

УДК 53.087.92

## НОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Н.П. Якимов, А.В. Машанов,  
И.Н. Лазовик, Р.И. Лазовик

*Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», Иркутск, Россия,  
lin@vniiftri-irk.ru*

*Аннотация. В статье приводится описание конструкции и алгоритма работы разработанного прибора для измерения биопотенциалов головного мозга человека, приводятся некоторые результаты измерений.*

*Ключевые слова: электроэнцефалография, электроэнцефалограф, аналогово-цифровой преобразователь, алгоритм работы.*

## NEW MEASURING CAPABILITIES OF BRAIN POTENTIALS

N.P. Yakimov, A.V. Mashanov,  
I.N. Lazovik, R.I. Lazovik

*East-Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", Irkutsk, Russia,  
lin@vniiftri-irk.ru*

*Annotation. The article describes the design and operation algorithm of the developed device for measuring the potentials of the human brain, some measurement results are given.*

*Key words: electroencephalography, electroencephalograph, analog-to-digital converter, operation algorithm.*

В настоящее время всё более широкое применение находят методы исследования головного мозга на основе регистрации биопотенциалов. Данный метод получил название электроэнцефалография (ЭЭГ) и используется в диагностике при исследовании течения различных заболеваний [1].

Для выполнения измерений используется электроэнцефалограф — электроизмерительный прибор для регистрации и измерения электрических колебаний с частотой 0,5–100 Гц.

В классической энцефалографии существует проблема того, что при диагностике различных состояний головного мозга регистрируемые значения биопотенциалов могут иметь близкие значения как в нормальном состоянии, так и при патологиях [2]. Поэтому одним из путей повышения диагностических возможностей электроэнцефалографии является расширение диапазона регистрируемых частот за счёт регистрации уровня постоянного потенциала (УПП) головного мозга и его колебаний в диапазоне менее 0,5 Гц.

Особенность решения данной задачи заключается в том, что диапазон напряжений, которые требуется измерять, составляет десятки милливольт, а с учётом электродных и поляризационных явлений — до  $\pm 500$  мВ для УПП.

Для того чтобы эффективно регистрировать такие сигналы, необходимо различать напряжения порядка 1 мкВ. Это значит, что при диапазоне измерений напряжения 1 В разрядность аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) должна быть по крайней мере 20 бит ( $2^{20} = 1048576$  уровней). Такой разрядностью обладают 24-битные АЦП, при этом необходимо использовать равномерное квантование. В качестве помехи значительную поляризацию могут вносить измерительные электроды. Поскольку абсолютные значения измеряемого сигнала варьируются от единиц микровольт до сотен милливольт, необходимо обеспечить одинаковую точность во всём диапазоне измерений.

При использовании неравномерного квантования пришлось бы выбирать диапазон, где уровней квантования должно быть больше, в зависимости от конкретных экземпляров электродов. Данная измерительная задача может быть решена путём разработки средства измерений в составе [3]:

- АЦП;
- устройство для измерения сопротивления электродов;
- микроконтроллер;
- гальваническая развязка;
- USB-мост.

Функциональная схема прибора показана на рис. 1.

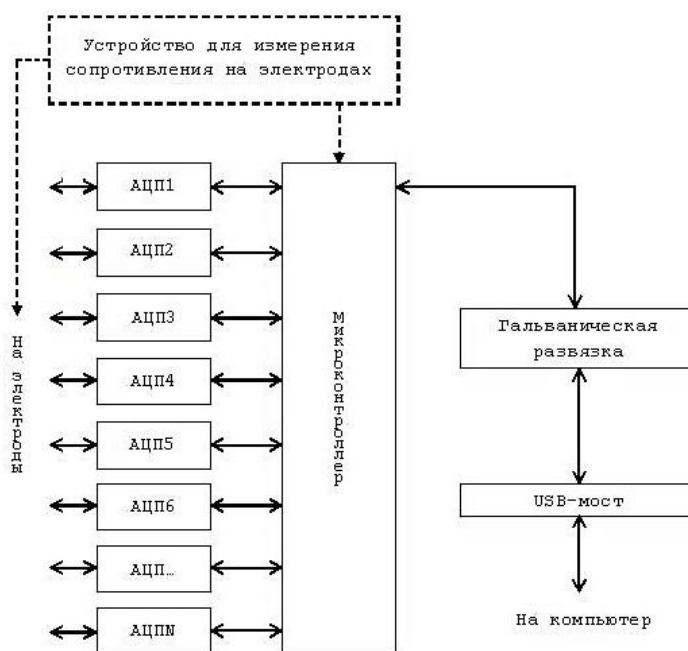


Рис. 1. Функциональная схема разрабатываемого устройства

Микроконтроллер связывается с персональным компьютером (ПК) посредством USB-моста, между которыми установлена гальваническая развязка.

Для начала измерения с ПК на микроконтроллер должна быть подана команда и необходимые настройки. Микроконтроллер подаёт команды на АЦП для их конфигурирования и передачи данных.

Перед началом основных измерений производится измерение сопротивления на электродах с помощью соответствующего блока (это может быть реализовано как отдельное устройство или с помощью функционала АЦП или контроллера).

При подаче соответствующей команды АЦП принимает с электродов сигнал и преобразует его в числовой код. Микроконтроллер перекодирует в требуемую форму полученную информацию и выдаёт её компьютеру через USB-мост.

Для практической реализации устройства по техническим параметрам подходят АЦП марки AD 7793 [4]. Это малощумящий 24-битный сигма-дельта-АЦП с тремя дифференциальными аналоговыми входами. Кроме того, на чипе размещены программируемые источники тока возбуждения, диагностические источники тока и генератор напряжения смещения. Устройствами можно управлять с помощью внутреннего источника или внешнего тактового сигнала.

Подразумевается использование нескольких таких АЦП (8–16). Вариант с использованием нескольких АЦП вместо одного АЦП с мультиплексором обусловлен тем, что этот чип доступен и также содержит в себе необходимые компоненты для реализации дополнительных функций.

В составе чипа с АЦП присутствуют измерительный дифференциальный усилитель на входе АЦП и источники тока возбуждения. Наличие измерительного усилителя в составе чипа позволяет проектировать устройство без использования дополнительных усилительных схем на входе.

Измерительный усилитель — это разновидность дифференциального усилителя. Измерительные усилители применяются в высокоточных схемах, потому что они при измерении обеспечивают: высокую точность коэффициента усиления, широкий диапазон регулирования коэффициента усиления, большое входное сопротивление, малый собственный шум.

Источники тока возбуждения (100 нА) помогут решить задачу измерения сопротивления электродов без дополнительных устройств. Сопротивление вычисляется как отношение разности измеренных напряжений при включенном и выключенном источнике за определённое время к величине тока.

В настоящее время существует большое разнообразие семейств микроконтроллеров. Например, ARM, AVR, STM, PIC и другие [5]. Для данного схемотехнического решения был выбран микроконтроллер PIC18F252 семейства PIC. К достоинствам PIC-контроллеров также можно отнести фиксированный размер команд, что будет важно при программировании микроконтроллера.

Гальваническая развязка в этом устройстве решает две задачи.

Во-первых, это защита от высоких напряжений. Наличие гальванической развязки — это требование, которое предъявляется техникой безопасности к большинству электроприборов.

Во-вторых, гальваническая развязка необходима для обеспечения лучшей помехоустойчивости. Прибор должен соединяться с ПК по интерфейсу USB, здесь неизбежны импульсные помехи по питанию, а АЦП очень чувствителен. Наличие помех от ПК повлияет на измерения.

В устройстве используется готовая цифровая двухканальная развязка на основе микросхемы ADUM 1201 [6].

При выборе USB-моста одним из основных требований была универсальность подключения к компьютерам на разных операционных системах. Основные требования к чипу: поддержка USB 2.0; обеспечение минимальной требуемой скорости обмена 292 кбит/с и наличие драйверов для актуальных операционных систем. В устройстве применяется USB-мост на основе микросхемы CP2102 [7]. Этот USB-мост обеспечивает требуемую скорость передачи данных. Обмен данными между микроконтроллером и компьютером будет осуществляться с использованием виртуального COM-порта. Этим обеспечивается универсальность.

Поскольку АЦП очень требовательны к питанию, то необходимо минимизировать помехи со стороны питания. Источник питания не должен вносить значимых помех. Трансформаторные источники питания имеют большие габариты. Основным недостаток импульсных источников — это наличие импульсных высокочастотных помех как на входе, так и на выходе. Для устранения этого недостатка необходимо применение фильтров. Это приведёт к усложнению схемы устройства.

С учётом низкого энергопотребления разрабатываемого устройства (до 2,5 Вт) оптимальным решением будет использование элементов питания, например, литий-ионных 3,7 В элементов форм-фактора 18650. Выбранные АЦП требуют отдельного питания для аналоговой и цифровой частей.

Два последовательно соединённых элемента 18650 дают напряжение около 7,4 В. Это напряжение стабилизируется до 5 В двумя стабилизаторами напряжения L7805CV. С одного стабилизатора напряжение идёт на цифровую часть АЦП, микроконтроллер и ADUM, со второго — на аналоговую часть АЦП. Минусы аналоговой и цифровой частей питания соединяются только в одной точке. Принципиальная схема блока питания показана на рис. 2.

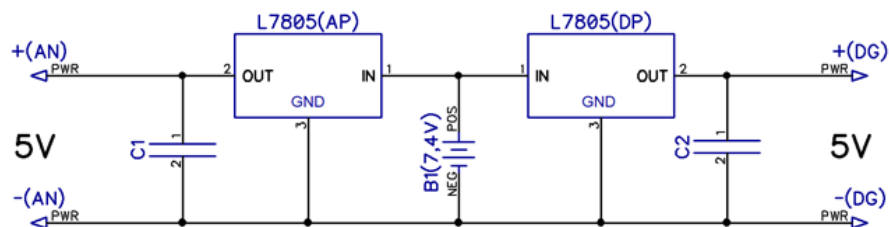


Рис. 2. Принципиальная схема блока питания

Схема проста в реализации и обеспечивает уровень шума по напряжению на выходе не более 2 мкВ.

На рис. 3 представлен алгоритм работы микроконтроллера. Программа для микроконтроллера написана на ассемблере. Для компиляции кода использовался компилятор MPASM.

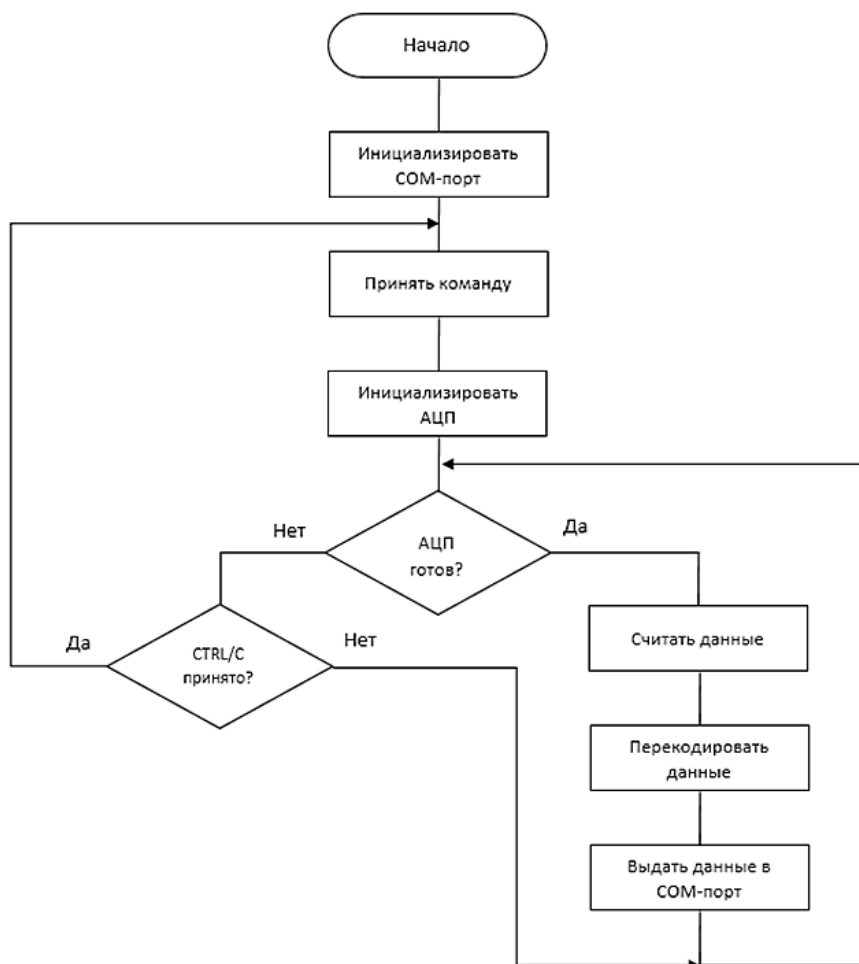


Рис. 3. Блок-схема работы микроконтроллера

После включения и инициализации микроконтроллера начинается основная программа. Первым действием происходит конфигурирование порта передачи (задаётся скорость передачи и т.д.). После того как порт передачи инициализирован, микроконтроллер ожидает команду с компьютера. Как только по порту приходит одна из известных команд, микроконтроллер в соответствии с этой командой инициализирует АЦП. Затем микроконтроллер проверяет готовность АЦП и ввода команды «прервать выполнение команды».

Как только АЦП готов, микроконтроллер принимает данные с него, выполняет перекодирование этих данных и отправляет их в порт передачи данных. Если АЦП не готов и в порт пришла команда «прервать выполнение команды», то микроконтроллер возвращается к этапу ожидания команды.

Данные передаются последовательно через UART на скорости 500 кбит/с. Каждый байт передаётся в режиме 8-N-1 (8 бит данных, 1 бит стоповый).

На основе вышеизложенного в настоящее время разработан новый тип электроэнцефалографа для регистрации и измерения электрических колебаний с частотой 0,5–100 Гц. Монтажная плата и внешний вид прибора показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

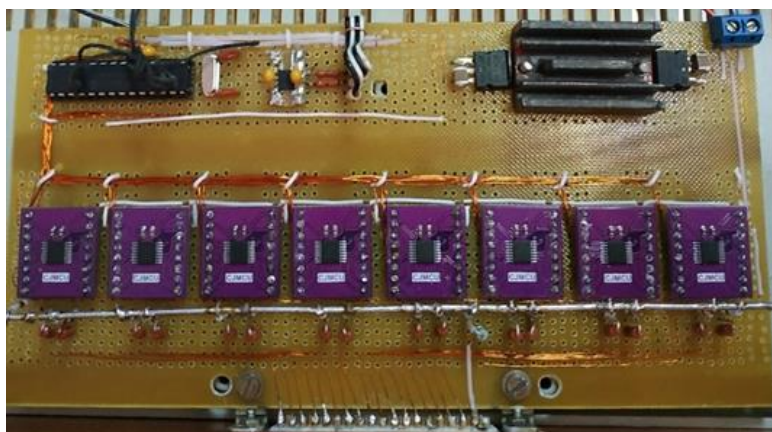


Рис. 4. Общий вид монтажной платы



Рис. 5. Внешний вид прибора

На рис. 6 показаны некоторые результаты выполненных измерений с использованием точечных хлорсеребряных электродов в точке Cz головы человека [8].

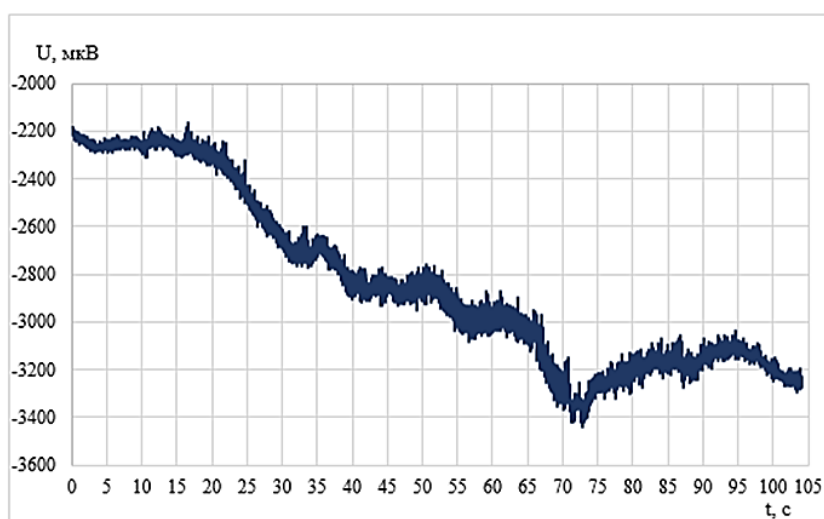


Рис. 6. Измерение напряжения в отведении Cz головы человека

Полученные результаты измерений хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами [8, 9].

Подтверждение метрологических характеристик данного прибора представляет собой отдельную задачу. Основная проблема при этом заключается в измерениях электрических колебаний менее 20 Гц.

Таким образом, разработанный прибор показал хорошую чувствительность и помехоустойчивость. В дальнейшем планируется проведение дополнительных исследований по подтверждению его действительных метрологических характеристик при различных режимах работы.

### Список литературы

1. Гусельников В.И. Электрофизиология головного мозга. — М.: Высшая школа, 1976. — 422 с.
2. Ганцгорн Е.В., Макляков Ю.С., Хлопонин Д.П. Морфологический анализ нейропротекторной активности ноотропов и их комбинаций с мелаксеном при экспериментальной ишемии головного мозга: научное издание // Биомедицина. — 2014. — № 3. — С. 152–153.
3. Якимов Н.П. и др. Разработка ЭЭГ-регистратора на основе новых подходов к анализу электрической активности мозга // Вестник Иркутского университета. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. — Вып. 22. — С. 215.
4. 3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC with On-Chip In-Amp and Reference // Mixed-signal and digital signal processing ICs. Analog devices: [сайт]. — URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7792\\_7793.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7792_7793.pdf) (дата обращения: 18.04.2019).

5. PIC18FXX2 Data Sheet. High-Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D // Microchip Technology: [сайт]. — URL: <https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf> (дата обращения: 18.04.2019).
6. CP2102/9 Data Sheet. Single-Chip USB-to-UART Bridge // Silicon Labs: [сайт] — URL: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf> (дата обращения: 18.04.2019).
7. Dual-Channel Digital Isolators. Data Sheet ADuM1200/ADuM1201 // Mixed-signal and digital signal processing ICs. Analog devices: [сайт] — URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1200\\_1201.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1200_1201.pdf) (дата обращения: 18.04.2019).
8. Мурик С.Э. О возможности омегаэлектроэнцефалографии в оценке функционального и метаболического состояния нервной ткани головного мозга при гипервентиляции // Бюллетень сибирской медицины. — 2019. — Вып. 18 (2). — С. 127–145.
9. Murik S.E., Shapkin A.G. Simultaneous recording of the EEG and direct current (DC) potential makes it possible to assess the functional and metabolic state of the nervous tissue // Intern J. Neuroscience. — 2004. — 114. — P. 921–934.

*Статья поступила в редакцию: 10.09.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 17.09.2021 г.*

*Статья принята в работу: 24.09.2021 г.*