

DOI:

## **ОПТИКО-ОКУЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В РЕАБИЛИТОЛОГИИ**

**Туровский Я.А.**

*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Университетская пл. 1;  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва ул.*

*Профсоюзная д.65*

*Yaroslav\_turovsk@mail.ru*

**Богатиков Е.В**

*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Университетская пл. 1*

*evbogatikov@yandex.ru*

**Борзунов С.В.**

*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Университетская пл. 1*

*sborzunov@gmail.com*

*Аннотация: в работе рассмотрены аппаратные решения для оптико-окулографических интерфейсов, используемых в системах управления как самоходными так и стационарными внешними устройствами. Даны характеристики различных схмотехнических решений и возможности их интеграции в реабилитационные системы.*

Ключевые слова: эргатические системы, оптико-окулографический интерфейс.

### **Введение**

Развитие систем реабилитации, включая собственно управление реабилитационным процессом, в настоящее время преследует несколько целей, одной из которых является обеспечение для пациента возможности максимально полноценно восстановить свой функционал. При этом восстановление физических функций обеспечивается за счёт технических решений, дающих пользователю возможность управлять внешними устройствами минуя классические подходы в виде клавиатуры, джостика, мыши и подобных устройств. Кроме голосовых помощников, значительный интерес привлекают т.н. альтернативные интерфейсы человек компьютер, такие как мозг-компьютер, миографические и окулографические. Последние наиболее интересны с точки зрения скорости точности и эргономичности работы. В тоже время, разработка аппаратных частей окулографических интерфейсов встречает определённые сложности, связанные с требованиями качества работы при разных режимах освещения. В свете сказанного выше задачей исследования является разработка аппаратной части системы управления окулографическим интерфейсом, адаптированной под задачи интеграции в реабилитационные системы [1-3].

### **1 Общая схема устройства**

Система окулографии, основана на идее использования для отслеживания положения зрачка оптические рефлективные датчики вместо традиционных вебкамер [4, 5]. Предлагаемая конструкция позволяет существенно упростить обработку данных, которая становится доступна бюджетным микроконтроллерам [6-8].

Принципиальная электрическая схема устройства приведена на рис.1. Она включает оптические рефлективные датчики U1-U4, подключенные через сдвоенный 4-канальный мультиплексор U5 к микроконтроллеру. Считывание отклика фототранзисторов, входящих в состав рефлективных датчиков, производится при помощи АЦП микроконтроллера (выход MCU\_ADC на рис.1). Для управления светодиодами рефлективных датчиков используется цифровой выход микроконтроллера (MCU\_Dx на рис.1). Также цифровые выходы микроконтроллера MCU\_Dxx и MCU\_Dxxx используются для управления мультиплексором, который выбирает текущий опрашиваемый датчик.

Для настройки оптимального коэффициента усиления для каждого фототранзистора используется цифровой потенциометр U6, определяющий величину нагрузочного сопротивления фототранзисторов. Выбор сопротивления цифрового потенциометра производится микроконтроллером по SPI-интерфейсу. Другой цифровой потенциометр U7 позволяет регулировать яркость свечения светодиодов рефлективного датчика.

## 2 Сравнение оптических рефлективных датчиков

Элемент ITR8307 имеет корпус для поверхностного монтажа, для работы с ним была изготовлена плата-переходник. Так как оптические датчики работают в условиях присутствия фоновой освещенности, которая содержит, прежде всего, постоянную составляющую в виде естественного освещения, а также переменную составляющую в виде освещения искусственного, то измерения проводились при подаче на светодиоды оптических датчиков переменного сигнала с частотой 500 Гц.

При проведении испытания датчиков расстояние между датчиками и отражателем (диаметр отражателя 15 мм) изменялось в интервале от 6 до 14 мм с шагом 2 мм, что соответствует диапазону расстояний их предполагаемого использования. Для выведения рабочей точки усилителей с общим эмиттером на основе фототранзисторов, входящих в состав датчиков, использовался дополнительный ИК-светодиод, на который подавалось постоянное напряжение. В качестве нагрузочного сопротивления усилителя с общим эмиттером для датчика ITR8307 использовался резистор номиналом 10 кОм, что соответствовало оптимальной величине при используемом уровне полезной освещенности (увеличение номинала свыше 15 кОм приводило к выходу рабочей точки из активной области ВАХ). Для датчика TCRT5000, напротив, было выбрано нагрузочное сопротивление 1кОм, что намного меньше максимально возможной величины. Однако отклик датчика TCRT5000 намного превосходил отклик ITR8307, что приводило к насыщению сигнала.

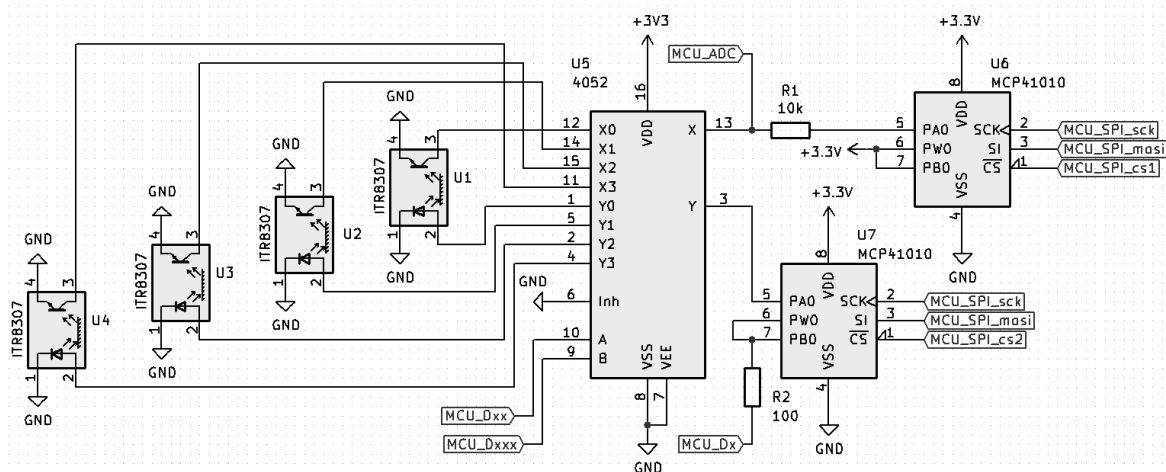
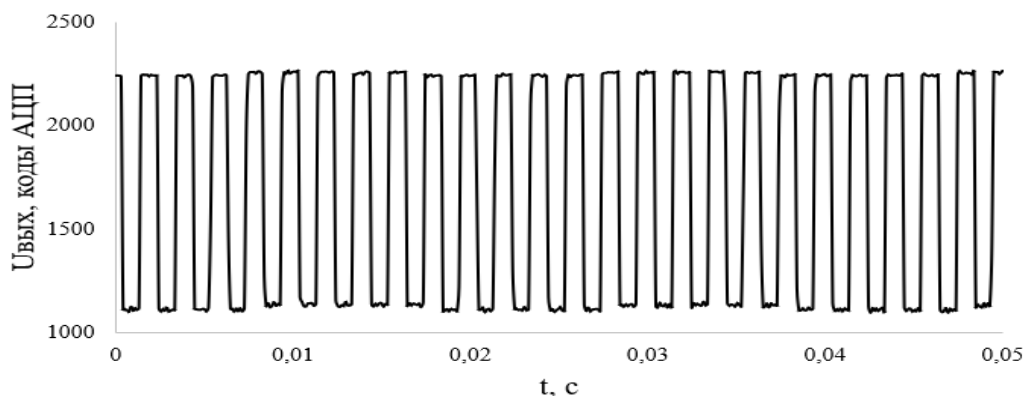


Рис. 1. Принципиальная схема системы видеоокулографии, использующей оптические рефлективные датчики

Примеры полученных откликов для максимального расстояния 14 мм приведены на рис.2а и рис.3а. Графики приведены для одинаковых масштабов. Для полученных графиков производилось построение спектров мощности Фурье (предварительно из сигналов вычиталось среднее значение) – рис.2б, 3б. На спектрах мощности легко выделяется полезный пик в области 500 Гц (а также его гармоники). Также выделяется пик в области 50 Гц, вызванный наличием специального паразитного сигнала, имитирующего искусственную освещенность. Для снижения амплитуды подобных пиков датчики оснащены оптическим окном, прозрачным преимущественно для ИК-излучения.

а)



б)

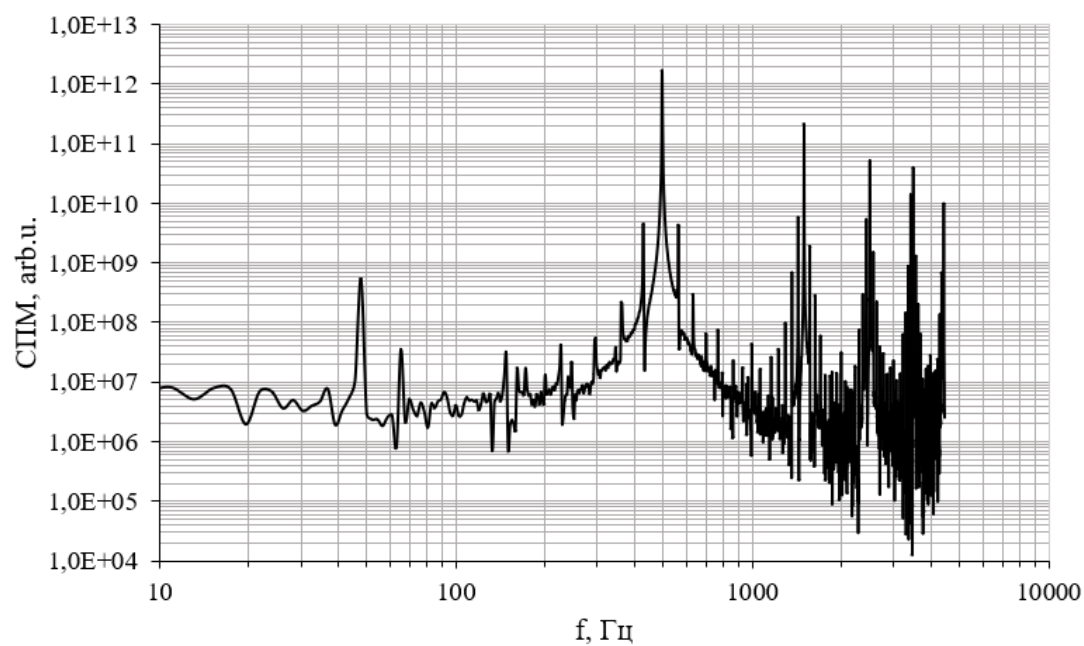
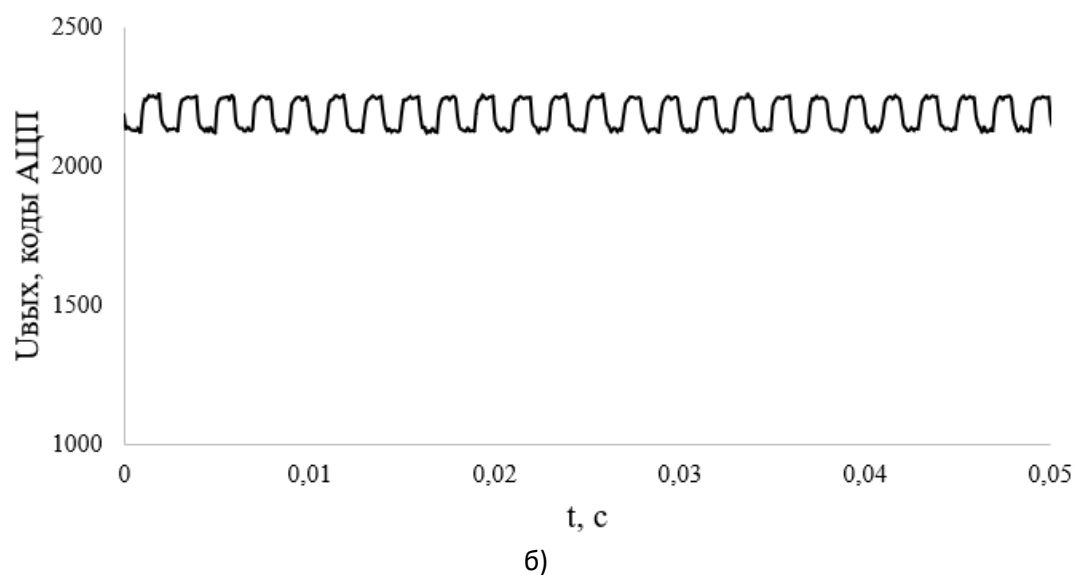


Рис.2. Отклик датчика TCRT5000 при расстоянии до отражателя 14 мм: а) исходный сигнал (первые 50 мс); б) спектр мощности



б)

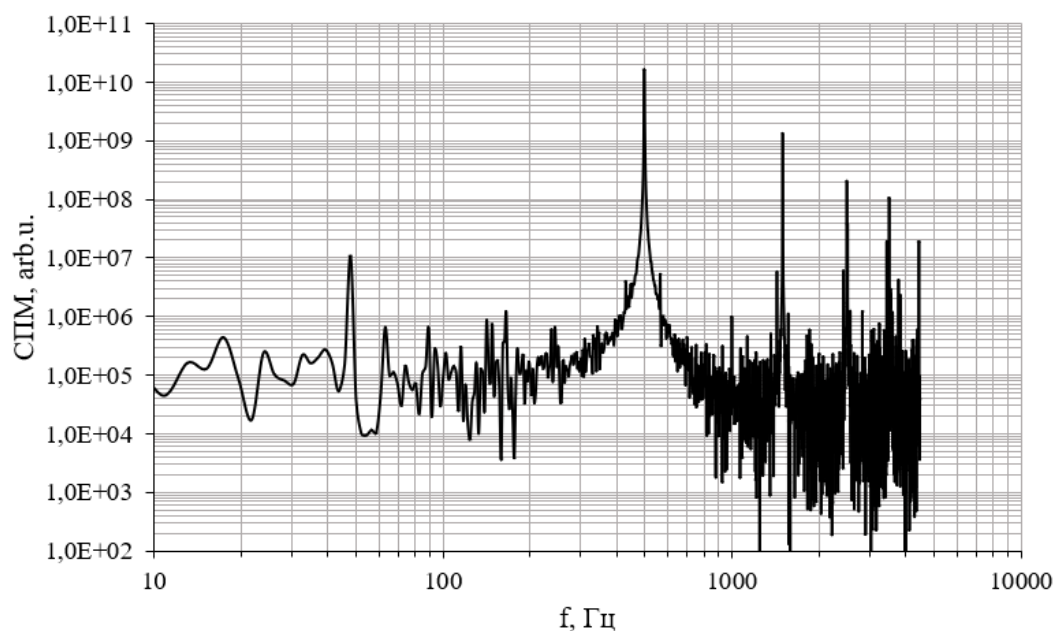


Рис.3. Отклик датчика ITR8307 при расстоянии до отражателя 14 мм: а) исходный сигнал (первые 50 мс); б) спектр мощности

Также по полученным данным производилась оценка отношения сигнал/шум для исследуемых датчиков. В качестве характеристики этого параметра использовалось отношение амплитуды спектра мощности на частоте 500 Гц к амплитуде на частоте 50 Гц. В тех случаях, когда оценке отношения сигнал/шум не мешали особенности схемы проведения эксперимента, оба датчика демонстрируют сходное значение данного параметра (на уровне ~4000-5000). Таким образом, основным преимуществом датчика ITR8307 являются его малые размеры и возможность детектирования объекта диаметром ~1-1.5 см при его приближении на расстояние ~ 6-8 мм. Данная особенность, вызванная габаритами датчика, может быть полезной при построении окулографических систем, т.к. там именно в подобной геометрии может быть использован датчик. Однако, т.к. резкое изменение отклика происходит строго на определенном расстоянии, это может затруднить адаптацию окулографической системы под конкретного человека. Напротив, датчик TCRT5000 продемонстрировал высокий и предсказуемый уровень отклика в широком диапазоне расстояний.

### 3 Сравнение режимов работы АЦП

Сравнение режимов работы АЦП для повышения соотношения сигнал/шум производилось на примере оптического рефлекторного датчика ITR8307, имеющего компактные размеры, но достаточно низкую чувствительность на больших расстояниях.

Датчики ITR8307 вместе с нагрузочными резисторами размещались на беспаячной макетной плате, помещенной в корпусе стенда на расстоянии 15 мм от перемещаемого столика с отражателем. Схема расположения и перемещения отражателя приведена на рис.4. Особенностью блока аналого-цифрового преобразователя в используемом микроконтроллере STM32F103C8T6 является наличие двух АЦП, которые могут работать не только поочередно, но и одновременно. При сравнении режимов работы АЦП использовались два типа настроек. Во-первых, использовалась настройка обычного парного режима, в котором канал IN0 (который соответствует выводу PA0) оцифровывается АЦП1, а канал IN1 (который соответствует выводу PA1) оцифровывается АЦП2. При этом АЦП1 выступает в роли ведущего и запускает ведомый канал АЦП2, причем само преобразование производится одновременно. Во-вторых, использовался обычный режим поочередного опроса, при котором каналы IN0 и IN1 последовательно опрашивались одним и тем же АЦП1. На рис.5 приведен результат измерений при использовании парного режима АЦП, а на рис.6 – результат измерений при использовании независимого режима (в обоих случаях по вертикальной оси показаны значения приведены в единицах отсчетов АЦП, цена одного отсчета ~ 0.8 мВ). Видно, что уровень шума при использовании парного режима существенно ниже, что объясняется нейтрализацией большинства типов шумов (за исключением шума квантования) операцией вычитания сигналов при одновременном выполнении преобразований АЦП. При использовании независимого режима между временными отсчетами

вычитаемых сигналов проходит определенное время, за которое шумовой сигнал успеет изменить свое значение.

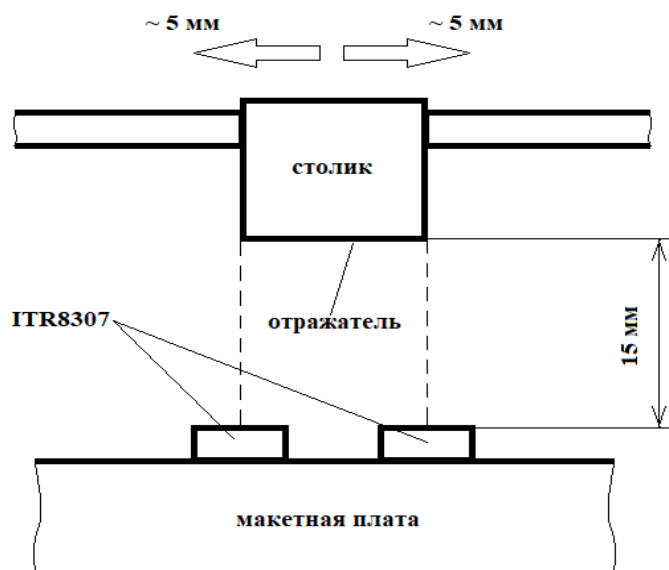
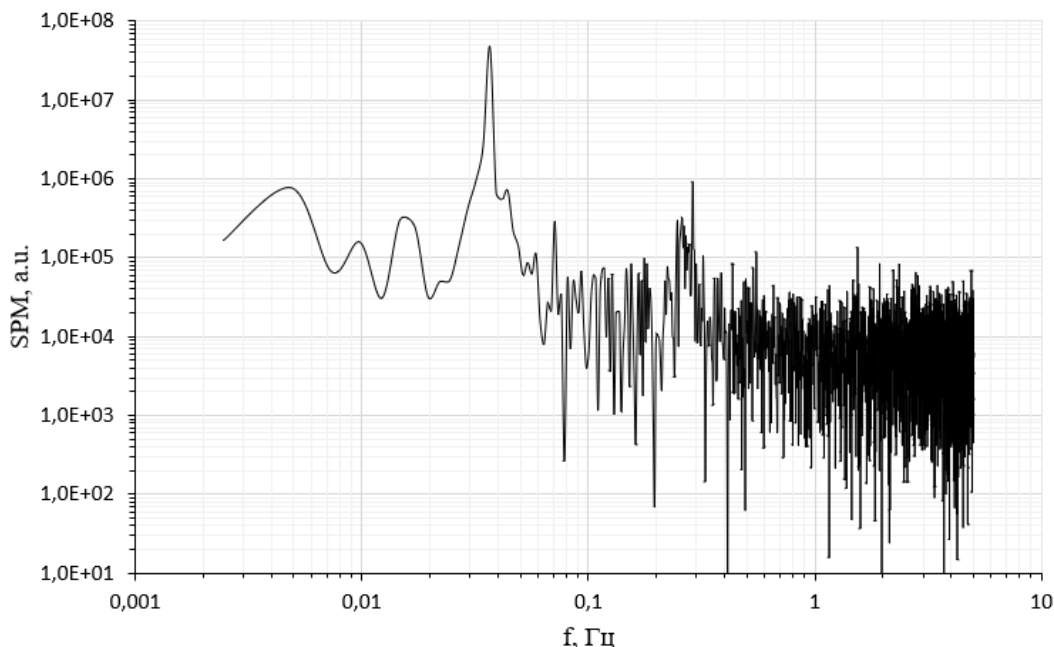


Рис.4. Схема взаимного расположения и перемещения датчиков ITR8307 и отражателя

Для количественной оценки влияния режима АЦП на результаты измерений производилось построение Фурье-спектров, а также выполнялась Фурье-фильтрация, позволяющая разделить исходный сигнал на полезную и шумовую составляющие [9].

На рис. 6 приведены спектры мощности сигналов, полученных в парном и независимом режимах оцифровки. На спектре независимого режима оцифровки видны пики в высокочастотной области спектра, которые вызваны эффектом алиасинга шумового сигнала 50 Гц. На спектре парного режима оцифровки данные пики не наблюдаются.

а)



б)

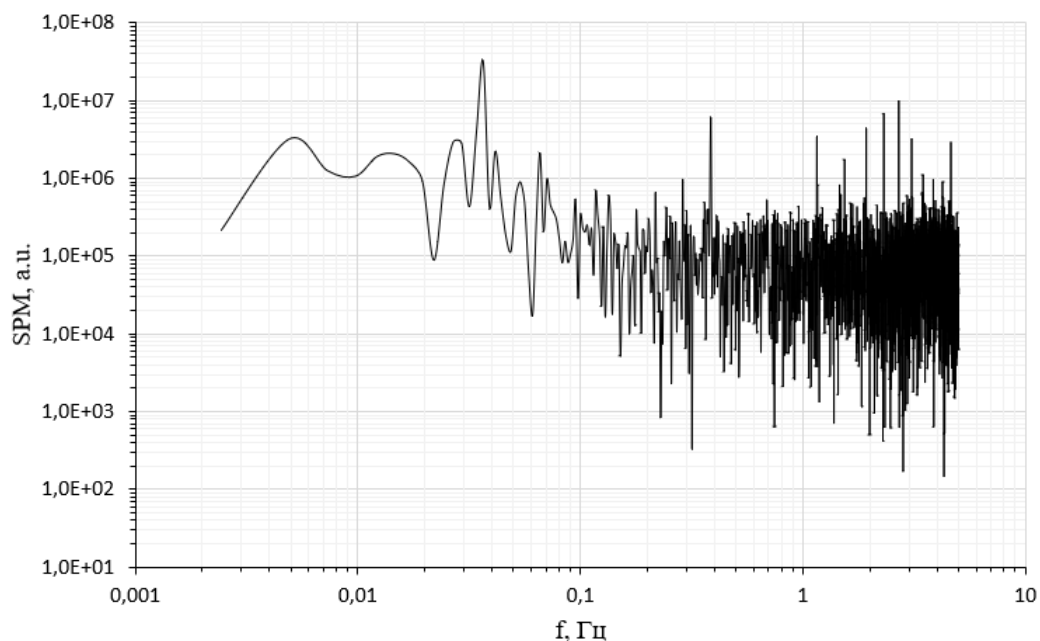


Рис.5. Спектральная плотность мощности для сигналов, представленных на рис. 8 (а) и рис.9 (б) (из сигналов предварительно вычитался линейный тренд)

Фурье-фильтрация заключалась в выполнении Фурье-разложения исходного сигнала, обнулении коэффициентов, соответствующих отфильтровываемой частоте и выполнении обратного Фурье-преобразования. На рис. 6. приведен результат разложения исходных сигналов на полезную и шумовую составляющие.

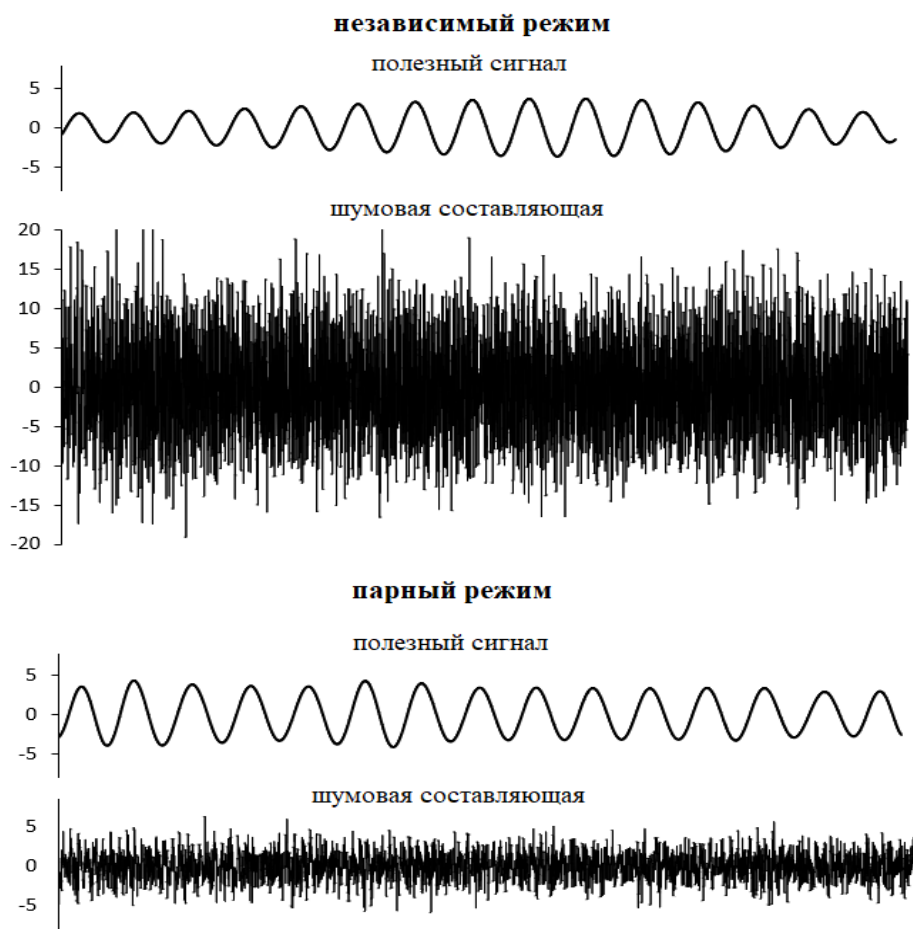


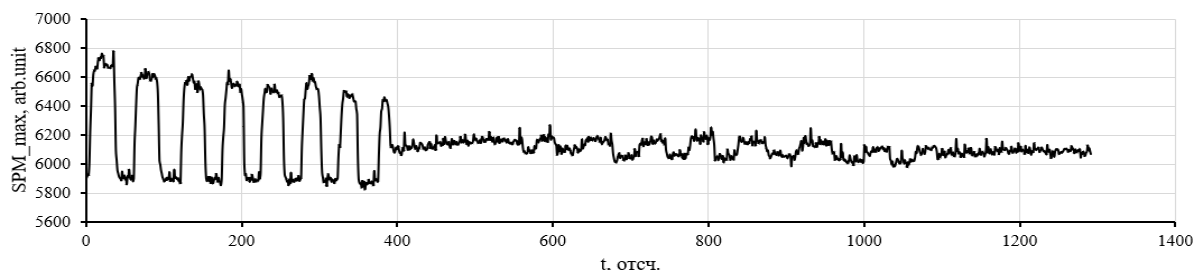
Рис.6. Разложение сигналов на полезную и шумовую составляющие

В результате расчета отношения сигнал шум были получены следующие значения: -9.9 дБ для независимого режима работы, +3.3 дБ для парного режима работы АЦП.

#### 4 Результаты испытания устройства

Для проверки работоспособности устройства в реальных условиях производилось распознавание направления взгляда (вверх, вниз, вправо, влево) для системы с датчиками ITR8307, которые благодаря компактным размерам практически не ограничивают поле зрения.

а)



б)

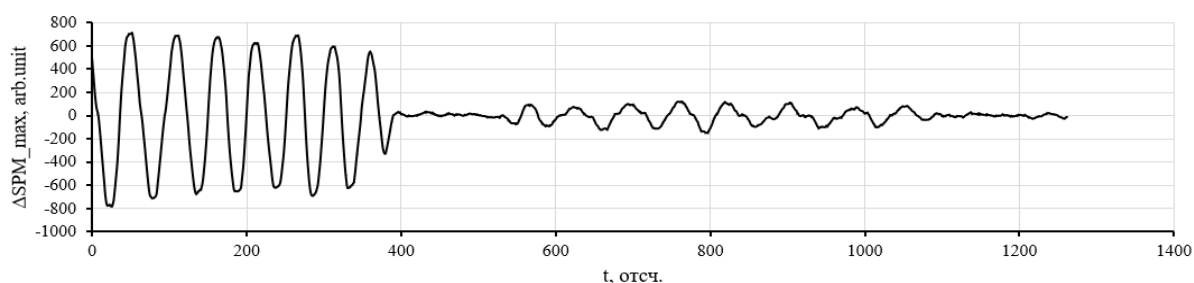


Рис. 7 Отклик устройства при изменении направления взгляда: а) необработанный сигнал; б) сигнал после сглаживания и дифференцирования

Управление устройством и обработка данных производилась бюджетным микроконтроллером STM32F103C8T6. Микроконтроллер поочередно опрашивал рефлексивные датчики с частотой 10 опросов в секунду для каждого датчика. В ходе опроса каждого датчика производилась генерация переменного сигнала с частотой 500 Гц, подаваемого на светодиод рефлекторного датчика, а также регистрация 256 отсчетов АЦП, считывающего выходной сигнал фототранзистора. Данные с АЦП подвергались быстрому преобразованию Фурье (которое также выполнялось микроконтроллером). В качестве выходного сигнала, отправляемого на компьютер, служило значение спектра мощности в точке максимума. Пример такого сигнала для одного из вертикальных каналов приведен на рис.7. В ходе эксперимента сначала производилось перемещение взгляда в вертикальном направлении (отсчеты 0-400), затем производилась фиксация взгляда в центральном положении (отсчеты 400-550), затем перемещение взгляда в горизонтальном направлении (отсчеты 550-1100) и снова фиксация взгляда в центральном положении.

Таким образом, разработана и верифицирована аппаратная часть системы управления на основе оптико-окулографического интерфейса.

Работа поддержана грантом 19-07-01037 А РФФИ

#### Литература

1. Nicolas-Alonso L.F., Gomez-Gil J. Brain computer interfaces, a Review // Sensors. – 2012. – Vol. 12. – P. 1211-1279.
2. Abiyev R.H., Arslan M. Head mouse control system for people with disabilities // Expert Systems. – 2020. – Vol. 37, №1. – P.e12398.
3. King A.J., Cooper G.F., Clermont G. [et al.] Leveraging eye tracking to prioritize relevant medical record data: Comparative machine learning study // Journal of Medical Internet Research. – Vol. 22, № 4. – P. e15876.

4. *Туровский Я.А., Кугалин С.Д., Алексеев А.В.* Анализ движения глаз человека при управлении самоходным шасси с использованием системы видеоокулографического интерфейса // Сенсорные системы, 2017. – № 1. – С. 51-58.
5. *Lotte F., Congedo M., Lécuycer A., Lamarche F., Arnaldi B.* A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces // Journal of Neural Engineering. – 2007. – Vol.4, № 2. – P. R1-R13.
6. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1997. – 256с.
7. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Соловьев М.М.* Моделирование развития крупномасштабных систем. – М.: Экономика. 1983. – С.35-38.
8. *Jackson J.K.* Medical data management // Archives of Computer Science. – 1992. – Vol. 28, № 5. – P.123-134.
9. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. Спб.: Питер, 2006. – 751 с.