

# АДАПТИВНЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТУРБИННОГО ДАТЧИКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

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 methods of reducing the conversion error are analyzed. A new method “the method of dynamic coefficients” is presented. The benefits of developed methods are proved.

**Key words** – spirometry, measure turbine, flow–volume loop, moving average, calibration factor.

## ВВЕДЕНИЕ

Рост внимания международных и государственных здравоохранительных организаций к проблеме заболеваемости органов дыхания дает мощный импульс к развитию производства спирометрической аппаратуры [1]. Существующая спирометрическая аппаратура может быть условно разделена на различные классы в зависимости от ее функционального назначения. Одними из наиболее развивающихся и востребованных являются классы портативных спирометров [2]:

- спирометры индивидуального пользования;
- спирометры для скрининговых исследований;
- переносные спирометры для тестирования пациентов на дому.

Поскольку от типа датчика зависят массогабитные показатели прибора, его устойчивость к санитарной обработке и, что немало важно, ценовой показатель, то в портативных спирометрах наиболее часто в качестве датчика используется турбинный преобразователь потока (ТПП) [3]. Кроме очевидных преимуществ по вышеперечисленным критериям данный тип датчика имеет передаточную характеристику близкую к линейной и низкое пневматическое сопротивление (порядка 25-50 Па·с/л при расходе 10 л/с) [4].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Среди множества конструкций ТПП особого внимания заслуживает преобразователь с оптическим устройством съема информации (ОУСИ), представленный на рис. 1.

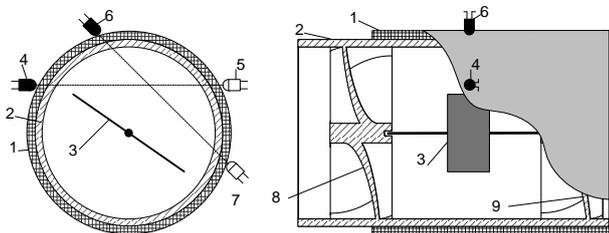


Рис. 1 Конструкция ТПП с ОУСИ

В состав ТПП (рис. 1) входят: втулка 1, измерительная турбина 2, ротор, выполненный в виде пластины 3 с двумя лепестками, две неподвижные крыльчатки 8 и 9, две оптические пары излучатель-фотоприемник 4-5 и 6-7. Такая конструкция имеет ряд достоинств: во-первых, устройство съема информации не создает момента сопротивления вращению ротора,

во-вторых, использование в качестве подвижного элемента пластины, а не крыльчатки, существенно снижает инерционность, и, в-третьих, указанное расположение оптических пар, позволяет определить направление движения воздушного потока. Кроме того, данная конструкция ТПП позволяет реализовать предложенный способ [5] повышения коэффициента передачи ОУСИ, который достигает восьми информационных импульсов на один оборот ротора, при условии использования электрической схемы, представленной на рис. 2.

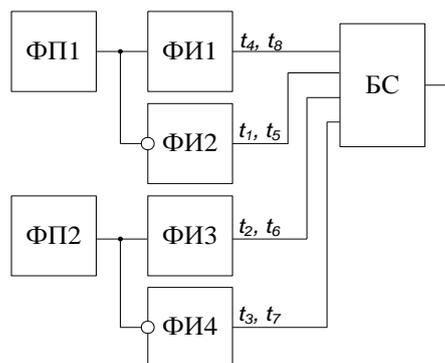


Рис. 2 Схема обработки выходного сигнала ОУСИ

Здесь, электрические сигналы с фотоприемников ФП1 и ФП2 (поз. 5 и 7 на рис. 1) поступают на формирователи импульсов по фронту ФИ1, ФИ3 и по срезу ФИ2, ФИ4. Конечный сигнал преобразования формируется путем логического суммирования сигналов ФИ1–ФИ4 в блоке суммирования БС. На рис. 3, а представлен этот сигнал за временной промежуток равный периоду  $T$  полного оборота ротора, где  $t_0$  – момент времени, соответствующий моменту  $t_8$  предыдущего периода.

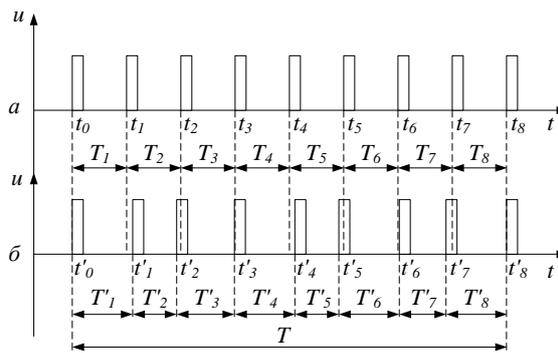


Рис. 3 Конечный сигнал преобразования

Информационным параметром сигнала является величина временного интервала  $T_i = t_i - t_{i-1}$ , где  $i$  – номер измеряемого интервала,  $t_i$  – моменты времени, соответствующие фронту  $i$ -го импульса ФИ.

Одной из трудностей, возникающей при реализации описанного выше способа, является влияние геометрии турбины ТПП и взаимного расположения оптических пар на длительности измеряемых интервалов времени. Такая инструментальная погрешность ТПП, связанная со смещением полученных моментов  $t'_i$  относительно моментов  $t_i$  (см. рис. 3, б), может достигать  $\pm 0,1$  внутри одного периода и определяется по выражению [6]:

$$\sigma_i = \frac{T_i - T'_i}{T_i}, \quad (1)$$

где  $T_i$  – значение интервалов при отсутствии технологического разброса параметров ( $T_i = T/n$ );  $n$  – количество информационных импульсов за один оборот ротора;  $T'_i$  – измеренное значение.

Общий период  $T$  оборота определяется как:

$$T = \sum_{i=1}^n T'_i = \sum_{i=1}^n (T_i + \sigma_i). \quad (2)$$

Значения ряда  $\sigma_i$  целиком зависят от взаимного расположения оптических пар излучатель-фотоприемник (рис. 1 поз. 4-7), их расположения относительно центра измерительной турбины и соотношения длин лепестков вращающейся пластины (рис. 1 поз. 3). Однако их суммарное значение за оборот вращающейся пластины будет равно нулю.

В связи с тем, что ТПП содержит подвижные элементы, подверженные старению и износу в течение эксплуатационного периода, его метрологические характеристики будут дополнительно изменяться из-за перекоса ротора [7], что приведет к увеличению ошибки преобразований  $\sigma_i$ .

Это явление существенно снижает точность преобразования в процессе эксплуатации и ставит под сомнение целесообразность увеличения коэффициента преобразования ТПП. А повышение требований к точности изготовления ТПП и использование более дорогих износостойких материалов влечет за собой значительное повышение стоимости датчика, что неприемлемо для портативных спирометров, особенно в случае использования одноразовых измерительных турбин.

Таким образом, целью данной работы является разработка адаптивного программно-математического метода снижения инструментальной погрешности преобразования ТПП с ОУСИ.

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Для достижения поставленной цели в различное время авторами были предложены следующие методы:

- усреднения членов массива временных интервалов  $T'_i$ , для сглаживания колебаний сигнала внутри периода  $T$ ;
- предварительной калибровки ТПП с последующей корректировкой результатов измерения;
- автоматической калибровки ТПП в процессе эксплуатации.

Первый метод опирается на тот факт, что отклонения двух соседних периодов имеют общую составляющую, противоположную по знаку. Значит, усреднение этих периодов позволит избавиться от этой составляющей. Усреднение временных интервалов предлагается осуществлять путем вычисления скользящего среднего (СС) значения, где интервал усреднения равняется количеству импульсов  $n$ . Вычислить СС значение  $i$ -того периода возможно по выражению

$$T_{CCi} = \sum_{j=0}^{n-1} T'_{(i-j)} / n. \quad (3)$$

С учетом (2) выражение (3) можно представить в виде

$$T_{CCi} = T/n. \quad (4)$$

Из (4) следует что, такой математический прием исключает последствия технологического разброса параметров.

Вычисление СС значения может быть рассмотрено как действие фильтра нижних частот и поэтому используется для устранения той составляющей ошибки  $\sigma_i$ , которая связана с перекосом ротора. Однако, как любой фильтр нижних частот СС ограничивает частотные свойства измерительной системы, и, следовательно, может быть использовано лишь при измерении постоянных или медленно изменяющихся расходов. При измерении быстро изменяющихся расходов СС вносит погрешность в результат измерений, обусловленную инерционностью. Количественной характеристикой инерционности СС служит постоянная времени, которая зависит от ширины интервала усреднения.

Таким образом, к достоинствам данного метода можно отнести существенное снижение погрешности во всем диапазоне расходов, а также достаточно простой математический аппарат. Среди недостатков – дополнительная инерционность, а, следовательно, искажение выходного сигнала на быстро изменяющихся расходах, которые имеют место в спирометрии.

Принципиально иным методом снижения инструментальной погрешности является предварительная калибровка ТПП. Этот метод заключается в следующем: на ТПП с ОУСИ с установки подается равномерный поток воздуха (расход  $Q = \text{const}$ ) и регистрируются временные интервалы между импульсами. При этом делается два допущения: первое – передаточная характеристика ТПП имеет линейный характер, второе – в новой измерительной турбине отсутствуют явления перекоса ротора. Тогда вся инструментальная погрешность будет связана с технологическими разбросом параметров ТПП.

Запишем отклонение каждого временного интервала в виде коэффициентов  $g_i = T_i / T'_i$ . Исключение влияния разброса параметров возможно путем умножения полученного значения временного интервала на соответствующий коэффициент. Для этого целесообразно использовать калибровочные коэффициенты  $G_i$ , которые могут быть получены путем последовательного усреднения соответствующих коэффициентов  $g_i$  при различных значениях расхода  $Q$ , подаваемого на вход ТПП. Однако при этом возникает задача определения соответствия измеренных коэффициентов отклонений  $g_i$  с калибровочными коэффициентами  $G_i$ , поскольку начало

отсчетов  $g_i$  при каждом тесте не предсказуемо и может быть любым из восьми (см. рис. 3).

С учетом того что в схеме (рис. 2) формируются 8 импульсов от четырех формирователей можно идентифицировать пары интервалов от соответствующих формирователей. В каждой паре импульсов один приходит от одной стороны вращающейся пластины, а второй от другой, поэтому окончательная задача определения номера импульса сводится к задаче определения номера лепестка вращающейся пластины (рис. 1 поз. 3), т.е. к идентификации интервалов  $T'_i$  и  $T'_{i+4}$ . Идентифицировать эти интервалы предлагается, используя коэффициенты отклонений  $g_i$ .

Предположим, что длины лепестков  $r_1$  и  $r_2$  не равны, а коэффициент  $\beta$  равен их отношению. Экспериментально установлено, что при прочих равных условиях сумма первых четырех коэффициентов всегда больше суммы последних четырех при условии  $\beta < 1$  и наоборот (см. рис. 4).

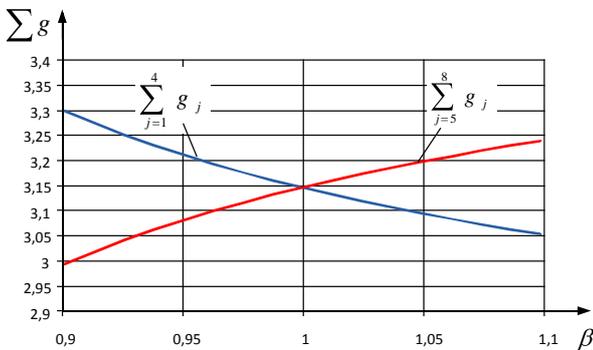


Рис. 4 К пояснению способа идентификации лепестка

Введем в обращение величину  $c$  для текущего измерения и величину  $C$ , для используемого ТПП, которые рассчитываются как:

$$c = \sum_{j=1}^4 g_j - \sum_{j=5}^8 g_j, \quad C = \sum_{i=1}^4 G_i - \sum_{i=5}^8 G_i, \quad (5)$$

где  $j$  – номера интервалов, которые отсчитываются от начала измерения, а  $i$  – номера интервалов, начиная с условно принятого первого для всех измерений данного ТПП.

Тогда идентифицировать номер лепестка возможно путем сравнения этих величин в конце одного измерения. Если соблюдается условие,  $c * C \geq 0$ , то номер  $j = i$ , иначе ( $c * C < 0$ ) номер  $j = i + 4$ .

Таким образом, метод предварительной калибровки можно представить совокупностью следующих этапов:

- определение калибровочных коэффициентов  $G_i$  при подаче стационарных расходов с калибровочной установки и запись их в память прибора;
- определение коэффициентов  $g_j$  при проведении дыхательного теста (вдоха или выдоха);
- идентификация номера временного интервала;
- корректировка результатов измерения путем умножения полученных значений временных интервалов  $T'_i$  на соответствующие коэффициенты  $G_i$ .

К преимуществам метода следует отнести его наилучшие частотные характеристики при измерении переменных расходов, так как математический аппарат не имеет в своем составе частотозависимых элементов.

Среди недостатков можно отметить:

- данный метод не позволяет учитывать влияние погрешностей, связанных с эксплуатационным износом;

- после замены измерительной турбины необходима новая калибровка на специальной установке и перезапись калибровочных коэффициентов  $G_i$ , что ограничивает использование данного метода для приборов со сменными или одноразовыми турбинами.

Недостатки, возникающие при использовании ранее рассмотренных методов, могут быть устранены в спирометрических приборах при использовании метода автоматической калибровки ТПП. Данный метод основан, как и предыдущий, на корректировке полученных значений временных интервалов калибровочными коэффициентами  $G_i$ , однако определяются эти коэффициенты не на специальной установке при равномерных расходах, а в процессе эксплуатации прибора.

Рассмотрим основные положения данного метода. Так как передаточная функция ТПП с определенными допущениями может быть рассмотрена как линейная и записана в виде:

$$f = K \cdot Q, \quad (6)$$

где  $K$  – передаточный коэффициент ТПП с ОУСИ,  $f$  – частота следования информационных импульсов; то значения измеряемых временных интервалов будут обратно пропорциональны текущему значению расхода  $Q$ .

Путем графического анализа основных, наиболее типичных для спирометрии, кривых поток-объем (использовались данные ATS WAVE26 [8], а также результаты собственных экспериментальных исследований) установлено, что на кривых зависимостей  $1/Q(t)$  имеются линейные участки. На рисунке 5 изображены эти зависимости для стандартных спирометрических тестов ЖЕЛ и ФЖЕЛ.

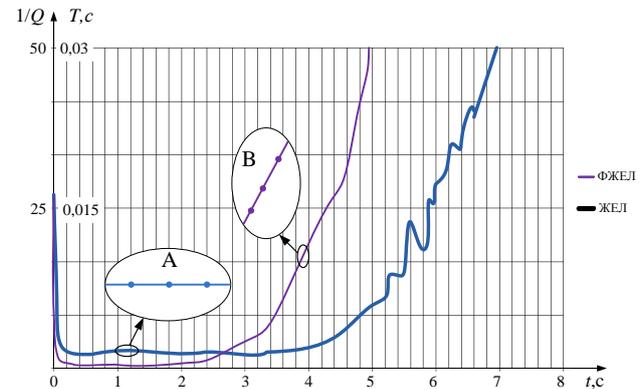


Рис. 5 Наличие линейных участков на кривых измерений

Линейные участки А и В могут быть рассмотрены как квазиравномерные и, на основании полученных данных, может быть проведена калибровка. Причем в течение одного дыхательного маневра эти участки могут встречаться неоднократно.

Так как кривые для каждого пациента и дыхательного теста строго индивидуальны, то одной из задач становится определение линейных участков, решение которой возможно путем математического анализа. Для исключения неоднозначности на границах участка, предлагается его расширить до трех оборотов пластины.

Таким образом, критерием линейности периода  $T_k$  на интервале от начала  $T_{k-1}$  до окончания  $T_{k+1}$ , является коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum_{p=-1}^1 (T_{(k+p)} - M_T)(t_{(k+p)} - M_t)}{\sqrt{\sum_{p=-1}^1 (T_{(k+p)} - M_T)^2 \sum_{p=-1}^1 (t_{(k+p)} - M_t)^2}}, \quad (7)$$

где  $T_{(i)}$  – длительность  $i$ -го оборота,  $t_{(i)}$  – время его окончания;  $M_T = \sum_{p=-1}^1 T_{(k+p)} / m$ ;  $M_t = \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)} / m$ .

Для того чтобы проверить, существенно ли отличается от нуля коэффициент корреляции, можно использовать критерий Стьюдента. Затем, на найденных линейных участках, для периода  $T_k$  возможно определение значений временных интервалов  $T_i$  с высокой точностью. Для этого применяется интерполяция полиномом второго порядка. Решая систему линейных уравнений

$$\begin{cases} a_0 \cdot 3 + a_1 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)} + a_2 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^2 = \sum_{p=-1}^1 T_{(k+p)} \\ a_0 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)} + a_1 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^2 + a_2 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^3 = \sum_{p=-1}^1 T_{(k+p)} t_{(k+p)} \\ a_0 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^2 + a_1 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^3 + a_2 \sum_{p=-1}^1 t_{(k+p)}^4 = \sum_{p=-1}^1 T_{(k+p)}^2 t_{(k+p)} \end{cases} \quad (8)$$

определяют коэффициенты полинома. Полученные коэффициенты подставляют в выражение:

$$T_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2. \quad (9)$$

Используя полученные значения временных интервалов возможно определение коэффициентов  $g_{i,k}$  для  $k$ -го периода. Однако запись этих коэффициентов в качестве калибровочных  $G_i$  сопряжена с внесением в математический аппарат погрешности, связанной со статистическим распределением ошибки.

Для ее исключения, при определении коэффициентов  $G_i$ , целесообразно использовать усреднение данных. Наилучшим решением, с точки зрения авторов, является использование экспоненциальной скользящей средней (ЭСС), определение которой соответствует действию фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) первого порядка, который описывается выражением:

$$G_{i,L} = G_{i,L-1}(1-A) + A \cdot g_{i,k}, \quad (10)$$

где  $G_{j,L}$  – текущее значение,  $G_{j,L-1}$  – предыдущее значение,  $A$  – постоянная времени,  $L$  – номер линейного участка.

Использование БИХ-фильтра позволяет уменьшить объем требуемой памяти, приблизить значения калибровочных коэффициентов к математическому ожиданию, учитывать медленно текущие процессы, такие как эксплуатационный износ измерительной турбины. Для исключения импульсных помех предлагается использование медианного фильтра.

Таким образом, предложенный программно-математический метод автоматической калибровки в процессе эксплуатации, состоит из следующих этапов:

- определение линейных участков зависимости  $1/Q(t)$  полученной по данным спирометрического теста;

- идентификация номера временного интервала;
- интерполяция полученных линейных участков полиномом 2-го порядка в точках  $T_i$ ;
- вычисление калибровочных коэффициентов  $g_i$ ;
- фильтрация полученных коэффициентов  $g_i$  медианным фильтром для исключения импульсных помех и отбраковки ложных данных;
- модификация коэффициентов  $G_i$  данными с выхода медианного фильтра по выражению (10);
- запись полученных констант в энергонезависимую память прибора;
- корректировка результатов измерения путем умножения полученных значений временных интервалов  $T'_i$  на соответствующие коэффициенты  $G_i$ .

## ВЫВОДЫ

Среди предложенных методов метод усреднения членов массива временных интервалов требует минимальных аппаратных и программных затрат, но может быть использован только при измерении медленно изменяющихся расходов, а следовательно использование его в спирометрии ограничено. Для этой области более подходящим является использование метода предварительной калибровки, однако ряд ограничений технического характера осложняет работу с приборами, особенно портативными, реализованными на его основе.

Наиболее оправданным для использования в портативных спирометрах является метод автоматической калибровки в процессе эксплуатации. Он не требует использования специальной установки для калибровки, а также позволяет использовать в спирометре сменные или одноразовые турбины без дополнительной калибровки. Основным преимуществом данного метода является его адаптивность, так как он учитывает неизбежные изменения геометрии ТПП в процессе эксплуатации, компенсирует влияние его износа, продлевает срок службы. Кроме того, по полученным значениям калибровочных коэффициентов возможна идентификация измерительной турбины, не пригодной для дальнейшей эксплуатации.

- [1] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs307/ru>.
- [2] <http://www.spirometry.com/ENG/About/Research.asp>.
- [3] Лопата В.А., Сахно Ю.Ф. Многоуровневая система спирометрической аппаратуры. // Функциональная диагностика. – Киев, 2003. № 2, С.52-55.
- [4] Лопата В. А. Медико-технические требования к флуоспиromетрам: стандарты, перспективы и возможности выполнения // Український пульмонологічний журнал. – Киев, 2005. № 3, С.46-49.
- [5] Измерительная система современного спирометра и пути ее усовершенствования / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Е.И. Король, Р.С. Томашевский // Вестник НТУ ХПИ «Новые решения в современных технологиях». – Харьков, 2009. №37, С.22-25.
- [6] Бошняк. Л.О., Бызов Л.Н. Тахометрические расходомеры. – Л.: Машиностроение, 1968. – 210 с.
- [7] Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – М.: Машиностроение, 1989. – 702 с.
- [8] [http://www.thoracic.org/education/pulmonary\\_function\\_testing/spirometry\\_waveforms/wave26/W500.TXT](http://www.thoracic.org/education/pulmonary_function_testing/spirometry_waveforms/wave26/W500.TXT)