

УДК 004.312.2

Сілі І. І., Азархов О. Ю., Федюшко Ю. М., Головаха Р. В.

ФЕТАЛЬНИЙ ПУЛЬСОМЕТР З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ УПРАВЛІННЯМ

Частота серцевих скорочень плода є важливим біологічним показником для оцінки стану самопочуття плода вагітної жінки. Коли серце б'ється, воно перекачує кисневу кров по всьому тілу організму. Адекватність оксигенації плода важлива для запобігання гіпоксії, яка впливає на все тіло. Якщо виникає гіпоксія, це може призвести до зменшення мозкового кровотоку плода. Отже, моніторинг серцебиття здатний розпізнати асфіксію плода. Таким чином моніторинг серцебиття здатний розпізнати асфіксію плоду. Дана робота присвячена розробці фетального пульсометра (ФЕП), який можна використовувати вагітній матері в домашніх умовах. Для розробки монітора серцевого ритму плода нами запропоновано п'ять кроків: 1) збір даних; 2) попередня обробка даних; 3) передача даних в мікроконтролер; 4) подальша обробка та 5) відображення результату на LCD дисплеї. Конденсаторний мікрофон використовується як датчик для отримання серцевого звуку плода. Мікрофон отримує дані, після чого проходить попередню обробку, яка включає посилення та фільтрацію за допомогою фільтра низької частоти четвертого порядку Баттерворта. Операційний підсилювач використовується для попереднього посилення під час фільтрації, ми використали операційний підсилювач LM741. Апарати на базі сучасних мікроконтролерів AVR в біоінженерії знаходять все більше застосування. Відомий мікропроцесор ATmega 328 в платах Ардуіно свого часу здійснив революцію в цифровій електроніці, а платформа Ардуіно все частіше застосовується при розробці нових біомедичних приладів. До переваг слід віднести простоту програмування, невисока вартість, маленькі габарити, достатня кількість цифрових та аналогових входів-виходів. Сигнал, який отримується після етапу попередньої обробки, надсилається до мікроконтролеру (ATmega328) для обчислення та передачі даних шляхом розробки алгоритму, щоб комп'ютер міг зчитувати сигнал. На фінальному етапі, вихід (частота серцевих скорочень плода) відображається на LCD-дисплеї.

Ключові слова: фетальний пульсометр (ФЕП), конденсаторний мікрофон, операційний підсилювач, мікроконтролер, біологічний показник, серцебиття.

Постановка проблеми. Серце і система кровообігу - це одні із ранніх органів, які розвиваються у плода. Перший удар серця у плода спостерігаються на 3-му тижні життя [1]. Існують відмінності в анатомії та фізіології серця плода та серця новонародженого. Під час вагітності кровообіг серця плода відрізняється від кровообігу серця новонароджених. Кисень надходить до плоду лише через плаценту, тому серце виконує функцію лише перекачування кисневої крові по всьому тілу, включаючи легені [2]. Однак легені забезпечують киснем серце новонародженого так само, як і у дорослих.

Частота серцевих скорочень плода - це дуже важливий параметр, який можна контролювати, і який виступає в якості показника для оцінки стану плода [3]. Під час вагітності іншим способом дізнатись про самопочуття плода є використання контролю за рухом плода. Однак даний метод має багато недоліків. В будь якому випадку важливо проводити моніторинг плоду, оскільки на цьому етапі можна вжити превентивні заходи, у

тому випадку, коли будуть виявлені порушення серцевого ритму плода, що можуть призводити до недозрівання або викидня. Інший важливий аспект це спостереження за тими майбутніми матерями, які перебувають у групі високого ризику або раніше вже перенесли викидень.

Коли серце б'ється, воно перекачує кисневу кров по всьому тілу організму. Адекватність оксигенації плода важлива для запобігання гіпоксії, яка впливає на все тіло. Якщо виникає гіпоксія, це може призвести до зменшення мозкового кровотоку плода. Отже, моніторинг серцебиття здатний розпізнати асфіксію плода [4]. Асфіксія плода це досить тяжкий стан, що може призвести до неврологічних пошкоджень або навіть загибелі дитини. Крім того, моніторинг серцебиття дитини може вирішити дві проблеми, які слугують скринінговим тестом на важку асфіксію і дозволяють розпізнати ранню асфіксію, щоб своєчасне акушерське втручання допомогло уникнути пошкодження мозку або смерті новонародженого, спричиненого асфіксією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз останніх досліджень свідчить, що спроби визначити серцебиття плоду в утробі матері є в більшості випадків досить успішні. В даний час основним методом оцінки стану плода під час пологів, є кардіотокографія (КТГ) [5]. Безперервний моніторинг серцевої діяльності плода за допомогою розроблених в кінці 1960-х рр. скальпелектродів, які можна прикладати на головку плоду, привів до величезної кількості досліджень по вивченню взаємовідносин між зміною частоти серцевих скорочень плода (ЧСС) і характером перебігу пологів. В [6] встановили, що ультразвукова доплерографія судин плода, артерії пуповини і маткових артерій недостатньо специфічна щодо гіпоксичного стану плода.

Можливість застосування фетальної пульсоксиметрії також вивчається протягом останніх 10 років, проте її потенційне клінічне значення як і раніше є неоднозначним. Зберігаються суперечки щодо того, наскільки точно результати пульсоксиметрії відображають рівень ацидемії. Таким чином, в даний час немає чітких критеріїв оцінки стану плода в пологах. Кожен з перерахованих методів фетального моніторингу не забезпечує окремо адекватної оцінки стану плода в пологах, що диктує необхідність комплексного обліку даних основних взаємодоповнюючих методів фетального моніторингу. Завдяки постійному прогресу технічних, діагностичних і лікувальних можливостей сучасної медицини методи оцінки стану плода в пологах будуть завжди залишатися розвиваючою областю перинаталогії, а широкий спектр недорогих електронних компонентів дозволяє створити прості, зручні, автономні та досить прецензійні прилади для виміру серцевих скорочень малюка.

Апарати на базі сучасних мікроконтролерів AVR в біоінженерії знаходить все більше застосування [7]. Відомий мікропроцесор ATmega 328 в платах Ардуіно свого часу здійснив революцію в цифровій електроніці, а платформа Ардуіно все частіше застосовується при розробці нових біомедичних приладів [8]. До переваг слід віднести простоту програмування, невисока вартість, маленькі габарити, достатня кількість цифрових та аналогових входів-виходів. Саме цю платформу ми будемо використовувати в нашій моделі.

Мета (завдання) дослідження. У цьому дослідженні ми представляємо нашу конструкцію нового компактного та недорогого фетального пульсометра (ФЕП) на основі конденсаторного мікрофона та мікроконтролера Arduino. Результатом ФЕП є середній пульс плода, який може відображатися на LCD-дисплеї.

Основний матеріал дослідження. На рисунку 1 показано загальну блок-схему всієї системи для апаратної реалізації. Вона складається з п'яти етапів: збір даних, попередня обробка даних, подача на мікроконтролер, цифрова обробка та відображення.



Рисунок 1 – Блок-схема роботи фетального пульсометра

Етап збору даних складається з одного конденсаторного мікрофона, який діє як датчик для виявлення та отримання серцевого звуку дитини. Звук, який виробляє серце плода, не чути людським слухом. Отже, для отримання сигналу потрібен носій. Конденсаторний мікрофон, здатний реагувати на звуки всіх частот у широкому частотному діапазоні до 20 кГц. Частота серцевого звуку плода до 200 Гц [5], тому була обрана гранична частота 200 Гц.

Попередня обробка даних складається з підсилювача та фільтра. Операційний підсилювач, який використовується для посилення - NE5532. Імітація схеми попереднього підсилення та фільтрації проводилася за допомогою програмного забезпечення Multisim окремо. Схему було зроблено на основі ескізу із використанням програмного забезпечення, результат моделювання показаний на рисунку 2.

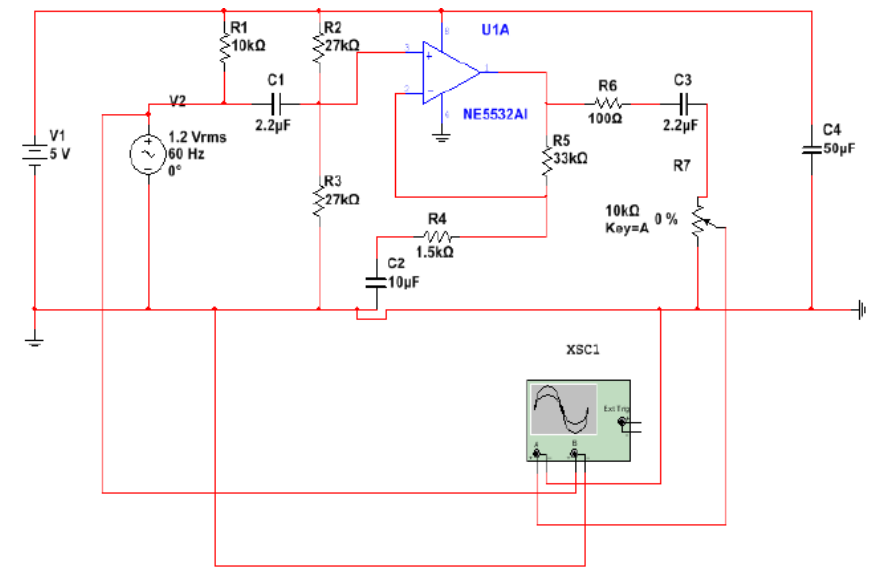


Рисунок 2 – Схема попереднього підсилення

Для усунення шумів нами використано низькочастотний фільтр. За допомогою програмного забезпечення Filter Lab 2.0 було створено низькочастотний фільтр Баттерворта четвертого порядку. Схема фільтрації показана на рис. 3, а результати моделювання - на рис. 4.

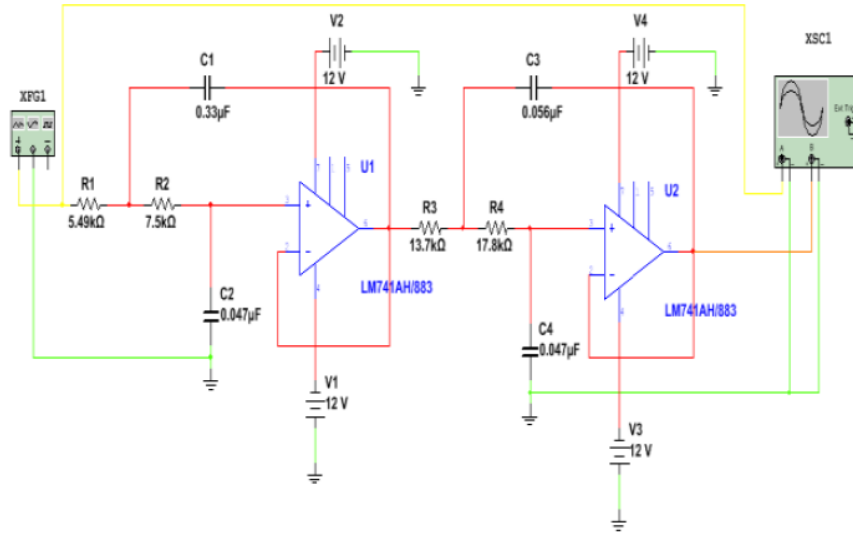


Рисунок 3 – Схема низькочастотного фільтра Баттерворта четвертого порядку

Ідея використання четвертого порядку є досить ефективною, тому що чим більша кількість сумарних каскадів, тим ближче фільтр до ідеальної реакції і використовує менше живлення компонентів порівняно з фільтром 8-го порядку. Операційним підсилювачем, що використовується для фільтрації, є LM741.

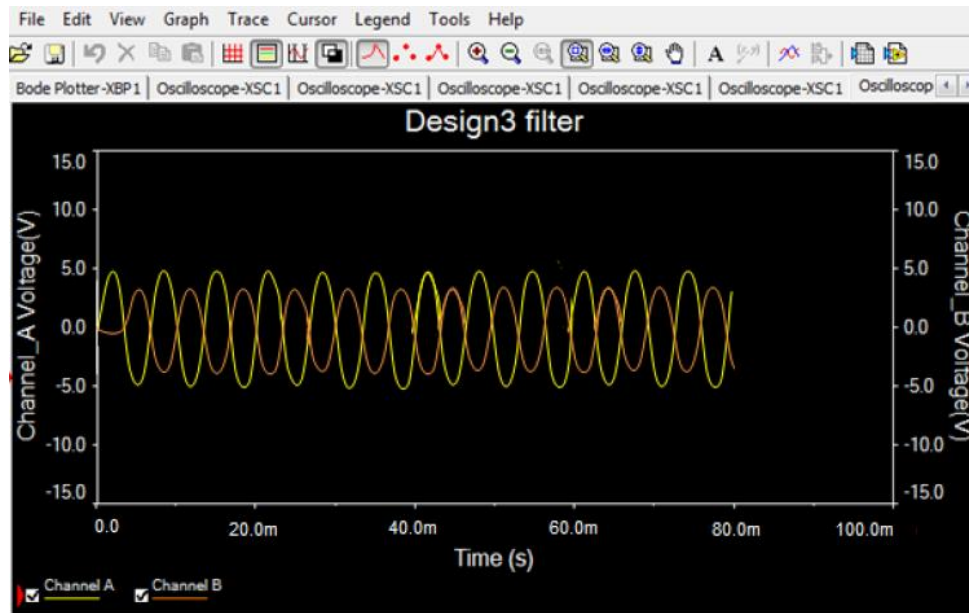


Рисунок 4 – Осцилограма низькочастотного фільтра Баттерворта четвертого порядку (200 Гц)

Оскільки частота відсічки становить 200 Гц, вихід нижче частоти відсікання дасть те саме, що і вхід. Однак у практичному випадку графік покаже максимум від 60 до 70 Гц, а

вихідна потужність почне зменшуватися після 70 Гц. Поріг використовується при програмуванні для усунення ефектів від цих частот.

В проєкті ми використали Arduino Uno R3, який має вбудований мікроконтролер ATmega 328 для обробки даних. Сигнал, отриманий після етапу попередньої обробки даних, надходить у Arduino Uno R3 як вхід для подальшої обробки. Вхід сигналу має аналогову форму, тому його можна підключити до аналогового входу на Arduino Uno (в нашому випадку A0). Комп'ютер не може прочитати аналогову форму сигналу. Отже, мікроконтролер також діє як 10 бітний АЦП, який може перетворювати аналогову форму в цифрову. Розроблена програма завантажується в Arduino Uno за допомогою програмного забезпечення Arduino IDE для подальшого процесу.

Для того, щоб отримати показники серцебиття плода, у роботі використовується постійний поріг. У цьому дослідженні було обрано поріг який дорівнює 10. Для введення цього вимірювання був наданий відфільтрований сигнал і алгоритм виявлення піків був використаний для виявлення піку від сигналу. Після виявлення піку було додано ще одну затримку в 300 мс (рис. 5).

```

1 | Arduino 1.8.13
Файл Правка Скетч Інструменти Допомога

1 §
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd_27(0x27, 16, 2);

void setup()
{
  lcd_27.begin ();
  lcd_27.backlight ();
}

void loop()
{
  if (analogRead(0) > 10)
  {
    lcd_27.setCursor(1-1, 1-1);
    lcd_27.print( "Fetal Heart Rate" );
    lcd_27.setCursor(1-1, 2-1);
    lcd_27.print( "Aver." );
    lcd_27.print( analogRead(0) );
    delay(300);
  }
}

```

Рисунок 5 – Приклад програмного коду для роботу фетального датчика з виводом результатів на екран LCD

На останньому етапі показники частоти серцевих скорочень плода відобразатимуться на LCD-дисплеї 16x2 з вбудованим модулем I2C. LCD-дисплей підключений до мікроконтролера і повинен бути запрограмований. Результат також можна контролювати через послідовний монітор (рис. 6). На LCD-дисплеї він відобразить середній пульс плода лише так, як показано на рис. 6(b) нижче. Частоту плода усереднювали протягом 1 хвилини, а оптимізований час усереднення класифікують у подальших дослідженнях. Живлення пристрою передбачено від акумулятора напругою 9В. Це дозволить побудувати прилад на умовах автономності та портативності.

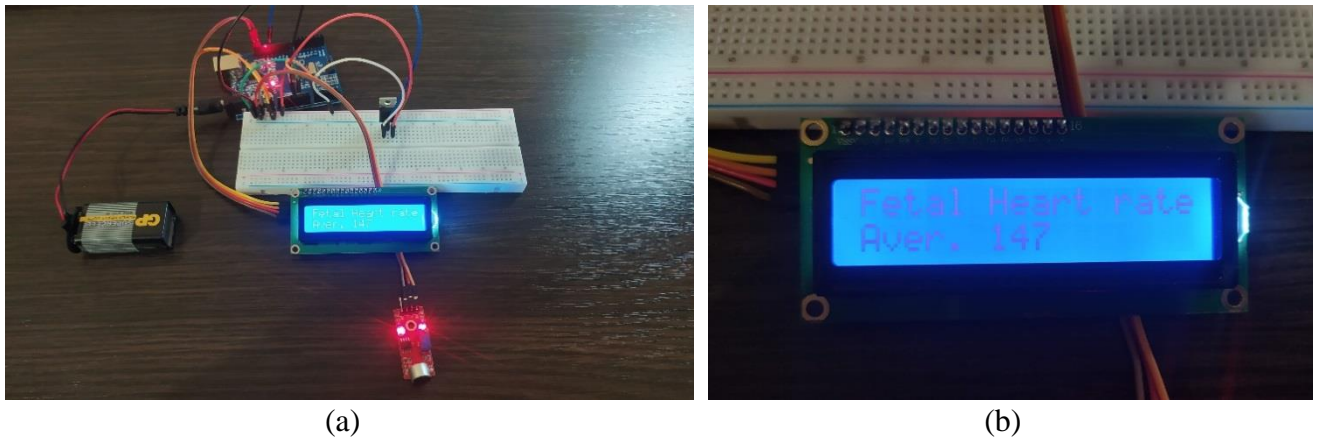


Рисунок 6 – Загальний вигляд моделі фетального пульсометру (a) та приклад виведення результату середнього пульсу плода на LCD дисплеї (b)

Для оцінки ефективності розробленого ФЕП, частоту серцевих скорочень плода, записаного за допомогою розробленого прототипу, ми порівнювали з існуючим електронним стетоскопом. Цей порівняльний експеримент був проведений на вагітній жінці у період від 35 до 39 тижня вагітності, і середній час запису був обмежений 1–2 хвилинами. У таблиці 1 узагальнено вимірювання частоти серцевих скорочень плода за допомогою розробленого прототипу та електронного стетоскопа.

Таблиця 1 – Порівняння результатів між прототипом ФЕП та електронним стетоскопом

	Тиждень вагітності	Показання електронного стетоскопу	Показання розробленого ФЕП
·	35	150	147
·	36	142	140
·	37	148	147
·	38	151	151
·	39	148	150

Біоінженерія

З таблиці видно, що показання прототипу в більшості випадків майже відповідає рівню електронного стетоскопа. Загальний зсув прототипу та електронного стетоскопа становить 1,4 % та - 1,2 % відповідно. Можна стверджувати, що дана різниця в показах знаходиться в межах допуску, який становить + 5 для частоти серцевих скорочень [9]. Однак обмеження пропонованого прототипу полягає в тому, що він здатний виявляти частоту серцевих скорочень плода лише протягом третього триместру, та не може фіксувати серцебиття плода у першому та другому триместрі.

ВИСНОВКИ

У науковій роботі представлено розробку недорогої, неінвазивної, керованої користувачем та мікроконтролером ATMEga 328 автономної системи моніторингу серцебиття плода, яка може використовуватися як в лікарняних так і в домашніх умовах. Тони серця плода реєструються за допомогою конденсаторного мікрофона та попередньо обробляються низькочастотним фільтром, який усуває непотрібні шуми та обмежує пропускну здатність сигналу. Крім того, розроблено алгоритм виявлення піку для виявлення піку із затримкою 300 мс. Це забезпечує серце плода значним діагностичним та клінічним значенням. Пристрій було протестоване на вагітній жінці у третьому триместрі та проведено порівняння з електронним стетоскопом лікаря. Результат показує, що запропонований прототип демонструє досить добру точність на основі відносної перевірки електронного стетоскопа в реальних клінічних умовах. Отже, дослідження показало, що конденсаторний мікрофон є робочою моделлю і може ефективно використовуватися при розробці комерційних ФЕП для використання в якості системи моніторингу домашнього догляду вагітних. Однак прототип пристрою потрібно протестувати на більшій кількості вагітних жінок для третього триместру, щоб узагальнити та покращити роботу пристрою.

Перелік використаних джерел:

1. *Sameni, R.* A Review of Fetal ECG Signal Processing Issues and Promising Directions [Electronic resource] / *R. Sameni, G. D. Clifford* // The Open Pacing, Electrophysiology & Therapy Journal. – 2010. – N 3. – P. 4–20. – Mode of access: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOPETJ/TOPETJ-3-4.pdf>
2. Health Encyclopedia [Electronic resource] / Rochester: University of Rochester Medical Center. – Mode of access: <https://www.urmc.rochester.edu/encyclopedia.aspx>
3. Intraoperative fetal heart monitoring for non-obstetric surgery: A systematic review [Electronic resource] / *O. Carlotta [et al.]* // European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology. – 2019. – Vol. 238, July. – P. 12–19. – Mode of access: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31082738/>
4. *Nageotte, M. P.* Fetal heart rate monitoring / *M. P. Nageotte* // Seminars in Fetal & Neonatal Medicine. – 2015. – Vol. 20, N 3. – P. 144–148.
5. *Барашнев, Ю. И.* Гипоксическая энцефалопатия: гипотезы патогенеза церебральных расстройств и поиск методов лекарственной терапии / *Ю. И. Барашнев* // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2002. – № 1. – С. 6–9.
6. Кардиотокография и доплерометрия в современном акушерстве / *В. И. Орлов [и др.]*. – Ростов на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. – 288 с.

7. Сілі, І. І. Модель безструмового апарату підігрівання імплантів [Електронний ресурс] / І. І. Сілі, О. Ю. Азархов // Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали І Міжнар. науково-практ. Інтернет-конф. (Мелітополь, 01–24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ. – Мелітополь, 2020. – С. 417–419. – Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/materialy-1-mnpk-tehnicne-zabezpechennja-innovacijnyh-tehnolohij-v-ahropromyslovomu-kompleksi-m.-melitopol-01-24.04.2020.pdf>

8. Волошин, В. С.осушувач повітря на базі елемента Пельтьє та Ардуіно [Електронний ресурс] / В. С. Волошин, О. Ю. Азархов, І. І. Сілі // Медична інформатика та інженерія. – 2020. – № 2. – С. 90–95. – Режим доступу: <https://doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2020.2.11180>

9. Santoso, D. Design and Implementation of Capnograph for Laparoscopic Surgery [Electronic resource] / D. Santoso, F. D. Setiaji // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2013. – Vol. 3, N 5, September. – P. 55–67. – Mode of access: <http://www.ijjee.org/papers/370-JI178.pdf>

Сілі І. І., Азархов А. Ю., Федюшко Ю. М., Головаха Р. В.

ФЕТАЛЬНЫЙ ПУЛЬСОМЕТР С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Частота сердечных сокращений плода является важным биологическим показателем для оценки состояния самочувствия плода беременной женщины. Когда сердце бьется, оно перекачивает кислородную кровь по всему телу плода. Адекватность оксигенации плода важна для предотвращения гипоксии, которая влияет на все тело ребенка. Если возникает гипоксия, это может привести к уменьшению мозгового кровотока плода. Таким образом мониторинг сердцебиения способен распознать асфиксию плода. Данная работа посвящена разработке фетального пульсометра (ФЕП), который можно использовать беременной матери в домашних условиях. Для разработки монитора сердечного ритма плода нами предложено пять шагов: 1) сбор данных; 2) предварительная обработка данных; 3) передача данных в микроконтроллер; 4) дальнейшая обработка и 5) отображение результатов на мониторе. Конденсаторный микрофон используется как датчик для получения сердечного звука плода. Микрофон получает данные, после чего проходит предварительную обработку, которая включает усиление и фильтрацию с помощью фильтра низкой частоты четвертого порядка Баттерворта. Операционный усилитель используется для предварительного усиления во время фильтрации; мы использовали операционный усилитель LM 741. Аппараты на базе современных микроконтроллеров AVR в бионженерии находят все большее применение. Известный микропроцессор ATmega 328 в платах Ардуино в свое время совершил революцию в цифровой электронике, а платформа Ардуино все чаще применяется при разработке новых биомедицинских приборов. К достоинствам следует отнести простоту программирования, невысокая стоимость, небольшие габариты, достаточное количество цифровых и аналоговых входов-выходов. Сигнал, получаемый после этапа предварительной обработки, направляется в микроконтроллер (ATmega328) для исчисления и передачи данных путем разработки алгоритма, чтобы компьютер мог считывать сигнал. На финальном этапе, выход (частота сердечных сокращений плода) отображается на LCD-дисплее.

Ключевые слова: *фетальный пульсометр, конденсаторный микрофон, операционный усилитель, микроконтроллер, биологический показатель, сердцебиение.*

Sili I. I., Azarkhov O. Yu., Fediushko Yu. M., Golovakha R. V.

FETAL HEART RATE MONITOR WITH MICROPROCESSOR CONTROL

Fetal heart rate is an important indicator or biological index to know the condition of fetal well-being. When a heart beats, it pumps oxygenated blood throughout the fetal body. Adequacy of fetal oxygenation is important to prevent hypoxia that affecting the whole fetal body. If hypoxia occurs, there might be a decrease in fetal cerebral blood flow. Therefore, fetal heart rate monitoring able to recognize fetal asphyxia. Thus, monitoring the heartbeat is able to recognize fetal asphyxia. This work is devoted to the development of a fetal heart rate monitor (FHRM) that can be used by a pregnant mother at home. We have proposed five steps to develop a fetal heart rate monitor: 1) data acquisition; 2) data pre-processing; 3) feeding into microcontroller; 4) post-processing and 5) LCD display. A condenser microphone is used as a transducer for fetal heart sound. Data acquisition stage comprises of one condenser microphone which act as a sensor to detect and acquire the fetal heart sound. Sound produce by fetal heart cannot be heard by human hearing. The frequency of fetal heart sound is up to 200Hz so a cutoff frequency of 200Hz was chosen. Then undergoes preprocessing, which includes amplification and filtering using a fourth-order Butterworth low-pass filter. An operational amplifier is used for pre-amplification during filtering; we used an operational amplifier LM 741. Devices based on modern AVR microcontrollers are increasingly being used in bioengineering. The well-known ATmega 328 microprocessor in Arduino boards at one time revolutionized digital electronics, and the Arduino platform is increasingly being used in the development of new biomedical devices. The advantages include simplicity of programming, low cost, small size and a sufficient number of digital and analog inputs and outputs (PINs). The signal obtained after the preprocessing step is sent to a microcontroller (ATmega328) for calculating and transmitting data by developing an algorithm so that the computer can read the signal. In the final stage, the output (fetal heart rate) is displayed on the LCD.

Keywords: *fetal heart rate monitor (FHRM), condenser microphone, operational amplifier, microcontroller, biological indicator, heartbeat.*

*Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Єфременко В. Г.
Стаття надійшла 30.11.2020 р.*