

Володимир Войтенко
Оксана Федорова
Роман Єршов

ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА РЕЄСТРАЦІЇ ТА ОБРОБКИ БІОЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Владимир Войтенко
Оксана Федорова
Роман Ершов

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Volodymyr Voytenko
Oksana Fedorova
Roman Yershov

ELECTRONIC SYSTEM FOR BIOELECTRICAL SIGNAL REGISTRATION AND PROCESSING

Методи запису біопотенціалів, що генерує мозок, серце або м'язи, мають два основних аспекти застосування: медичний та дослідницький. Медична діагностика в умовах стаціонару найчастіше спирається на такі методи неінвазивних досліджень, в яких використовується громізка та вартісна апаратура. В той же час актуальною проблемою залишається автономний контроль та поточний моніторинг стану людини, як з метою своєчасного виявлення критичних станів, так і для визначення реакцій на ті чи інші впливи.

Роботу присвячено вирішенню задачі створення дослідницького комплексу, який вміщує пристрій для попередньої обробки біоелектричних сигналів, перетворення їх у цифрову форму та введення до персонального комп'ютера з метою наступного аналізу та відпрацювання алгоритмів функціонування портативної автономної електронної системи, яка розроблюється вперше.

Ключові слова: біоелектричні сигнали, біопотенціал, аналого-цифровий перетворювач, візуалізація.

Рис.: 4. Бібл.: 16.

Методы записи биопотенциалов, генерируемых мозгом, сердцем или мышцами имеют два основных аспекта применения: медицинский и исследовательский. Медицинская диагностика в условиях стационара в настоящее время чаще всего опирается на такие методы неинвазивных исследований, в которых используется громоздкая и дорогостоящая аппаратура. В то же время актуальной проблемой остается автономный контроль и текущий мониторинг состояния человека, как с целью своевременного выявления критических состояний, так и для определения реакций на те или иные воздействия.

Работа посвящена решению задачи создания исследовательского комплекса, содержащего устройства для предварительной обработки биолоэлектрических сигналов, преобразования их в цифровую форму и ввода в персональный компьютер с целью последующего анализа и отработки алгоритмов функционирования разрабатываемой портативной автономной электронной системы.

Ключевые слова: биоэлектрические сигналы, биопотенциал, аналого-цифровой преобразователь, визуализация.

Рис.: 4. Библ.: 16.

Methods to record bio-potentials generated by the brain, heart and muscles have two main application aspects: one in medicine and another one in research. Medical diagnostics in hospital conditions is currently mainly based on non-invasive research methods that use bulky and expensive equipment. At the same time, autonomous control and current monitoring of the human state remains an important problem from two perspectives: to timely identify critical conditions and to detect the reaction to specific impacts.

This article seeks to develop a research complex that would contain devices for a preliminary processing of bioelectric signals, their transformation into digital form and their input to a personal computer. These signals will then be used to analyze and process the functioning algorithms of a portable autonomous electronic system under development.

Key words: bioelectric signals, bio-potential, analog-digital converter, visualization.

Fig.: 4. Bibl.: 16.

Постановка проблеми. Біоелектричні сигнали вже тривалий час використовуються в медичній практиці. Сьогодні важко уявити ситуацію, коли б до процесу діагностики захворювань, пов'язаних із серцем, мозком або м'язами, не була долучена певна інформація, отримана за допомогою електронних реєстраторів біоелектричних сигналів. Медична діагностика – це основна, проте не єдина сфера застосування електронних приладів для роботи з біоелектричними сигналами. Важливими
Войтенко В., Федорова О.О., Єршов Р. Електронна система реєстрації та обробки біоелектричних сигналів // Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – № 1 (3). – С. 109 – 115.

напрямами є терапія захворювань, поєднана з медикаментозним та хірургічним впливом, а також моніторинг стану пацієнта, особливо, – в повсякденному житті [1]. Якщо під час медичної діагностики припустимо застосування габаритних та вартісних електронних апаратів, таких, як комп'ютерний, позитронно-емісійний, функціональний або магніторезонансний томограф, моніторинг вимагає створення малогабаритних, дешевих, надійних і автономних електронних приладів для реєстрації біоелектричних сигналів. Подібні вимоги висуває також вирішення проблеми розробки таких нетривіальних людино-машинних інтерфейсів, як, скажімо, «мозок – комп'ютер».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосуванню апаратури для обробки біоелектричних сигналів в наукових дослідженнях присвячено багато публікацій, зокрема [2-5]. Розвиток комп'ютерної техніки, мікроелектронних технологій та сучасна елементна база електронних систем відкривають нові можливості у розробці комплексів з обробки біоелектричних сигналів з якісно новими характеристиками, а також методів їхнього застосування [6]. Це дозволяє значно підвищити точність і стабільність результатів порівняно з аналоговими системами, зменшити вплив шумів, завад та оточуючого середовища, а також надати можливість застосування складних і різноманітних алгоритмів обробки сигналу.

Важливою проблемою, яка постає перед розробником будь-якого електронного пристрою реєстрації біоелектричних сигналів, є вибір алгоритму роботи для виділення корисної інформації на фоні завад, представлення її у зручному вигляді безпосередньо біля (для) об'єкта (суб'єкта) дослідження та (або) передача цієї інформації для дистанційного аналізу. Значно полегшити і прискорити вирішення цієї проблеми може застосування можливостей, які надає пакет імітаційного моделювання *Matlab–Simulink*.

Мета статті. Метою даної роботи є обґрунтування структури та визначення складових електронної системи-прототипу розроблюваних автономних комплексів для реєстрації біоелектричних сигналів.

Характеристика біоелектричних сигналів. У даній роботі в якості біоелектричних сигналів використовуються електричні сигнали, які несуть інформацію про активність мозку, серця та м'язів. Частина цих сигналів відбиває спонтанну поточну активність, а інші мають місце тільки внаслідок зовнішньої стимуляції. Суттєва відмінність характеру зумовлює і численні та різноманітні методи обробки цих сигналів. Тому застосування засобів, призначених для комп'ютерного моделювання, може суттєво спростити процес проектування кінцевої електронної системи.

Електроенцефалограма (ЕЕГ, Рис. 1, а) відбиває електричну активність мозку [7-9]. Інвазійний варіант передбачає встановлення електродів безпосередньо на неприкриті ділянки мозку під час хірургічної операції і забезпечує зняття так званої електрокортікограми (ЕКОГ).

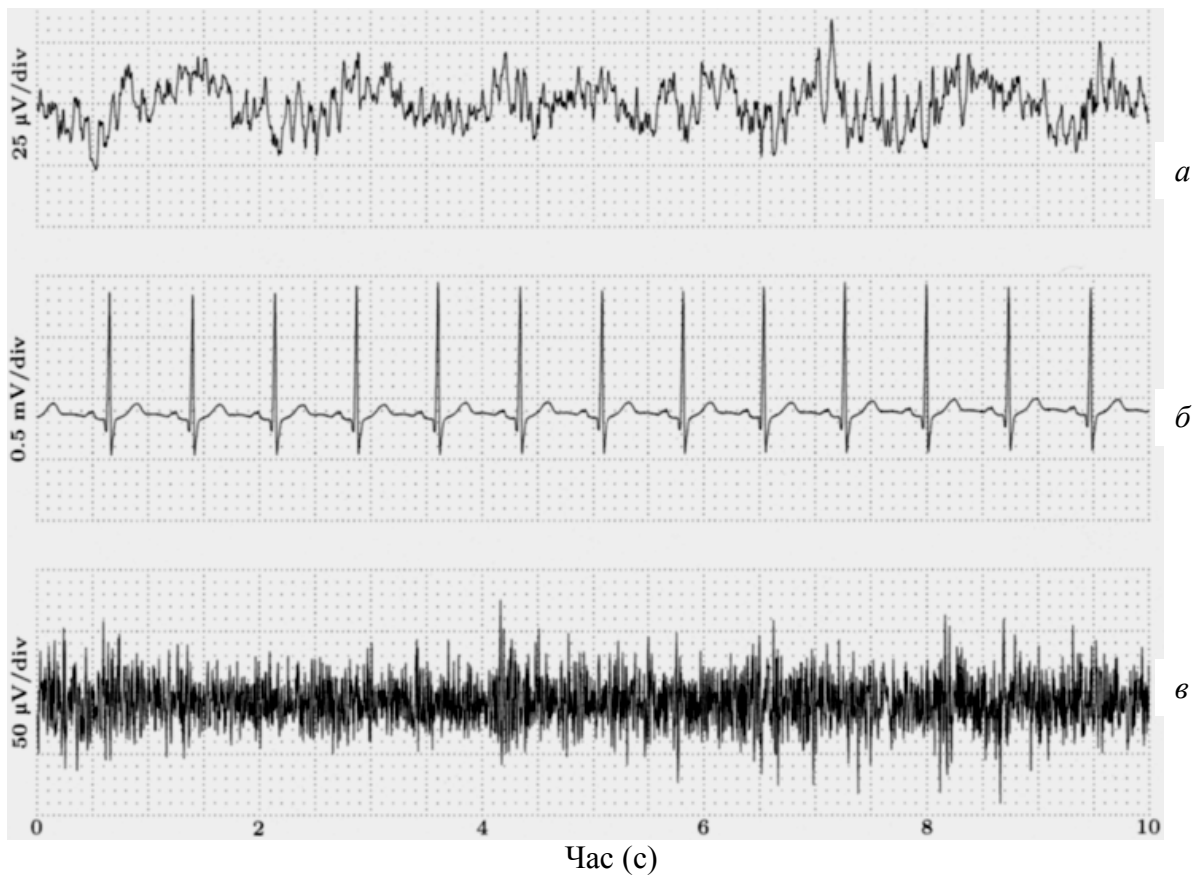
Викликані потенціали (ВП) демонструють форму активності мозку, викликану такими стимулами, як візуальні або акустичні [10, 11]. Методика зняття ВП подібна до ЕЕГ.

Електрокардіограма (ЕКГ, Рис.1, б) відображає електричну активність серця [12, 13]. Сигнал має більшу амплітуду і характерні властивості.

Електроміограма (ЕМГ, Рис.1, в) є запис електричної активності скелетних м'язів, які продукують електричний струм, пропорційний ступеню активності [14].

Захват біоелектричних сигналів здійснюється за допомогою електронних пристроїв, які відповідним чином підсилюють сигнал та перетворюють його у цифровий код. Зважаючи на досить незначну амплітуду зазначених вище сигналів, дуже важливою є їхня попередня аналогова обробка. Ця обробка має сприяти покращенню відношення сигнал-шум, а також звуженню полоси аналогового сигналу, який потрапляє на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), аби не допустити перекриття спектрів.

Зазвичай така обробка здійснюється за допомогою операційних підсилювачів і пасивних компонентів.



*Рис. 1 – Осцилограми біоелектричних сигналів:
а – електроенцефалограма, б – електрокардіограма і в – електроміограма*

Реалізація пристрою захоплення біоелектричних сигналів. Зважаючи на велику кількість потрібних сигналів і датчиків, блок попередньої обробки біоелектричних сигналів стає занадто громіздким і малонадійним. У випадку розробки моніторингових систем додаткові складнощі викликає зростання енергоспоживання, що унеможливує живлення від автономних джерел. Один з варіантів сучасного рішення – це застосування спеціалізованих інтегрованих схем (IC), які в одному корпусі поєднують декілька операційних підсилювачів та аналого-цифрові перетворювачі. Прикладом такої IC є 8-канальний 24-розрядний дельта-сигма АЦП ADS1298 з одночасним захватом аналогових сигналів усіх каналів. Ця IC має вбудовані підсилювачі з коефіцієнтом підсилення, що програмується, внутрішнє джерело опорного сигналу та генератор тактової частоти. Дана IC об'єднує всі можливості, які зазвичай потрібні для реєстрації ЕКГ, ЕМГ та ЕЕГ.

Високий рівень інтеграції та виняткові характеристики дозволяють на основі приладів сімейства ADS1298 створювати медичне обладнання різного ступеня складності при значно менших розмірах, потужності споживання і ціні. На Рис. 2 зображена спрощена структурна схема ADS1298 [15]. Важливою особливістю є використання послідовного інтерфейсу SPI як для керування процесом реєстрації біоелектричних сигналів, так і для передачі отриманих результатів для подальшої візуалізації, обробки та зберігання даних. Якщо у дослідницькому комплексі застосовувати персональний комп'ютер, наявність SPI зумовлює необхідність

Войтенко В., Федорова О.О., Єршов Р. Електронна система реєстрації та обробки біоелектричних сигналів // Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – № 1 (3). – С. 109 – 115.

додаткового пристрою, який би підтримував як даний інтерфейс, так і будь-який, що є стандартним для персонального комп'ютера.

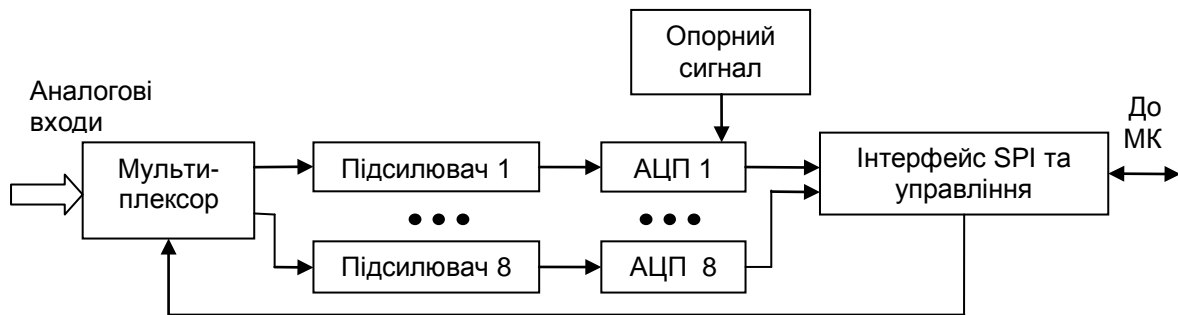


Рис. 2 – Спрощена структура ADS1298

Важливою особливістю даної ІС є можливість її експлуатації в широкому діапазоні температур оточуючого середовища ($-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$), що відкриває перспективи створення пристроїв автономного моніторингу, коли об'єкт перебуває безпосередньо майже на будь-якому робочому місці.

На Рис. 3 зображено зовнішній вигляд пристрою захоплення біоелектричних сигналів.

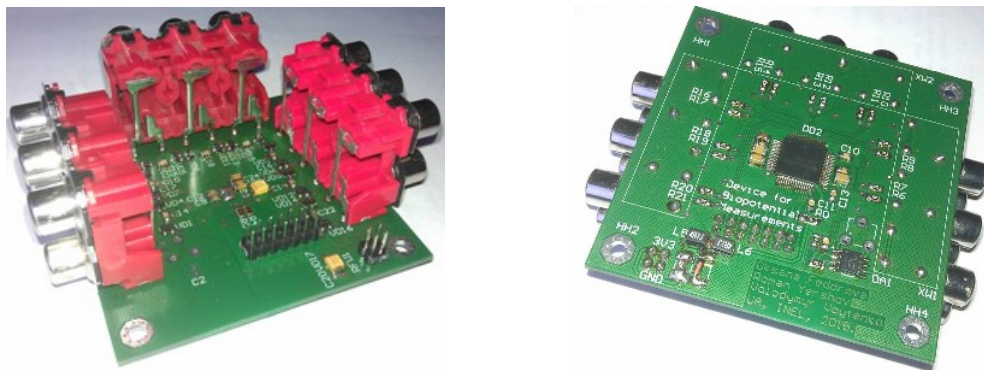


Рис. 3 – Зовнішній вигляд пристрою захоплення біоелектричних сигналів

Пристрій комунікації з персональним комп'ютером. У кінцевому автономному пристрої для моніторингу біоелектричних сигналів візуалізація та аналіз отриманих даних може здійснюватися за допомогою, наприклад, смартфона з можливістю подальшої обробки, передачі, завантаження, зберігання на віддалених пристроях (наприклад, персональному комп'ютері). Незалежно від варіанту на виході пристрою захоплення біоелектричних сигналів на базі спеціалізованої ІС ADS1298 потрібен додатковий вузол, який здійснюватиме перетворення сигналів SPI в сигнали стандартного інтерфейсу, що підтримується персональним комп'ютером.

Під час розробки комплексу-прототипу важливо мати якомога ширший вибір засобів комунікації. В якості пристрою, який здійснюватиме зв'язок із ADS1298, обрано навчальний стенд *LPC2148 Educational Board* фірми *Embedded Artists* [16], який призначений не тільки для ознайомлення з мікроконтролерами (МК) *ARM7TDMI* виробництва фірми *NXP*, а також і для розробки й швидкого запуску пристроїв на базі цих МК. Безпосередньо на платі реалізовані унікальні можливості взаємодії МК з типовими для електронних систем об'єктами керування, які істотно полегшують і підвищують наочність процесу розробки. Крім того через інтерфейси розширення

також доступне підключення різноманітних за функціями дочірніх модулів: *Ethernet*, *Bluetooth*, *ZigBee*, *UART*, *RS485* тощо. Для зв'язку з оператором можна використати виведення інформації на родинно-кристалічний індикатор, одиничний багатоколірний, матричний та багаторозрядний світлодіодні індикатори, а також кнопки, джойстик, аналогові регулятори. Під час відлагодження програмного забезпечення також може бути задіяний опціональний *JTAG*-інтерфейс.

Виходячи з найважливішого з завдань, яке стояло перед прототипом пристрою, а саме – зв'язок із середовищем *Matlab*, був обраний послідовний інтерфейс зв'язку з персональним комп'ютером *UART*. Оскільки в стенді *LPC2148 Educational Board* розміщено ІС міст-перетворювач *FTDI232L*, це дозволило за допомогою відносно простого програмного забезпечення для *UART* забезпечити підключення до персонального комп'ютера через поширений інтерфейс *USB*.

Візуалізація та обробка біоелектричних сигналів. На персональному комп'ютері під час розробки прототипу автономної системи аналіз сигналів найбільш доцільно робити у програмному середовищі, яке дозволяє дослідити якомога більше варіантів тракту попередньої обробки з найменшими витратами часу на модернізацію апаратного забезпечення. На Рис. 4 зображено базову *Simulink*-модель, яка дозволяє використовувати широкі можливості *Matlab* з метою визначення кінцевої структури системи та вимог до її програмного забезпечення.

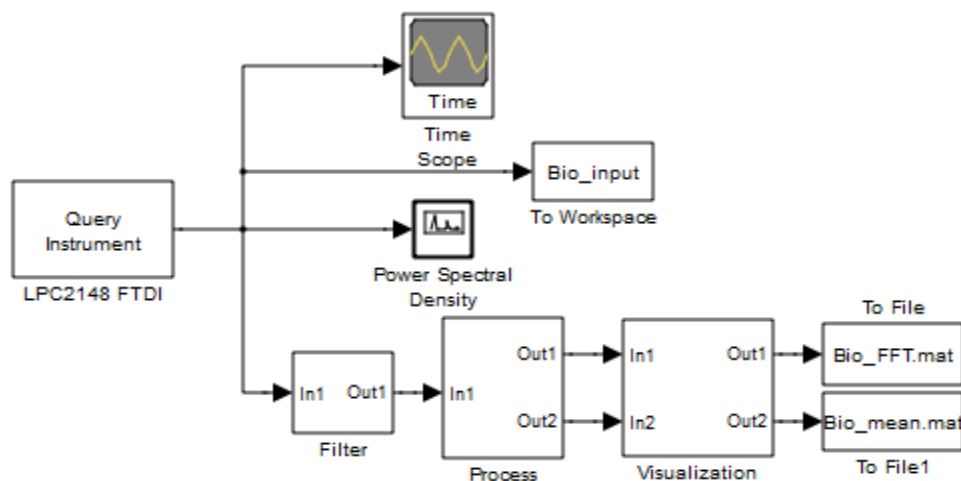


Рис. 4 – Базова *Simulink*-модель пристрою обробки біоелектричних сигналів

Блок *Query Instrument* конфігурує та відкриває інтерфейс з пристроєм комунікації і виконує запит даних. Конфігурування та відкриття реалізуються із запуском моделі, а запит даних від пристрою комунікації відбувається протягом всього часу роботи моделі. Блок має один вихідний порт відповідно до даних, які приймаються від пристрою і не має входних портів.

Блок *Time Scope* дозволяє у реальному часі спостерігати миттєві відліки сигналу, які надходять з послідовного порту, а блок *To Workspace* – тимчасово накопичувати ті ж цифрові значення у змінній робочого простору *Matlab* з іменем *Bio_input* для подальшого більш детального аналізу.

Блок *Power Spectral Density* у графічному вікні відбиває частотний вміст буфера. Це допомагає визначитися з основними характеристиками фільтра попередньої обробки *Filter* та змінити їх в залежності від поточного спектру сигналу.

Основна обробка сигналу (швидке перетворення Фур'є, осереднення тощо)

здійснюється за допомогою блоку *Process*, вміст якого можна швидко коригувати під час здійснення експерименту. Основні результати обробки біоелектричних сигналів відображаються за допомогою блоку *Visualization*. Ті ж дані для наступного аналізу (в тому числі – і віддаленого) зберігаються у файлах за допомогою блоків *To File*.

Висновки і пропозиції. Обґрунтовано структуру комплексу для дослідження біоелектричних сигналів у складі пристрою захвату на основі спеціалізованої ІС *ADS1298*, пристрою комунікації на базі мікроконтролера *ARM* та персонального комп'ютера загального призначення. Розроблено топологію, виготовлено друковану плату та змонтовано пристрій дискретизації та квантування біоелектричних сигналів, масогабаритні показники якого дозволяють його автономне використання. Розроблена програма комунікації та *Simulink*-модель блоку обробки інформації, які дозволили забезпечити введення біоелектричних сигналів до персонального комп'ютера з метою подальшого їх аналізу безпосередньо у середовищі *Matlab*.

Список використаних джерел

1. *Sörnmo L.* Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications / L. Sörnmo, P. Laguna. – Elsevier, 2005. – 688 p.
2. *Petrenas A.* An Echo State Neural Network for QRST Cancellation During Atrial Fibrillation / A. Petrenas, V. Marozas, L. Sörnmo, A. Lukosevicius // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. – 2012. – Vol. 59, Num. 10. – P. 2950-2955.
3. *Gil E.* Heart Rate Turbulence Analysis Based on Photoplethysmography / E. Gil, P. Laguna, J.P. Mart'inez, O. Barquero-Pe'rez, A. Garc'ia-Alberola, L. Sörnmo. // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 60, Num. 11. – P. 3149-3155.
4. *Sandberg F.* Prediction of Intradialytic Hypotension using PPG and ECG / F. Sandberg, R. Bailon, D. Hernando, P. Laguna, J. P. Martinez, K. Solem, L. Sörnmo // Computing in Cardiology. – 2013. Vol. 40. – P. 1227-1230.
5. *Behjat H.* Statistical Parametric Mapping of Functional MRI Data Using Wavelets Adapted to the Cerebral Cortex / H. Behjat, N. Leonardi, D. Van De Ville // Proceedings of the 10th 2013 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro, San Francisco, CA, USA, April 7-11, 2013. P. 1070-1073.
6. *Ветвицкий Е. В.* Цифровой комплекс для ЭЭГ исследований : дисс. канд. техн. наук : 05.11.17. – М.:, 2000. – 112 с.: РГБ ОД, 61 01-5/1413-4.
7. *Ebersole J.* Current Practice of Clinical Electroencephalography. / J. Ebersole, T. Pedley. – Lippincott Williams & Wilkins, 2003. – 974 p.
8. *Зенков Л. Р.* Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). Руководство для врачей / Л.Р.Зенков. – М.: МЕДпресс-информ, 2011. – 368 с.
9. *Жадин М. Н.* Биофизические основы формирования электроэнцефалограммы / М. Н. Жадин. – М. : Наука, 1984. – 198 с.
10. *Шагас Ч.* Вызванные потенциалы мозга в норме и патологии / Ч. Шагас. – М. : Мир, 1975. – 318 с.
11. *Рутман Э. М.* Вызванные потенциалы в психологии и психофизиологии / Э. М. Рутман. – М. : "Наука", 1979. – 642 с.
12. *Эберт Г.-Х.* Простой анализ ЭКГ / Г.-Х. Эберт. – М. : Логосфера, 2010. – 283 с.
13. *Коломиец С.Н.* Введение в ЭКГ / С. Н. Коломиец. – Одесса: ОНМУ, 2012. – 84 с.
14. *Николаев С. Г.* Практикум по клинической электромиографии / С. Г. Николаев. – Иваново : Государств. мед. академия, 2003. – 260 с.
15. *ADS129x* Low-Power, 8-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Bio-potential Measurements (Rev. K). Texas Instruments production data SBAS459K. – 2010 (rev. August 2015).
16. *LPC2148* Education Board. User's Guide. – Embedded Artists AB, 2007.