

**Оптический метод регистрации пространственного положения хирургического инструмента в компьютерной навигационной системе / М. Ю. Тымкович // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ», – 2013. – № 18 (991). – С. 124-130. – Бібліогр.: 14 назв.**

В роботі розглядаються основні складові частини хірургічної навігаційної системи. Такі системи складаються із підсистеми візуалізації, реєстрації положення. Одна із основних частин комп'ютерної навігаційної системи – підсистема реєстрації положення. Розглянуто основні етапи визначення положення хірургічного інструмента у просторі. Розроблено відповідні частини хірургічної навігаційної системи.

**Ключові слова:** хірургічна навігація, хірургічний інструмент, калібрація камери.

The paper considers the main components of a surgical navigation system. These systems are composed of subsystems visualization and determination of position. Subsystem determination of a position is a one of the main parts of computer navigation system. Were considered the main stages of determination the surgical instrument in space. Have been developed the suitable parts of the surgical navigation system.

**Keywords:** surgical navigation, surgical instrument, camera calibration.

## УДК 615.47

**Е. И. СОКОЛ**, чл.-корр. НАНУ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;  
**Р. С. ТОМАШЕВСКИЙ**, канд. техн. наук, старш. преп., НТУ «ХПІ»;  
**В. А. МАКАРОВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

### **МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРОМЕТРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ СЕМЕЙНОЙ МЕДИЦИНЫ**

В статье показаны современные тенденции развития технического обеспечения семейной медицины, в частности в области пульмонологии, и определены основные требования к спирометрам. В ходе аналитического обзора в качестве датчика для портативного спирометра был выбран турбинный преобразователь потока. В работе был обоснован метод повышения чувствительности и улучшения частотных свойств спирометра на этапе получения диагностической информации. Для снижения инструментальной погрешности был разработан программный метод динамической компенсации ошибки и рассмотрены возможные способы определения поправочных коэффициентов. По результатам исследований математической модели определена функция, описывающая передаточную характеристику измерительной турбины, и разработана методика калибровки спирометра, работающего с таким типом датчика.

**Ключевые слова:** спирометр, турбинный преобразователь потока, инструментальная погрешность, методы коррекции, динамическая компенсация ошибки, измерительная турбина.

**Введение.** Сегодня, в условиях активного развития сектора семейной медицины, особое внимание уделяется экспресс-методам функциональной диагностики и лабораторной аналитики. Основной причиной этого является высокое соотношение информативности подобных методов к их ресурсоемкости. На примере развитых государств показано, что до 80 % заболеваний, с которыми пациенты обращаются к врачу, могут быть диагностированы с применением лишь амбулаторного

обследования и определённых лабораторных и функциональных методов [1]. В свою очередь, это позволяет быстрее начать терапию, а, следовательно, уменьшить время лечения и снизить медикаментозную нагрузку на организм пациента. Другая причина повышенного внимания к этим экспресс-методам – возможность диагностического контроля процесса терапии, что, в большинстве случаев, позволяет создать гибкий курс лечения.

Одним из основных методов, применяемых для экспресс-диагностики дыхательной системы, является спирометрия [2]. И хотя в медицинской практике она используется в основном при проведении профилактических осмотров (в рекомендациях ВОЗ спирометрия признана обязательной для скрининговых обследований), спирометрия также может быть применена в комплексе процедур для сложных функциональных исследований органов дыхания. Суть данного метода состоит в измерении объемов воздуха и объемных скоростей воздушного потока, так называемых параметров функции внешнего дыхания (ФВД), на различных этапах выполнения дыхательного теста. Анализ результатов обследования производится в соответствии со статистическими данными, типичными для антропометрической группы и региона проживания пациента. При этом основная нагрузка по измерению параметров ФВД и их интерпретации ложится на технические средства – спирометры [3]. Такие приборы относятся к медицинским средствам измерения, что в свою очередь устанавливает нормы по достоверности получаемой диагностической информации. Для применения в семейной медицине к спирометрам также предъявляются и специфические требования: портативность, автономность, функциональность, легкость калибровки, простота дезинфекции, совместимость с персональным компьютером.

**Цель работы.** Проведенный анализ литературных источников показал, что обеспечение достоверности диагностики средствами портативной спирометрической аппаратуры является перспективной и актуальной задачей. Таким образом, целью данной работы является разработка методов улучшения технических характеристик прибора для исследования функции внешнего дыхания, соответствующего требованиям к аппаратному обеспечению семейной медицины.

**Выбор датчика и определение задач.** Обзор медицинской техники показал, что выполнение вышеуказанных требований в спирометрической аппаратуре возможно за счет использования определенного типа датчика и микропроцессорной системы обработки информации и управления [4]. Наиболее целесообразно, с точки зрения авторов, является измерение расхода воздуха тахометрическим методом и использование для этого турбинного преобразователя потока (ТПП). Тахометрический метод измерения расхода представляет собой преобразование объемной скорости воздушного потока во вращение ротора, с последующим измерением его угловой скорости. ТПП имеет функцию преобразования в рабочем диапазоне близкую к линейной, довольно низкое пневматическое сопротивление, хорошие массогабаритные и стоимостные показатели. Кроме того, данный тип датчика позволяет проводить измерения, как на вдохе, так и на выдохе, а использование одно-разовых сменных турбин упрощает процесс дезинфекции.

Повышение точности и чувствительности спирометра с ТПП возможно за счет уменьшения интервалов дискретизации по типу преобразователей угол-код

(энкодеров) [5]. Отсутствие исследований о влиянии технологического разброса геометрических параметров ТПП на точность преобразования, ставит задачу математического описания и моделирования данного процесса.

Точное восстановление входной функции по полученным данным возможно лишь в случае адекватного математического описания статических и динамических свойств измерительного преобразователя [6]. Такое описание позволит не только определить передаточную функцию ТПП, но и даст возможность разработать методику определения коэффициентов для каждой индивидуальной измерительной турбины, а, следовательно, существенно упростить процесс калибровки.

**Реализация метода повышения точности и чувствительности на этапе получения диагностической информации.** Для реализации метода была предложена схема измерительной части портативного спирометра, которая представляет собой последовательное соединение следующих измерительных преобразователей: измерительной турбины (ИТ), оптического тахометрического преобразователя (ОТП), импульсно-цифрового преобразователя (ИЦП). Проведенные исследования [5] показали, что увеличивая коэффициент передачи ТПП, а, следовательно, уменьшая интервал усреднения сигнала, возможно повышение чувствительности измерительного канала спирометра и улучшение его частотных свойств. Для обеспечения предложенного метода был проведен детальный анализ конструкции ТПП, и разработаны способы ее модернизации. Эти способы, в первую очередь, основаны на увеличении количества  $n$  информационных импульсов за один оборот ротора турбины, и могут быть реализованы за счет использования нескольких оптических пар ОТП или лепестков ротора ИТ [7]. Информационным параметром при этом будет период следования импульсов  $T = 1/f \cdot n$ , где  $f$  – частота вращения ротора.

Для снижения инструментальной погрешности при разработке конструкции ТПП необходимо выполнение следующих соотношений:

$$r = \sum_{k=1}^l r_k / l; \quad L = r \cdot \cos \frac{\pi}{2 \cdot l}; \quad \gamma = \frac{\pi}{m \cdot l} \quad (1)$$

где  $r$  – длина лепестка ротора;  $L$  – минимальное расстояние от центра ИТ до оптического луча ОТП;  $\gamma$  – угол между осями оптических пар;  $l$  – количество лепестков ротора;  $m$  – количество оптических пар.

В работе [8] была проведена количественная оценка, путем математического моделирования процесса преобразования, влияния технологического разброса при выполнении указанных соотношений (1) и влияния эксплуатационного износа. Первый фактор необходимо учитывать при использовании одноразовых (сменных) спирометрических турбин, второй – при использовании многоразовых. На основании проведенных исследований установлено, что при теоретически возможном значении технологического разброса и износа  $\pm 5\%$  наибольшее значение инструментальной погрешности измерения мгновенного значения расхода  $q_i$  составит порядка 20 %.

Для снижения такой погрешности в работе [9] был предложен метод динамической компенсации ошибки (МДКО). Суть этого метода состоит в определении поправочных коэффициентов на участках дискретной функции  $q_i(t_i)$  измеряемого сигнала, и последующей коррекции полученных данных. Отклонения в значениях параметров  $r$ ,  $L$ ,  $\gamma$  влияют на точность измерения мгновенных значений расхода  $q_i$ ,

определяемого в моменты времени  $t_i$ , в то время как среднее значение расхода

$$Q_{CP j} = \sum_{i=0}^{j-n..j} q_i / n, \quad (2)$$

определяемое за  $j$ -й период оборота ротора  $T_j$ , от них не зависит. Так как функция преобразования ТПП с определенными допущениями может быть рассмотрена как линейная и записана в виде:

$$\varphi_j = K \cdot Q_{CP j}, \quad (3)$$

где  $\varphi_j$  – значение частоты следования информационных импульсов;  $K$  – коэффициент передачи ТПП с ОТП, то значения измеряемых временных интервалов  $\tau_i = t_i - t_{i-1}$  будут обратно пропорциональны значению расхода  $q_i$ . Поправочные коэффициенты  $g_i$ , при этом, могут быть определены как отношение полученного значения временного интервала к расчетному, равному  $T_j/n$

$$g_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{T_j / n}. \quad (4)$$

Такой способ определения поправочных коэффициентов может быть использован только на линейных участках функции измеряемого сигнала, а, следовательно, его использование ограничено [10].

Расширить диапазон использования МДКО возможно при использовании в качестве аппроксимирующей функции, не линейной зависимости, а полинома более высокого порядка [9]. Для исключения неоднозначности на границах участка функции, предлагается расширить его в  $N$  раз, например до трех оборотов ротора ТПП: от начала  $T_{j-1}$  до окончания  $T_{j+1}$ . Тогда, решая систему уравнений

$$\begin{cases} a_{0i} + a_{1i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i} + a_{2i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^2 = \sum_{N=-1}^1 T_{(j+N)}; \\ a_{0i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i} + a_{1i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^2 + a_{2i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^3 = \sum_{m=-1}^1 T_{(j+N)} t_{(j+N)i}; \\ a_{0i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^2 + a_{1i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^3 + a_{2i} \sum_{N=-1}^1 t_{(j+N)i}^4 = \sum_{N=-1}^1 T_{(j+N)}^2 t_{(j+N)i}, \end{cases} \quad (5)$$

становится возможным определить коэффициенты  $a_{ji}$  полинома. По полученным коэффициентам может быть определено значение искомого временного интервала

$$\tau_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2. \quad (6)$$

Поправочные коэффициенты также могут быть получены путем нахождения так называемых «центров масс» на участке функции равном обороту ротора [11]. Умножив левую и правую части выражения (3) на  $T_j$  и преобразовав его, можно определить объем воздуха, проходящий за один оборот ротора  $V_j = V_{OB} = 1/K = const$ .

При увеличении количества  $n$  информационных импульсов за один оборот ротора турбины, количество «центров масс» будет также равно  $n$ , при этом поправочные коэффициенты  $G_i$  могут быть вычислены исходя из условия равенства интегралов функции объему  $V_{OB}/n$

$$G_i = \frac{S_i}{V_{iA} / n} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} q_i \cdot dt / V_{iA} / n. \quad (7)$$

Данный способ позволяет получать значения поправочных коэффициентов наиболее точно, однако требует большой производительности микропроцессорной системы.

### Методика калибровки портативного спирометра с учетом реальной функции преобразования

Для определения основных показателей ФВД необходимо математическое восстановление входного сигнала, который представляет собой импульсную последовательность. Однако такое восстановление невозможно без определения передаточной функции каждого звена измерительного канала спирометра, особенно ИТ. Для этого, в результате анализа были определены основные моменты сил, действующих на ротор турбины, и получены их аналитические выражения, что позволило математически описать статическую функцию преобразования ИТ [6]. В ходе работы были установлены значения расходов (диапазон 0,2-1 л/с), в котором происходит смена режима течения потока воздуха через ИТ с ламинарного на турбулентный. Исследование динамических свойств ротора измерительной турбины позволили установить, что он является аperiодическим звеном первого порядка и может быть описан соответствующей динамической характеристикой.

В результате исследований [12] получено выражение которое описывает передаточную функцию спирометрической ИТ, причем относительная погрешность не превышает 4,5 % в диапазоне расходов 0,1-0,5 л/с, и 2 % в диапазоне расходов 0,5-10 л/с:

$$q_i = b_1 + \frac{b_2}{\tau_i} + \frac{b_3}{\sqrt{\tau_i}} \left( b_4 \cdot \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\tau_i \cdot \tau_{i-1}} + 1 \right), \quad (8)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – расчетные коэффициенты.

На основе полученной функции (см. выражение (8)) была разработана методика определения коэффициентов  $b_i$  [13]. Определение значений коэффициентов проводится в два этапа, на которых условно разделяются статическая и динамическая составляющие передаточной функции.

Первый этап калибровки состоит в определении коэффициентов  $b_1, b_2, b_3$  выражения (8) и проводится в следующей последовательности:

- подача на вход ТПП  $m$  постоянных расходов  $Q_{CT}$ , во всем диапазоне их измерения (0,1-14 л/с);
- вычисление значений  $b_1, b_2, b_3$  путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} b_1 + b_2 / \tau_1 + b_3 / \sqrt{\tau_1} = Q_{CT1}; \\ b_1 + b_2 / \tau_2 + b_3 / \sqrt{\tau_2} = Q_{CT2}; \\ \dots \\ b_1 + b_2 / \tau_m + b_3 / \sqrt{\tau_m} = Q_{CTm}, \end{cases} \quad (9)$$

Второй этап калибровки заключается в нахождении постоянной времени преобразователя, которая численно равна коэффициенту  $b_4$ . и проводится следующим образом:

- подача вход ТПП  $k$  фиксированных объемов  $V_\phi$  воздуха с различными законами изменения скорости  $q(t)$  потока;
- определение коэффициента  $b_4$  путем решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \left( b_1 + \frac{b_2}{\tau_{1,i}} + \frac{b_3}{\sqrt{\tau_{1,i}}} \left( b_4 \cdot \frac{\tau_{1,i} - \tau_{1,i-1}}{\tau_{1,i} \cdot \tau_{1,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{\tau_{1,i}} \right) = V_\delta; \\ \sum_{i=1}^n \left( b_1 + \frac{b_2}{\tau_{2,i}} + \frac{b_3}{\sqrt{\tau_{2,i}}} \left( b_4 \cdot \frac{\tau_{2,i} - \tau_{2,i-1}}{\tau_{2,i} \cdot \tau_{2,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{\tau_{2,i}} \right) = V_\delta; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \left( b_1 + \frac{b_2}{\tau_{k,i}} + \frac{b_3}{\sqrt{\tau_{k,i}}} \left( b_4 \cdot \frac{\tau_{k,i} - \tau_{k,i-1}}{\tau_{k,i} \cdot \tau_{k,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{\tau_{k,i}} \right) = V_\delta. \end{array} \right. \quad (10)$$

Исследования, проведенные в специализированном инженерном пакете Flow Simulation [6], подтвердили работоспособность предложенной методики. Погрешность преобразования для полученной передаточной функции компьютерной модели ИТ не превысила 3 % для объемного показателя (ОФВ1), 2,9 % для скоростного (ПОС) и 1,5 % для временного показателя ( $T_{\text{ПОС}}$ ).

**Выводы.** Программные методы повышения точности, чувствительности и методика калибровки были использованы при разработке и производстве цифрового портативного спирометра в «РАДМИР» ДП АО НИИРИ (г. Харьков). Экспериментальные исследования опытного образца цифрового портативного спирометра, показали, что погрешность измерения постоянных расходов в заданном диапазоне не превышает 3 %; погрешность измерения эталонного объема составила: для 1 л – не более 1,5 %, а для 3 л – не более 3 %. Медицинская апробация спирометра показала, что он полностью соответствует своему медицинскому назначению, имеет высокую эффективность, безопасен при эксплуатации и может быть рекомендован к использованию в практике медицинских учреждений Украины.

**Список литературы: 1.** Общая врачебная практика (семейная медицина): проблемы и перспективы / Материалы третьей научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры общей врачебной практики (семейной медицины) и поликлинической терапии. - Хабаровск: Издательство ДВГМУ, 2011. – 227 с. **2.** Сахно Ю. Ф. Исследование вентиляционной функции легких: учебно-методическое пособие / Сахно Ю. Ф., Дроздов Д. В., Ярцев С. С. – М.: Издательство РУДН, 2005. – 83 с. **3.** Lung function tests: Physiological principles and clinical applications / Ed. By J. M. B. Hughes, N. B. Pride. – London ttc.: Saunders, 1999. – 314 p. **4.** Сокол Е. И. Спирометрия. Ее техническое обеспечение. Проблемы и перспективы / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Р. С. Томашевский // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2008. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 3. – С. 119-124. **5.** Сокол Е. И. Измерительная система современного спирометра и пути ее совершенствования / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский, Е. И. Король // Вестник НТУ ХПИ «Новые решения в современных технологиях». – Харьков, 2009. – №37. – С.22-25. **6.** Кипенский А. В. Математическое моделирование процессов в турбинном преобразователе потока портативного спирометра / А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский // Вестник НТУ ХПИ «Математические методы в технике и технологиях». – Харьков, 2012. – №54. – С.86-98. **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.** *Томашевский П.С.* Улучшение технических показателей портативного спирометра с турбинным преобразователем потока / *П.С. Томашевский* // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2010. – Т. 9. – С. 569-573. **9.** *Сокол Е. И.* Адаптивный метод снижения инструментальной погрешности турбинного датчика в процессе его эксплуатации / *Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Р. С. Томашевский* // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2010 Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – С. 265-268. **10.** *Сокол Е. И.* Анализ методов программной коррекции результатов измерений, полученных с помощью турбинного преобразователя потока в спирометрической аппаратуре / *Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский* // Вестник НТУ ХПИ «Новые решения в современных технологиях». – Харьков, 2012. – №50. – С.146-153. **11.** *Макаров В.А.* Формирование точек коммутации синусоидальной ШИМ микропроцессорными средствами / *В.А. Макаров, А.П. Ластовка* // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2012 Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.1. – С. 81-86. **12.** *Сокол Е. И.* Определение функции преобразования спирометрического турбинного преобразователя потока / *Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский* // Сборник научных трудов 3-го международного радио-электронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Т. III. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2011. – С.108-110. **13.** *Сокол Е. И.* Проблемы калибровки портативных спирометров с турбинным преобразователем потока / *Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский* // Матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Ч. II – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – С. 181. **14.** *Сокол Е. И.* Цифровой портативный спирометр с турбинным преобразователем воздушного потока / *Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский, Е. И. Король* // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2011 Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – С. 265-268.

*Надійшла до редколегії 15.03.2013*

УДК 615.47

**Методы улучшения технических характеристик спирометров применительно к задачам семейной медицины / Е. И. Сокол, Р. С. Томашевский, В. А. Макаров** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ», – 2013. - № 18 (991). – С. 130-136. – Бібліогр.: 14 назв.

У статті показані сучасні тенденції розвитку технічного забезпечення сімейної медицини, зокрема в області пульмонології, та визначено основні вимоги до спірометрії. У ході аналітичного огляду в якості датчика для портативного спірометра був обраний турбінний перетворювач потоку. У роботі був обґрунтований метод підвищення чутливості і поліпшення частотних властивостей спірометра на етапі отримання діагностичної інформації. Для зниження інструментальної похибки був розроблений програмний метод динамічної компенсації помилки і розглянуто можливі способи визначення поправочних коефіцієнтів. За результатами досліджень математичної моделі визначена функція, що описує передавальну характеристику вимірювальної турбіни, та розроблено методику калібрування спірометра, що працює з таким типом датчика.

**Ключові слова:** спірометр, турбінний перетворювач потоку, інструментальна похибка, методи корекції, динамічна компенсація помилки, вимірювальна турбіна.

The article shows the current trends of technical support of family medicine, in particular in the field of pulmonology, and the main requirements for spirometry. In the research report as a sensor for a portable spirometer was chosen turbine flow transducer. In this paper the method has been proved to increase the sensitivity and improve the frequency characteristics of the spirometer at the stage of obtaining diagnostic information. To reduce the instrumental error was developed by the program method of dynamic error compensation, and considers possible ways to determine the correction factors. According to the research of the mathematical model defined function that describes the transfer characteristic of the turbine meter, and developed a method of calibrating the spirometer working with this type of sensor.

**Keywords:** spirometer, turbine flow converter, instrumental error, correction method, dynamic error compensation, measuring turbine.