

# ЦИФРОВИЙ СПІРОМЕТР

Зубков С. В., ст. викладач каф. БМІ  
szub284@gmail.com

Цибань Ю. О., студент  
Tsyban.yura@ukr.net

Факультет біомедичної інженерії  
Національний технічний університет

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
м. Київ, Україна

**Реферат** – Спірометрія є одним з основних методів дослідження функції зовнішнього дихання. Захворювання дихальних шляхів та легеневої тканини в більшості випадках викликають зміну функціональних параметрів дихання. Таким чином досліджуючи функціональний стан респіраторної системи, можна отримати уявлення про характер паталогічного процесу в бронхах та легенях. На сьогоднішній день спірометрія є найбільш простим та розповсюдженим методом функціональної діагностики обструктивних захворювання легень, таких як астма. Але вивченню сучасним основам даного методу функціональної діагностики приділяється недостатньо уваги під час навчання студентів факультету біомедичної інженерії, через відсутність цифрових спірометрів у матеріально-технічній базі. Саме тому було вирішено створити цифровий спірометр, для навчальних і наукових потреб факультета. Для опанування студентами даного методу дослідження і отримання практичного досвіду роботи з цифровим спірометром.

**Ключові слова** – функція зовнішнього дихання людини, спірометрія, вимірювання потоку повітря, трубка Піто, датчик тиску, DipTrace, Micro-Cap 9Pro

## I. ВСТУП

Спірометр – медичний діагностичний прилад, який використовується для оцінки функції зовнішнього дихання [1]. З 1846 року, моменту його винаходу, його стали використовувати по всьому світу [2,3]. В даний час спірометри в своїй більшості переносні та комп'ютеризовані. Вони складаються з механічного або електричного датчика, процесора і принтера або іншого альтернативного способу представлення будь-якої з нижче наведеної інформації:

- кривих Об'єм-Час;
- кривих Потік-Об'єм;
- ФЖЄЛ(форсована життєва ємність легень) та ФОВ1(форсований об'єм видиху за першу секунду);
- загальна інформація про пацієнта.

На разі існують декілька основних рекомендацій, щодо стандартизації спірометрів, наприклад ATS (Американське торокальне товариство), ERC (Європейський респіраторний комітет), ГОСТ Р ИСО 26782-2016 [11,14].

Спірометрія дозволяє: (1) визначити легеневі об'єми та ємності, оцінити функцію зовнішнього дихання; (2) діагностувати різні типи респіраторних захворювань; (3) оцінити

відповідь пацієнта на призначенне лікування; (4) оцінити ризики при хірургічних операціях, знаючи легеневі ємності [5,6].

## II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка прототипу цифрового спірометра, який базується на вимірюванні різниці тиску (за допомогою трубки Піто).

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На основі проведеного порівняльного аналізу сучасних спірометрів та у відповідності до діючих стандартів сформовані технічні вимоги до цифрового спірометра (табл. 1).

Таблиця 1. Технічні вимоги до розроблюваного спірометра

Назва параметра	Значення параметра
Діапазон потоку повітря,	16 л/с (вдих / видих)
Точність вимірювання потоку (від 50 мл/с до 16 л/с )	±5% чи 200 мл/с
Діапазон об'єму	0,1–10 л
Точність вимірювання об'єму	±3% або 50 мл
Параметри вимірювання	ФЖЄЛ, ФОВ1, ФЖЄЛ/ФОВ1, ПШВ
Час запису, не менше	15 с
Аналого-Цифровий Перетворювач Живлення	12 бітний 5В

Створено функціональну схему спірометра (рис. 1)

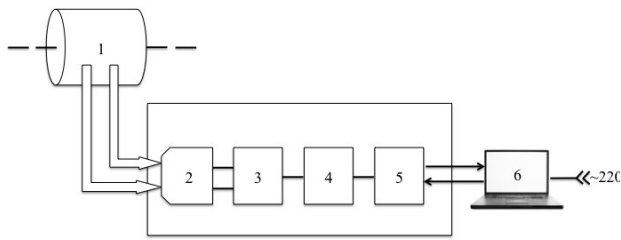


Рис. 1 - Функціональна схема спірометра

1 – блок вимірювання витрат (Трубка Піто, рис. 2); 2 – диференціальний датчик тиску; 3 – інструментальний диференціальний підсилювач; 4 – фільтр низьких частот; 5 – мікроконтролер; 6 – персональний комп'ютер.

Принцип дії базується на непрямому вимірюванні потоку повітря, за рахунок вимірювання різниці тиску на різних ділянках трубки (витратомір швидкісного напору, трубка Піто) (рис. 2) [9].

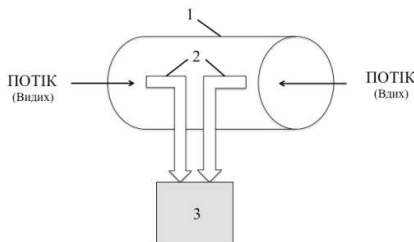


Рис. 2 – Датчик швидкісного напору (Трубка Піто)

1 – трубовід; 2 – напорні трубки; 3 – диференціальний датчик тиску.

Різниця тиску отримана з трубки Піто подається по газопроводу на диференціальний датчик тиску MPX2010DP, який вимірює різниці тиску від 0 до 10 кПа, після чого з диференціальних виходів датчика електричний сигнал подається на інструментальний підсилювач AD623, який дозволяє підсилити сигнал до потрібного значення і зменшити синфазну заваду сигналу. Для того щоб подати 2.5 В напруги зміщення на вихід інструментального диференціального підсилювача був спроектований повторювач напруги на операційному підсилювачі AD8572. Далі сигнал потрапляє на фільтр низьких частот Салена-Кі [19] з частотою зрізу 15 Гц, також спроектованому на операційному підсилювачі AD8572 (рис. 5).

Після обробки сигнал подається на одну з ніжок мікроконтролера STM32F103C6, оцифровується на 12 бітному АЦП (аналогоцифровому перетворювачі) і передається через USB на комп'ютер де відбувається математична обробка сигналу.

Живлення схеми відбувається через USB, з виходу якого можна отримати 5 В, тому для живлення мікроконтролера використовується лінійний перетворювач напруги ADP1710, який понижує напругу до 3.3 В.

Для забезпечення безпеки користувача та приладу, була використана гальванічна розв'язка в 5 кВ ADuM4160 для каналів передачі даних USB та гальванічну розв'язку в 5кВ MEJ1S0505SC для каналів живлення.

Розроблена принципова електрична схема в програмному середовищі DipTrace Schematics зображена на рис. 6

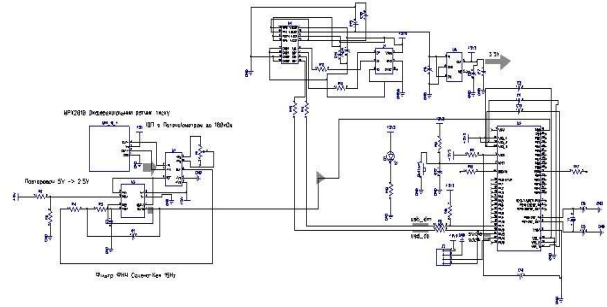


Рис. 3 – Схема принципова електрична спірометра в середовищі DipTrace

Для програмування мікроконтролера використовуються інтерфейс SWD (Serial Wire Debug).

### Вимірювання потоку повітря

Трубка Піто (датчик швидкісного напору) визначає різницю тиску, яку за допомогою закону Бернуллі [10] можна перетворити у швидкість потоку:

$$\rho gh + p + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (1)$$

де  $\rho$  - густина рідини;

$g$  - прискорення вільного падіння;

$h$  - висота відносно землі;

$p$  - тиск, що створюється потоком;

$v$  - швидкість потоку.

Прискорення, викликане гравітацією і густиною повітря є константами під час вимірювання, тоді швидкість рідини пропорційна квадратному кореню різниці тиску. Можна зробити висновок, що швидкість потоку газу дорівнює добутку сталої та квадратному кореню різниці тиску, як зазначено нижче:

$$v = k\sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

де  $k$  – стала;

$\Delta p$ - падіння тиску.

Знаючи параметри трубки Піто за формулою (4), можна визначити об'ємну витрату потоку [9]:

$$Q = Sv \quad (3)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата потоку;

$S$  – площа поперечного перетину трубопроводу.

Далі шляхом інтегрування (5) неперервного вимірювання об'ємної витрати потоку можна визначити кількість повітря (об'єм), що пройшов за час вимірювання через трубопровід[9]:

$$V = \int_{t1}^{t2} Q dt \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм повітря.

Іншим способом, за допомогою закону (рівняння) Пуазейля, можна визначити об'ємну витрату повітря

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L} \quad (5)$$

де  $R$  – внутрішній радіус трубопроводу;

$\eta$  - коефіцієнт динамічної в'язкості;

$L$  – відстань між точками вимірювання.

### Моделювання роботи спірометра в Micro-CAP 9Pro

Спроектована в Micro-Cap 9Pro аналогова частина електрично принципової схеми зображена на рис. 3[15].

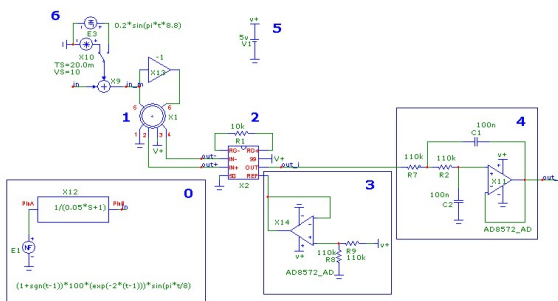


Рис. 3 – Електрично принципова схема аналогової частини спірометра в Micro-Cap 9Pro

0 – змодельований сигнал зміни лінійної швидкості повітря при видиху; 1 – диференціальний датчик тиску MPX2010; 2 – інструментальний диференціальний підсилювач; 3 – повторювач напруги; 4 – низько частотний фільтр; 5- джерело живлення 5 В; 6 – джерела похибки вимірювань.

Результати моделювання зображені на рис. 4,5.

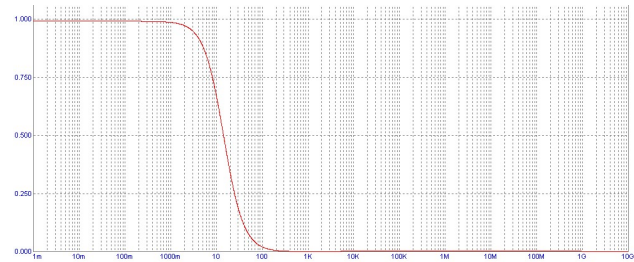


Рис. 4 – Амплітудно-частотна характеристика спроектованого фільтра, по горизонтальній осі - колова частота, по вертикальній осі - коефіцієнт підсилення.

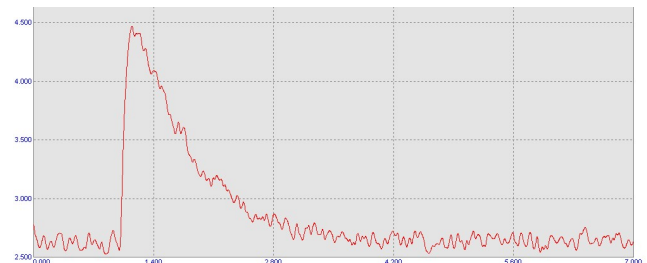


Рис. 5– Сигнал отриманий з виходу фільтра низьких частот; по осі абсцис – час в секундах; по осі ординат напруга у вольтах.

### Виготовлення прототипу цифрового спірометра

Трасування схеми спірометра було зроблено в програмному середовищі DipTrace PCB Layout.

Реальний вигляд друкованої плати зображений на рис. 6.

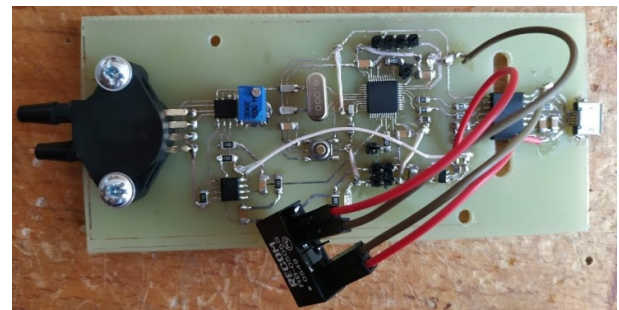


Рис. 6 - Реальний вигляд друкованої плати

Прототип виготовлявся лазерно прасковою технологією, з фольгованого склотекстоліту.

### IV. ВИСНОВКИ

1. Спірометрія є основним методом дослідження функції зовнішнього дихання.
2. Визначенні основні принципи і методи проведення спірометрії, основні досліджувані показники та способи їх відображення.
3. На основі проведеного порівняльного аналізу сучасних спірометрів та у

відповідності до діючих стандартів сформовані медико-технічні вимоги до електронного спірометра. Створено функціональну схему розробленого приладу.

4. Проведено моделювання роботи аналогової частини спірометра в програмному продукті Micro-Cap 9Pro.

5. Створена електрична принципова схема спірометра в програмному пакеті DipTrace Schematics.

6. Зроблено трасування схеми спірометра в програмному пакеті Dip Trace PCB Layout.

7. Виготовлено датчик (трубка Піто) та плату, зібрано прототип.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] Айсанов З.Р., Черняк А.В., Калманова Е.Н. Спирометрия в диагностике и оценке терапии хронической обструктивной болезни легких в общей врачебной практике. *Пульмонология*. 2014;(5):101-110

[2] Ходош Э. М. Очерк по эволюции спирометрии / Эдуард Михайлович Ходош. // Газета "Новини медицини та фармації". – 2012. – №6.

[3] Johnston R. TIMELINE [Електронний ресурс] / Richard Johnston – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pftforum.com/history/timeline/>.

[4] Физиология человека: В 3-х томах. Т.2. Пер. с англ./Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – 3-е изд. – М.: Мир, 2005. – 314 с., ил. ISBN 5-03-003576-1

[5] Інструментальні методи дослідження функції зовнішнього дихання при захворюваннях бронхо-легеневої системи: (Метод, рекомендації) /Ю. М. Мостовий, Т. В. Константинович-Чічирельо, О. М. Колошко, Л. В. Распутіна; Вінниц. держ. мед. ун-т ім. М. І. Пирогова. Каф. пропедевтиківнутр. хвороб.— Вінниця, 2000.— 36 с

[6] Анатомія та фізіологія з паталогією: підручник /[Я.І. Федонюк, К. С. Волков, В. Д. Волошин та ін.] ; за ред. Я. І. Федонюка, В.Д. Волошина. – 3-те вид., допов. і випр. – Тернопіль: ТДМУ, 2012. –676 с.

[7] V.C. Moore. Spirometry: step by step [Електроннийресурс] / V.C. Moore. – 2012.

[8] Spirometry: step by step / [M.R. Miller, J. Hankinson, V. Brusascotain.]. // *European Respiratory Journal*. – 2005.

[9] Биомедицинская измерительная техника: Учеб. пособие для вузов/Л.В. Илясов. — М.: Высш. шк., 2007. — 342 е.: ил.

[10] Милн-Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. Пер. с англ. под ред. Н. Н. Моисеева. – М.: Мир, 1964. – 660 с.

[11] Standartization of Spirometry / Robert O. Crapo, John L. Hankinson, Charles Irvin таін.]. // *American Thoracic Society*. – 1994. – №152. – С. 1107–1136.

[12] Спирометрия. Ее техническое обеспечение. Проблемы и перспективы / Е. И. Сокол [и др.] // *Технічна електродинаміка = Technical electrodyamics*. – 2008. – № 3. – С. 119-124.

[13] Современное состояние технологии спирометрии / И. С. Мясный, В. А. Лопата, Л. В. Петренко, Ю. И. Лыховский // *Актуальні проблеми клінічної та профілактичної медицини*. - 2013. - Т. 1, №1. - С. 66-73. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/akprkl\\_2013\\_1\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/akprkl_2013_1_1_13)

[14] ГОСТ Р ИСО 26782-2016 Спирометры, предназначенные для измерения форсированного выдоха человека. Технические требования и методы испытаний.

[15] Амелина М.А. Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версия 9, 10. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.,ил.

[16] Чучалин А.Г., Айсанов З.Р., Чикина С.Ю., Черняк А.В., Калманова Е.Н. Федеральные клинические рекомендации Российского респираторного общества по использованию метода спирометрии. *Пульмонология*. 2014;(6):11-24.

[17] Черняк А. В. СПИРОМЕТРИЯ: КАК ИЗБЕЖАТЬ ОШИБОК И ПОВЫСИТЬ КАЧЕСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ / А. В. Черняк, Г. В. Неклюдова. // *Практическая пульмонология*. – 2016. – №2. – С. 9.

[18] Панфилов Ю. А. СПИРОМЕТРИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ / Ю. А. Панфилов, В. А. Луныков. // *Земский врач*. – 2017. – С. 6.

[19] Cartwright, K. V.; E. J. Kaminsky (2013). "Finding the minimum input impedance of a second-order unity-gain Sallen-Key low-pass filter without calculus" (PDF). *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 7 (4): 525–535.

УДК 616-7

# Цифровой спирометр

Зубков С. В., ст. преподаватель каф. БМИ  
[szub284@gmail.com](mailto:szub284@gmail.com)

Цыбань Ю. О., студент  
[tsyban.yura@ukr.net](mailto:tsyban.yura@ukr.net)

Факультет биомедицинской инженерии  
Национальный технический университет  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
г. Киев, Украина

*Реферат* – На сегодняшний день спирометрия является наиболее простым и распространенным методом функциональной диагностики обструктивных заболеваний легких, таких как астма. Но изучению современным основам данного метода функциональной диагностики уделяется недостаточно внимания при обучении студентов факультета биомедицинской инженерии, из-за отсутствия цифровых спирометров в материально-технической базе. Именно поэтому было решено создать электронный спирометр, для учебных и научных потребностей факультета. Для освоения студентами данного метода исследования и получения практического опыта работы с электронным спирометром.

*Ключевые слова*– функция внешнего дыхания человека, спирометрия, измерение потока воздуха, трубка Питто, датчик давления, DipTrace, Micro-Cap 9Pro

UDC 616-7

# DIGITAL SPIROMETER

Zubkov.S., Senior Lecturer

Tsyban Y. O.

[Tsyban.yura@ukr.net](mailto:tsyban.yura@ukr.net)

Faculty of Biomedical Engineering

National Technical University

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kyiv, Ukraine

*Abstract*-Spirometry is the simplest and most common method of functional diagnosis of obstructive pulmonary diseases, such as asthma. But during the students training in the faculty of biomedical engineering for the studying of the modern foundations of this method of functional diagnostics is given insufficient attention, due to the lack of digital spirometers in the material and technical base. That is why it was decided to create an electronic spirometer for the educational and scientific needs of the faculty.

*Key words* – pulmonary function, air flow measurement, Pitot tube, pressure sensor, Dip Trace, Micro-Cap 9Pro