

Цифровой USB прибор для измерения вольт-амперных характеристик

Д.А. Коновалов, н.с. лаб. ФПС КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Создан опытный экземпляр прибора для измерения вольт-амперных характеристик. Созданный прибор относится к классу виртуальных цифровых приборов. Он состоит из физического устройства – программно-управляемого источника-измерителя и прикладного программного обеспечения, реализующего логику работы прибора и интерфейс оператора.

Оглавление

1	Особенности конструкции	1
2	Технические параметры	2
3	Техническое описание	2
3.1	Основная плата	3
3.1.1	Подробное описание	3
3.2	Модуль АЦП	4
3.2.1	Подробное описание	4
3.3	Модуль ЦАП	4
3.3.1	Формирование управляющего напряжения	5
3.4	Измерительные клеммы.....	5

1 Особенности конструкции

- Возможность проведения ВАХ измерений с постоянным шагом по току или по напряжению;
- Управляющий контроллер Iskra Nano Pro (Arduino Nano)
- Измерения осуществляются с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADS1220.
 - ADS1220 – 4-х каналный 24-битный дельта-сигма преобразователь с масштабным усилителем и с двумя встроенными программируемыми источниками тока:
 - Три канала используются для измерений, четвертый при калибровке.
 - Встроенные программируемые источники тока используются при калибровке канала измерения тока.
- Измерительное напряжение задается с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) MAX5815;
 - MAX5815 – 4-х каналный 12-битный преобразователь со встроенными буферными усилителями и прецизионными источниками опорного напряжения:
 - Все четыре канала используются для формирования биполярного управляющего напряжения с дискретностью ~ 19.5 бит.

- Ток через объект исследования задается с помощью источника тока, управляемого напряжением (ИТУН);

2 Технические параметры

Версия 2.2:

- Диапазон установки тока: -40 мА ... +40 мА;
- Дискретность установки тока: 0.1 мкА;
- Диапазон рабочего напряжения: -20 В ... + 20 В;
- Дискретность установки напряжения: 50 мкВ;
- Точность измерения тока и напряжения: 1%;
- Разрешение измерения тока: 0.5 мкА;
- Разрешение измерения напряжения: 40 мкВ (скорость преобразования 20 SPS);
- Время измерения одной точки (установка тока + измерение напряжения и тока): 50 мс (скорость преобразования 175 SPS и более);
- Питание: постоянное напряжение 5 В, 500 мА;
- Габариты источника-измерителя: 122x102x25 мм.

3 Техническое описание

На Рис. 1 представлена блок-схема физического устройства – программно-управляемого источника-измерителя. В состав источника-измерителя входит источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП), модуль микроконтроллера (МК), модуль цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), два оптронных ключа (Р1 и Р2) и стандартный повышающий биполярный преобразователь напряжения (не показан). На блок-схеме полупроводниковый объект исследования выделен штриховой линией и показан условным обозначением диода D. Напряжение, падающее на измерительном сопротивлении R, пропорционально протекающему по цепи D-R току. К точке соединения D и R подключены вход обратной связи ОС ИТУН и вход 2 модуля АЦП - канал измерения тока. Вход 1 и вход 2 модуля АЦП образуют дифференциальный канал измерения напряжения. При замыкании оптронного ключа Р2 напряжение с выхода модуля ЦАП прикладывается к объекту исследования. При замыкании оптронного ключа Р1 выход ИТУН подключается к объекту исследования, а напряжение с выхода модуля ЦАП используется для задания выходного тока ИТУН. Одновременное замыкание ключей Р1 и Р2 запрещено на уровне прошивки МК. ИТУН выполнен по классической схеме источника тока с незаземленной нагрузкой на базе электрометрического усилителя.

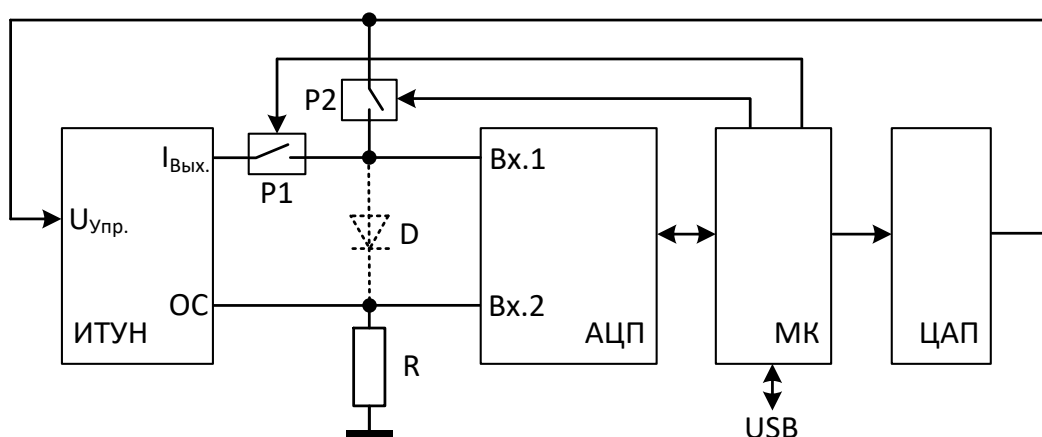


Рис. 1. Блок схема источника-измерителя.

3.1 Основная плата

Принципиальная электрическая схема основной платы приведена на Рис. 3. Основная плата содержит управляемый источник тока на базе высоковольтного операционного усилителя с высоким выходным током OPA551 (U4), оптронные ключи (U5, U6), DC-DC преобразователи AM2D-0524DZ (M1, M2) для питания ИТУН, измерительные цепи, элементы защиты и разъемы для подключения модулей (U1, U2, U3), объекта исследования J1 и внешнего питания J3. Фотографии основной платы представлены на Фото 2 (сторона компонентов с установленными модулями) и Фото 3 (обратная сторона).

3.1.1 Подробное описание

ИТУН выполнен по классической схеме источника тока с незаземленной нагрузкой на базе электрометрического усилителя. С целью снижения влияния наводок на соединительных проводниках управляющее напряжение, задающее максимальный ток (40 мА), равно 20 В. При токе 40 мА на резисторе R1, с которого снимается сигнал обратной связи для ИТУН, падает напряжение ~ 0.4 В. Резисторы R2-R4 образуют делитель управляющего напряжения ($20 \text{ В} / 50 = 0.4 \text{ В}$). Переменный резистор R4 позволяет в небольших пределах масштабировать зависимость выходного тока ИТУН от управляющего напряжения. С помощью переменного резистора R9 устанавливается минимальный ток на выходе ИТУН, когда управляющее напряжение равно нулю. Таким образом компенсируется суммарное смещение сразу трех компонентов – операционного усилителя U4, буферных усилителей микросхемы ЦАП и сумматора/вычитателя модуля ЦАП. Значения напряжений на выводах R9 стабилизированы параметрическими стабилизаторами R5, D2 и R10, D4. Необходимо отметить, что смещение операционного усилителя OPA551 (U4) довольно сильно зависит от температуры и при выходных токах более 10 мА «ноль» неизбежно будет смещаться из-за нагрева корпуса микросхемы. Но это не сказывается на конечном результате, поскольку измеряются реальные значения тока и напряжения.

Твердотельные реле PVA1352N (U5) и CPC1017N (U6) служат для подключения к измерительным цепям выхода ИТУН (микросхема U4) и выхода модуля ЦАП, соответственно.

Стабилитрон D1 и предохранитель Пр2 являются элементами защиты модуля АЦП по входу AIN2. Напряжение на входах АЦП не должно превышать 2.8 В. Поэтому напряжение, на входных клеммах J1 измеряется с помощью делителя, образованного элементами R11-R14. Паразитный

ток, протекающий через этот делитель в обход объекта исследования, учитывается при программной обработке результатов измерений.

Внешнее питание напряжением 5 В подается через разъем mini USB J3 от компьютера или от сетевого блока питания.

Для питания ИТУН и выходного усилителя модуля ЦАП применены DC-DC преобразователи M1 и M2, работающие параллельно. Преобразователи включены по типовой схеме, а их выходы объединены через развязывающие диоды.

3.2 Модуль АЦП

Принципиальная электрическая схема модуля АЦП приведена на Рис. 4. На модуле установлена собственно микросхема АЦП ADS1220 (U1) и источники питания аналоговой части микросхемы – понижающий стабилизатор U2 и инвертирующий преобразователь U3. Интерфейс связи с микроконтроллером – SPI. Фотография модуля АЦП представлена на Фото 4.

Микросхема ADS1220 содержит два программируемых источника тока. Точность установки тока – $\pm 1\%$. Каждый источник тока может быть подключен к любому аналоговому входу АЦП. При калибровке устройства генераторы тока подключаются к входу AIN2 для определения точного значения измерительного сопротивления. Калибровка занимает очень мало времени и может производиться перед каждым циклом построения вольт-амперной характеристики. Поэтому требования к точности и температурной стабильности этого сопротивления очень низкие.

3.2.1 Подробное описание

Входы AIN0 и AIN1 соединены. Используются для измерения смещения встроенного в микросхему АЦП усилителя с программируемым усилением. Выход AIN3 соединен с аналоговой «землей».

Подразумеваются следующие рабочие конфигурации мультиплексора входов микросхемы АЦП:

- 0000 : AIN_P = AIN0, AIN_N = AIN1 (default) – измерение внутреннего смещения АЦП;
- 0011 : AIN_P = AIN1, AIN_N = AIN2 – измерение напряжения, падающего на объекте исследования;
- 0101 : AIN_P = AIN2, AIN_N = AIN3 – измерение напряжения, падающего на измерительном сопротивлении (измерение тока)

Определения коэффициента преобразования напряжение-ток при калибровке устройства.:

- Выход ИТУН отключается;
- Генераторы тока АЦП программируются на ток 500 мкА;
- Выходы обоих генераторов тока параллельно подключаются к входу АЦП AIN2, подсоединенному к измерительному резистору.
- Мультиплексор входов АЦП конфигурируется в состояние 0101 : AIN_P = AIN2, AIN_N = AIN3;
- Проводится серия измерений напряжения в мВ, результат усредняется;
- Полученное значение имеет размерность мВ/мА, т.е. Ом.

3.3 Модуль ЦАП

Принципиальная электрическая схема модуля ЦАП приведена на Рис. 5. На модуле установлена микросхема 4-х канального ЦАП MAX5815 (U1) и сумматор/вычитатель на базе высоковольтного операционного усилителя ОРА551 (U2). Интерфейс связи с микроконтроллером – I2C. Фотография модуля ЦАП представлена на Фото 5.

3.3.1 Формирование управляющего напряжения

Выходы однополярных каналов А,В и С, D попарно подключены к входам сумматора/вычитателя, выполненного на внешнем операционном усилителе.

Вес выходных напряжений каналов В и D при суммировании/вычитании составляет 1/100 от веса каналов А и С;

Управляющее напряжение U для ИТУН вычисляется по формуле:

$U = k(U_C + U_D/100) - k(U_A + U_B/100)$, где k – коэффициент усиления.

Таким образом, комбинируя выходные напряжения 4-х каналов ЦАП, имеющих дискретность 12 бит, можно сформировать биполярное управляющее напряжение с дискретностью ~ 19.5 бит.

На Рис. 2 представлена схема сумматора/вычитателя. Для простоты понимания принципа коэффициент усиления принят равным 1.

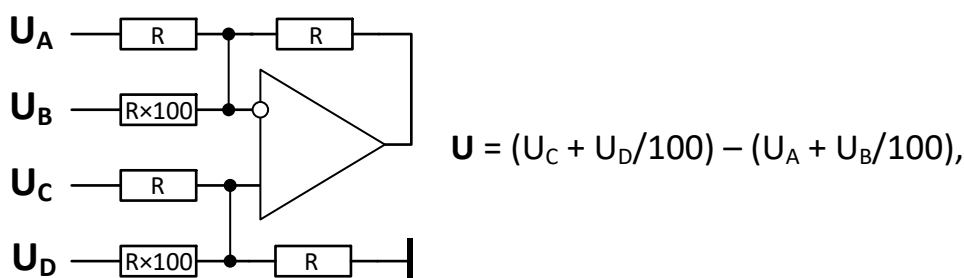


Рис. 2

Исходные данные:

- Опорное напряжение ЦАП – 4.096 В;
- При загрузке кода 4095 в регистр канала А значение U увеличивается на 4.095 В;
- При загрузке кода 4095 в регистр канала В значение U увеличивается на 0.04095 В;
- При загрузке кода 4095 в регистр канала С значение U уменьшается на 4.095 В;
- При загрузке кода 4095 в регистр канала D значение U уменьшается на 0.04095 В;

Алгоритм вычисления кодов для загрузки в регистры 4-х каналов ЦАП:

- Если U должно быть >0, значения регистров каналов А, В = 0;
- Если U должно быть <0, значения регистров каналов С, D = 0;

Значения регистров 2-х значащих каналов вычисляются с помощью операции деления с остатком:

Код (А | С) = $40 * |U| \div 0.04$;

Код (В | D) = $1E5 * |U| \bmod 0.04$.

3.4 Измерительные клеммы

Клеммы для подключения объекта исследования выполнены в виде сменного модуля (Фото 6).

Разъем, установленный на основной плате, имеет два контакта для подключения объекта исследования и внешний экран. Сменный модуль может быть выполнен в виде экранированной конструкции. При установке экран будет присоединен к аналоговому общему проводу прибора.

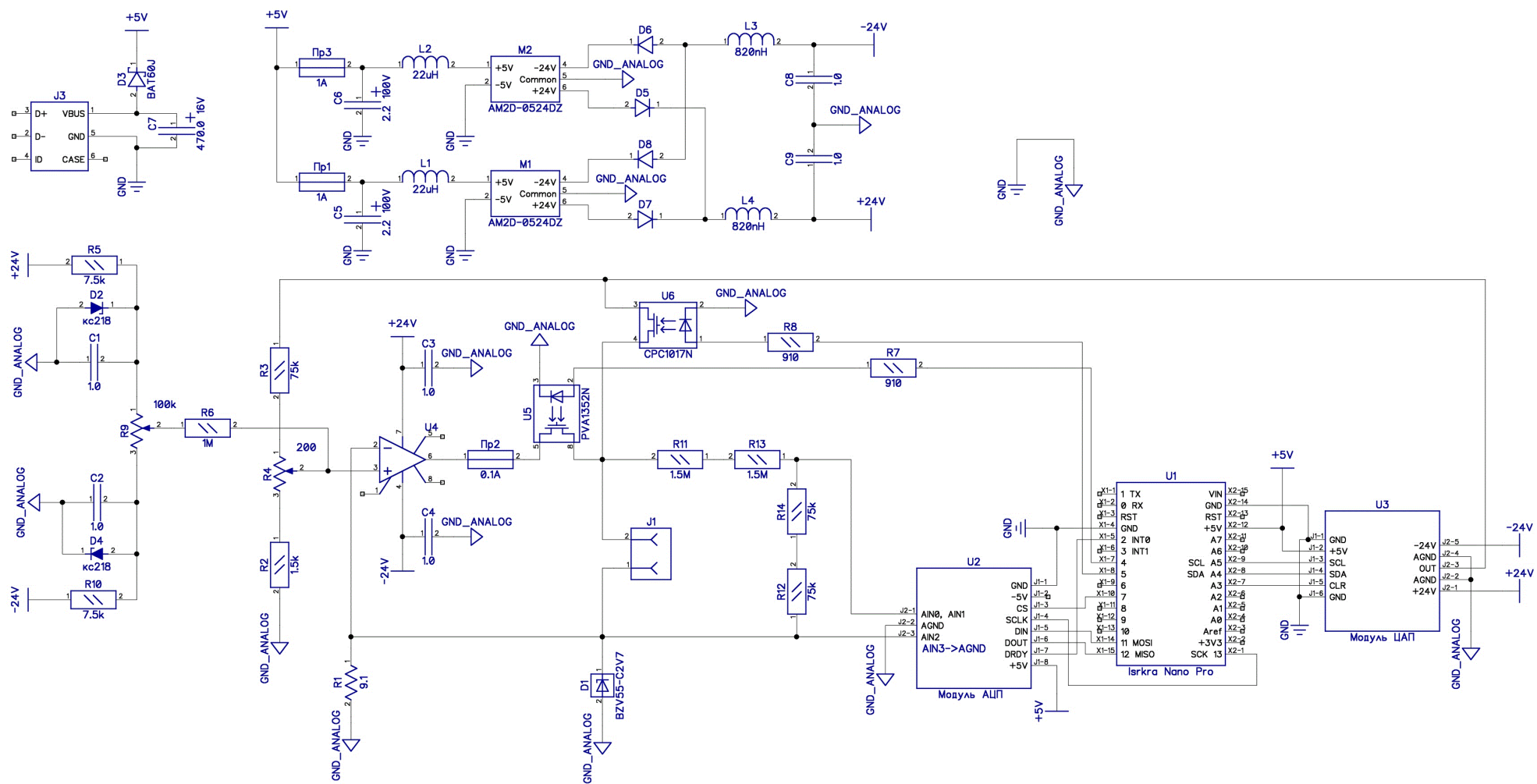


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема основной платы источника-измерителя.

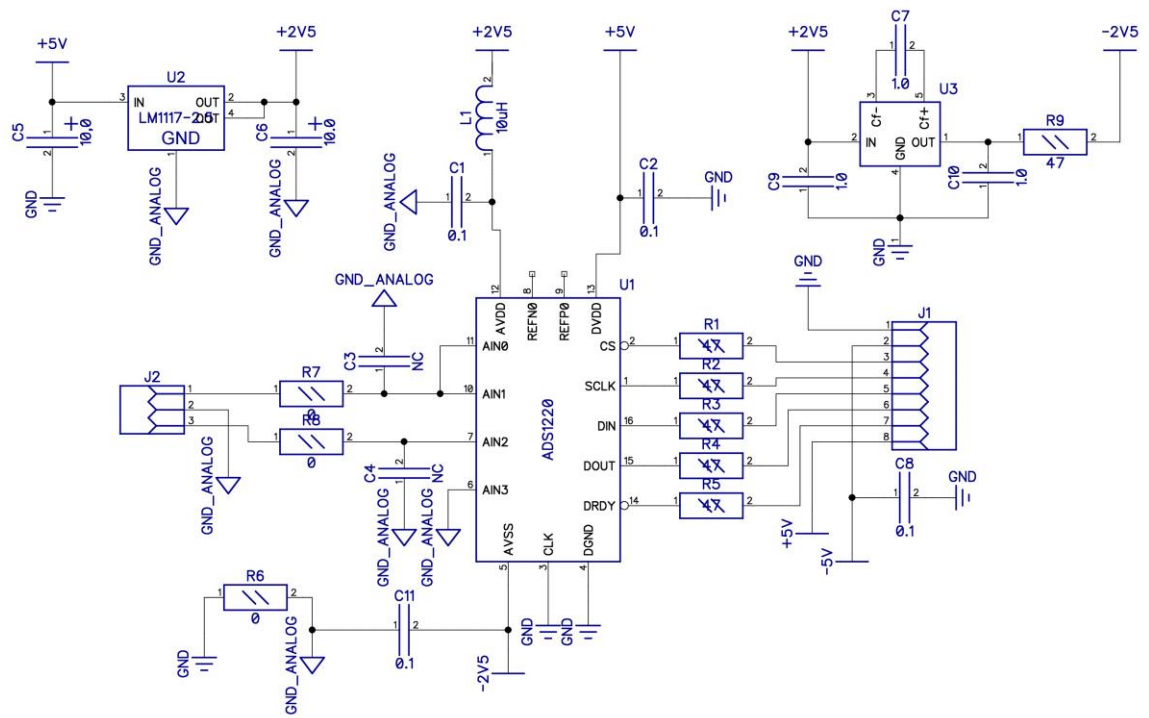


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема модуля АЦП.

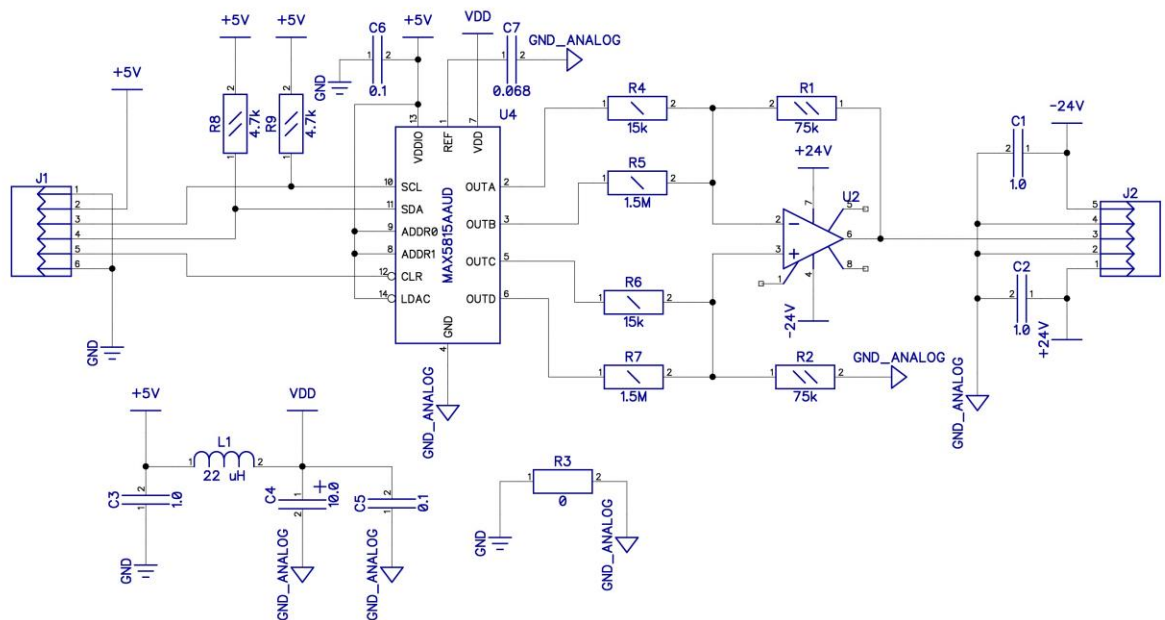


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема модуля ЦАП.

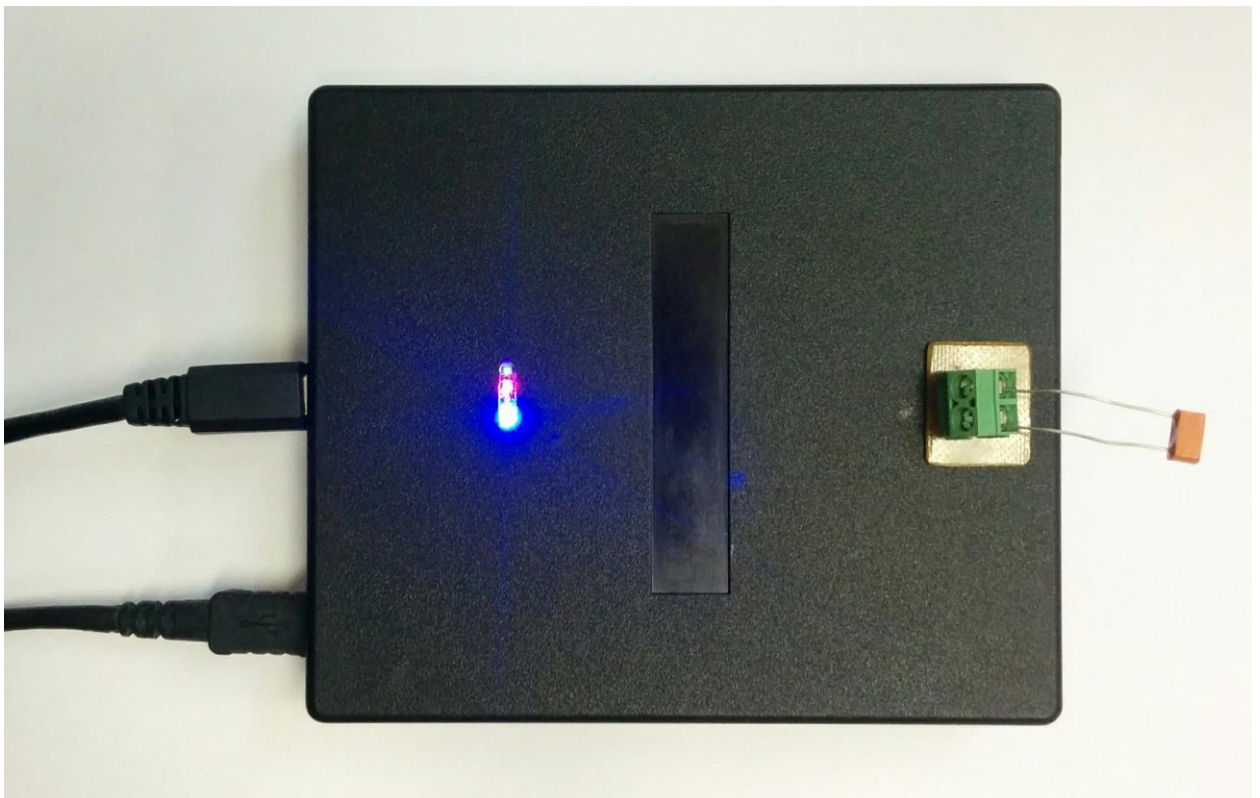


Фото 1. Внешний вид устройства.

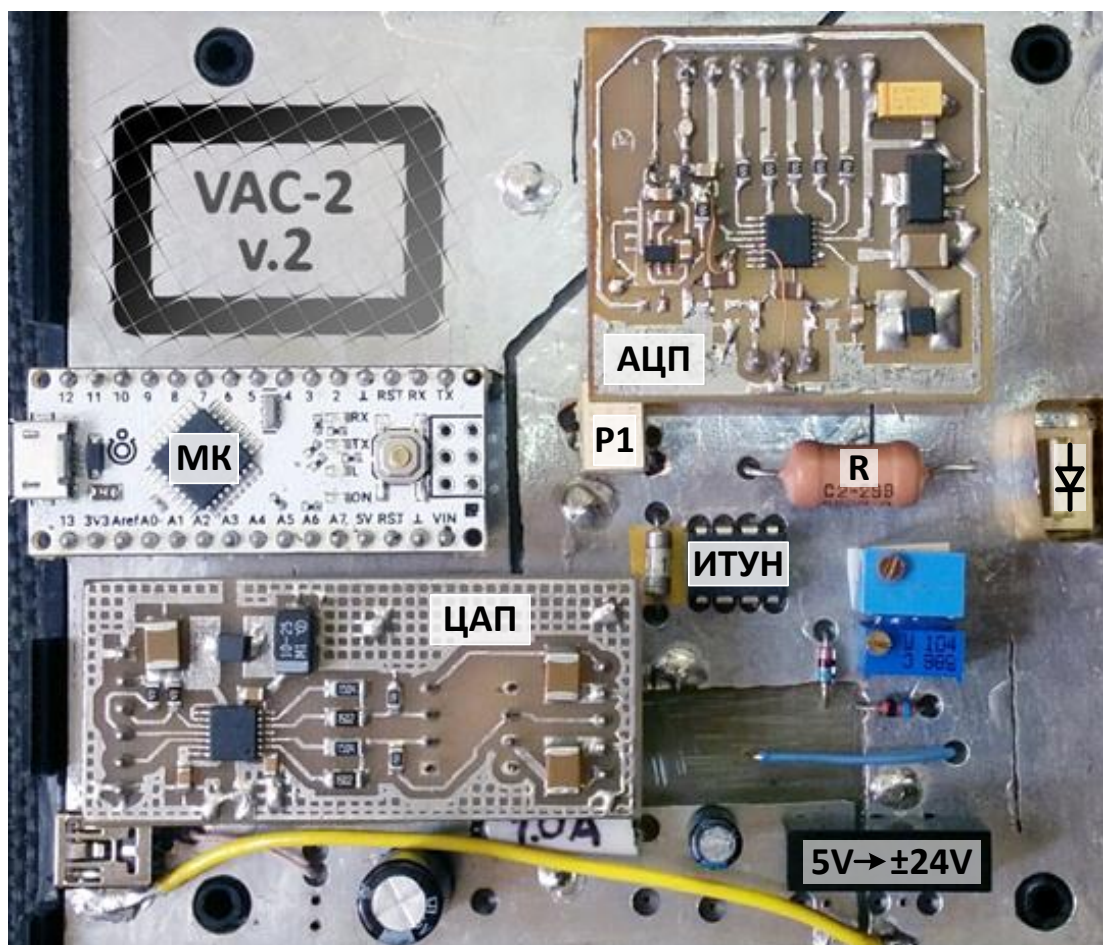


Фото 2. Основная плата – сторона компонентов.

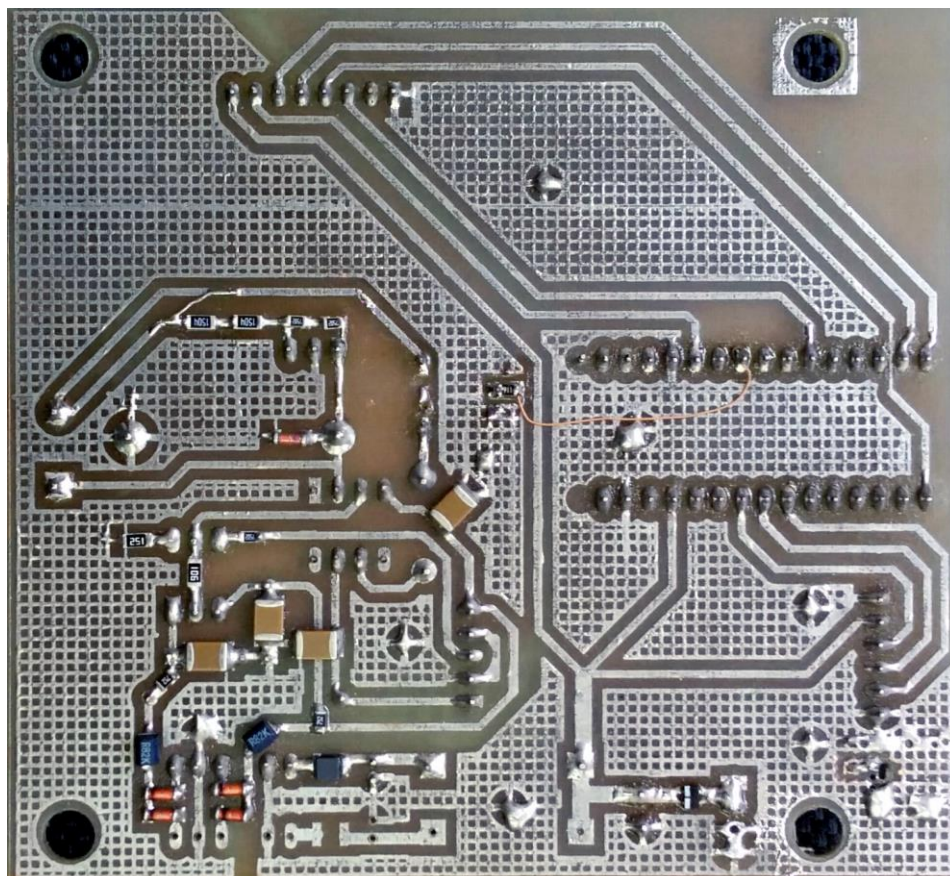


Фото 3. Основная плата – сторона проводников.

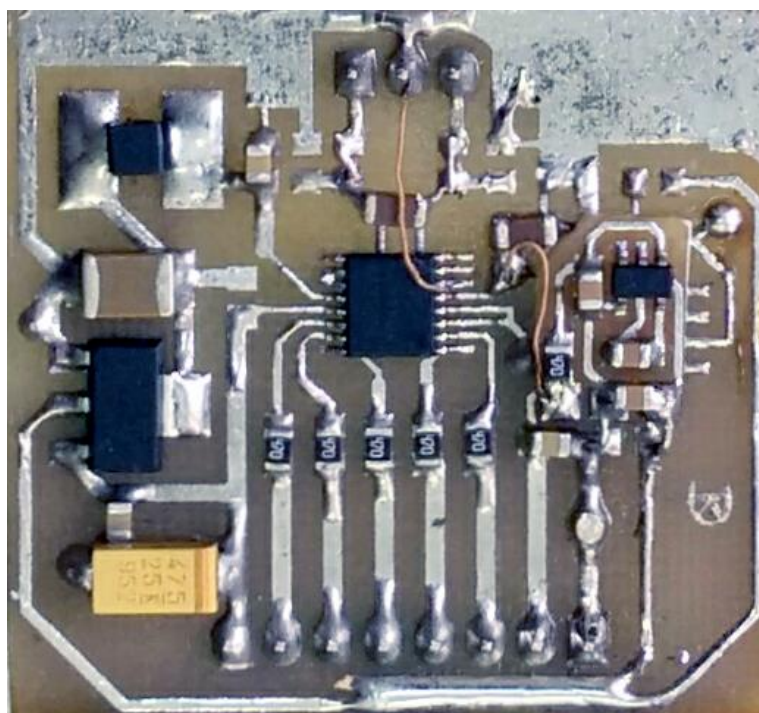


Фото 4. Модуль АЦП

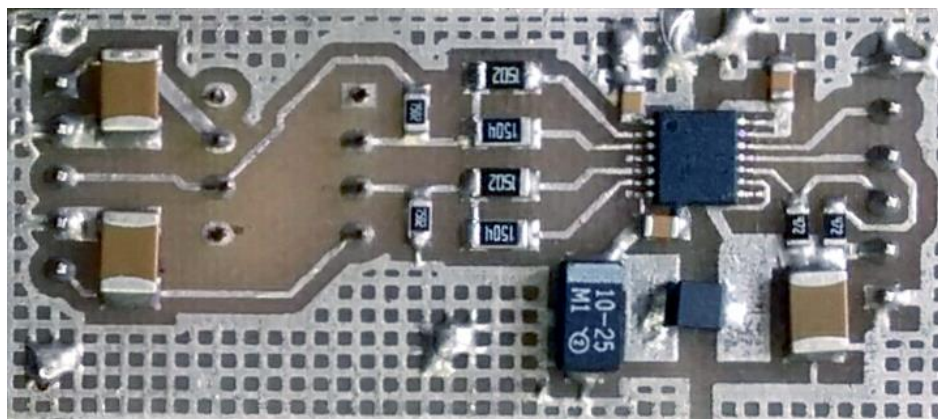


Фото 5. Модуль ЦАП

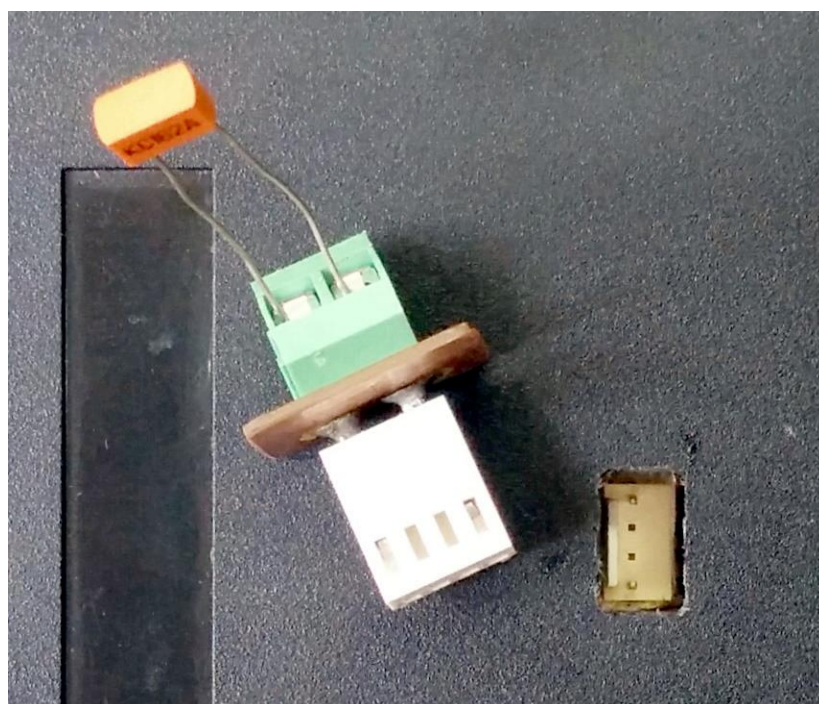


Фото 6. Сменная клеммная колодка