

УДК 615.471.036:616

Ю.С. Синекон, канд. техн. наук, В.А. Лопата, канд. техн. наук, М.А.-А. Эль Шебах

Этапы становления и развития компьютерной спирометрии

Описаны концепции и характерные особенности разработки компьютерных спирометров. Определены современные тенденции развития спирометрии на базе микропроцессорной технологии.

The concepts and typical particularities of the computer spirometers elaboration are described. The up-date trends of spirometry development on the base of microprocessor technology are determined.

Введение

Современная компьютерная спирометрия в своём становлении прошла несколько этапов. Рассмотрение характерных особенностей этих этапов дает возможность оценить эволюцию и определить перспективы компьютеризации спирометрии.

Основная часть

Проблема автоматизации спирометрических исследований обусловлена потребностями клинической практики. Со времени широкого распространения методик исследования форсированного дыхания, повышения информативности и диагностической ценности спирометрии, проявились факторы, ускоряющие процессы её автоматизации:

1. Необходимость проведения массовых обследований больших групп пациентов (скрининг, профилактические осмотры, диспансеризация)
2. Желательность получения результатов обследований в режиме реального времени
3. Необходимость избежать погрешностей при ручной обработке спирограмм
4. Нехватка квалифицированного медицинского персонала
5. Существенные временные и финансовые затраты на проведение спирометрического теста.

Если первые четыре из перечисленных факторов не требуют аргументов, то по данным [1], только определение статических объемов легких занимает 42 мин, причем в основном это время расходуется на ручные расчеты, а компьютеризация обработки спирограммы снижает ее стоимость в 3,6 раза [2]. Таким образом, задачей компьютеризации спирометрии была поставлена автоматизация обработки её резуль-

татов, и решалась она теми техническими средствами, которые были доступны на каждом этапе эволюции компьютерных технологий.

Начало этого процесса относится к середине 1960-х годов, когда подавляющее большинство спирометрической аппаратуры составляли жидкостные спирометры. Их автоматизация предполагала трансформацию механического выходного сигнала (линейное или угловое перемещение) в электрический сигнал напряжения постоянного тока. В качестве трансформирующего элемента использовался потенциометр.

Именно такая установка (рис. 1) описана в [3].



Рис. 1. Автоматизированная установка для исследования функции легких

На поворотный шкив жидкостного спирометра «Collins» объемом 9 л установлен потенциометр сопротивлением 10 Ом, включенный в контур постоянного тока. Линейное перемещение колокола спирометра вызывает вращение потенциометра, вырабатывающего напряжение постоянного тока в диапазоне $\pm 2,5$ В. Установка содержит магнитофон с системой частотной модуляции, АЦП, частотный демодулятор, контур двоичного кода, монитор-осциллограф, входную цепь и усилители для записи входного сигнала на бумажный носитель и магнитную ленту с частотной модуляцией. Код идентификации пациента и сигнал спирометра фиксируются на магнитную ленту, сигнал с которой передается на АЦП, преобразующий напряжение

в двоичный код, используемый компьютером при анализе результатов измерений. Извлечение информации о процессе форсированного выдоха обеспечивается частотой дискретизации 200 Гц.

В установке использован компьютер 160А фирмы Control Data Corporation (США), программное обеспечение (ПО) составлено на специальном языке OSASA. Сигнал на магнитной ленте записывался на скорости 9,5 см/с. Выводной терминал – электрическая пишущая машинка.

На материале обследования 400 пациентов авторы [3] делают следующие выводы и заключения:

- модификация жидкостного спирометра и устройство магнитной записи – основные средства, необходимые для подготовки результатов спирометрических тестов к компьютерной обработке;
- компьютерный анализ результатов тестов спирометрии устраняет потребность в специально подготовленном персонале и исключает ошибки ручной обработки, избавляя их от индивидуальной вариабельности при интерпретации результатов;
- при скрининге больших групп пациентов, для анализа магнитных записей результатов спирометрии можно использовать вычислительный центр и установить стандарты интерпретации спирограмм в целях сопоставимости различных исследований.

Со временем средства цифровой вычислительной техники заметно совершенствуются [4], что сразу отразилось на техническом уровне компьютерных спирометров конца 1960-х годов.

Целью разработки системы [5] было создание методологии более детального спирометрического тестирования в широком спектре применений. В качестве прототипа принят двухколокольный жидкостный спирометр «Pulmotest». В стандартный протокол спирометрического теста включены статические и динамические объемы легких. Некоторые параметры измеряются повторно после применения бронходилататора у пациентов с экспираторной обструкцией. Программа предназначена для выполнения всех вычислений, обычно выполняемых оператором, в т.ч. соотношений измеренных величин к должным. Эти вычисления включали все преобразования исходных данных с приведением их к конечным результатам в соответствующих единицах измерений. Программа также обеспечивала запись кода идентификации пациента и распечатку протокола в легко читаемом формате, соответствующем нормам госпиталя для размеров документов или диа-

грамм. Требования к аппаратной части системы: простота обслуживания персоналом с ограниченной подготовкой; быстрая распечатка данных в нескольких копиях, пригодных для внесения в досье пациента или передачи врачу; ограничение пространства для компьютерного терминала; низкая стоимость обследования пациента. Эти требования были полностью удовлетворены стандартной телетайпной установкой с печатью на перфорированной ленте (рис. 2), предоставляющей доступ к одному из двух компьютеров, удаленных от госпиталя на значительное расстояние. Оба компьютера представляли собой системы большой емкости, способные легко обрабатывать сложные спирометрические программы.

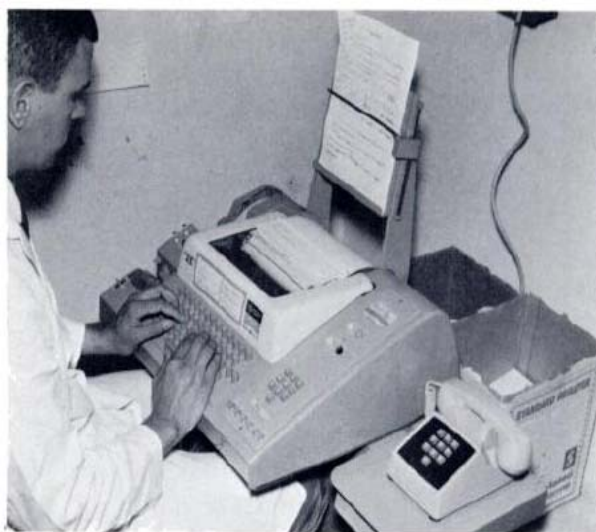


Рис. 2. Терминал ввода-вывода компьютеризованного спирометра [5]

Сравнения затрат времени показало, что операторы с 6-летним опытом работы в лаборатории, использующие настольный калькулятор для вычислений, затрачивали 25-30 мин на обработку теста пациента. Кроме этого, требовалось не менее 5 мин времени секретаря для распечатки подлинника и трех копий протокола. Компьютерная система требовала всего 15 мин времени техника, а одномоментная распечатка четырех копий протокола проходила в автоматическом режиме.

Авторы полагают основными преимуществами разработанной системы рациональное использование квалифицированного персонала и возможность параллельного пользования системой многими небольшими клиниками и офисами. Оценивая перспективы компьютеризации спирометрии, авторы в рамках современных представлений о её технических средствах, предположили два возможных варианта:

- обеспечение записи выходного сигнала спирометра на магнитной ленте с последующим анализом записи компьютерной программой;
- выполнение непосредственного автоматизированного анализа, без записи на магнитную ленту.

Оба предложенных метода должны не только повысить точность и согласованность ввода данных в компьютер, избежать множества шагов обработки исходных данных, но также обеспечить экономию времени.

На основании первого опыта использования компьютеров в медицине, [6] отмечает его достоинства и недостатки:

Компьютерные спирометры (1969 – 1973 годы)	
Достоинства	Недостатки
Устранение ошибок ручной обработки данных	Недооценка пусковых издержек
Возможность коллективного использования больших ЭВМ	Высокая стоимость сбоев и ремонтов компьютеров
Внедрение миникомпьютеров расширяет область применения методик диагностики	Использование громоздких языков программирования миникомпьютеров требует значительного времени

Обзор [6] завершается глобальным выводом: «Медицина вступила в компьютерную эру, и, несмотря на многие ловушки, которые ожидают неосторожных, на продублированные усилия в программировании, на преувеличенную рекламу неподходящего оборудования, компьютеры посодействовали медицинскому прогрессу. Будущее обещает еще больше восхитительных разработок. Хотя некоторые боятся этого, как дальнейшего признака обезличивания медицинской практики, эти машины являются инструментами врача и неспособны к независимым действиям. Компьютеры достигнут самых высоких целей в медицине, если мы примем на себя ответственность благоразумно применять их возможности».

Следующий этап автоматизации спирометрии, с начала 1970-х годов, отмечен применением миникомпьютеров, например, Wang 2200B-2 [7]. Устройство программируется на языке BASIC, имеет электронно-лучевой дисплей и печатный терминал в виде электрической пишущей машинки. Вся информация вводится через клавиатуру с возможностью коррекции ошибок. Оператор отвечает на стандартную серию вопросов программы, отобра-

жающихся на дисплее, выбирая тесты для выполнения пациентом. Протокол распечатывается в принятой стандартной форме и рассматривается как предварительное заключение, подлежащее утверждению врачом. Это сохраняет время врача, но не снимает с него ответственности за интерпретацию результатов теста.

Некоторые итоги применения компьютеров в спирометрии подведены дискуссией 1977 г. [8]. Подтверждено, что потребность в компьютеризации обусловлена необходимостью обработки данных и управления качеством. Определены основные области применения: системы профилактических обследований и тестирования в режиме «он-лайн»; системы контроля за процедурой теста; полные системы для функциональной лаборатории. Отмечено, что научно-исследовательские лаборатории применяют небольшие компьютеры для выполнения тестов в режиме «он-лайн». Считается, что такие системы используются неэффективно, поскольку основное время тратится на регистрацию сравнительно небольших объемов данных, и для них проблематичны попытки дальнейших разработок. Если же возникает необходимость анализа непрерывно измеряемых данных (мониторинга) или контроля качества теста, то их реализация без таких систем невозможна.

В качестве примера современной (1977 г.) компьютерной технологии приведена пакетная система обработки результатов тестов, вводимых персоналом в систему на бумажной ленте. Все вводимые данные проверяются программой, способной обнаружить ошибки транскрипции и подготовки данных. Вычислительные процедуры программы организованы в оверлейной структуре с отдельными подпрограммами для каждой логической группы данных. Система формирует два типа сообщения с интерпретационным комментарием (для лечащего врача и для передачи в другие лаборатории), а также создает рабочие еженедельные и архивные файлы для научно-исследовательских целей.

Исследование [9], выполненное в 1980 г., ставило своей целью определить возможности использования современных микропроцессоров для компьютеризации спирометрии. Микропроцессорный блок (емкость ROM = 10240 слов, емкость RWM = 2304 слова) был смонтирован в двух стандартных 5-дюймовых релейных стойках (рис. 3).

Ввод необходимых сведений (должные величины, рост, пол пациента, температура спирометра) производится оператором с клавиатуры. Над клавиатурой расположен дисплей, справа – 40-строчный принтер для распечатки

протокола теста (рис. 4). Результаты измерений в диапазонах до 10 л и 20 л/с преобразуются АЦП с разрядностью 512 бит, т.е. разрешение системы составляет $< 0,02$ л по объему и $< 0,04$ л/с по объемной скорости воздуха. Испытания блока, сопряженного с жидкостным спирометром «Collins», турбинным спирометром «K & L Engineering» и спирометром с трубкой Флейша «Dynasciences Medical Products» показали отличное совпадение результатов измерений в группе из 168 пациентов (коэффициенты регрессии от 0,944 до 0,999).



Рис. 3. Внешний вид микропроцессорного блока [9]

SPIROMETRY				FLOW/VOLUME PLOT	
PT. NO: 123456789		DATE: 6/21/79		VOL = .2 L FLO = .3 L/S	
HT: 72 AGE: 36		SEX: M TEMP: 25			
	ACTUAL	PRED	1/2PRED		
FVC	4.96	5.52	98		
FEV. 5	3.32	2.98	111		
FEV1	4.37	4.21	104		
FEV3	4.96	5.35	93		
FEFR	10.1	9.7	104		
FEF 25-75	4.41	4.27	103		
FEF 25%	9.86	8.5	116		
FEF 50%	5.73	6.00	96		
FEF 75%	2.53	3.12	81		
FEV. 5/FVC	67	54			
FEV1/FVC	88	76			
FEV3/FVC	100	97			
PRELIMINARY REPORT INDICATES SPIROMETRY IS WITHIN NORMAL LIMITS. BASED ON THESE FACTORS: FEF 25-75 1/2PRED > 70 FVC 1/2PRED > 80 FEV1/FVC 1/2PRED > 99 THIS IS NOT AN OFFICIAL INTERPRETATION					

Рис. 4. Образец протокола [9]

Анализируя аспекты внедрения микропроцессорной техники в спирометрию к 1980 г., авторы [9] отмечают, что его основная задача - анализ данных и формирование отчета с целью снижения стоимости и устранения ошибок тестов. Первоначально локальные терминалы подключались к удаленным компьютерам в режиме разделения времени, но эта схема вскоре была отвергнута, как неподходящая для «он-лайн» измерений. При этом необходимый ввод аналоговых данных, обычно на магнитной ленте, повышал риск ошибок, системы были громоздкими и дорогими. Позднее миникомпьютеры включались в системы, существенно снижавшие число

шагов, необходимых для извлечения полезных данных из измерений. Эти разработки стимулировались быстрым снижением размеров и стоимости компьютеров, обусловленным разработкой интегральных схем и микропроцессоров. Размеры компьютерных спирометров десятилетней давности уменьшились на два порядка, что сделало возможными новые методы исследований. Стоимость аппаратного обеспечения, в частности компонентов памяти, стала пренебрежимо малой. Это позволило заменять программируемые чипы, расширяя функциональные возможности и снижая моральный износ приборов. Кроме того, использование микропроцессоров фактически устранило проблемы эксплуатации и ремонта. Главной статьей эксплуатационных расходов становится программирование, поскольку языки для небольших компьютеров громоздки и требуют применения специальных программаторов. Уменьшение стоимости микропроцессоров позволяет использовать их в каждом приборе пульмонологической лаборатории, решая проблему одновременного тестирования нескольких пациентов. Специальный режим обеспечивает калибровку - ответственную процедуру, особенно при использовании преобразователей потока.

Авторы [2], оценивая свойства спирометрической аппаратуры, показали, что к 1980 г. более половины спирометров были оснащены микрокомпьютерами, причем до 75% стоимости прибора (\$ 5000-7000), составляет цена компьютера. Отмечается, что компьютерные системы обработки должны решить все проблемы спирометрии в будущем, когда уменьшение размеров и стоимости микропроцессоров, увеличение их быстродействия и надежности приведет к тому, что лаборатории будут все больше полагаться на компьютеры. Достоинства таких систем - экономия времени исследователя, простота использования, уменьшение количества ошибок, интерпретация результатов, возможность хранения данных; недостатки - высокая стоимость и сложность ремонта.

Что же касается централизованных ЭВМ, то, судя по [10,11], метод их использования предполагал дистанционный анализ и распечатки спирограмм на выходном терминале. Такой метод оценивался как малоэффективный и осложненный существенными недостатками [12]: проблемами совместного использования ЭВМ; необходимостью ввода и обработки данных сериями по 2-3 раза в день; увеличением искажений тестов из-за многократного обмена данными между терминалом и ЭВМ.

Достоинства компьютерных спирометров по мнению [12] значительно превосходят их недостатки, особенно при экономически обоснованной производительности - исследовании более пяти пациентов в день [13].

Компьютерные спирометры (1981...1984 годы)	
Достоинства	Недостатки
Экономия времени исследователя, снижение стоимости исследования	Пошаговое увеличение начальной стоимости оборудования
Простота использования и стандартизация процедуры	Необходимость более тщательной подготовки персонала
Значительное уменьшение ошибок измерений, выдача их результатов в реальном времени	Лимитирование гибкости в некоторых тестовых процедурах
Хранение информации, ее быстрый и эффективный поиск	Невозможность коррекции ПО пользователем
Внедрение автоматической калибровки и процедур контроля	Высокая стоимость (\$ 5000 ... 8000)
Стандартизованная интерпретация результатов	Сложный ремонт

Начиная с 1980 г., ведущие фирмы стали оснащать производимые ими спирометры специализированными микропроцессорными модулями (рис. 5), содержащими функциональную клавиатуру, программатор и термопринтер для распечатки протокола обследования.

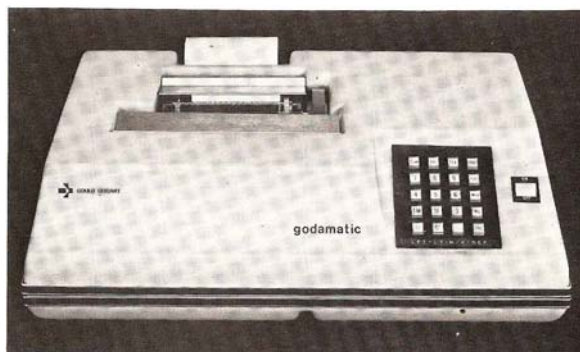


Рис. 5. Микропроцессорный модуль GODAMATIC фирмы Gould Godart

Разработка таких модулей совпала по времени с появлением в 1981 г. персональных компьютеров (ПК), пригодных по техническим и экономическим параметрам для использования в спирометрических комплексах. Одним из первых ПК такого типа нашел свое применение программируемый на языке BASIC блок Apex 420 (ROM = 2 кБ; RAM прямого доступа = 64 кБ; ГМД размером 8" и емкостью 250 кБ, хранивший

результаты спирометрии 60 пациентов). Позднее, к 1990 г., популярным стал компьютер IBM PS/2 30286 (RAM = 512 кБ; ГМД размером 3,5" и емкостью 1,44 МБ; ЖМД = 20 МБ).

В дальнейшем принцип создания спирометрических комплексов на базе ПК не изменился [14-18], совершенствовались только модели компьютеров, операционные системы (от Windows 3.1 до Windows XP) и языки программирования (Pascal, C, Delphi и т.п.) [19-22]. Кроме того, существенно изменилось соотношение стоимости составных частей современных комплексов: при общей цене до 2000 \$ за комплекс, доля ПК и периферийного оборудования (монитор, принтер) не превышает 40%.

Рассмотренные концепции автоматизации спирометров положили начало современным направлениям их разработок, которые в настоящее время характеризуются двумя вариантами компьютеризации.

В первом варианте обработка и регистрация информации выполняются ПК, снабженным пакетом ПО. Эффективное и рациональное использование современных ПК с высоким быстродействием, огромными вычислительными ресурсами и объемами памяти предусматривает формирование автоматизированных рабочих мест (АРМ) [23] для проведения комплекса диагностических исследований, ориентированных на применение в научно-исследовательских и диагностических центрах (рис. 6). Ввод данных в ПК [24] осуществляется либо через системную шину (рис. 7а), либо по последовательному интерфейсу (рис. 7б).



Рис. 6. Конфигурация АРМ спирометрии

Иногда системы этого типа содержат и ЦАП, используемый для автоматической балансировки измерительного канала. Такая схема достаточно универсальна и позволяет расширять

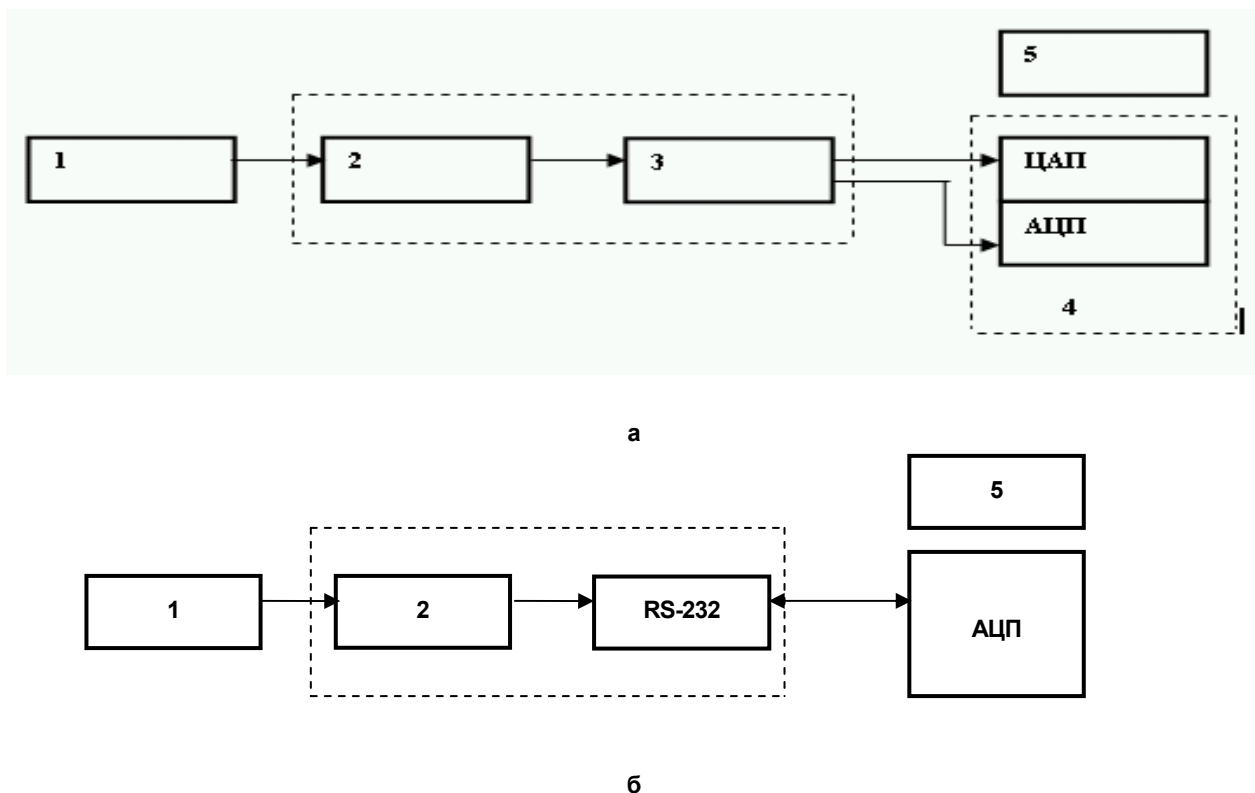


Рис. 7. Структурные схемы компьютерных спирометров [24]: 1 – приемник воздушного потока; 2 – преобразователь давления; 3 – усилитель сигнала; 4 – ПК; 5 – разделительный трансформатор

функциональные возможности прибора путем подключения к многоканальному АЦП других преобразователей (например, анализаторов состава дыхательных газов). Определенные неудобства представляет необходимость установки платы АЦП-ЦАП (или, как минимум, интерфейсной платы) в корпус системного блока ПК.

При использовании последовательного интерфейса конструкция системы может быть портативной, однако подключение дополнительных преобразователей к системе вызывает существенные трудности.

В современных конструкциях компьютерных систем спирометрии эта проблема снимается соединением прибора с ПК через разъем USB [25].

Во втором варианте используется микропроцессорный контроллер, программируемый на обработку результатов наиболее информативных тестов. Такие автономные и портативные приборы, оснащенные жидкокристаллическим дисплеем и термопринтером (рис. 8), составляют основу современного аппаратного обеспечения спирометрии и ориентированы на использование в самой широкой сети медицинских учреждений [26].

Современные направления совершенствования компьютерной спирометрии следуют общим тенденциям развития микропроцессорной техники.

Повышение объема памяти, быстродействия, степени интеграции и микроминиатюризация устройств на фоне стремительного снижения их стоимости определяют перспективу

сближения конструктивных исполнений обоих вариантов компьютерных спирометров, вплоть до полной унификации на базе «карманных ПК» (рис. 9).



Рис. 8. Микропроцессорные спирометры: а) СПИРОС -100 [27], б) Spirolab II [28]

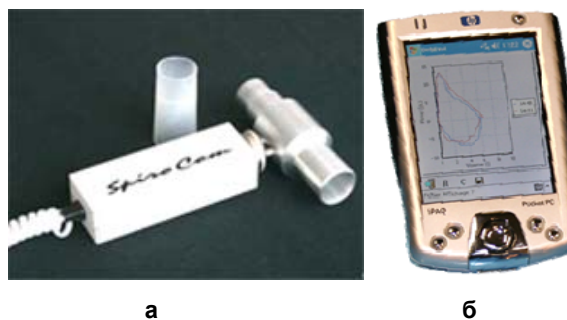


Рис. 9. Составные части спирометрического комплекса SpiroCom на базе «карманного» ПК [29]: а) измерительный блок; б) КПК

Выводы

1. Современное аппаратное обеспечение спирометрии составляют приборы двух конструктивных исполнений – сопрягаемые с ПК и автономные микропроцессорные спирометры.

2. Общие тенденции развития микропроцессорной техники определяют перспективу полной унификации компьютерных спирометров на базе «карманных ПК».

3. Очевидно, что разработки оригинальных микропроцессорных устройств для спирометрии уступят место разработке технологий беспроводных коммуникаций измерительного блока спирометра с ПК, а акцент инноваций будет перенесен в область создания ПО спирометрии.

Литература

1. *Хасис Г.Л.* Показатели внешнего дыхания здорового человека. Часть I. - Кемеровское книжное изд-во, 1975. - 250 с.
2. *Gardner R.M.* et al. Evaluating commercially available spirometers. - Amer. Rev. Resp. Dis., 1980, v.121, № 1, p.73-82.
3. *Shonfeld E.M.* et. al. Methodology for computer measurement of pulmonary function curves. - Chest, 1964, v.46, № 4, p.427-434.
4. *Hodes Ch.* The computer and screening techniques in general practice. - J. Roy. Coll. Gen. Practit., 1969, v. 18, p. 330-335
5. *Moser K.M.* et al. Practical Computer Program for Routine Spirometric Testing Using the "Time-Sharing" Concept. - Chest, 1969, 56, 2, 92-97.
6. *Mittman Ch.* Computers in Medicine: Boon or Boondoggle? - Chest, 1973, 64, 4, 418-419
7. *Ellis J.H., Jr.* et. al. A computer program for calculation and interpretation of pulmonary function studies. - Chest, 1975, v.68, № 2, p.209-213.
8. *Pack A.* et al. Application of Computers to Automation of Pulmonary Function Tests. - Proc. roy. Soc. Med., 1977, v. 70, p. 171-172
9. *Black K.H.* et al. A general purpose microprocessor for spirometry. - Chest, 1980, v. 78, № 4, p. 605-612.
10. *Gardner R.M.* et. al. Spirometry: what paper speed? - Chest, 1983, v.84, № 2, p.161-165.
11. *Lewis F.J.* et al. Analysis of respiration by an on-line digital computer system: clinical data following thoracoabdominal surgery. - Annals of Surgery, 1966, v.164, № 4, p.547-556.
12. *Tanser A.R.* The use of a micro-computer system in a lung function testing laboratory. - Brit. J. Dis. Chest, 1982, v.76, № 1, p.130-136.
13. *Gardner R.M., Crapo R.O.* Pulmonary function testing in the office, in the clinic and in group screening. - Futura Publishing Co., Mount Cisco, NY, 1983.
14. *Chowienczyk P.J., Rees P.J., Clark T.J.* Automated system for the measurement of airways resistance, lung volumes and flow-volume loops. - Thorax, 1981, v. 36, p. 944-949.
15. *Gardner R.M.* et al. Computerized decision-making in the pulmonary function laboratory. - Respir. Care, 1982, v. 27, № 7, p. 799-816.
16. *Larson J.K.* Computer-assisted spirometry. - Respir. Care, 1982, v. 27, № 7, p. 839-841.
17. *Gardner R.M.* et al. Quality assurance in pulmonary function laboratories. Proposed ATS recommended guidelines. - ATS News, 1984, v. 10, № 2, p. 4-5.
18. *Als A.B.* The desk-top computer as a magic box: patterns of behaviour connected with the desk-top computer; GPs' and patients' perceptions. - Family practice, 1997, v. 14, № 1, p. 17-23.
19. *Ganguli A.K.* Development of software for computer-assisted interpretation of pulmonary function tests. - Indian J. Physiol. Pharmacol., 1990, v. 34, № 4, p. 271-276.
20. *Verbraak A.F.* et al. A lung function information system. - J. Biomed. Eng., 1991, v. 13, № 1, p. 27-34.
21. *Aggarwal A.N., Gupta D., Jindal S.K.* Development of a simple computer program for spirometry interpretation. - J. Assoc. Physicians India, 2002, 50, № 4, p. 567-570.
22. *Ross R.M., Corry D.B.* Software for interpreting cardiopulmonary exercise tests. - BMC Pulmonary Medicine, 2007, v. 7, № 15, p. 1-9
23. *Ищенко А.М., Ткаченко В.Л., Лопата В.А.* Медико-технические проблемы создания АРМ кардиореспираторной диагностики // Автоматизированное рабочее место врача: Сб. докладов Международной научно-практической конференции, 15 октября 2002 г.- Днепропетровск, с.88-90.
24. *Сивачев А.В.* Компьютерные спирометры (анализ конструктивных решений). - Мед. техника, 1994, № 4, с.28-31.
25. *Alejos-Palomares R.* et al. Digital Spirometer with LabView Interface. - Electronics, Communications and Computers, 2008. CONIELECOMP-2008, 18th International Conference, 3-5 March 2008, p. 105 – 110.
26. *Лопата В.А., Сахно Ю.Ф.* Многоуровневая система спирометрической аппаратуры. - Функциональная диагностика, 2003, № 2, с.52-55.
27. <http://www.altonika.ru/detail.php?id=201>
28. http://www.spirometry.com/Download/Manuals/new_download_manual.asp?device=spirolab&doc=brochures&txtFile=spirolab_ENG_01_rev0.pdf
29. <http://www.xai-medica.com/spirometry/>