разработанный китайским производителем Espressif с интерфейсом WiFi. Помимо WiFi микроконтроллер отличается возможностью исполнять программы из внешней флеш-памяти с интерфейсом SPI. Данный микроконтроллер привлёк к себе внимание в 2014 году в связи с выходом первых продуктов на его базе и их необыкновенно низкой ценой.

Процессор микроконтроллера Tensilica работает на частоте 80 МГц при 32 разрядахах. Wi-Fi может поддерживать WEP и WPA/WPA2. Питание от 3.0 до 3.6 В. Потребление тока до 200 мА, находясь в режиме передачи, и 60 мА, в режиме приема. Режим пониженного потребления с сохранением соединения с точкой доступа 1 мА [12].

Микроконтроллер не имеет на кристалле пользовательской энергонезависимой памяти. Исполнение программы ведется из внешней SPI ПЗУ путём динамической подгрузки требуемых участков программы в кэш инструкций. Подгрузка идет аппаратно, прозрачно для программиста. Поддерживается до 16 МБ внешней памяти программ. Возможен Standard, Dual или Quad SPI интерфейс.

Производитель, к сожалению, не предоставляет полной документации на внутреннюю периферию микроконтроллера. Вместо этого он дает набор библиотек, через API которых программист получает доступ к периферии. Поскольку эти библиотеки интенсивно используют ОЗУ контроллера, то производитель в документах не указывает точное количество ОЗУ на кристалле, а только приблизительную оценку того количества ОЗУ, что останется пользователю после компиляции библиотек — порядка 50 кБ. Энтузиасты, исследовавшие библиотеки ESP8266, предполагают, что он содержит 32 кБ кэша инструкций и 80 кБ ОЗУ данных.

Источник исполняемой программы ESP8266 задается состоянием портов GPIO0, GPIO2 и GPIO15 (см. рисунок 3.4) в момент окончания сигнала Reset, то есть подачи питания. Наиболее интересны два режима: исполнение кода из UART (GPIO0 = 0, GPIO2 = 1 и GPIO15 = 0) и из внешней ПЗУ (GPIO0 = 1, GPIO2 = 1 и GPIO15 = 0). Режим исполнения кода из UART используется для перепрошивки подключенной флеш-памяти, а второй режим штатный рабочий.

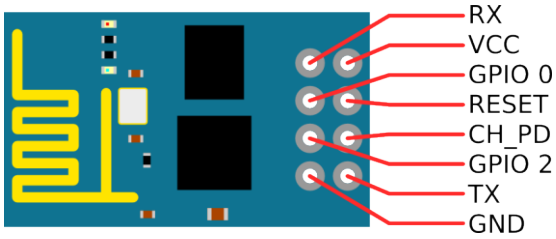

Рисунок 3.4 — Схема Wifi модуля esp8266

Программные средства разработки (программный комплект разработчика, SDK) состоят из:

компилятора, который для Xtensa LX106 входит в пакет компиляторов GNU Compiler Collection;

библиотек для работы с периферией контроллера, стеков протоколов WiFi, TCP/IP;

средств загрузки исполняемого файла в память программ микроконтроллера;

опциональной IDE.

Так же Espressif свободно распространяет свой комплект разработчика. В этот комплект входит компилятор GCC, библиотеки Espressif и загрузочная утилита XTCOM. Библиотеки поставляются в виде скомпилированных библиотек, без исходных текстов. Espressif поддерживает две версии SDK: одна на основе RTOS, другая на основе обратных вызовов (callback).

Чтобы упростить использование микроконтроллера в типовых проектах возможно использование готовых бинарных файлов, пригодных к прямой заливке в ПЗУ модулей (так называемых прошивок). Готовые прошивки можно разделить на несколько групп согласно концепции их использования [11]:

прошивки для работы под управлением внешнего контроллера, как в случае с флюксметром. В этих прошивках реализован некий функционал, которому внешний контроллер через UART задает параметры работы. К таким прошивкам относится прошивка с управлением AT-командами из SDK Espressif. Там же можно найти документы «4A-ESP8266AT Instruction Set» и «4B-ESP8266AT Command Examples». На просторах интренета можно найти множесто описаний AT команд в том числе и на русском языке. Также есть утилита, позволяющая сконфигурировать модуль без знания AT команд;

прошивки с встроенными интерпретаторами разнообразных языков высокого уровня. Эти прошивки позволяют подгружать через UART и исполнять скрипты разработчика устройства;

NodeMCU — проект на основе скриптового языка Lua. Прошивка умеет исполнять Lua-скрипты как из UART (аналогично AT-командам) так и из внутренней flash памяти. Для загрузки скриптов в flash память поддерживается файловая система. Со стороны Wi-Fi имеются встроенные MQTT протокол и HTTP сервер. Встроена графическая оболочка, что позволяет подключать к ESP8266

графические индикаторы. В интернет-магазинах популярны недорогие модули с прошивкой NodeMCU;

Espruino — проект на основе скриптового языка JavaScript. Имеется графическая оболочка (IDE) для работы с исходными текстами скриптов и закачки их в модули;

ESP8266 BASIC — проект на основе скриптового языка Basic. Проект отличает возможность редактирования и запуска скриптов через браузер, через HTML страничку ESP8266. Также проект поддерживает свою графическую утилиту для прошивки флеш-памяти. Поддерживаются модули с 512 кБ, 1, 2 или 4 МБ памяти;

прошивки для «интернета вещей» (управление бытовыми приборами через Wifi) – это такой класс прошивок, который позволяет с одной стороны подключить к ESP8266 набор датчиков и исполнительных устройств, а с другой стороны предоставляет необходимый сетевой функционал для работы в инфраструктуре Internet of Things;

ESP Easy — прошивка для домашней автоматизации. Выполнена как скетч Arduino. Поддерживает множество датчиков и исполнительных устройств, поддержка которых есть в Arduino (например, датчики температуры, влажности, освещенности, дисплеи, реле и т. п.). Есть клиент MQTT;

WiFi-IoT.ru — онлайн конструктор IoT-прошивок для ESP8266 от Максима Миклина для проекта домашней автоматизаци. [8] Позволяет прямо на сайте создать прошивку ESP8266 для работы с одной из множества поддерживаемых IoT систем верхнего уровня. Вариант требуемой прошивки создается путём выбора опций конфигурации. Проект коммерческий, но есть бесплатные ограниченные возможности;

прошивки для популярного применения переходника UART-WiFi;

проект библиотек HTTP сервера с файловой системой для ESP8266. Здесь реализована настройка WiFi параметров через HTML интерфейс. На основе библиотеки создан проект TCP2UART переходника;

ESP8266-transparent-bridge — это проект прозрачного переходника TCP-UART.

Разумеется, что для управления процессом обновления прошивки имеется множество утилит, таких как:

XTCOM — консольная утилита из Espressif SDK;

NodeMCU-Flasher — оконная утилита под Windows;

esptoolck — консольная утилита, написанная на Си;

esptool — консольная утилита, написанная на C++;

esptool.py — консольная утилита, написанная на Python.

Внешняя SPI flash должна иметь определенный заголовок для корректного исполнения кода. Структура заголовка указана в документации к утилите XTCOM. Загрузочные утилиты обычно умеют добавлять его к прошивке.

Создатели микроконтроллера предусмотрели возможность обновить прошивку работающего устройства через WiFi. Для этого разделяют флеш-память программ на несколько частей. Одна отводится менеджеру прошивок, две другие под пользовательскую программу. Когда хотят обновить прошивку, новый образ загружают в свободную часть флеш-памяти. После тщательной проверки целостности вновь загруженного образа менеджер прошивок переключает флажок, после чего участок памяти со старой прошивкой освобождается, а исполнение кода идет из нового участка. Соответственно в следующий раз обновление будет загружаться в свободный участок памяти.

ESP8266 может работать как в роли точки доступа так и оконечной станции. При нормальной работе в локальной сети ESP8266 конфигурируется в режим оконечной станции. Для этого устройству необходимо задать SSID WiFi сети и, в закрытых сетях, пароль доступа. Для первоначального конфигурирования этих параметров удобен режим точки доступа. В режиме точки доступа устройство видно при стандартном поиске сетей в планшетах и компьютерах. Остается подключиться к устройству, открыть HTML страничку конфигурирования и задать сетевые параметры. После чего устройство штатно подключится к локальной сети в режиме станции.

В случае исключительно локального использования возможно всегда оставлять устройство в режиме точки доступа, что снижает необходимые усилия пользователя по его настройке.

После подключения к WiFi сети устройство должно получить IP-параметры локальной сети. Эти параметры можно задать вручную вместе с параметрами WiFi или же активизировать какие либо сервисы автоматического конфигурирования IP-параметров.

После настройки IP параметров обращение к серверу устройства в локальной сети обычно осуществляется по его IP адресу, сетевому имени (в случае если имена поддержаны какой либо технологией) или сервису (в случае если поддержан автоматический поиск сервисов).

Зачастую доступ к устройству требуется из Интернета. Например пользователь с мобильного телефона удаленно проверяет состояние своего «умного дома», обращаясь напрямую к устройству. В этом случае устройство работает в режиме сервера, к которому обращается внешний клиент.

3.3 Интегрированная среда разработки Arduino IDE

Среда разработки Arduino состоит из встроенного текстового редактора программного кода, области сообщений, окна вывода текста (консоли), панели инструментов с кнопками часто используемых команд и нескольких меню. Всё это можно посмотреть на рисунке 3.5. Для загрузки программ и связи среда разработки подключается к аппаратной части Arduino.

Программа, написанная в среде Arduino IDE, называется скетчем. Скетч пишется в текстовом редакторе, имеющем инструменты вырезки/вставки, поиска/замены текста. Во время сохранения и экспорта проекта в области сообщений появляются пояснения, также могут отображаться возникшие ошибки. Окно вывода текста показывает сообщения Arduino IDE, включающие полные отчеты об ошибках и другую информацию, например размера скетча. Кнопки панели инструментов позволяют проверить и записать программу, создать, открыть и сохранить скетч, открыть мониторинг последовательной шины: Verify/Compile (проверка программного кода на ошибки, компиляция), Stop (остановка мониторинга последовательной шины (Serial monitor) или затемнение других кнопок), New (создание нового скетча), Open (открытие меню доступа ко всем скетчам в блокноте, открывается нажатием в текущем окне), Save (сохранение скетча), Upload to I/O Board (компилирует программный код и загружает его в устройство Arduino), Serial Monitor (открытие мониторинга последовательной шины).

Дополнительные команды сгруппированы в пять меню: File, Edit, Sketch, Tools, Help. Доступность меню определяется работой, выполняемой в данный момент.

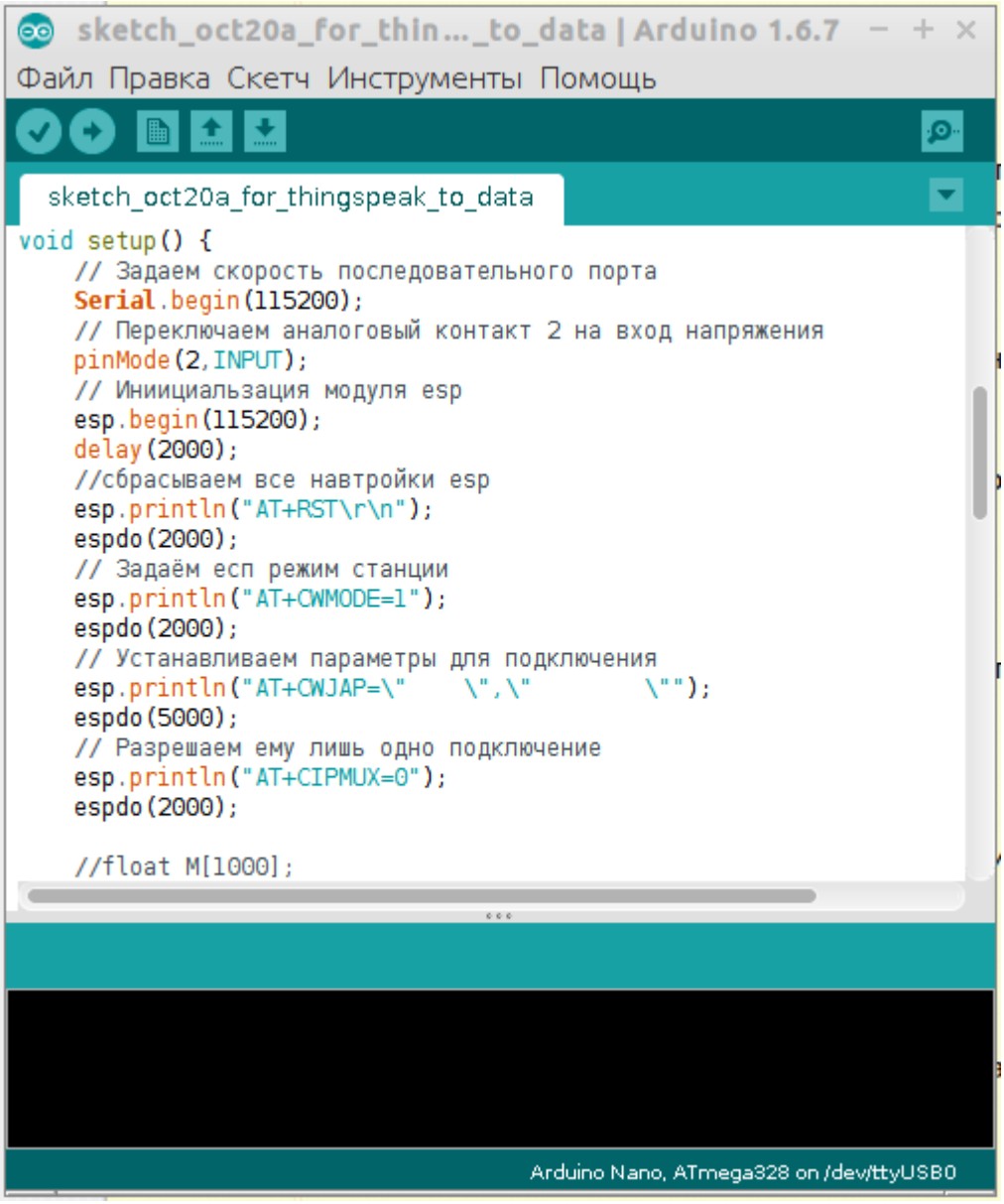

Рисунок 3.5 — Внешний вид Arduino IDE 1.6.7

Copy for Discourse копирует в буфер обмена подходящий для размещения на форуме код скетча с выделением синтаксиса;

Copy as HTML копирует код скетча в буфер обмена как HTML код, для размещения на веб-страницах;

Verify/Compile проверка скетча на ошибки;

Import Library добавляет библиотеку в текущий скетч, вставляя директиву include в код скетча. Подробная информация в описании библиотек ниже (Libraries);

Show Sketch Folder открывает папку, содержащую файл скетча, на рабочем столе;

Add File добавляет файл в скетч (файл будет скопирован из текущего места расположения). Новый файл появляется в новой закладке в окне скетча. Файл может быть удален из скетча при помощи меню закладок;

Auto Format оптимизирует код, например, выстраивает в одну линию по вертикали открывающую и закрывающую скобки и помещает между ними утверждение;

Board выбор используемой платформы. Список с описанием платформ приводится ниже;

Serial Port меню содержит список последовательных устройств передачи данных (реальных и виртуальных) на компьютере. Список обновляется автоматически каждый раз при открытии меню Tools;

Burn Bootloader данное меню позволяет записать Загрузчик (Bootloader) в микроконтроллер на платформе Arduino. Данное действие не требуется в текущей работе с Arduino, но пригодится, если имеется новый ATmega (без загрузчика). Перед записью рекомендуется проверить правильность выбора платформы из меню. При использовании AVR ISP необходимо выбрать соответствующий программатору порт из меню Serial Port.

Средой Arduino IDE используется принцип блокнота: стандартное место для хранения программ. Скетчи из блокнота открываются через меню «File > Sketchbook» или кнопкой «Open» на панели инструментов. При первом запуске программы Arduino автоматически создается директория для блокнота. Расположение блокнота меняется через диалоговое окно «Preferences».

Закладки, «Файлы» и «Компиляция» позволяют работать с несколькими файлами скетчей, каждый из которых открывается в отдельной закладке. Файлы кода могут быть стандартными Arduino (*.ino), файлами C (расширение *.c), файлами C++ (*.cpp) или заголовными файлами (.h).

Перед загрузкой скетча требуется задать необходимые параметры в меню «Tools > Board» и «Tools > Serial Port». Платформы описываются далее по тексту. В ОС Mac последовательный порт может обозначаться как dev/tty.usbserial-1B1 (для платы USB) или /dev/tty.USA19QW1b1P1.1 (для платы последовательной шины, подключенной через адаптер Keyspan USB-to-Serial). В ОС Windows порты могут обозначаться как COM1 или COM2 (для платы последовательной шины) или COM4, COM5, COM7 и выше (для платы USB). Определение порта USB про-

изводится в поле «последовательной шины» USB Диспетчера устройств Windows. В ОС Linux порты могут обозначаться как /dev/ttyUSB0, /dev/ttyUSB1.

После выбора порта и платформы необходимо нажать кнопку загрузки на панели инструментов или выбрать пункт меню «File > Upload to I/O Board». Современные платформы Arduino перезагружаются автоматически перед загрузкой. На старых платформах необходимо нажать кнопку перезагрузки. На большинстве плат во время процесса будут мигать светодиоды RX и TX. Среда разработки Arduino IDE выведет сообщение об окончании загрузки или об ошибках.

При загрузке скетча используется загрузчик Arduino, небольшая программа, загружаемая в микроконтроллер на плате. Она позволяет загружать программный код без использования дополнительных аппаратных средств. Загрузчик активен в течении нескольких секунд при перезагрузке платформы и при загрузке любого из скетчей в микроконтроллер. Работа загрузчика распознается по миганию светодиода (13 контакт), например, при перезагрузке платы.

Библиотеки добавляют дополнительную функциональность скетчам, например, при работе с аппаратной частью или при обработке данных. Для использования библиотеки необходимо выбрать меню «Sketch > Import Library». Одна или несколько директив include будут размещены в начале кода скетча с последующей компиляцией библиотек и вместе со скетчем. Загрузка библиотек требует дополнительного места в памяти Arduino. Неиспользуемые библиотеки можно удалить из скетча убрав директиву include.

На Arduino.cc имеется список библиотек. Некоторые библиотеки включены в среду разработки Arduino. Другие могут быть загружены с различных ресурсов. Для установки скачанных библиотек необходимо создать каталог «libraries» в каталоге установки Arduino IDE и затем распаковать архив. Например, для установки библиотеки DateTime ее файлы должны находится в подкаталоге /libraries /DateTime.

Поддерживаемые аппаратные средства других производителей добавляются в соответствующий подкаталог. Устанавливаемые платформы могут включать собственные характеристики (в меню платформы), корневые библиотеки, загрузчик и характеристики программатора. Для установки требуется распаковать архив в созданный каталог. Запрещено использовать наименование папки "arduino т.к.

могут быть перезаписаны встроенные данные платформы Arduino. Для деинсталляции данных удаляется соответствующий каталог.

Мониторинг последовательной шины (Serial Monitor) отображает данные посылаемые в платформу Arduino (плата USB или плата последовательной шины). Для отправки данных необходимо ввести текст и нажать кнопку «Send» или клавишу «Enter». Затем выбирается скорость передачи из выпадающего списка, соответствующая значению Serial.begin в скетче. На ОС Mac или Linux платформа Arduino будет перезагружена (скетч начнется сначала) при подключении мониторинга последовательной шины. Имеется возможность обмена информацией с платформой через программы Processing, Flash, MaxMSP и т.д.

Некоторые настройки изменяются в окне «Preferences» (меню Arduino в ОС Mac или «File» в ОС Windows и Linux). Остальные настройки находятся в файле, месторасположение которого указано в окне «Preferences» [7].

3.4 Конструкция флюксметра

Как уже писалось выше, конструкция флюксметра (см. рисунок 2.1) довольно-таки простая. На рисунках 3.6 и 3.7 представлены фотографии моего устройства. Можно убедиться, что создание флюксметра возможно из подручных средств.

Рисунок 3.6 — Реализация метода Вильсона

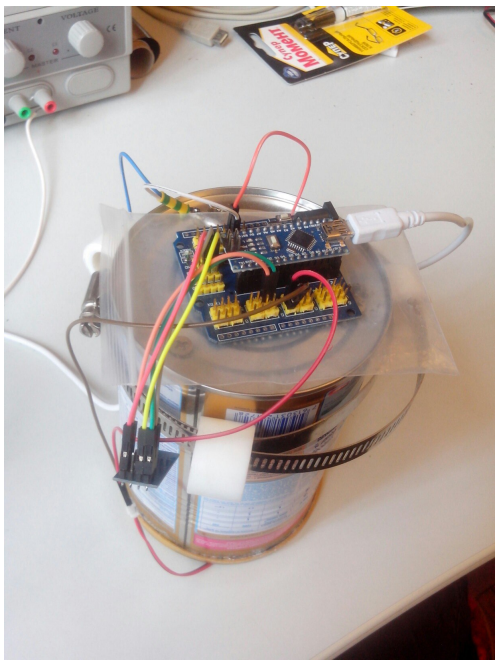

Рисунок 3.7 — Реализация метода Вильсона при помощи Arduino Nano

В качестве корпуса, выбрана токопроводящая банка, выполняющая роль экрана. В крышке банки сделаны прорези для осуществления модуляции, а для накопления заряда, на внутренней поверхности нанесён слой фольги. Так же, слой проводящего металла был нанесён на поверхности регистрирующей пластины. Пластина закреплена на корпусе прибора изолирующим мателиалом. В качестве роторного двигателя, используется кулер, питающийся от 5В с восьмого цифрового канала (см рисунок 3.8). Arduino Nano, и её расширяющая плата размещены вне прибора, для предотвращения помех из-за работы микроконтроллера, а так же, для свободной работы WiFi модуля ESP8266.

3.5 Калибровка флюксметра

Для исправной работы устройства необходимо провести его калибровку. В нашем случае необходимо знать значения напряжённости поля в воздухе, в котором будет происходить замер значений. При помощи генератора, и двух металлических проводящих сеток, можно задавать определённое напряжение. При этом, расстояние между сетками 4,5 см, а задаваемое напряжение 0-60 В. Шаг был выбран в 10 В. Результаты измерений представлены в приложении А.

В качестве вывода, можно сказать, что выбор микроконтроллера Arduino Nano позволит создать рабочее устройство, для регистрации вариаций напряжён-

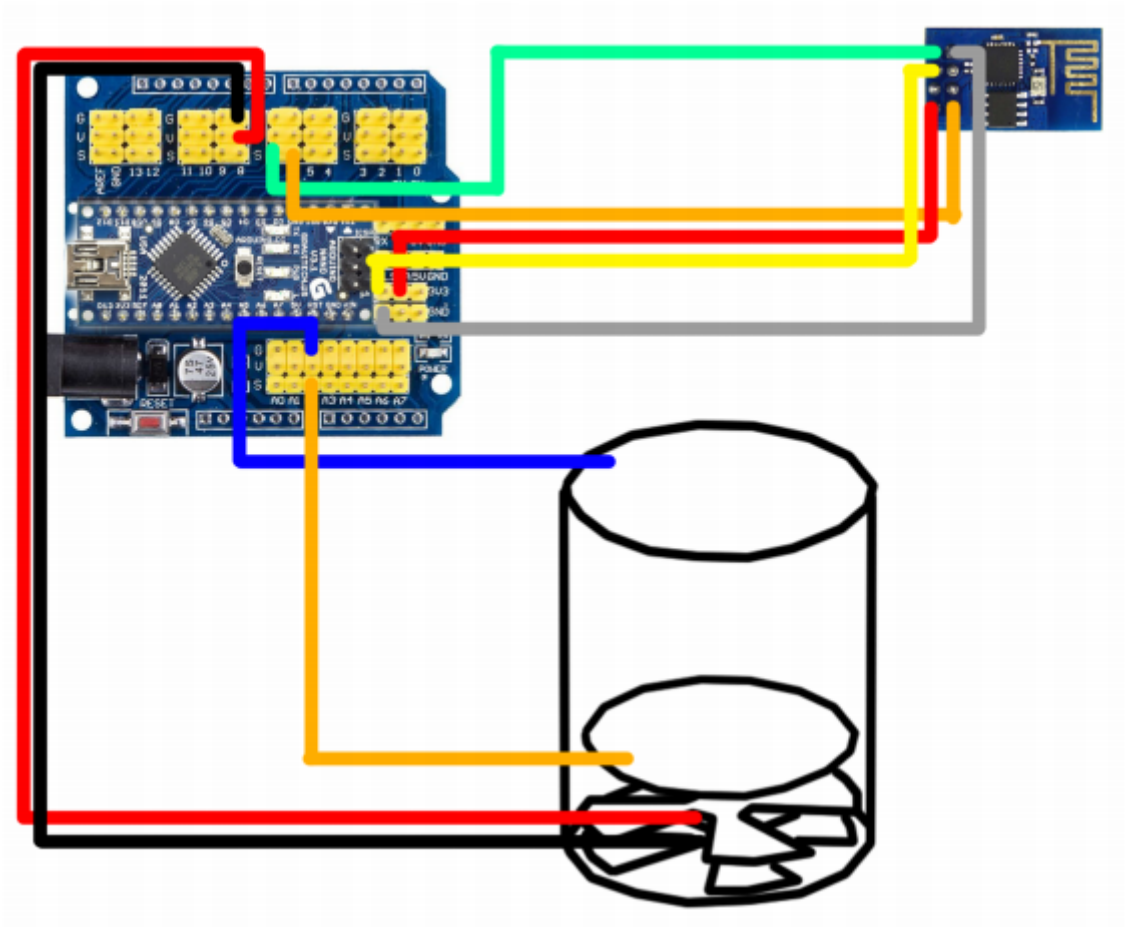

Рисунок 3.8 — Схема реализованного флюксметра

ности атмосферного электрического поля, поскольку его работа определяется точностью выполнения, доступностью (в ценовом плане), удобством использования и программирования.

4 Анализ результатов измерений напряжённости электрического поля

4.1 Описание условий проведения полевых измерений

Для того чтобы пластины заряжались, принимая заряд из атмосферы, устройство необходимо расположить на высоте, поскольку, оставив у поверхности земли, заряд будет не откуда принимать, и сигнал будет нулевым. Мною были сняты показания на высоте 2м, что является достаточным, для регистрации напряжённости поля. Так же, измерения проводились в дали от электроприборов, будь то трансформаторная будка, фонарный столб, линии электропередач. Фклюксметр включался в пасмурную и ясную погоду, для выявления различий между состояниями поля атмосферы.

4.2 Результаты измерений уровня собственных шумов

Как уже упоминалось выше, измерения у поверхности земли никакого сигнала нам не дадут. А это значит, можно будет зарегистрировать шум, производимый микроконтроллером. На рисунке 4.1 изображён сигнал, принятый устройством, у поверхности земли. Видно, что сигнал не так велик, как при измерениях на высоте 2 м, и в среднем составляет 3 единицы АЦП, то есть 6 В/м.

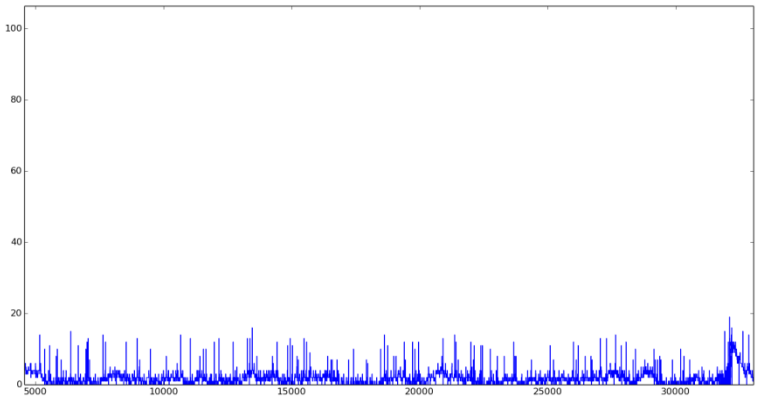

Рисунок 4.1 — Сигнал, регистрируемый флюксметром у поверхности Земли

Для исключения вероятного заряда, который мог бы приходить из окружающего воздуха, прибор был экранирован фольгой. Сигнал, измеряемый при

таких условиях, изображён на рисунке 4.2. Необходимо этот шум учитывать, и делать приборную поправку, при измерениях напряжённости электрического поля. Средний уровень шумов составляет 1 В/м.

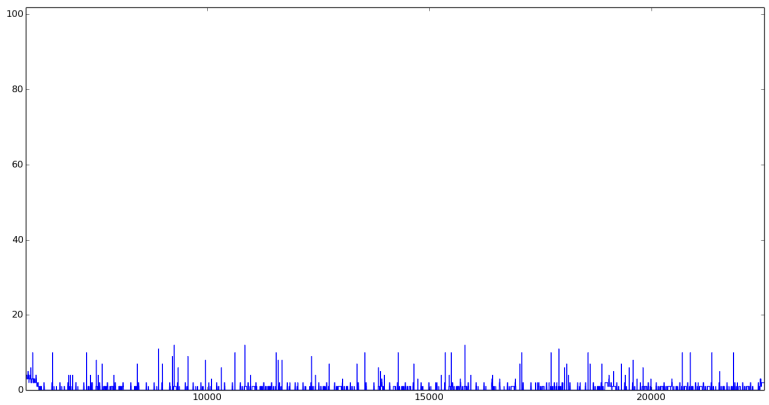

Рисунок 4.2 — Собственный шум флюксметра

4.3 Анализ данных о влиянии облачности на значение напряжённости электрического поля

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены принятые сигналы при ясной и пасмурной погоде. Видно, что разница в сигналах значительная: 2500-3500 В/м при пасмурном небе, и 100-450 В/м при ясном, что соответствует нормальному состоянию поля данных этих условиях.

Исходя из результатов измерений, можно заключить, что методом Вильсона можно регистрировать напряжённость электрического поля атмосферы, используя микроконтроллер Arduino Nano.

Так же, в ходе измерений было определено время релаксации флюксметра (рисунок 4.5). Видно, что период «стекания» сигнала (время разрядки корпуса устройства) составило порядка 10000 принятых значений, что равно 8.2 секунды.

При дальнейшем анализе, принимаемый сигнал был преобразован методом Фурье, для определения частоты принимаемого сигнала. Результаты проиллюстрированы на рисунках 4.6 и 4.7, на которых видно, что частота полезного сигнала приходится на 10 Гц (частота модуляции нижней пластины), в отличие от 50 Гц в случае влияния электроприборов.

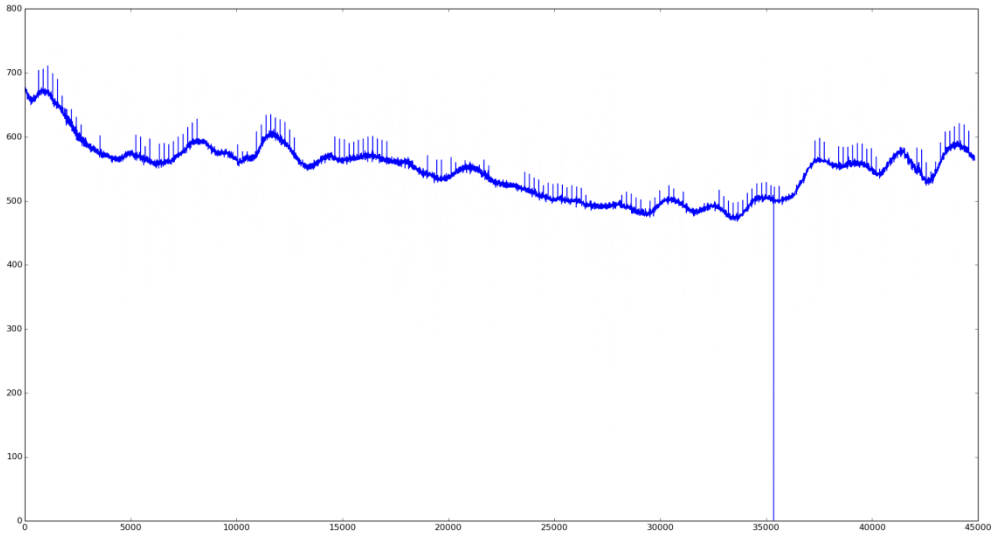

Рисунок 4.3 — Измеренный сигнал при пасмурной погоде

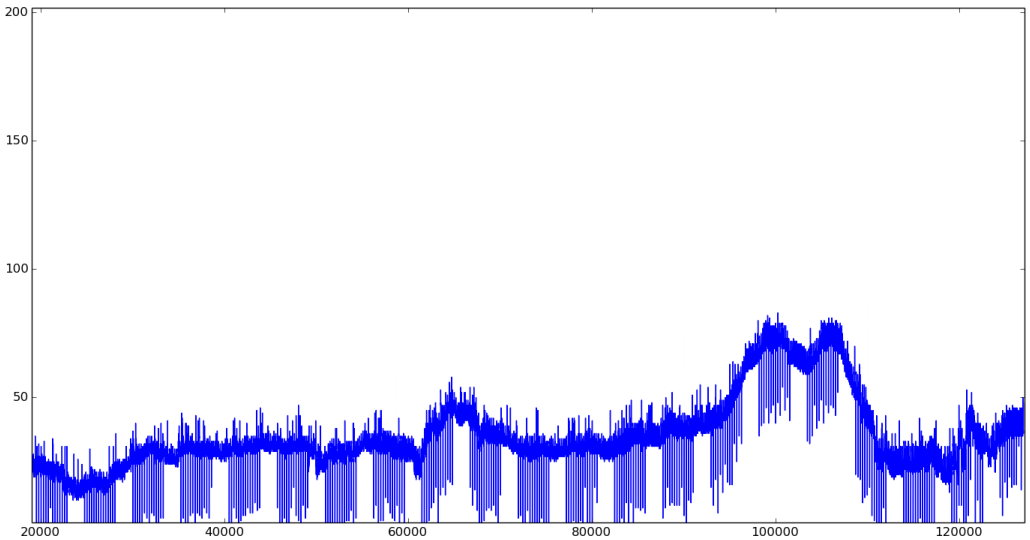

Рисунок 4.4 — Спектр сигнала, измеренного при ясной погоде

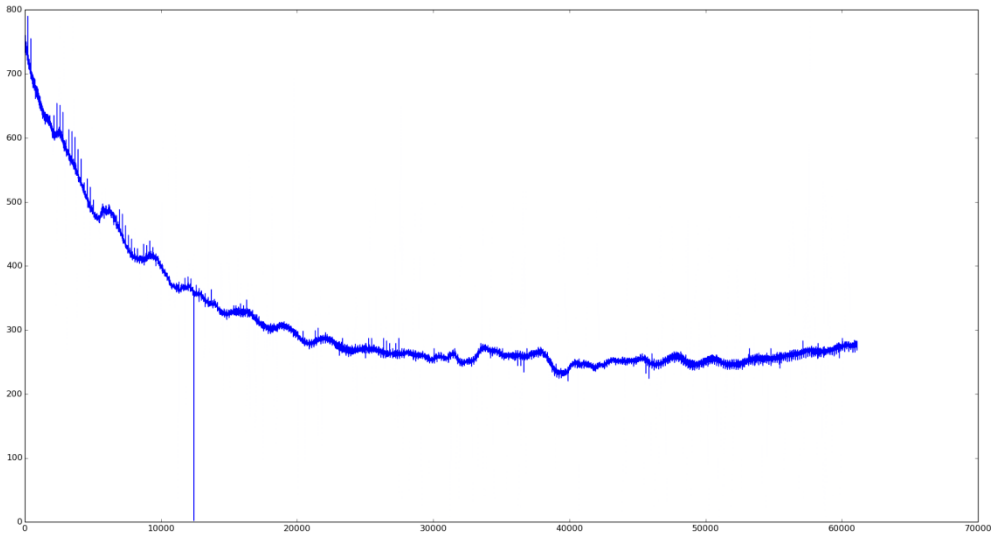

Рисунок 4.5 — Спектр сигнала, измеренного при облачной погоде

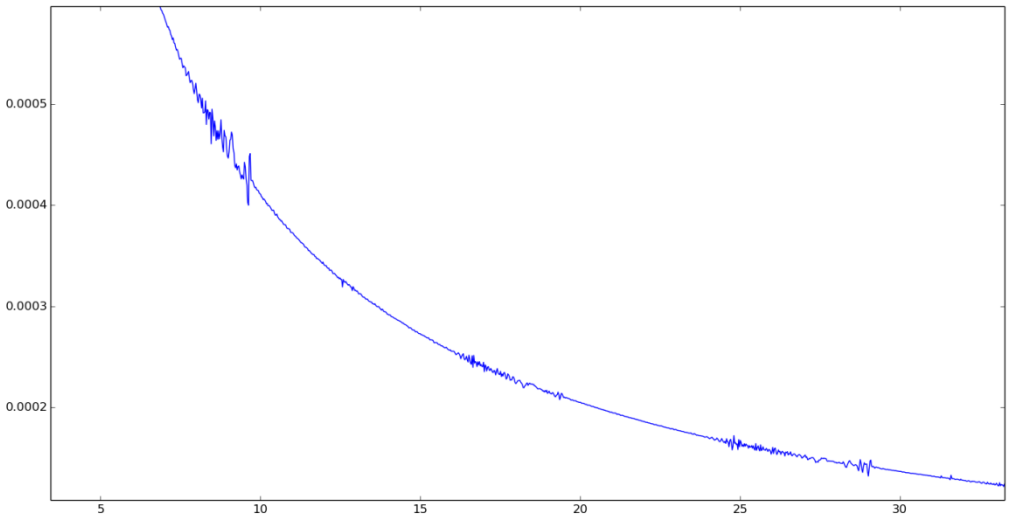

Рисунок 4.6 — Преобразованый сигнал измеренный при ясной погоде

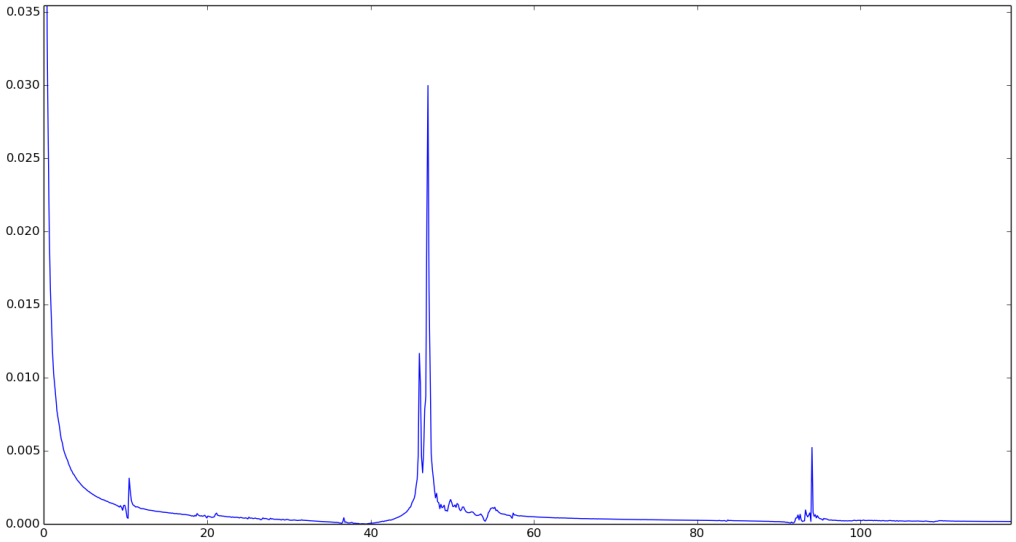

Рисунок 4.7 — Преобразованый сигнал измеренный в поле действия окружающих электроприборов

Заключение

При выполнении работы, проведённой в рамках выпускной квалификационной работы, все поставленные задачи были выполнены:

- выявлена корреляция между значениями ГКЛ и напряжённости электрического поля атмосферы, и найдена связь этих параметров;

- проанализированы значения потенциала солнечной модуляции в паре с напряжённостью атмосферного поля, и так же найдена их связь;

- разработана конструкция устройства для регистрации вариаций напряжённости электрического поля;

- создан флюксметр для измерения напряжённости атмосферного электрического поля на базе Arduino Nano, основанный на методе Вильсона;

- проведена серия измерений в натурных условиях, и осуществлена обработка полученных данных и выполнена предварительная калибровка измерительной системы.

Таким образом, в результате было получено относительно недорогое устройство, которое способно измерять значение напряжённости электрического поля, и осуществлять передачу данных по беспроводному каналу связи WiFi на сервер хранения баз данных, доступных через Интернет. Дальнейшие исследования должны быть направленый на создание/разработку итогового варианта флюксметра, учитывающего влияние всех факторов, например такого как уровень ионизации воздуха.

Приложение А

Результаты измерений флюксемром в лабораторных условиях

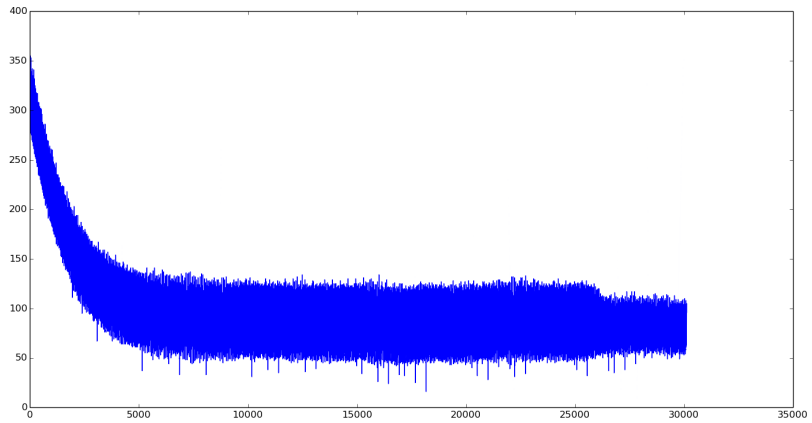

Рисунок А.1 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 0 В

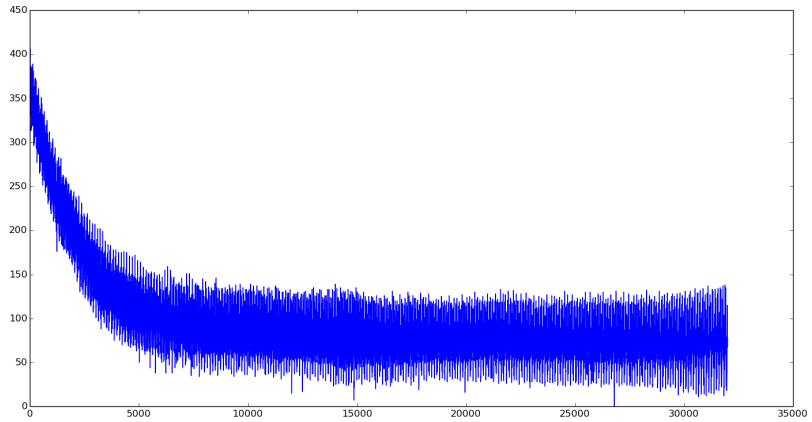

Рисунок А.2 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 10 В

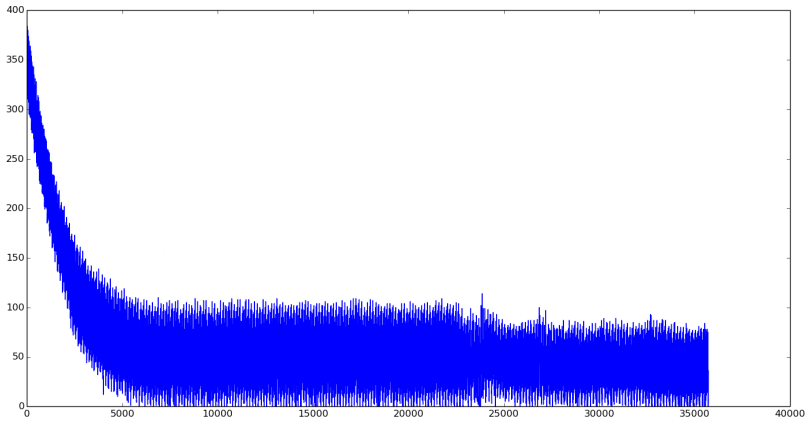

Рисунок А.3 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 20 В

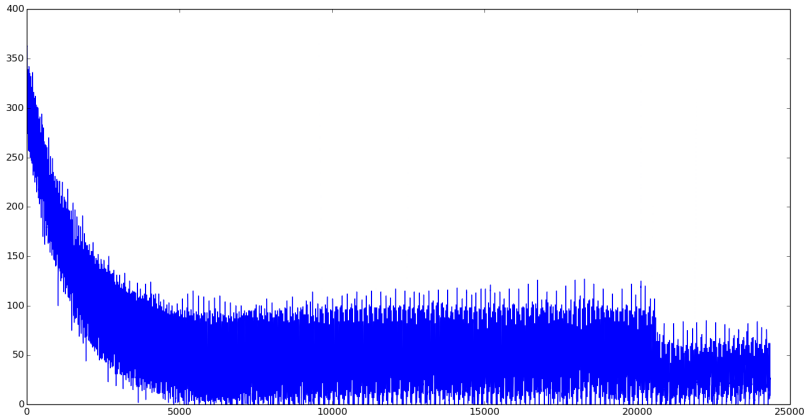

Рисунок А.4 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 30 В

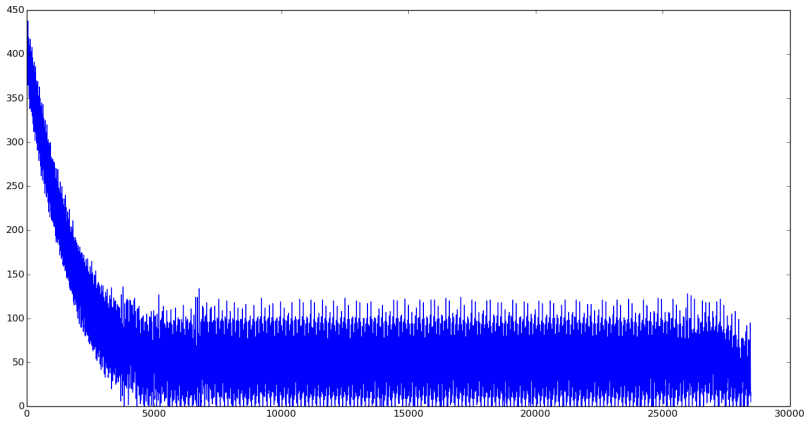

Рисунок А.5 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 40 В

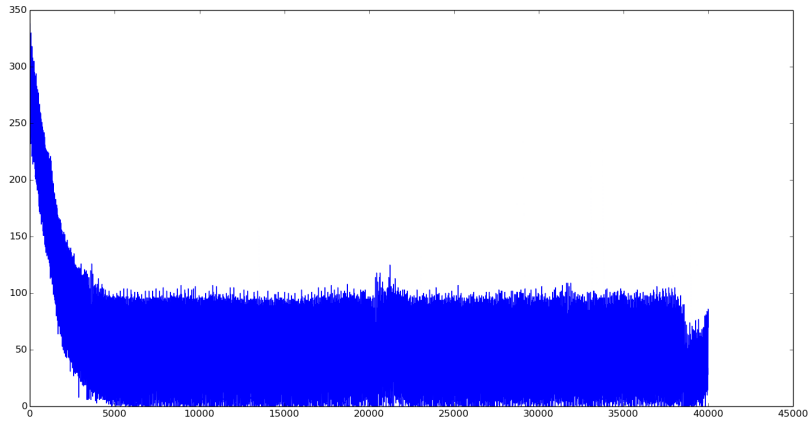

Рисунок А.6 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 50 В

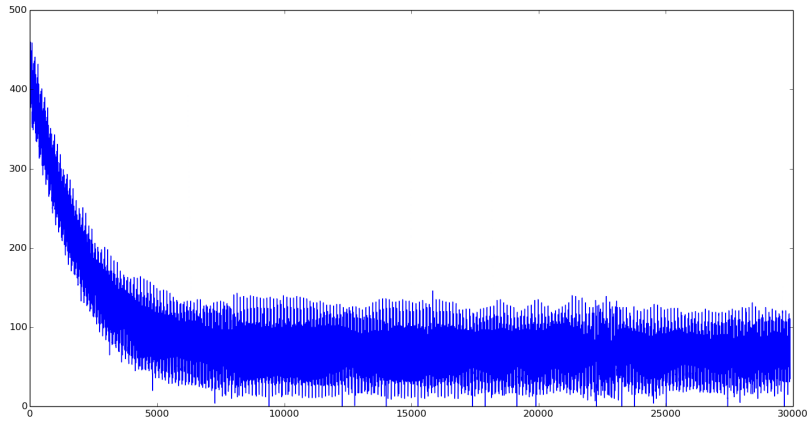

Рисунок А.7 — Сигнал измеренный в поле, с напряжением в 60 В

Список использованных источников

1 Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества [Текст] / изд 2-е, испр.. - М.: КомКнига, 2007.

2 Седунов Ю.С. Атмосфера: справочник (справ, данные, модели) [Текст] / ред. Ю.С. Седунов и др.. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991.

3 Апсен А.Г. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве [Текст] / А.Г. Апсен, Х.Д. Канониди, С.П. Чернышева и др.. - Л.: Наука, 1988.

4 Данные с динамического флюксметра. - URL: https://thingspeak.com/channels/81561 (дата обращения: 07.05.2016)

5 Плата расширения для Arduino nano или Arduino UNO. - URL: http://arduino-kit.ru/catalog/id/plata-rasshireniya-dlya-arduino-nano-v3.0 (дата обращения: 07.05.2016)

6 Среда разработки Arduino. - URL: http://arduino.ru/Arduino_environment (дата обращения: 08.05.2016)

7 Проект домашней автоматизации. - URL: http://homes-smart.ru (дата обращения: 08.05.2016)

8 Пулинец С.А. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы [Текст] / Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.. - Л.: УФН, 1998. - 582-589 с.

9 Поставки электронных и электротехнических изделий, оборудования. - URL: http://splicecom.ru/arduino (дата обращения: 06.06.2016)

10 ESP8266 сообщество разработчиков. - URL: http://esp8266.ru/downloads/esp8266-firmware/wpfb-cat-2 (дата обращения: 06.06.2016)

11 Комоненты и технологии. - URL: http://kit-e.ru/articles/elcomp/2009_10_66.php (дата обращения: 06.06.2016)

12 Измерения количества осадков и градиента потенциала университетской атмосферной обсерваторией Ридинга (Великобритания). - Личное общение с Майком Страудом (дата обращения: 09.09.2013)

13 Усоскин И. Г. Солнечная модуляция космических лучей с 2008 по 2013 годы регистрируемая из наземных нейтронных мониторов и ионизационных камер

[Текст] / И. Г. Усоскин, Г. А. Базилевская, Г. А. Ковальцов. - журнал геофизических исследований. – 2011. – Вып.116. – A02104.

14 Ковровский форум. - URL: http://www.kovrov33.ru/f2/index.php?action=printpage (дата обращения: 06.01.2016)