

Прикладное программное обеспечение цифрового USB прибора для измерения вольт-амперных характеристик.

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

В состав цифрового USB прибора для измерения вольт-амперных характеристик (далее USB прибор) входит прикладное программное обеспечение (ППО). ППО запускается на рабочей станции под управлением операционной системы Windows. ППО предназначено для реализации функций:

- управления и контроля состояния USB прибора;
- сбора, окончательной обработки, визуализации и сохранения результатов измерения USB прибором.

ППО реализуется как программа на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments. Для работы программы необходимо наличие рабочей станции с установленной на ней средой для выполнения кода LabVIEW 2012 SP1 Runtime.

ППО представлено скомпилированным исполняемым .exe файлом.

Оглавление

1	Логическая структура	2
2	Организация информационного обмена с USB прибором.....	2
2.1	Модуль ЦАП	2
2.1.1	Команды модуля ЦАП	3
2.2	Модуль АЦП	3
2.2.1	Команды модуля АЦП	3
2.3	Оптронные ключи.....	4
2.3.1	Команды управления оптронными ключами	4
3	Алгоритм исполнения программы ППО	4
3.1	Алгоритм калибровки:	4
3.2	Алгоритм работы программного блока VAC.....	5
3.2.1	Формат файла с результатами измерений.....	6
3.2.2	Сохранение архивного снимка.....	6
3.3	Алгоритм работы программного блока Service	8
3.4	Алгоритм работы программного блока Camera	9

1 Логическая структура

Структурно ППО состоит из трех крупных блоков, оформленных на виртуальной лицевой панели прибора в виде отдельных вкладок, имеющих интуитивно понятный графический интерфейс:

- **VAC** – измерение ВАХ образца, подключенного к измерительным клеммам;
- **Camera** – работа с USB-камерой. В составе расширенной версии ППО – VAC-2_3-Camera.
- **Calibrate** – калибровка USB прибора;
- **Service** – графический стенд, показывающий упрощенную принципиальную схему прибора, и позволяющий управлять его отдельными модулями. Используется для отладки и для обучения работе с устройствами сбора данных на базе ЦАП и АЦП.

2 Организация информационного обмена с USB прибором

ППО взаимодействует с USB прибором по последовательному интерфейсу по протоколу RS-232. Скорость передачи данных 115200 бит/с без контроля четности, 8 бит данных, 1 стоп-бит. Интерпретатор команд интерфейса связи реализован в виде текстового консольного интерфейса. Полный список команд приведен в документе «Специальное программное обеспечение цифрового USB прибора для измерения вольт-амперных характеристик».

Функционально USB прибор разделен на несколько модулей, тремя из которых ППО может управлять при помощи команд.

2.1 Модуль ЦАП

Модуль ЦАП формирует биполярное напряжение. Структурно модуль ЦАП состоит из четырех независимых каналов (A, B, C, D) формирующих однополярные напряжения и сумматора-вычитателя напряжений на базе операционного усилителя (Рис. 1). Вес выходных напряжений каналов B и D (U_B и U_D) при суммировании/вычитании составляет 1/100 от веса каналов A и C (U_A и U_C). Комбинируя выходные однополярные напряжения 4-х каналов ЦАП, имеющих дискретность 12 бит, можно сформировать биполярное напряжение U с дискретностью ~ 19.5 бит.

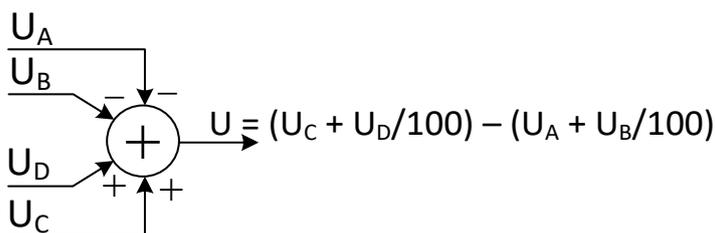


Рис. 1. Функциональная схема формирования управляющего напряжения

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

- Если U должно быть >0 , значения регистров каналов A, B = 0;
- Если U должно быть <0 , значения регистров каналов C, D = 0;
- Значения регистров 2-х значащих каналов вычисляются с помощью операции деления с остатком:

Код (A | C) = 40 * |U| div 0.04;
Код (B | D) = 1E5 * |U| mod 0.04.

2.1.1 Команды модуля ЦАП

- **DAC n DDDD** – для канала ЦАП **n** задает значение **DDDD** (**n**: 0-3, **DDDD**: 0-4095);
- **DAC_CLR** – загрузка нулевого кода в регистры всех каналов ЦАП.

2.2 Модуль АЦП

Модуль АЦП содержит 4-х канальный 24-битный дельта-сигма преобразователь с масштабным усилителем и с двумя встроенными программируемыми источниками тока.

На Рис. 2 представлена упрощенная схема аналогового коммутатора микросхемы АЦП. На ней приведены только те ключи и источники сигналов, которыми ППО может управлять с помощью команд.

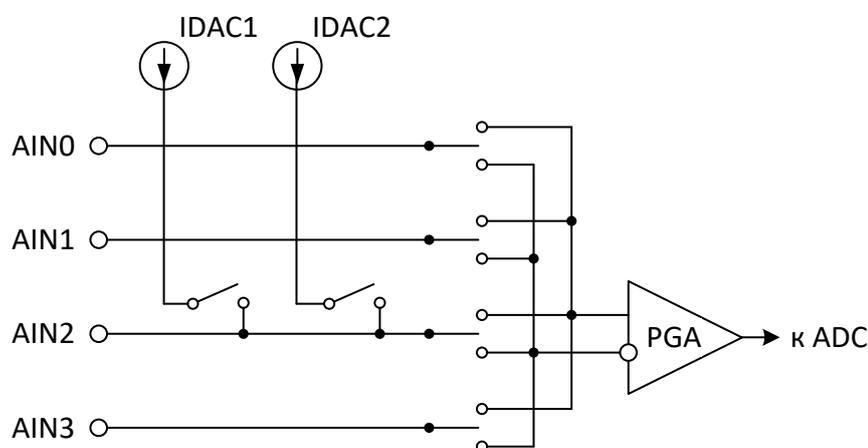


Рис. 2. Упрощенная схема аналогового коммутатора АЦП

2.2.1 Команды модуля АЦП

- **ADC_CONFIG?** – выводит значения 4-х регистров конфигурации АЦП в шестнадцатеричном формате;
- **ADC_CONFIG XX XX XX XX** – задает значения 4-х регистров конфигурации АЦП, XX – значение соответствующего регистра в шестнадцатеричном формате;
- **GAIN n** – задает коэффициент усиления масштабного усилителя PGA (**n**: 0-7, коэффициент усиления = $2^{<n>$ (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128));
- **MUX n** – конфигурирует входной коммутатор АЦП (**n**: 0-5, где 0: АИН0_АИН1, 1: АИН0_АИН2, 2: АИН0_АИН3, 3: АИН1_АИН2, 4: АИН1_АИН3, 5: АИН2_АИН3);
- **IDAC n** – конфигурирует встроенные в АЦП источники тока (**n**: 0-7, где 0: Off, 1: 10uA, 2: 50uA, 3: 100uA, 4: 250uA, 5: 500uA, 6: 1mA, 7: 1.5mA);
- **I1MUX n** – управляет подключением встроенного в АЦП источника тока 1 к входу АИН2 (**n**: 0-1, где 0: Off, 1: АИН2);
- **I2MUX n** – управляет подключением встроенного в АЦП источника тока 2 к входу АИН2 (**n**: 0-1, где 0: Off, 1: АИН2);
- **DATA?** – ждет окончания преобразования АЦП и выводит: результат в мВ с точностью 6 знаков после запятой; отсчет АЦП в шестнадцатеричном формате; значение коэффициента

усиления. Разделитель – символ «возврат каретки» (ответ: data_mV<CR> data_hex<CR> gain<CR>);

- **UI? n m** – макрокоманда (**n** GainU:0-7, **m** GainI:0-7). Выполняет последовательность действий по измерению напряжения и тока (ответ: Udata_mV<CR> Idata_mV<CR>).
- **STREAM** – в цикле ждет окончания преобразования АЦП и выводит результат в мВ с точностью 6 знаков после запятой.

2.3 Оптронные ключи

Оптронные ключи служат для подключения выхода модуля ЦАП и выхода ИТУН к измерительным цепям.

2.3.1 Команды управления оптронными ключами

- **OUT n** – **n**: 0-1, где 0: Off, 1:Current, 2:Voltage.

3 Алгоритм исполнения программы ППО

При запуске исполняемого файла VAC-2_1.exe происходит инициализация графического интерфейса и последовательного порта для связи с прибором. После этого происходит переключение на вкладку **Calibrate** и управление передается программному блоку калибровки (Рис. 3). Калибровка запускается автоматически и длится несколько секунд. По окончании калибровки управление передается на вкладку программного блока **VAC** (Рис. 4). Вкладка **Service** (Рис. 5) активируется кликом. Вкладка **Camera** (Рис. 6) для позиционирования зондов активируется кликом. Также на неё передается управления после окончания цикла измерений с вкладки **VAC** для сохранения архивного снимка. При нажатии на экранную кнопку **EXIT** работа активного программного блока прерывается, выход ИТУН отключается от измерительных клемм, все каналы ЦАП обнуляются, АЦП конфигурируется в состояние по умолчанию, последовательный порт освобождается и программа завершает свою работу.

3.1 Алгоритм калибровки:

- выходы модуля ЦАП и ИТУН отключаются от измерительных клемм (*команда: **OUT 0***);
- калибровка каналов измерения напряжения и тока:
 - макрокомандой **UI? n m** в цикле производятся измерения с накоплением для каждого значения коэффициента усиления ;
 - формируются массивы поправок **Ar_U_0** и **Ar_I_0**.
- определение значения измерительного сопротивления:
 - входной коммутатор микросхемы АЦП конфигурируется в состояние AIN2-AIN3
 - встроенные программируемые источники тока микросхемы АЦП программируются на значение тока 0.5 mA (**IDAC 5**);
 - встроенные программируемые источники тока микросхемы АЦП подключаются к входу АЦП AIN2 (**I1MUX 1, I2MUX 1**);
 - производится измерение с накоплением и с учетом калибровки. Полученное значение имеет размерность mV/mA, т.е. Ом (в цикле **DATA?**);

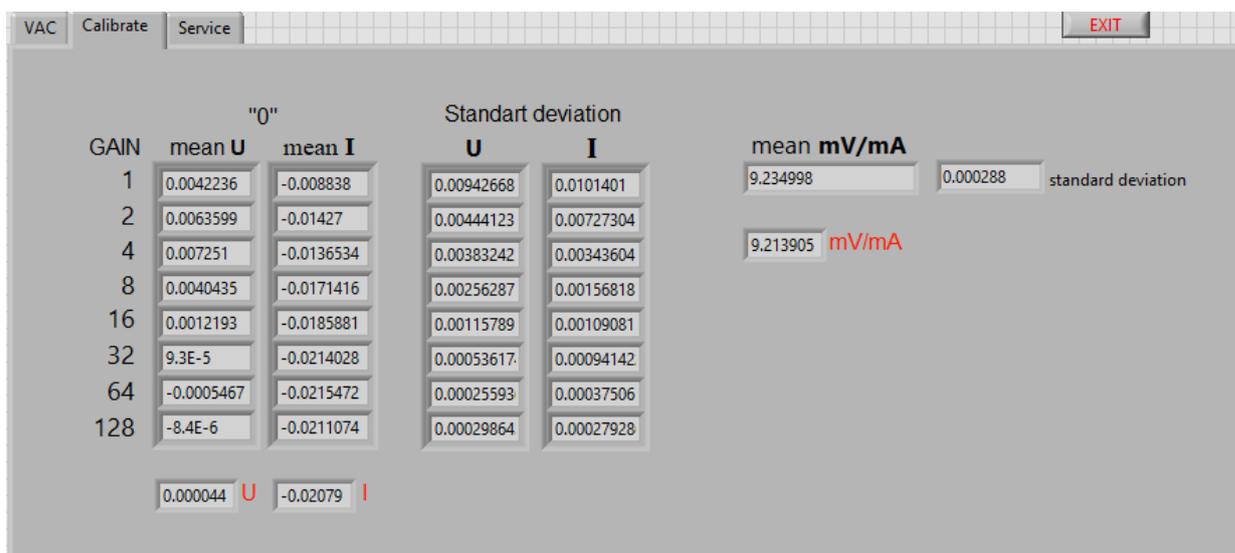


Рис. 3. Вкладка программного блока Calibrate.

3.2 Алгоритм работы программного блока VAC

На вкладке **VAC** (Рис. 4) расположены восемь элементов управления и три элемента индикации.

Элементы управления:

- поле **Режим** – выпадающий список: Гальваностат, Потенциостат;
- поле **I max, mA** ;
- поле **Step I, mA** - отображается только в режиме Гальваностат;
- поле **U max, V** - отображается только в режиме Потенциостат;
- поле **Step U, V** - отображается только в режиме Потенциостат;
- экранная кнопка **START**;
- два поля блока **Диапазоны (U, I)** – задают коэффициенты усиления масштабного усилителя микросхемы АЦП для каналов измерения напряжения и тока.

Нажатие кнопки **START** запускает процесс измерения:

- В режиме Гальваностат:
 - выход ИТУН подключается к измерительным клеммам;
 - задается ток ($+ I_{max}$);
 - в цикле:
 - производится измерение значений тока, протекающего через образец, и напряжения, падающего на образце;
 - заданный ток уменьшается на величину ($Step I$).
 - условие завершения цикла:
 - заданный ток достиг значения ($- I_{max}$), или
 - напряжение, падающее на образце, меньше или равно ($- 20 V$), или
 - нажата кнопка **EXIT**.
 - по завершению цикла выход ИТУН отключается от измерительных клемм, все каналы ЦАП обнуляются, АЦП конфигурируется в состояние по умолчанию, оператору предлагается сохранить результат измерений.

- если результаты были сохранены, происходит переключение на вкладку **Camera** (только для расширенной версии ППО – VAC-2_3-Camera).
- В режиме Потенциостат:
 - производится проверка условий $+ I (+U \max) \leq + I \max, - I (- U \max) \geq - I \max$;
 - при необходимости значения $+U \max$ и $- U \max$ корректируются;
 - выход модуля ЦАП подключается к измерительным клеммам;
 - задается напряжение ($+ U \max$);
 - в цикле:
 - производится измерение значений тока, протекающего через образец, и напряжения, падающего на образце;
 - заданное напряжение уменьшается на величину (*Step U*).
 - условие завершения цикла:
 - заданное напряжение достигло значения ($- U \max$), или
 - нажата кнопка **EXIT**.
 - по завершению цикла выход модуля ЦАП отключается от измерительных клемм, все каналы ЦАП обнуляются, АЦП конфигурируется в состояние по умолчанию, оператору предлагается сохранить результат измерений.
 - если результаты были сохранены, происходит переключение на вкладку **Camera** (только для расширенной версии ППО – VAC-2_3-Camera).

Элементы индикации:

- окно **XY Graph** динамически строит вольт-амперную характеристику в процессе измерительного цикла.
- два цифровых индикатора **U, mV** и **I, mA**, расположенные поверх окна **XY Graph** - отображают значения тока и напряжения, измеренные в текущем шаге измерительного цикла;

3.2.1 Формат файла с результатами измерений

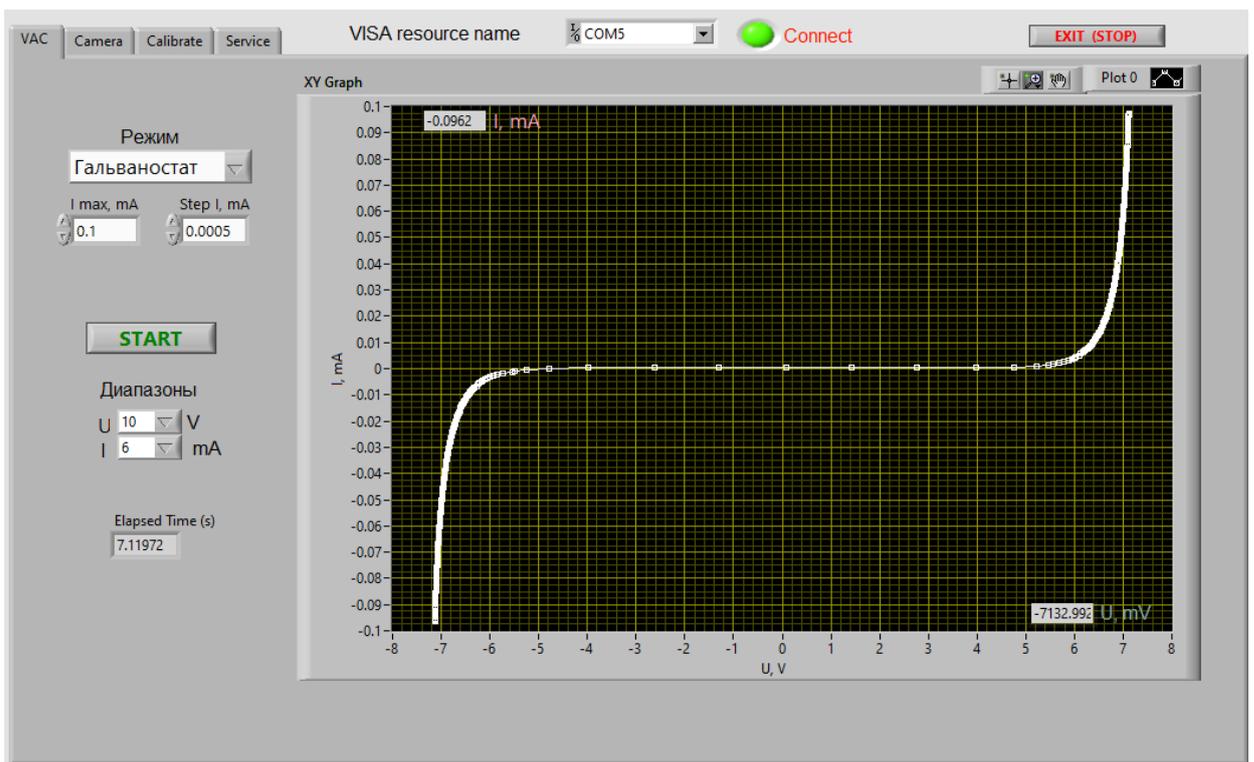
Результаты сохраняются в текстовый файл в виде таблицы из двух столбцов, разделенных символом табуляции:

U, mV	I, mA
5229.966927	0.978287
5226.267585	0.968482
5223.001960	0.958721
...	

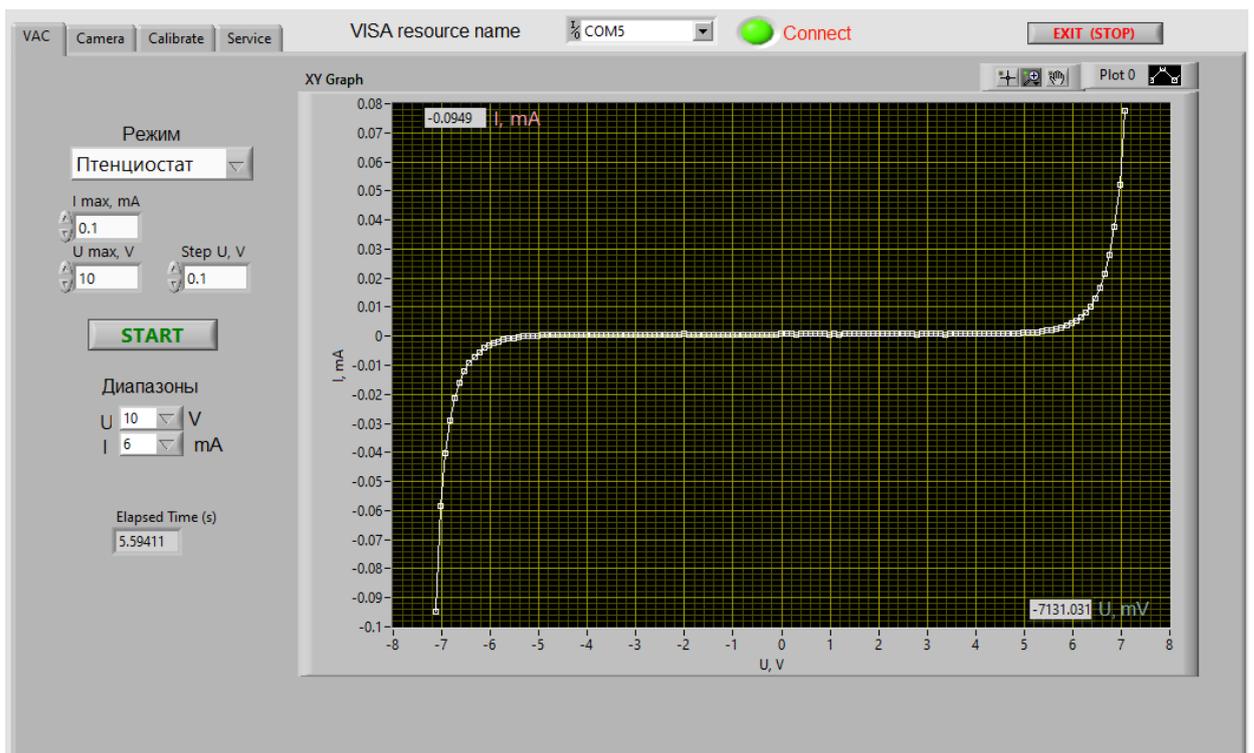
3.2.2 Сохранение архивного снимка

(только для расширенной версии ППО – VAC-2_3-Camera)

После сохранения результатов измерений происходит переключение на вкладку **Camera** (Рис.6). Поле **Path** будет содержать путь, выбранный при сохранении результата. Поле **File** будет содержать имя файла, выбранное при сохранении результата. Сохранение графического файла с расширением **.png** произойдет после нажатия на экранную кнопку **Снимок**.



a)



б)

Рис. 4. Вкладка программного блока VAC. (а) – режим Гальваностат, (б) – режим Потенциостат

3.3 Алгоритм работы программного блока Service

Вкладка программного блока **Service** (Рис. 5) выполнена в виде графического стенда, показывающего упрощенную принципиальную схему прибора. С помощью элементов управления, расположенных на этой вкладке, можно управлять его отдельными модулями – ЦАП, АЦП, твердотельным реле.

Элементы управления:

- поле **VISA resource name** позволяет выбрать порт, к которому подключен прибор;
- четыре поля **OUTA**, **OUTB**, **OUTC**, **OUTD** задают значения регистров каналов ЦАП;
- кнопка **OUT** управляет подключением выхода ИТУН к измерительным клеммам;
- выпадающий список **MUX** позволяет выбрать конфигурацию аналогового коммутатора АЦП;
- выпадающий список **IDAC** позволяет выбрать конфигурацию встроенных источников тока АЦП;
- кнопки **IDAC1**, **IDAC2** управляют подключением встроенных источников тока АЦП к входу АIN2;
- выпадающий список **GAIN** позволяет установить коэффициент усиления масштабного усилителя АЦП.

Элементы индикации:

- индикатор **Connect** загорается зеленым цветом после приема символа приглашения «>»;
- индикатор кнопки **OUT** загорается зеленым цветом при подключении выхода ИТУН к измерительным клеммам;
- индикаторы АIN0, АIN1, АIN2, АIN3 загораются зеленым цветом в зависимости от конфигурации аналогового коммутатора АЦП;
- индикаторы кнопок **IDAC1**, **IDAC2** загораются зеленым цветом при подключении встроенных источников тока АЦП к входу АIN2;
- цифровые индикаторы **HEX**, **mV**, **Gain** отображают текущие значения отсчета АЦП в шестнадцатеричном формате, измеренного напряжения в mV и коэффициент усиления масштабного усилителя АЦП, при котором было осуществлено аналого-цифровое преобразование;
- цифровые индикаторы **R0**, **R1**, **R2**, **R3** отображают текущее состояние регистров конфигурации АЦП в шестнадцатеричном формате;
- развертка **U**, **mV** отображает в виде графика изменение значения измеренного напряжения от времени.

Цикл выполнения программного блока Service:

- опрашиваются все элементы управления;
 - при изменении значений или состояния элементов управления модулями формируются и передаются в прибор соответствующие команды и параметры.
- запрашиваются, принимаются от прибора и отображаются:
 - результат аналого-цифрового преобразования;
 - значения регистров конфигурации АЦП.
- выполнение программного блока Service останавливается при условиях:
 - нажата кнопка **EXIT**;

- активирована другая вкладка на виртуальной лицевой панели прибора.

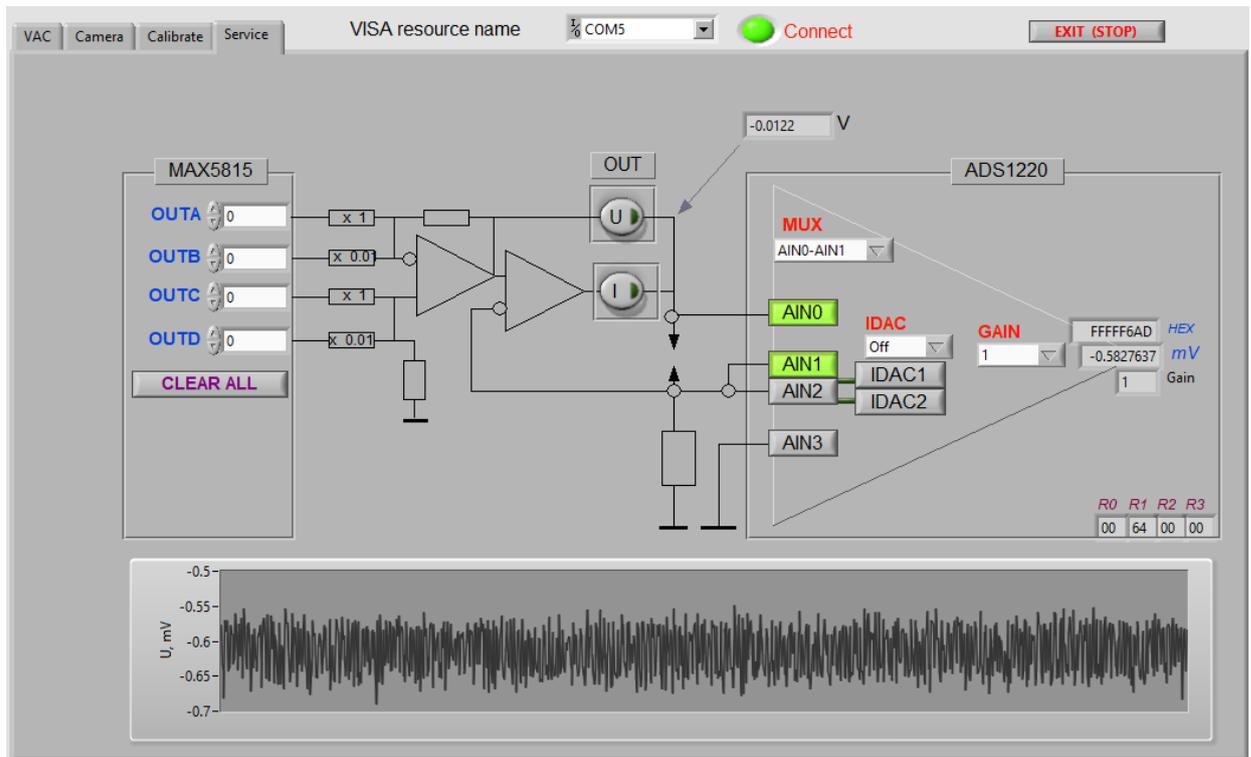


Рис. 5. Вкладка программного блока Service.

3.4 Алгоритм работы программного блока Camera

На вкладке **Camera** (Рис. 6) расположены три элемента управления и графическое окно.

В графическое окно в реальном масштабе времени (с небольшой задержкой) выводится изображение, передаваемой USB-камерой.

Поля **Path** и **File** заполняются автоматически после сохранения результатов измерений, выполненных в программном блоке **VAC**. Сохранение графического файла с расширением **.png** происходит после нажатия на экранную кнопку **Снимок**.

Работа программного блока Camera основана на использовании библиотеки **libvlc.dll**. Эта библиотека устанавливается на компьютер вместе с приложением **VLC media player**.

Гарантирована корректная работа с приложением **VLC media player** версии 3.0.11. Работа с более ранними и более поздними версиями не проверялась.

Инициализация Веб-камеры осуществляется при запуске ППО в виртуальном приборе **VLC-start.vi**. Параметры инициализации заданы текстовыми константами для конкретной USB-камеры – видеоэндоскоп **iCartool IC-V99**:

- `dshow-vdev=USB2.0 PC CAMERA`
- `dshow-size=640`

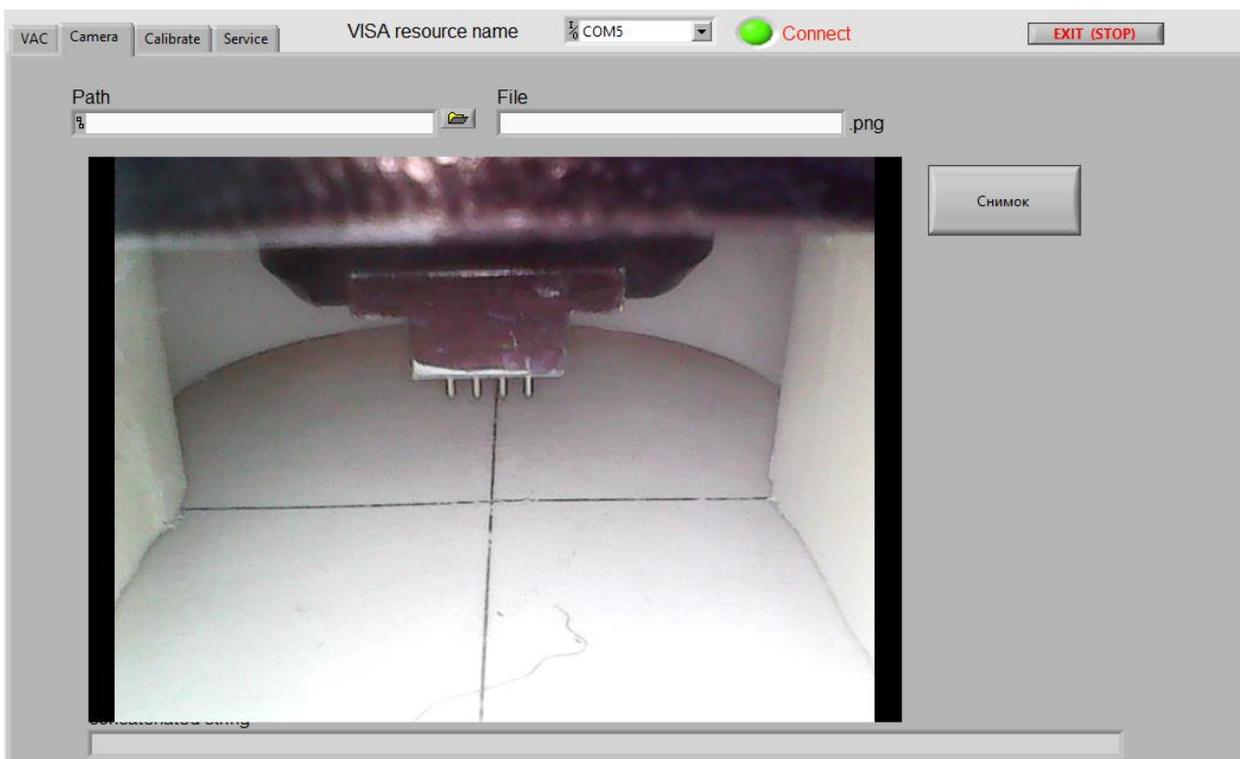


Рис. 6 Вкладка программного блока Camera