

ЦИФРОВОЙ ПОРТАТИВНЫЙ СПИРОМЕТР С ТУРБИНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Р.С. Томашевский, Е.И. Король
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника»
лаборатория биомедицинской электроники
НТУ «ХПИ», ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина
Тел.: (057) 70-76-237, 70-76-937, E-mail: moemulo@meta.ua

Annotation – In this paper data on spirometry and its technical support are provided. A functional scheme of digital office spirometer with turbine air flow converter and block-diagram of algorithm is presented. The technical parameters of digital spirometer are given.

Key words – spirometry, measure turbine, the measurement error, impulse-digital converter, calibration factor.

ВВЕДЕНИЕ

В связи со сложившейся ситуацией с заболеваемостью органов дыхания в Украине [1], функциональные методы исследования приобретают все большее значение в диагностике заболеваний легких. В основном, такая тенденция связана с потребностью клиницистов в достоверной количественной и качественной характеристике состояния органов дыхания пациента. Наиболее простым и информативным методом оценки функции легких является спирометрия. Этот метод может считаться скрининговым и обязательным для внедрения в лечебных учреждениях, осуществляющих наблюдение, лечение и реабилитацию легочных больных.

Как и любой диагностический метод, спирометрия требует соответствующей материально-технической базы. В настоящее время в Украине разработаны и выпускаются специализированные спирометрические компьютерные комплексы, обладающие высокими точностными и функциональными показателями. Однако использование таких комплексов для скрининговых исследований населения оказывается затруднительным. Кроме того цена этих комплексов слишком высока для оснащения государственных медицинских учреждений.

Для скрининговых исследований в мировой практике чаще всего используются портативные или, так называемые, «ручные» приборы [2]. Применение таких приборов особенно оправдано при проведении спирометрических обследований на предприятиях, в больничных палатах, на дому у пациента. К сожалению, сегодня украинскими производителями серийный выпуск портативных спирометров не освоен.

Так как портативные спирометры, по сути, являются медицинскими средствами измерения, то при их разработке и производстве особое внимание уделяется метрологическим характеристикам и показателям. Эти показатели нормируются международными стандартами *American Thoracic Society (ATS)* и *European Respiratory Society (ERS)* (допустимые параметры спирометров из этих стандартов редакции 2005 года [3] сведены в табл. 1), а также требованиями, предъявляемыми медицинским сообществом к диагностическому прибору [4].

Таким образом, целью данной работы является разработка современного отечественного цифрового портативного спирометра, соответствующего международным стандартам и обладающего высокими техническими и эксплуатационными показателями.

Таблица 1 Допустимые параметры спирометров из обобщенных стандартов ATS и ERS

Нормируемый параметр	Ед. изм	Значение
Сопротивление дыханию, не более	кПа/л•с	0,15
Порог реагирования, не более	л/с	0,025
Верхний предел диапазона измерений	л/с	14
Пределы допускаемой относительной погрешности	%	3
Нелинейность АЧХ в диапазоне частот до 20 Гц, не более	%	5

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Лаборатория биомедицинской электроники кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» НТУ «ХПИ» совместно с кафедрой фтизиатрии и пульмонологии Харьковской медицинской академии последипломного образования по заказу фирмы «РАДМИР» ДП АО Научно-исследовательский институт радиотехнических измерений (г. Харьков) провела разработку цифрового портативного прибора для тестирования функции внешнего дыхания (ФВД). В ходе работы были рассмотрены зарубежные аналоги и определены современные тенденции разработки спирометров [5]. Кроме того были проанализированы различные типы датчиков расхода и объема, используемых в спирометрической аппаратуре. В разработанном приборе в качестве первичного преобразователя воздушного потока была

выбрана измерительная турбина (ИТ), в качестве вторичного – использовано оптическое тахометрическое устройство (ОТУ). Основная погрешность таких преобразователей составляет 0,25-1,0 %, постоянная времени – не более 1 мс [6].

В результате проведенных исследований были сформированы основные медико-технические требования и разработана функциональная схема портативного спирометра (рис 1).

Принцип действия прибора основан на преобразовании потока воздуха, с помощью турбинного преобразователя потока (ТПП), в последовательность электрических импульсов. Такое преобразование производится путем модуляции электромагнитного излучения инфракрасного диапазона, поступающего от излучателя к приемнику, с помощью лепестков ротора ИТ.

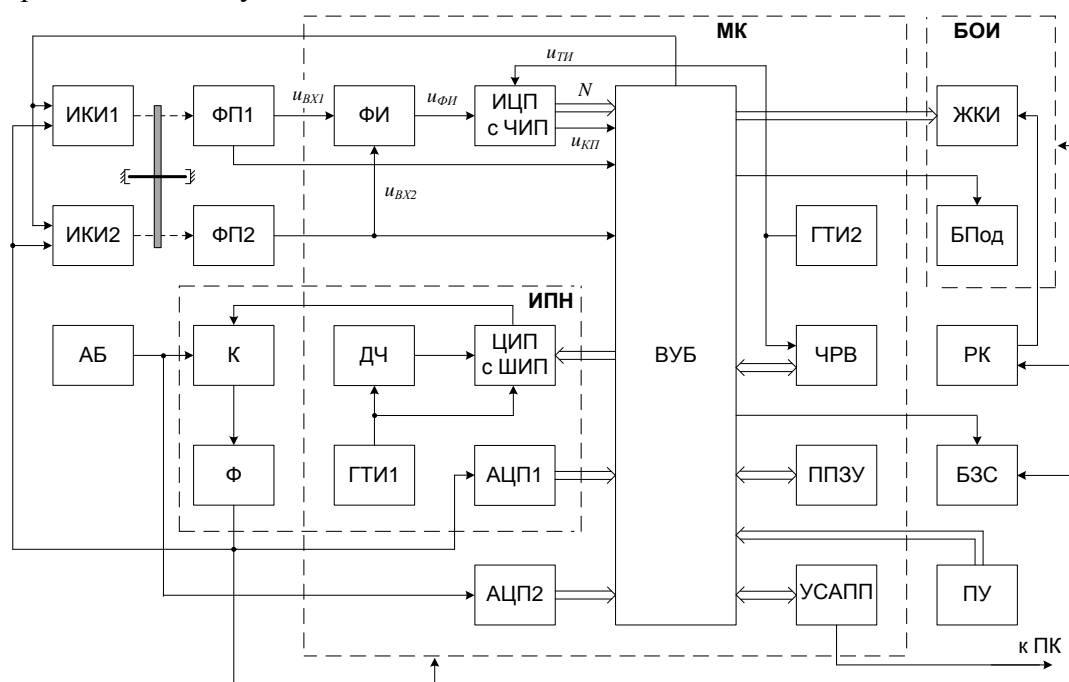


Рис. 1 Функциональная схема цифрового портативного спирометра

Источниками инфракрасного излучения служат два светодиодных излучателя (ИКИ1 и ИКИ2), асимметрично расположенных относительно центра турбины. Наличие двух излучателей, а также их асимметричное размещение обусловлено необходимостью определения направления вращения ротора, а, следовательно, и направления проходящего потока воздуха, что позволяет дифференцировать вдох и выдох. Фотоприемники (ФП1 и ФП2) расположены напротив излучателей таким образом, чтобы лепестки вращающегося ротора прерывали излучение каждой из оптических пар (ИКИ1-ФП1 и ИКИ2-ФП2). На предложенную конструкцию ТПП получен патент Украины [7].

Последовательности электрических импульсов u_{BX1} и u_{BX2} с фотоприемников ФП1 и ФП2 поступают на формирователь импульсов (ФИ), где по их фронтам и срезам формируются короткие импульсы $u_{ФИ}$ (рис. 2, а-в).

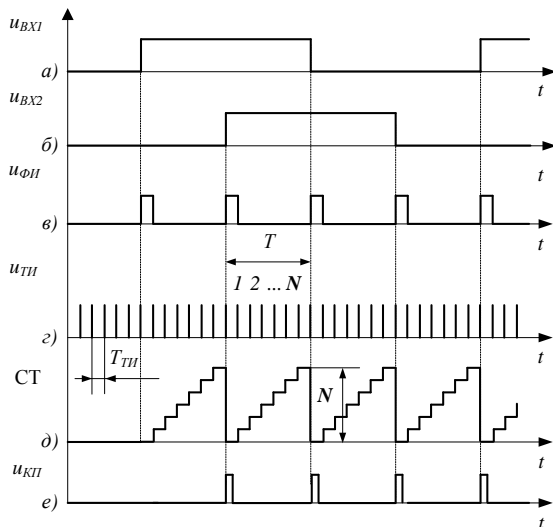


Рис. 2 Временные диаграммы процесса преобразований

Для определения периода следования импульсов T в схеме служит импульсно-цифровой преобразователь с частотно-импульсным законом преобразования (ИЦП с ЧИП). Преобразование проводится с использованием классического метода последовательного счета [8], суть которого состоит в подсчете тактовых импульсов $u_{ТИ}$ счетчиком (СТ) ИЦП в течении

периода T (см. рис. 2, з, д).

Значение T при этом может быть определено по формуле

$$T = N \cdot T_{ТИ} . \quad (1)$$

Цифровой код числа N поступает на вычислительно-управляющий блок (ВУБ), где в его функции определяются мгновенные и средние значения скорости воздушного потока. Тактирование ИЦП с ЧИП производится высокоточным тактовым генератором (ГТИ2) с частотой 32 кГц. Также, с помощью генератора ГТИ2, в приборе тактируются часы реального времени (ЧРВ) Real Time Clock.

Управление прибором осуществляется с помощью пульта управления (ПУ), содержащего четыре кнопки А, В, С, D. Для визуализации информации о процессе тестирования служит блок отображения информации (БОИ). В состав БОИ входит жидко-кристаллический индикатор (ЖКИ) и блок подсветки (БПод). Посредством регулятора контрастности (РК) осуществляется настройка необходимой контрастности индикатора. Для звуковой индикации некоторых ситуаций, возникающих в процессе работы, используется блок звуковой сигнализации (БЗС).

Питание прибора осуществляется от двух аккумуляторных батарей (АБ) с суммарным напряжением не менее 2,1 В. Преобразование данного напряжения до уровня необходимого для работы цифровых устройств (5 В) производится с помощью импульсного преобразователя напряжения (ИПН). Сглаживание пульсаций выходного напряжения коммутатора (К) обеспечивается фильтром (Ф). Формирование длительности управляющих импульсов в ИПН производится цифро-импульсным преобразователем с широтно-импульсным законом преобразования (ЦИП с ШИП). Частота следования управляющих импульсов (20 кГц) определяется коэффициентом деления делителя частоты (ДЧ). Тактирование ЦИП с ШИП осуществляется тактовым генератором (ГТИ1) с частотой импульсов 1 МГц. Ширина управляющих импульсов ИПН определяется в ВУБ с учетом текущего уровня

АБ. Контроль напряжения питания производится с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП1). Уровень заряда аккумуляторных батарей определяется посредством аналогово-цифровых преобразований АЦП2 (рис. 1). Таким образом, в приборе осуществляется контроль двух уровней напряжения: напряжения аккумуляторных батарей и выходного напряжения ИПН. Использование такого технического решения позволило добиться хороших массогабаритных показателей и малого энергопотребления спирометра.

Результаты тестирования, данные о пациенте, а также таблицы с должными величинами хранятся в постоянном перезаписываемом запоминающем устройстве (ППЗУ). Для организации связи с персональным компьютером в приборе используется универсальный синхронно-асинхронный приемо-передатчик (УСАПП). Подключение прибора к компьютеру производится с помощью специального кабеля с гальванической развязкой.

Для достижения требований стандартов и улучшения технических показателей портативного спирометра, в ходе работы был предложен и обоснован способ уменьшения интервалов дискретизации измеряемой величины [9], что привело к повышению чувствительности и расширению частотной полосы пропускания входного сигнала. Для повышения точности преобразования турбинного ТПП был разработан адаптивный метод снижения инструментальной погрешности с учетом текущего состояния ИТ, изменяющегося в процессе эксплуатации [10].

Алгоритм основной программы ВУБ приведен на рис. 3. После подачи питания на микроконтроллер (МК) от аккумуляторной батареи происходит инициализация ЧРВ (RTC), после чего ВУБ переходит в режим ожидания «Sleep Mode» до нажатия кнопки D (бл. 1-3). По нажатию указанной кнопки производится настройка устройств периферии микроконтроллера (порты, АЦП, интерфейсы связи, таймеры) и включение ИПН для обеспечения напряжения питания 5 В.

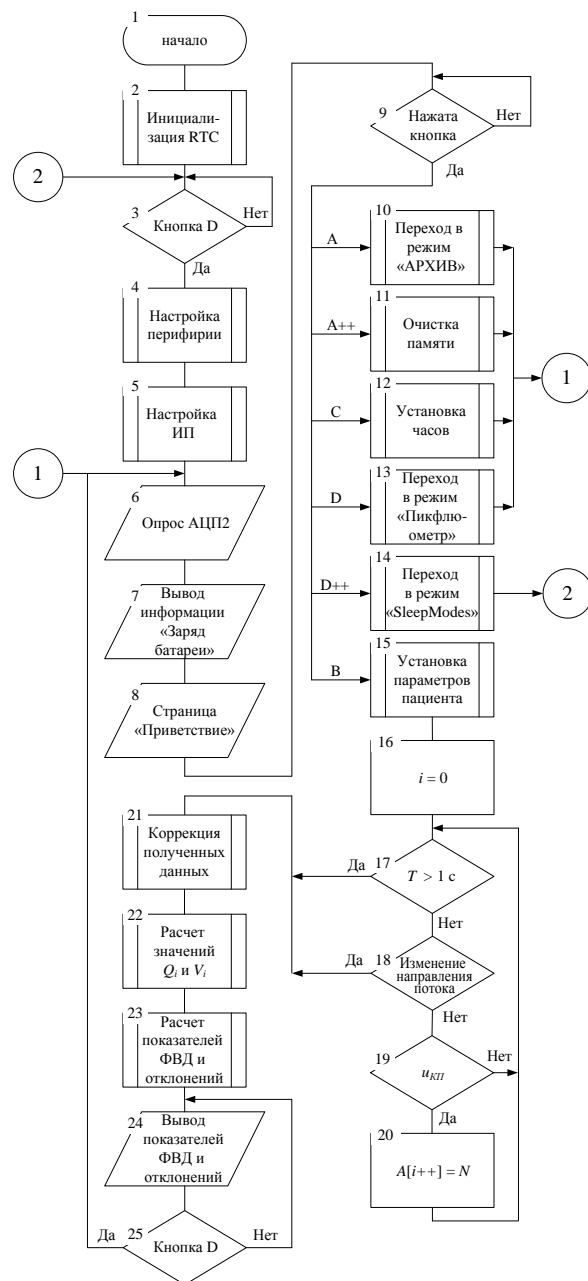


Рис. 3 Алгоритм основной программы спирометра

По полученным от АЦП2 данным выводится информация о текущем заряде батареи. В случае недостаточного заряда на экран выводится сообщение «Замените батарею» (бл. 4-7). После настроек основных устройств для пользователя выводится приветственная страница, а прибор находится в режиме ожидания. По нажатию одной из кнопок (бл. 9-15) производятся следующие действия:

- А – АРХИВ – переход в режим доступа к просмотру ранее записанных те-

стов, находящихся в памяти спирометра;

- А++ – по нажатию и двухсекундному удержанию – переход в режим очистки памяти;

- В – ТЕСТ – переход в режим записи новых тестов;

- С – переход в режим «Установка часов»;

- D – ПИКФЛ – переход в режим работы пикфлоуметра (измерение пиковой объемной скорости ПОС);

- D++ – выключение спирометра и переход в режим ожидания «Sleep Mode».

В режиме исследования «ТЕСТ» в первую очередь производится запись основных антропометрических показателей пациента для расчета условной нормы. Затем обнуляется программный счетчик количества импульсов $u_{КП}$ «конец преобразования» от ИЦП (бл. 16).

С приходом каждого импульса $u_{КП}$ в массив данных A добавляется значение очередного числа N (бл. 20) и начинается процесс преобразований следующего периода T (рис. 2).

Окончание выдоха/вдоха фиксируется при выполнении условия $T > 1$ с (бл. 17). Другим условием окончания выдоха/вдоха является изменение направления воздушного потока (бл. 18), которое определяется путем анализа очередности прихода импульсов $u_{ВХ1}$ и $u_{ВХ2}$ (см. рис. 2).

По завершению выдоха/вдоха проводится коррекция данных сформированного массива по разработанному адаптивному методу снижения инструментальной погрешности. Расчет дискретных значений расхода Q_i производится по передаточной

функции, полученной в результате анализа движения ротора под действием набегающего потока воздуха. Значения объемов могут быть вычислены по формуле

$$V_i = Q_i \cdot T_i. \quad (2)$$

По полученным данным производится расчет и вывод основных показателей ФВД, а также отклонений относительно условных норм (бл. 23-24). По нажатию кнопки D происходит проверка уровня заряда АБ и переход спирометра в режим ожидания (бл. 25).

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы разработан цифровой портативный спирометр (рис. 4) с техническими характеристиками, приведенными в табл. 2. Данный спирометр обеспечивает:

- измерение и вычисление следующих показателей внешнего дыхания: ЖЕЛ, ФЖЕЛ, ОФВ1, индекс Тиффно, индекс Генслера, ПОС, МОС25, МОС50, МОС75, СОС25-75;

- сравнение измеренных показателей со статистическими данными по Р.Ф. Клементу, с учетом пола, возраста и роста пациента, и вычисление отклонений от нормы в процентном выражении;

- отображение уровня отклонения показателей по Л.Л.Шику и Н.Н.Канаеву на цветовой шкале;

- хранение в памяти результатов 10 тестов;

- работу в режиме пикфлоуметра;

- передачу сохраненных данных исследования на персональный компьютер.

Таблица 2 Технические параметры цифрового портативного спирометра

Параметр	Ед. изм.	Величина
Соппротивление дыханию, не более	кПа/л·с	0,077
Порог реагирования, не более	л/с	0,02
Верхний предел диапазона измерения скорости потока	л/с	14
Диапазон измерения объема	л	0-8
Погрешность измерения скорости потока, не более	%	3
Погрешность измерения объема, не более	%	3
Нелинейность АЧХ в диапазоне частот до 20 Гц, не более	%	5



Рис. 4 Внешний вид цифрового портативного спирометра

Автоматическое сравнение полученных показателей внешнего дыхания с должными величинами облегчает постановку диагноза и сводит к минимуму рутинную работу врача-пульмонолога. Высокая точность измерения скоростей и объемов воздуха обеспечивается за счет применения в приборе микропроцессорной системы, которая разработана с использованием положений теории цифровых импульсных и импульсно-цифровых преобразований.

[1] http://www.ifp.kiev.ua/doc/staff/staff_ukr.htm.

[2] Сахно Ю.Ф., Дроздов Д.В., Ярцев С.С. Исследование вентиляционной функции легких. – М.: Издательство РУДН, 2005. – 83 с.

[3] Standardisation of spirometry / [M. R. Miller; R. Crapo; J. Natkinson et al.]; edited by V. Brusasco // Eur. Respiratory Journal. – 26'2005. – 319-338 pp.

[4] Enright P.L. Office spirometers: the good, the bad, and the ugly / P.L. Enright, M. Swanney, D. Burton and G. Liistro // The buyers' guide to respiratory care products. – 2007 – 5-18 pp.

[5] Сокол Е.И., Кипенский А.В., Король Е.И., Томашевский Р.С. Спирометрия. Ее техническое обеспечение. Проблемы и перспективы // «Технічна е-

лектродинаміка» Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 3. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2008. – С. 119-124.

[6] Бошняк Л. Л., Бызов Л. Н. Тахометрические расходомеры – Л.:Машиностроение, 1968. – 212 с.

[7] Пат. 55354 Україна, МПК (2009) G01F 3/00. Спірометричний турбінний перетворювач / Є.І.Сокол, А.В.Кіпенський, Є.І.Король, Р.С. Томашевський. – № u201007009; заявл. 07.06.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23.

[8] Кипенский А. В. Импульсно-цифровые и цифро-импульсные преобразователи: Учебное пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2000. – 132 с.

[9] Томашевский Р.С. Улучшение технических показателей портативного спирометра с турбинным преобразователем потока // «Прикладная радиоэлектроника». – Т.9 – №4 – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2010. – С. 569-574.

[10] Сокол Е.И., Кипенский А.В., Томашевский Р.С., Король Е.И. Адаптивный метод снижения инструментальной погрешности турбинного датчика в процессе его эксплуатации // «Технічна електродинаміка» Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2 – Київ: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 265-268.