

Эксперименты по измерению потребления тока платы Arduino Uno при работе программы Blink

А. Д. Миришкин, Я. А. Волкова, А. П. Дьяченко, М. И. Васильев, О. Е. Дьяченко, В. Д. Сафонов

Ключевые слова: Arduino UNO, расчеты токопотребления, blink led, осциллограммы

Токопотребление устройства практически всегда является отражением работы этого устройства, поэтому результат его измерения может ответить на вопрос "Всё работает по плану, или что-то пошло не так?" Нередки также случаи, когда разработчики оценивают потребление на каждом этапе создания или обновления продукта. К примеру, если после измерений напряжения в контрольных точках устройства результат не совпал с ожиданиями, необходимо выяснить причину и восстановить корректную работу ПО.

Примечание: Обратите внимание, на Arduino и им подобных платах токопотребление у АЦП достаточно велико, поэтому при подозрительных изменениях тока в первую очередь стоит обратить внимание именно на него.

По ходу выполнения программы микроконтроллером могут задействоваться или не задействоваться те или иные устройства, расположенные на самой плате или подключенные к ней. Следовательно, от исполняемой программы зависит и потребление платы.

Программа Blink

Рассмотрим код программы Blink из нашего примера:

```
void setup() {  
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);  
}  
  
void loop() {  
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);  
  delay(10);  
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);  
  delay(10);  
}
```

Суть программы Blink состоит в том, чтобы заставить встроенный светодиод платы Arduino (L) мигать с некоторой частотой. Для этого светодиод попеременно то включается, то выключается через равные промежутки времени.

В нашем случае эти промежутки равны по 10мс. Это значение выбрано в середине ограниченного диапазона возможных частот.

- Осциллограф не очень хорошо работает с низкочастотными сигналами. Поэтому желательно, чтобы время между переключениями составляло не более 250мс;

- Теоретически, верхней границей может стать предельно высокая частота, с которой может работать осциллограф, или частота, обусловленная инертностью светодиода, однако оба эти ограничения проявляются для сигналов длительностью порядка наносекунд. В нашем коде подразумевается использование стандартной процедуры delay или ее аналога delayMicroseconds, а значит минимальная задержка, которую мы можем выставить – 1 мкс.

Светодиод является потребителем тока, поэтому при его попеременном включении/отключении потребление платы будет изменяться. По величине этого изменения можно рассчитать ток, потребляемый этим светодиодом. Среднее потребление светодиода составляет половину максимального, так как скважность подаваемых импульсов равна 2. Скважность – это отношение периода следования импульсов к длине этих импульсов.

Оценка величины потребляемого тока

Перед тем, как приступить к измерению реального значения потребляемого тока, следует оценить, какой примерно величины оно будет.

Для начала нарисуем упрощённую схему платы, где изобразим линию питания платы и всех потребителей тока между ней и землёй (потребители, не задействованные в работе программы, на схеме не изображены).

К основным потребителям тока на плате Arduino UNO относятся: стабилизатор напряжения NCP1117, светодиоды ON и L, двояный операционный усилитель LM358, USB-UART мост CH340G, микроконтроллер ATmega328P и стабилизатор LM6206 (см. рисунок 1).

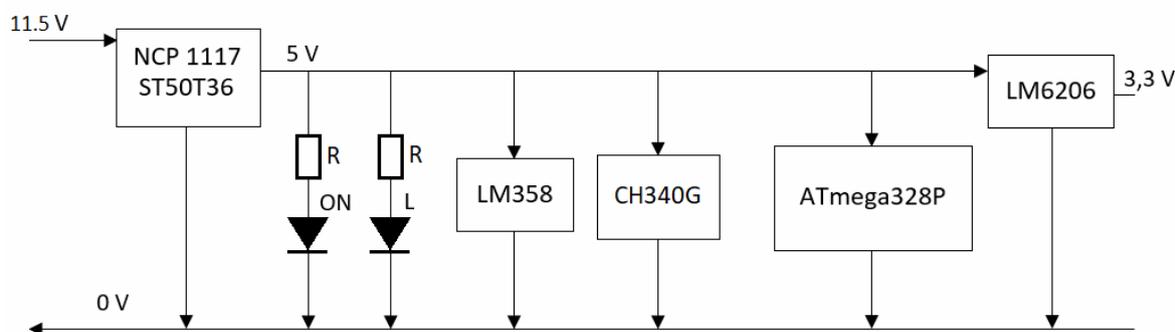


Рис. 1 – Схематичное изображение Arduino UNO

Примечание: Линия питания 3.3 В на рисунке 1 изображена так, потому что на плате Arduino она есть, но никакие устройства к ней не подключены, и ток по ней не течёт. Стоит также отметить, что на входе между источником питания и стабилизатором на 5В есть еще один элемент (диод D1 или транзистор Q1 в зависимости от типа питания), но он подключён последовательно с остальными элементами, следовательно, через него течёт ток такой же, как и через остальные элементы схемы.

Все устройства на данной схеме подключены параллельно, следовательно общий ток является суммой токов всех элементов. Микроконтроллеры ATmega и CH340G потребляют около 10-20 мА, светодиоды могут потреблять 2-5 мА, а ток через

стабилизаторы и LM358 очень мал (порядка микроамперов), и поэтому им можно пренебречь. Возьмем максимальные значения. Тогда суммарный ток получается равным примерно 50 мА. Это значение пригодится в дальнейшем.

Измерение величины потребляемого тока

Для измерения тока, потребляемого платой Arduino UNO, необходимо впаять резистор с некоторым определённым сопротивлением в минусовую жилу провода в разрыв цепи питания. Зарегистрированное осциллографом падение напряжения на этом резисторе при протекании тока через плату Arduino UNO позволит оценить сам ток, зная номинальное сопротивление резистора.

Теперь стоит определить величину сопротивления резистора. Она ограничивается потреблением платы и уровнем шумов.

Если сделать **сопротивление слишком большим**, то на нём будет падать большое напряжение, и плате Arduino просто не хватит напряжения для работы. Как известно для стабильной работы платы ей нужно напряжение не меньше 7 В.

При **слишком маленьком** сопротивлении изменение напряжения будет столь малым, что будет заглушаться шумами. Уровень шума можно определить по показаниям осциллографа, когда он ни к чему не подключён (рис. 2). В данном случае шум составляют 3-5 мВ, значит сопротивление резистора нужно рассчитать так, чтобы напряжение на нём составляло как минимум 20 мВ.

Полученные в ходе этих вычислений значения нужно воспринимать не как чёткие границы, а как некоторые ориентировочные значения, и брать сопротивление с “запасом”.

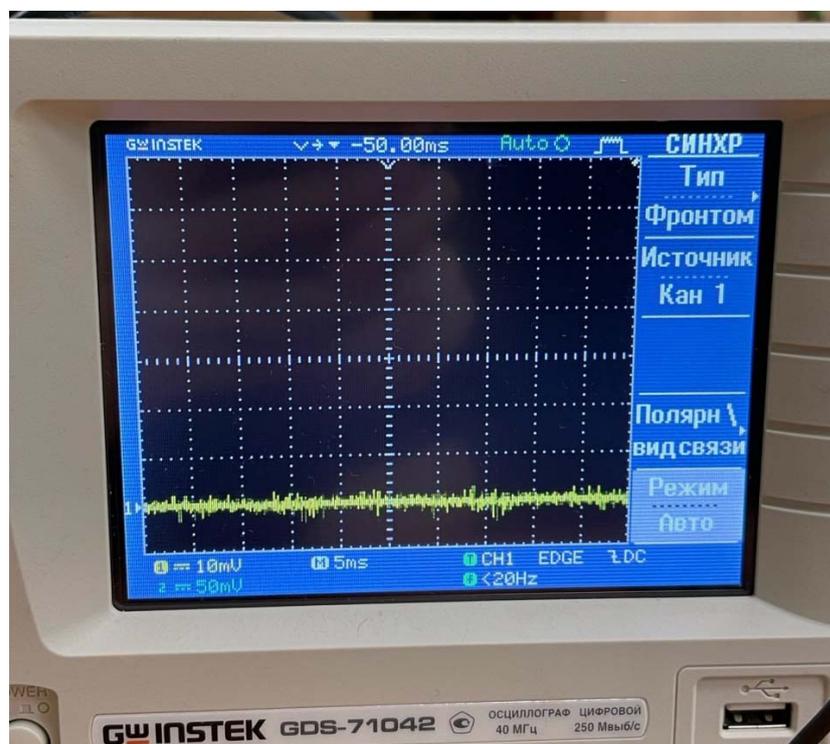


Рис. 2 - Шум осциллографа (~2-3 мВ)

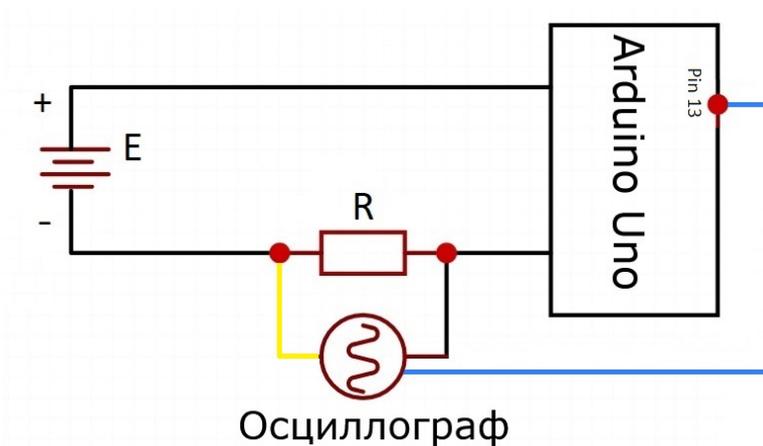


Рис. 3 – Схема измерений

Схема эксперимента представлена на рис. 3. Токоизмерительный резистор находится на линии идущей от платы к минусу блока питания.

Его можно было установить в разрез провода, идущего от плюса блока питания. Однако в таком случае на концах резистора окажется большой потенциал, соответствующий входному напряжению платы. Это чрезмерно усложнит измерение напряжения на встроенном светодиоде платы. При первом варианте подключения таких проблем не возникает, ведь в этом случае резистор подключён к земле платы, и все сигналы измеряются осциллографом относительно этой общей шины.

В нашем примере будет разобран случай с использованием блока питания на 12 В, в кабель которого последовательно впаён резистор сопротивлением 9.8 Ω.

Максимальное напряжение, которое может упасть на резисторе равно:

$$U_{\text{макс}} = 12 - 7 = 5 \text{ В} \quad (1)$$

Значит, с учетом того, что сила тока, идущего через резистор составляет, 50 мА (оценочное значение), самое большое сопротивление, которое можно использовать, равно:

$$R_{\text{макс}} = U/I = 5/(50 \cdot 10^{-3}) = 100 \text{ Ω} \quad (2)$$

Минимальное сопротивление, при $U_{\text{мин}} = 20 \text{ мВ}$ равно:

$$R_{\text{мин}} = (20 \cdot 10^{-3})/(50 \cdot 10^{-3}) = 0.4 \text{ Ω} \quad (3)$$

Установленный резистор с сопротивлением 9.8Ω удовлетворяет этим условиям.

Эксперимент по измерению токопотребления платы Arduino UNO

Приступим к измерениям. На рис. 3 представлена схема эксперимента.

Подадим ток на плату через блок питания. Так как резистор в цепи подключён последовательно, то ток потребления можно рассчитать согласно закону Ома (разделив напряжение, падающее на резисторе, на его сопротивление). Получить значение напряжения можно с помощью осциллографа (рис. 4).

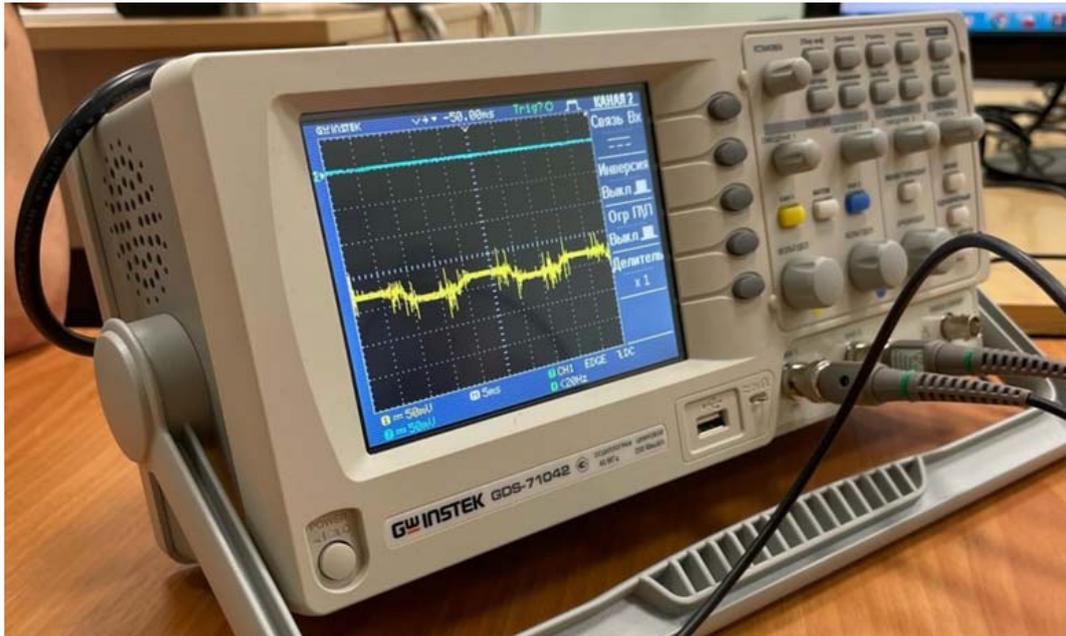


Рис. 4 – Осциллограмма падения напряжения на резисторе при работе программы “blink”

Синий луч на осциллограмме показывает ноль, а желтый отвечает за напряжение, падающее на резисторе. Оно отрицательно, поскольку «земля» осциллографа подсоединена к правому выводу резистора R.

В данном случае выбрана такая развертка, что одна клетка соответствует 50 мВ (что можно увидеть в левом нижнем углу экрана осциллографа).

Колебания падающего на светодиоде напряжения обусловлены попеременным включением и выключением светодиода L вследствие работы программы Blink. Из осциллограммы видно, что максимальное падение напряжения составляет 200 мВ (максимум 4 клетки от синего луча до желтого). Теперь разделим падающее на резисторе напряжение на сопротивление резистора ($9,8 \Omega$) и получим, что максимальный ток потребления всей платы Arduino UNO составляет ~ 21 мА.

Полученное в результате измерений значение не совпадает с изначальной оценкой (50 мА), поскольку оценочное значение рассчитывалось исходя из максимальных токов.

Сравнение результата с предыдущим опытом

Итак, потребление платы Arduino UNO при выполнении программы blink составляет ~ 21 мА. Сравним его с результатом от 18 ноября. В опыте от 18.11.2022 измеряли ток, проходящий через цепь резистор-светодиод. Во время свечения светодиода на светодиоде падало напряжение примерно на 1.82 В. Перед светодиодом стоит резистор на 1 к Ω . Так как на линию, где последовательно стоят резистор и светодиод, приходит 5 В, то на резисторе падает $5 - 1,82 = 3,18$ В. Тогда сила тока в последовательной цепи равна $3,18 / 1000 = 3,18$ мА – запомним это значение.

Исходя из осциллограммы (рис. 4) можно заметить, что при не горящем светодиоде падение напряжения составляет 175 мВ, а сила тока равна $\sim 17,86$ мА. Получается, что на линии, где последовательно стоят токоограничивающий резистор и светодиод, сила

тока равна $21 - 17,86 = 3,14$ мА. Есть пренебрежимо малое расхождение со значением 3.18 мА. Кроме этого, отличия могут быть связаны со следующим.

а) Измерения проводились на разных платах. Как оказалось, светодиоды на них тоже были разные (до этого был красный, а в этот раз - зелёный).

б) Есть вероятность, что МК при включении светодиода из-за своего внутреннего строения может потреблять меньший ток, чем при выключенном светодиоде.

Эксперимент по изучению осциллограмм напряжения на светодиоде при подаче питания для двух случаев

Непосредственно сразу после подачи напряжения на любое электронное устройство, первыми заряжаются конденсаторы на плате. При этом в потреблении тока наблюдается пик.

Для изучения процесса зарядки конденсаторов на плате Arduino UNO попробовали подавать напряжение от блока питания двумя способами.

- 1) БП 220В/12В воткнут в розетку 220 В, конденсаторы БП заряжены, далее штекер питания втыкается в разъем на плате Arduino UNO.
- 2) БП 220В/12В подключен к плате Arduino UNO, далее он подключается к сети 220 В. Происходит зарядка конденсаторов в БП и на плате Arduino UNO.

Осциллограммы приведены на рисунке 5. Желтым лучом показано потребление тока, в синем – сигнал на линии 13 (светодиод L). Примерно через 75 мс микроконтроллер начинает моргать светодиодом (см. рисунок 5б).

В ходе проведения экспериментов в случае 1 было зарегистрировано напряжение уровня 12 В на линии 13, что было очень неожиданно (рис. 5, а).

Опытным путём было выяснено, что высокий потенциал разной длительности регистрируется в случае, когда блок питания подключен к сети, а цепь рвется между Arduino и блоком питания. При отключении блока питания от сети это явление отсутствует (рис. 5, б).

Это можно объяснить тем, что при подключении БП к плате сначала происходит контакт внутреннего контакта (плюсового) коаксиального разъема питания с внутренним контактом гнезда питания, а соединение “минусов” происходит немного позже. Поэтому чем медленнее штекер вставляется в гнездо платы Arduino, тем дольше держится высокий потенциал. В этот момент времени тока плата еще не потребляет, но напряжение осциллограф регистрирует, поскольку он подключен к объекту измерений двумя щупами, каждый из которых обладает высоким входным сопротивлением.

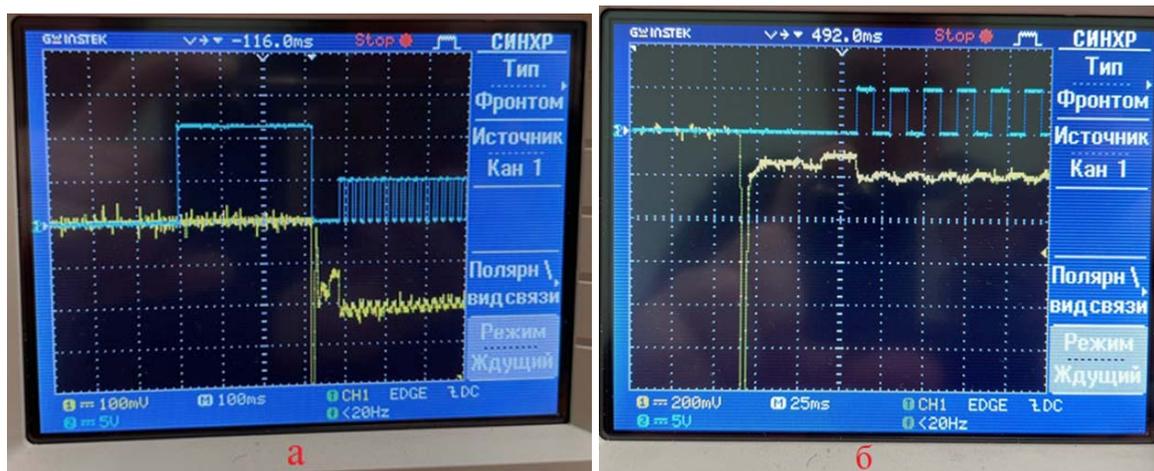


Рис. 5 – Осциллограммы подаче питания для двух случаев (а – включение БП 220 Вольт при подключенной Arduino, б – включение Arduino при ранее включенном БП).

Расчет ёмкости конденсаторов для двух случаев подачи питания

В ходе предыдущего эксперимента, когда ток на плату подавался с заряженного и незаряженного блока питания, были получены следующие осциллограммы (в этот раз измерялось падение напряжения на резисторе):

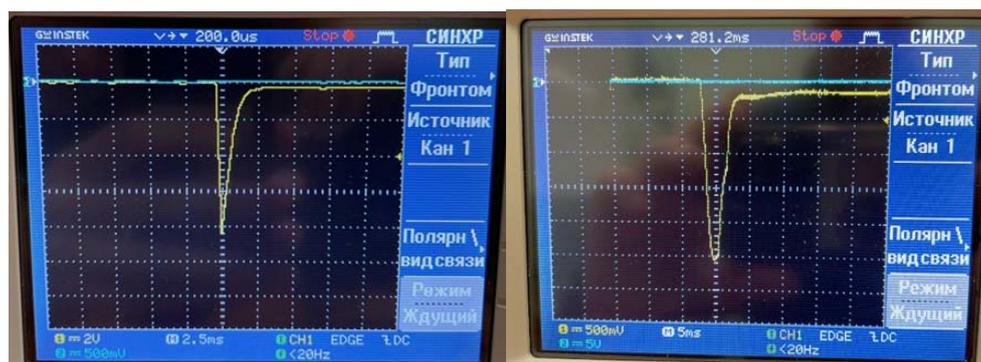


Рис. 6 – Момент подключения платы Arduino к сети, зарегистрированный с помощью осциллографа (слева – после разрыва цепи между Arduino и БП, справа – после разрыва цепи между БП и сетью)

Стоит отметить, что при разрыве цепи между БП и сетью и последующем ее восстановлении сначала происходит зарядка конденсаторов в блоке питания и плавный выход в рабочий режим, поэтому пиковое значение тока, отдаваемого им, меньше (а время заряда конденсаторов на плате, соответственно, больше). Когда разрыв и восстановление цепи происходит между блоком питания и Arduino, блок питания остается заряженным, поэтому он может отдать плате весь заряд за меньшее время.

Было сделано предположение, что экспоненциальное уменьшение величины напряжения обусловлено зарядкой конденсаторов. Проверим, так ли это.

Емкость конденсатора можно вычислить по формуле:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Где U – это напряжение, а Q – заряд на обкладках конденсатора.

Найти заряд на обкладках конденсатора можно через ток, который является производной заряда по времени:

$$I = dQ/dt$$

Отсюда:

$$Q = \int i dt$$

Зависимость тока от времени можно определить по осциллограмме. Осциллограмма отображает зависимость напряжения от времени, а не тока, однако график тока будет в точности повторять график напряжения, но в масштабе $1/9.8$. Причина в том, что у резистора отношение $U/I = R = \text{const}$, то есть в каждой точке графика ток будет ровно в R раз меньше напряжения.

Зависимость I от t может быть достаточно сложна, но для текущей задачи нет необходимости считать интеграл - подойдет и приблизительное значение. Например, для первого случая искомая площадь будет приблизительно равна площади обозначенного прямоугольного треугольника.



Рис. 7 – Вычисление перенесенного заряда в случае разрыва цепи между Arduino и БП.

Вертикальная грань треугольника отражает максимальное значение напряжения (тока), а горизонтальная – общую длительность сигнала. Их значения равны:

$$I = \frac{9.4}{9.8} = 0.957A$$

$$t = 2\text{мс}$$

Теперь можно вычислить заряд:

$$Q = \frac{I \cdot t}{2} = \frac{0.857 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2} = 857 \text{ мкКл}$$

Во втором случае график сложнее, поэтому его лучше разбить на два треугольника:



Рис. 8. Вычисление перенесенного заряда в случае разрыва цепи между БП и сетью.

Для левого треугольника:

$$I_1 = \frac{2.6}{9.8} = 0.265 \text{ А}$$

$$t_1 = 3 \text{ мс}$$

$$Q_1 = \frac{0.265 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2} = 398 \text{ мкКл}$$

Для правого треугольника:

$$I_2 = \frac{2.5}{9.8} = 0.255 \text{ А}$$

$$t_2 = 3 \text{ мс}$$

$$Q_2 = \frac{0.255 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2} = 383 \text{ мкКл}$$

Общий заряд для второго случая:

$$Q = Q_1 - Q_2 = 781 \text{ мкКл}$$

Полученные значения 857 мкКл и 781 мкКл равны в пределах погрешностей. Заряд, накапливаемый на конденсаторах платы Arduino UNO равен ~800 мкКл.

На плате Arduino UNO есть несколько конденсаторов, но только два из них – крупные электролитические. Они установлены по разные стороны от стабилизатора (C2 и C3 на рис. 9) и напряжение на их обкладках разное.

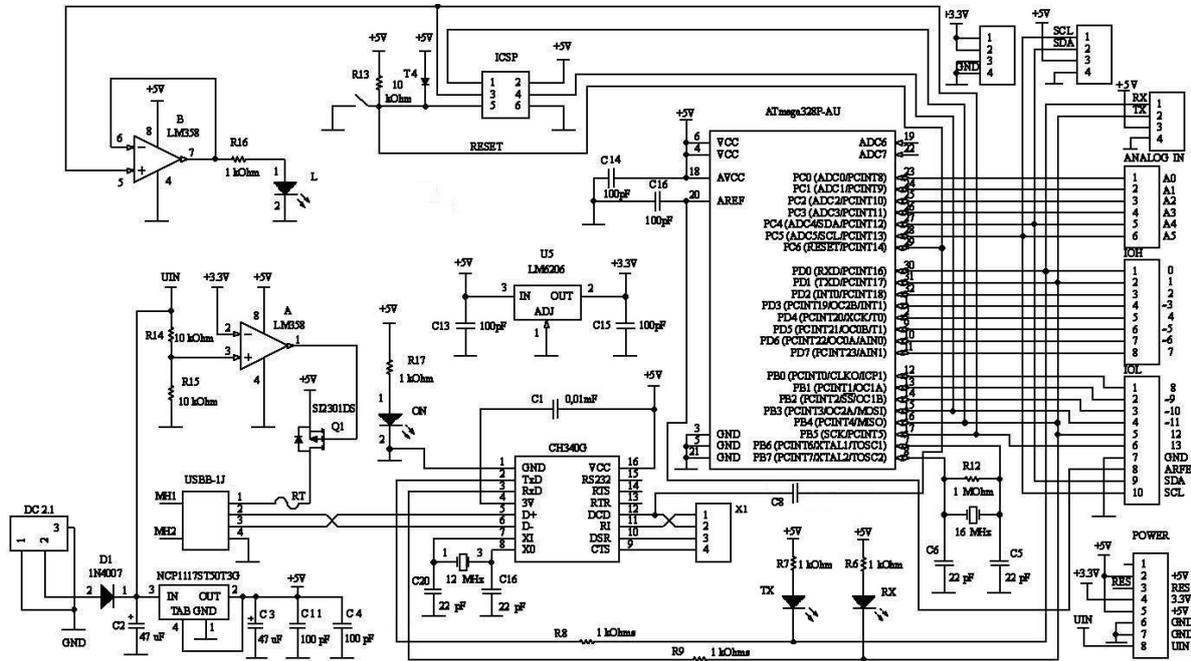


Рис. 9. Принципиальная схема Arduino Uno

Напряжение на C2 равно напряжению питания платы минус напряжение падающее на диоде D1:

$$U_1 = 12 - 0.8 = 11.2В$$

Конденсатор C3 подключен к линии питания 5В:

$$U_2 = 5В$$

Теперь необходимо вычислить, как заряд распределяется между этими конденсаторами. Это можно сделать, опираясь на тот факт, что они имеют одинаковую емкость. **Примечание МАПа: после зарядки заряд будет определяться их емкостью и напряжением, поэтому тезис в этом абзаце и вычисления ниже – спорные.**

$$C = \frac{Q_1}{U_1} = \frac{Q_2}{U_2} \Rightarrow Q_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot Q_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{U_1}{U_2} \cdot Q_2 + Q_2 = \frac{U_1 + U_2}{U_2} \cdot Q_2$$

$$Q_2 = \frac{U_2}{U_1 + U_2} \cdot Q = \frac{5}{11.2 + 5} \cdot Q = 0.31Q$$

Для случая разрыва цепи между Arduino и БП:

$$Q_1 = 0.31 * 857 * 10^{-6} = 266 \text{ нкКл}$$

Для случая разрыва цепи между БП и сетью:

$$Q_2 = 0.31 * 781 * 10^{-6} = 242 \text{ нкКл}$$

Теперь рассчитаем емкость.

Для первого случая:

$$C = \frac{266 * 10^{-6}}{5} = 53.2 \text{ мкФ}$$

Для второго случая:

$$C = \frac{242 * 10^{-6}}{5} = 48.4 \text{ мкФ}$$

Оба результата приблизительно совпадают с номинальными значениями емкости конденсаторов (47 мкФ). Значит пик потребления тока в момент подачи питания действительно связан с их зарядкой.

Примечание МАПа: если я правильно понял, расчет сделан только для конденсатора С3.