

УДК 615.47

Е. И. СОКОЛ, чл.-корр. НАНУ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков;

А. В. КИПЕНСКИЙ, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков;

Р. С. ТОМАШЕВСКИЙ, ассистент, НТУ «ХПИ», Харьков

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГРАММНОЙ КОРРЕКЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТУРБИННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОТОКА В СПИРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

В статье с целью снижения инструментальной погрешности предложены и описаны методы математической коррекции результатов измерений, полученных с помощью турбинного

преобразователя потока. Проведен анализ частотных свойств такого преобразователя и определено влияние на результаты преобразования предложенных методов. На основании анализа были сделаны выводы о специфике предложенных методов и показана целесообразность использования каждого из них в спирометрической аппаратуре. Ил.: 5. Библиогр.: 8 назв.

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

Введение. Среди огромной номенклатуры технических средств исследования функции внешнего дыхания особое место занимают портативные спирометры. Такие приборы не требуют дополнительного оборудования в кабинетах функциональной диагностики, позволяют проводить скрининговые обследования населения вне медицинского учреждения и удобны в эксплуатации [1]. С учетом современных тенденций развития сектора домашней медицины в системе здравоохранения, задача повышения качества портативных спирометров является весьма актуальной.

Наиболее часто в портативной спирометрической аппаратуре в качестве датчика используется турбинный преобразователь потока (ТПП), поскольку он имеет ряд неоспоримых достоинств: хорошие массогабаритные показатели, низкое пневматическое сопротивление, устойчивость к санитарной обработке [2]. Однако согласно требованиям ведущих пульмонологических организаций спирометр должен обладать высокой чувствительностью и хорошими частотными свойствами [3]. В работах [4, 5] были предложены конструктивные способы улучшения этих параметров в измерительном канале спирометра с ТПП. Эти способы, в первую очередь, основаны на увеличении количества n информационных импульсов за один оборот ротора турбины. Информационным параметром при этом будет период следования импульсов $T = 1/f \cdot n$, где f – частота вращения ротора.

Постановка задачи исследований. Влияние технологического разброса параметров ТПП при изготовлении и износа его элементов в процессе эксплуатации может вносить в результаты измерений текущего значения частоты f вращения ротора существенную погрешность, которую принято называть инструментальной. Это в свою очередь повысит погрешность определения скорости потока q . В работе [6] было показано, что при

отклонении размеров элементов ТПП и их взаимного расположения, относительно расчетных, на 5 % погрешность измерения текущего значения частоты f может достигать 20 % при неизменном значении погрешности определения ее среднего значения.

Для коррекции результатов измерений ТПП был предложен ряд программно-математических методов обработки: метод скользящего среднего (МСС), метод предварительной калибровки (МПК) и метод динамической компенсации ошибки (МДКО) [7].

Суть первого метода состоит в определении периода следования импульсов T , как среднего арифметического на интервале равном одному обороту ротора:

$$T_{MCC} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T'_j, \quad (1)$$

где T' – измеренное значение периода следования информационных импульсов.

Второй метод основан на коррекции результатов измерения с помощью поправочных коэффициентов g , которые определяются на этапе производственной калибровки:

$$T_{MПК} = T' \cdot g. \quad (2)$$

Третий метод (МДКО) представляет собой некоторую модификацию МПК. Здесь коррекция производится также путем умножения T' на соответствующие поправочные коэффициенты, однако они определяются не на этапе производственной калибровки, а в процессе эксплуатации спирометра. При этом вычисление коэффициентов производится на участках входного сигнала близких к линейным, а для устранения случайной погрешности используются цифровой фильтр 1-ого порядка с бесконечной импульсной характеристикой и медианный фильтр [7].

Цель данных исследований состоит в анализе предложенных методов коррекции, проводимом путем сопоставления их частотных свойств и точности преобразования, то есть с учетом критериев и требований ведущих пульмонологических организаций. Ввиду технической сложности проведения натуральных экспериментов, исследования проводились на математической модели ТПП.

Математическая модель ТПП. ТПП представляет собой последовательное соединение нескольких измерительных преобразователей: измерительная турбина,

тахометрическое устройство, преобразователь электрического сигнала. Для создания адекватной математической модели и проведения экспериментов необходим анализ процессов, происходящих в ТПП на этапе преобразования частоты вращения ротора в электрический сигнал. В данной работе исследуется модель ТПП с двухлепестковым ротором и двумя оптическими парами с инфракрасными (ИК) излучающими диодами и фотоприемниками (рис. 1). Это позволяет за один оборот ротора формировать 8 информационных импульсов.

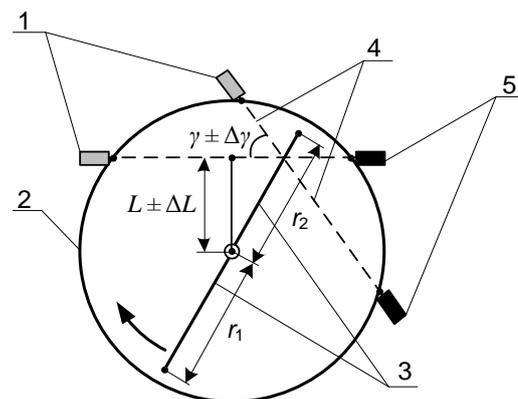


Рис. 1. Конструкция ТПП: 1 – излучающие диоды; 2 – прозрачный корпус измерительной турбины; 3 – лепестки ротора; 4 – траектории ИК-лучей; 5 – фотоприемники

Детально процессы преобразования в ТПП с такой конструкцией были описаны в работе [6], а временные диаграммы приведены на рис. 2. Процесс движения лепестков ротора относительно оптических пар может быть описан системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1(t) = r_2 \cdot \sin \alpha(t); \\ x_2(t) = r_1 \cdot \sin[\alpha(t) + \pi]; \\ x'_1(t) = r_2 \cdot \sin[\alpha(t) + \gamma]; \\ x'_2(t) = r_1 \cdot \sin[\alpha(t) + \pi + \gamma], \end{cases} \quad (3)$$

где $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – функции движения лепестков (длиной r_1 и r_2) ротора относительно угол поворота ротора.

Как видно из рис. 2 электрические импульсы $u_{ВЫХ}$ на выходе устройства формируются в момент пересечения одной из функций $x(t)$ луча ИК-излучения, находящегося на расстоянии L от центра турбины. То есть, подставив

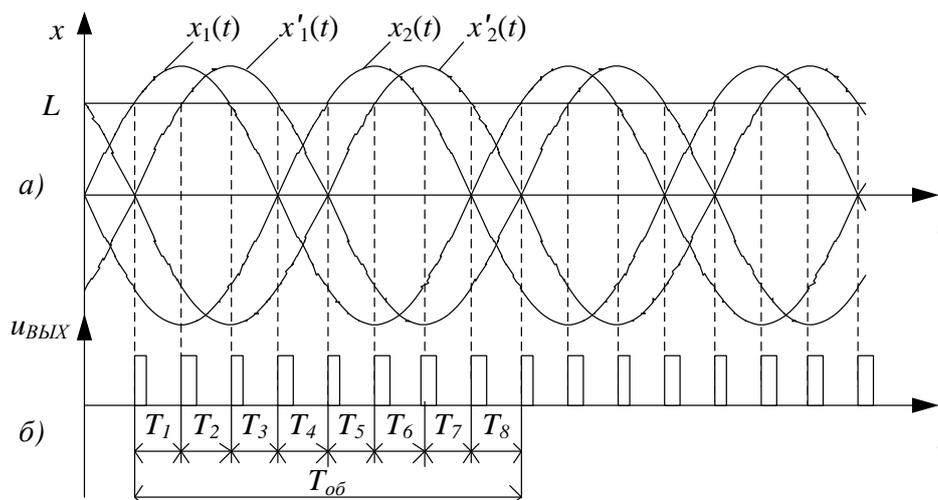


Рис. 2. Временные диаграммы процесса преобразований в ТПП

L в левую часть системы уравнений (3) и

решив ее, возможно определить моменты времени формирования электрических импульсов на выходе тахометрического устройства.

Для учета влияния технологического разброса с систему уравнений были введены дополнительные переменные: Δr – разница между длинами лепестков ротора r_1 и r_2 , ΔL – отклонение расстояния ИК-луча от центра турбины, $\Delta\gamma$ – отклонение угла смещения между осями оптических пар (рис. 1). Каждое из перечисленных отклонений может достигать 0,025 от расчетных значений.

С учетом вышесказанного система уравнений (3) приобретает вид:

$$\begin{cases} L(1 \pm \Delta L) = r(1 \pm \Delta r) \cdot \sin \alpha(t); \\ L(1 \pm \Delta L) = r \cdot \sin[\alpha(t) + \pi]; \\ L(1 \pm \Delta L) = r \cdot \sin[\alpha(t) + \gamma(1 \pm \Delta\gamma)]; \\ L(1 \pm \Delta L) = r(1 \pm \Delta r) \cdot \sin[\alpha(t) + \pi + \gamma(1 \pm \Delta\gamma)]. \end{cases} \quad (4)$$

В процессе моделирования была упрощена функция преобразования измерительной турбины, в частности, не учитывалось влияние параметров воздуха и режимов его протекания. В данных исследованиях эта функция описывается линейной зависимостью вида:

$$q(t) = a + \frac{\omega(t)}{\varphi}, \quad (5)$$

где $q(t)$ – объемная скорость воздуха; φ – передаточный коэффициент измерительной турбины; $\omega(t)$ – угловая скорость ротора; a – постоянная смещения.

При этом выражение для определения угловой скорости ротора турбины может быть представлено в виде:

$$\omega(t) = 2\pi \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}. \quad (6)$$

В процессе проведения исследований изменения расхода воздуха задавали в диапазоне от 0,1 до 14 л/с, который соответствует большинству спирометров. Коэффициенты φ и a принимали равными 229,3 и 0,0092, исходя из результатов экспериментальных исследований измерительной спирометрической турбины фирмы MIR (Италия). Длина лепестков ротора в такой турбине равна 12 мм. С учетом предложенной конструкции тахометрического устройства [5], расстояние L составило 8,49 мм, а угол γ между осями оптических пар – $\pi/4$. При этом максимальная частота вращения ротора будет достигать 511 Гц.

Исследование частотных свойств ТПП с различными методами коррекции. Оценка частотных свойств ТПП производилась на основании анализа его амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при использовании различных методов коррекции результатов измерений. Для определения АЧХ на вход математической модели подавался расход, изменяющийся по гармоническому закону с некоторой постоянной составляющей, который описывается выражением

$$q(t) = Q_0 + Q_m \sin \Omega t, \quad (7)$$

где Q_0 – постоянная составляющая, Q_m – амплитуда гармонического сигнала, Ω – ч

Наличие постоянной составляющей необходимо для исключения возможности остановки ротора, связанной с изменением направления вращения.

Так как частота вращения ротора ТПП зависит от расхода, то и АЧХ преобразователя будет зависеть от него. При постановке эксперимента наблюдалось условие $Q_0 = 2Q_m$. По результатам исследования частотных свойств были построены АЧХ ТПП при использовании рассмотренных методов коррекции. АЧХ ТПП при расходах 0,1 и 1 л/с приведены на рис. 3.

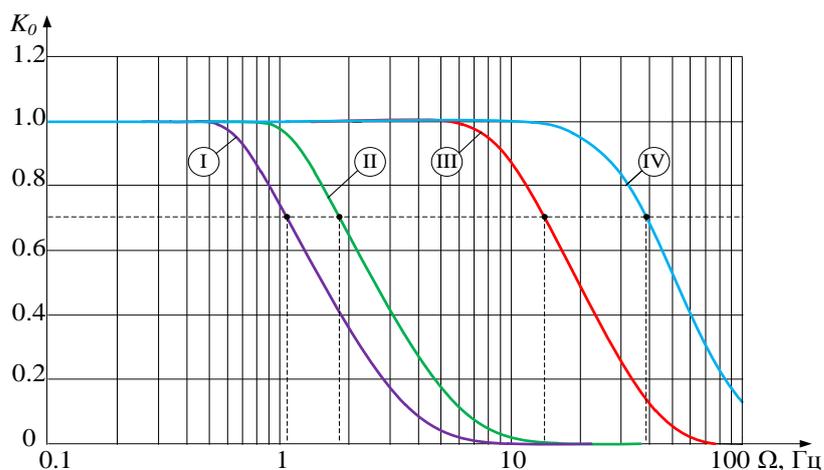


Рис. 3. АЧХ ТПП при различных методах коррекции I – МСС при $Q_0 = 0,1$ л/с; II – МПК и МДКО при $Q_0 = 0,1$ л/с; III – МСС при $Q_0 = 1$ л/с; IV – МПК и МДКО при $Q_0 = 1$ л/с

Характер АЧХ при больших значениях расхода имеет аналогичный вид, а соответствующие характеристики смещаются по оси частот вправо.

Из приведенных зависимостей следует, что при входном расходе, изменяющемся по гармоническому закону (7) с постоянной составляющей $Q_0 = 0,1$ л/с, значение частоты среза $\Omega_{ср}$ для МСС оказалось равным 1,1 Гц, а для МПК и МДКО – 1,8 Гц, при этом наклон АЧХ в полосе затухания равен 38 и 40 дБ/дек соответственно. При входном расходе с $Q_0 = 1$ л/с частота среза $\Omega_{ср}$ для МСС составила 15 Гц, а для МПК и МДКО – 39 Гц, наклон АЧХ в полосе затухания равен 45 и 53 дБ/дек соответственно.

Таким образом, использование МСС приводит к существенному сужению полосы пропускания ТПП, а применение МПК и МДКО не влияет на нее по сравнению с полосой пропускания ТПП без коррекции результатов измерений.

Определение влияния методов коррекции на точность преобразований в ТПП. Как уже было отмечено выше, инструментальная погрешность, возникающая в ТПП, обусловлена двумя процессами: технологическим разбросом параметров при изготовлении и эксплуатационным износом. Количественная оценка влияния первого процесса на результат определения текущего значения частоты была получена, путем проведения экспериментов с использованием модели, которая описывается системой уравнений (4).

На рис. 4 приведена зависимость погрешности определения частоты как функции технологического разброса параметров ТПП: Δr , ΔL и $\Delta \gamma$. Исследования проводились при постоянном значении расхода $Q_0 = 1$ л/с и разбросе геометрических параметров Δ в заданном диапазоне $\pm 0,025$. Погрешность определения текущего значения частоты

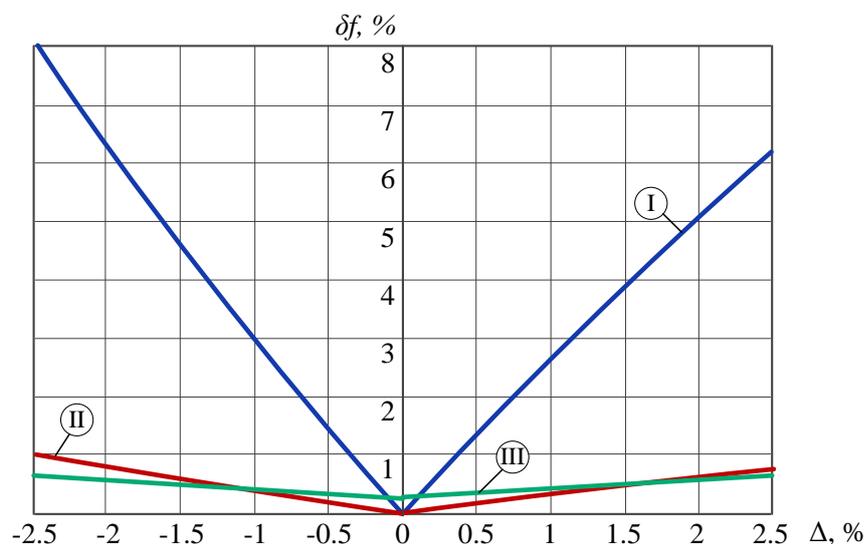


Рис. 4. Зависимость погрешности определения частоты от разброса технологических параметров: I – без коррекции; II – при коррекции МСС; III – при коррекции МПК и МДКО

исходного сигнала составила: без коррекции (кривая I) до 8%; с использованием МСС (кривая II) до 1,05% и с использованием МПК и МДКО (кривая III) до 0,65% (на рис. 4 приведен наихудший случай комбинации отклонений параметров элементов ТПП).

Для оценки влияния износа ТПП на результат преобразований была проведена серия экспериментов, которая имитировала один год его эксплуатации (рис. 5). В течение 365 измерений, каждое из которых соответствовало 1 дню в году, изменялось геометрическое соотношение между элементами ТПП в соответствии с

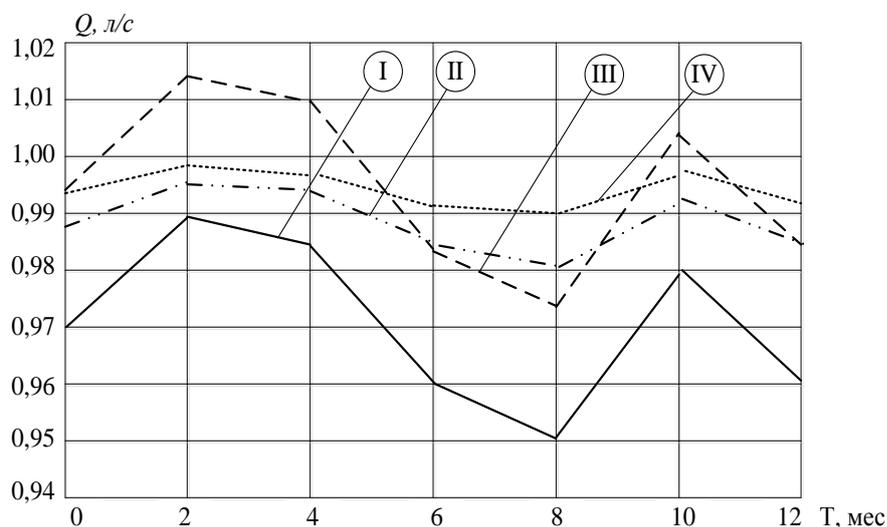


Рис. 5. Временная зависимость качества коррекции результатов преобразования предложенными методами: I – без коррекции; II – при коррекции МСС; III – при коррекции МПК; IV – при коррекции МДКО

обобщенными данными [8].

Качество методов коррекции оценивалось отклонением δ измеренного расхода от заданного значения $Q_0 = 1$ л/с. Наилучшие результаты были получены при использовании МДКО ($\delta \leq 0,01$) и МСС ($\delta \leq 0,018$), несколько худшие результаты – при использовании МПК ($\delta \leq 0,025$). Максимальное отклонение результатов преобразования без коррекции составило 0,05. Начальные отклонения при использовании МПК и МДКО связаны с накоплением ошибки отбрасывания при моделировании.

Таким образом, использование МСС ведет к существенному снижению погрешности, обусловленной эксплуатационным износом; МПК – технологическим разбросом параметров; МДКО – имеет минимальную погрешность в обоих случаях.

Выводы. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Среди предложенных методов метод скользящего среднего требует минимальных аппаратных и программных затрат, но может быть использован только при измерении медленно изменяющихся расходов, а следовательно использование его в спирометрии ограничено.

Более подходящим для спирометрии является метод предварительной калибровки, однако ряд ограничений технического характера осложняет работу с портативными приборами, реализованными на его основе. Одним из таких ограничений является большая погрешность преобразования при использовании одноразовых турбин.

Наилучшим для использования в портативных спирометрах является метод динамической компенсации ошибки. Теоретически этот метод позволяет учитывать погрешность, вносимую как технологическим разбросом параметров ТПП, так и использованием одноразовых измерительных турбин. Основным преимуществом данного метода является его адаптивность, поскольку он учитывает неизбежные изменения геометрических параметров в процессе эксплуатации ТПП, что продлевает срок его службы. Кроме того, по полученным значениям поправочных коэффициентов можно идентифицировать состояние измерительной турбины и определять целесообразность ее замены.

Список литературы: 1. 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. 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. Hankinson et al.; edited by V. Brusasco // Eur. Respiratory Journal. – 26'2005. – 319-338 pp. 4. Измерительная система современного спирометра и пути ее усовершенствования / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Р. С. Томашевский // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: «Новые решения в современных технологиях». – Харьков НТУ «ХПИ», 2009. – № 37. – С 22-25. 5. 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. 6. 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. 7.

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. 8. Long term performance of a hand held spirometer / Asger Dirksen, Flemming Madsen, Ole Find Pedersen, Anne Mette Vedel, Axel Kok-Jensen // Thorax. An international peer-reviewed journal for health professionals in all aspects of respiratory medicine. – BMJ Publishing Group Ltd & British Thoracic Society. – 1996. – № 51. – pp. 973-976.

УДК 615.47

Аналіз методів програмної корекції результатів вимірювань, отриманих за допомогою турбінного перетворювача потоку у спірометричній апаратурі / Сокол Є. І., Кіпенський А. В., Томашевський Р. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». - Харків: НТУ «ХПІ». - 2012.-№50(956). - С.146 - 153

У статті з метою зниження інструментальної похибки запропоновані й описані методи математичної корекції результатів вимірювань, отриманих за допомогою турбінного перетворювача потоку. Проведено аналіз частотних властивостей такого перетворювача та визначено вплив на результати перетворення запропонованих методів. На підставі аналізу були зроблені висновки про специфіку запропонованих методів і показана доцільність використання кожного з них в спірометричній апаратурі. Іл.: 5. Бібліогр.: 8 назв.

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

UDC 615.47

The analysis methods of correction of test results obtained from a turbine flow converter in spirometric apparatus / Sokol E. I., Kipenskyi A. V., Tomashevskiy R. S. // Bulletin of NTU "KhPI". Subject issue : New decisions of modern technologies. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2012. - №50(956). . – P. 146-153

In this paper in order to reduce the instrumental error and describes the proposed methods of mathematical correction of the measurement results obtained with the turbine flow transducer. The analysis of the frequency characteristics of the transmitter and determined the effect on the results of the transformation of the proposed methods. Based on the analysis it was concluded on the specifics of the proposed methods, and shows the feasibility of using each of them in spirometry equipment. Pic.: 5. Bibliogr.: 8 titles.

Keywords: spirometer, turbine flow converter, instrument error correction methods, the dynamic error compensation.

Надійшла до редакції 10.10.2012