

А.В. КИПЕНСКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Р.С. ТОМАШЕВСКИЙ, ассист., НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТУРБИННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОТОКА ПОРТАТИВНОГО СПИРОМЕТРА

Выполнен детальный анализ процесса движения ротора измерительной спирометрической турбины под действием воздушного потока. В результате исследований получена передаточная функция измерительной турбины. Проведены экспериментальные исследования такой турбины на виртуальной модели. Эти исследования подтверждают возможность использования полученной передаточной функции для восстановления сигнала, соответствующего входному расходу.

Ключевые слова: измерительная турбина, момент движения ротора, передаточная функция, спирометр, турбинный преобразователь потока.

Введение. Наиболее простым и информативным методом оценки функции дыхания является *спирометрия*. Для *скрининговых исследований* в мировой практике чаще всего используются портативные или, так называемые, (hand-held) приборы [1]. Применение таких приборов целесообразно при проведении спирометрических обследований на предприятиях, в больничных палатах, на дому у пациента.

Анализ современных средств технического обеспечения спирометрии показывает, что в подавляющем большинстве портативных спирометров в качестве первичного измерителя используется турбинный преобразователь потока (ТПП). Это объясняется хорошими массогабаритными показателями преобразователя, достаточно высокой чувствительностью и помехоустойчивостью, низким пневматическим сопротивлением измерительных турбин (ИТ) (порядка 25-50 Па·с/л при расходе 10 л/с), а их постоянная времени не превышает 1 мс [2].

В общем случае ТПП представляет собой устройство, которое преобразует поток воздуха во вращение ротора, а затем, в электрический выходной сигнал. Структурная схема измерительного канала современного спирометра, реализованного на турбинном преобразователе потока, приведена на рис. 1.

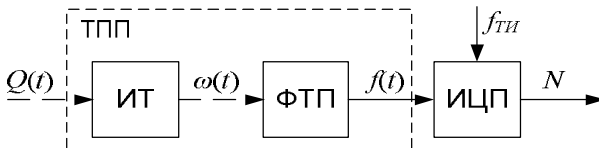


Рис. 1 – Структурная схема измерительного канала спирометра, реализованного на турбинном преобразователе потока.

Измерительная турбина конструкция, которой показана на рис. 2, в данной системе используется в качестве первичного преобразователя воздушного потока и преобразует объемную скорость воздуха $Q(t)$ в угловую скорость ротора $\omega(t)$. Вторичный измеритель представляет собой фотоэлектрический тахометрический преобразователь, который преобразует вращение пластины в электрический сигнал с частотой $f(t)$, пропорциональной $\omega(t)$.

Преобразование частоты $f(t)$ в цифровой код N осуществляется с помощью *импульсного - цифрового преобразователя с частотно-импульсным законом преобразования* классическим методом последовательного счета [3]. Данный метод позволяет осуществлять преобразование в цифровой код текущего значения частоты при достаточно низкой погрешности преобразования.

Однако, обычно класс турбинных преобразователей характеризуется невысокой точностью измерений, что обусловлено представлением их передаточной функции линейной зависимостью во всем диапазоне измерения скорости воздушного потока [1]:

$$Q = a + \frac{\omega}{\varphi}, \quad (1)$$

где Q – расход воздуха через турбину; ω – угловая скорость ротора; φ – передаточный коэффициент турбинного преобразователя; a – постоянная сдвига.

Кроме того, динамические свойства турбины, как правило, не учитываются, что дополнительно снижает точность измерения и, следовательно, затрудняет постановку верного диагноза.

ТПП современного спирометра представляет собой устройство, которое преобразует входной расход воздуха $Q(t)$ в последовательность импульсов, частота следования которых зависит от расхода, а количество – от объема воздуха, прошедшего через преобразователь [4]. При этом точное измерение сигнала, соответствующего входному воздушному потоку по полученным данным, возможно только в случае адекватного математического описания статических и динамических свойств ИТ. Кроме того, такое описание позволит разработать методику определения передаточных коэффициентов индивидуально для каждой измерительной турбины.

Цель данной статьи состоит в разработке математической модели процессов в турбинном преобразователе потока, учитывающей их нелинейность, инерционность и позволяющей определить передаточную функцию во всем диапазоне измерения скорости воздушного потока.

Анализ влияния моментов движения и сопротивления ротора турбины на процессы преобразований. Для построения адекватной математической модели ТПП необходимо определить и оценить моменты сил, дейст-

вующие на ротор ИТ в процессе преобразований.

С целью получения аналитической зависимости расхода воздуха $Q_{СТ}$ в статическом режиме от частоты f вращения ротора ИТ, первоначально было проанализировано уравнение движения ротора турбины при постоянном расходе, которое может быть записано в следующем виде:

$$M_D + \sum M_C = 0, \quad (2)$$

где M_D – момент, движущий (вращающий) ротор; $\sum M_C$ – сумма моментов сопротивления (моментов, препятствующих вращению ротора).

Согласно *теореме моментов количеств движения* [2] движущий момент на роторе измерительной турбины определяется соотношением, которое называется *уравнение Эйлера*:

$$M_D = m_\Gamma (r_{1CP} v_1 - r_{2CP} v_2), \quad (3)$$

где m_Γ – секундный массовый расход газа, отнесенный к цилиндрическому слою круговой решетки единичной высоты; r_{1CP} и r_{2CP} – средние радиусы цилиндрического слоя, на входе и выходе из него; v_1 и v_2 – окружная составляющая абсолютной скорости газа, перед и за турбиной.

При подстановке в выражение (3) значений скоростей, с учетом их распределения по сечению лопатки, замене линейных показателей на объемные и равнозначности входного и выходного радиуса ИТ ($r_{1CP} = r_{2CP} = r_{CP}$), выражение для момента движения будет иметь вид:

$$M_D = \frac{2\pi}{PF} k_V k_\Delta \frac{\rho r_{CP}^2 Q_{СТ}^2}{\eta} - \omega \frac{\rho r_{CP}^2 Q_{СТ}}{\eta}, \quad (4)$$

где P – осевая сила от воздействия потока на ротор; F – эффективная площадь турбины; k_V – коэффициент учета неравномерности потока воздуха в нормальном сечении турбины; k_Δ – коэффициент учета прохода воздуха через радиальный зазор; ρ – плотность воздуха; ω – угловая скорость ротора; η – коэффициент структуры потока.

При введении коэффициентов K_1 и K_2 выражение (4) может быть переписано в виде

$$M_D = K_1 Q_{СТ}^2 + K_2 \omega Q_{СТ}. \quad (5)$$

Кроме того, из (4) можно определить значение коэффициента φ передачи ИТ, выразив его через величину ω :

$$\varphi = \frac{k_V k_\Delta}{PF} - \frac{\eta M_D}{2\pi \rho r_{CP}^2 Q_{СТ}^2}, \quad (6)$$

где $\varphi = \omega / 2\pi Q_{СТ}$.

Детальный анализ результатов экспериментальных исследований процесса движения ротора ИТ, приведенный в работе [5], позволил выделить основные составляющие суммарного момента сопротивления движению ΣM_C ,

$$\Sigma M_C = M_{\Pi} + M_3 + M_K + M_{СИ}, \quad (7)$$

где M_{Π} – момент сил трения в опорах ИТ; M_3 – момент сопротивления, возникающий в зазоре между поверхностью ИТ и ротором; M_K – момент сил трения воздуха о поверхность крыльчатки; $M_{СИ}$ – момент сопротивления системы съема информации.

Эти моменты также являются функциями кинематических свойств потока газа, геометрии турбины, частоты вращения ротора и объемной скорости воздушного потока.

Так как в качестве опор ротора в турбине используются втулки без подшипников, то для описания момента M_{Π} в первом приближении может быть использована модель сухого трения скольжения для прямолинейного движения

$$\vec{M}_{\Pi} = K [\vec{R} \times \vec{N}], \quad (8)$$

где K – коэффициент трения; \vec{R} – вектор, направление которого совпадает с осью ротора, а его значение равно длине ротора, \vec{N} – вектор силы реакции опоры.

В силу перпендикулярности векторов выражение (8) может быть переписано в скалярном виде

$$M_{\Pi} = KRN. \quad (9)$$

Сила реакции опоры N при постоянной скорости вращения будет пропорциональна моменту импульса L ,

$$L = J_a \omega, \quad (10)$$

где J_a – момент инерции ротора.

Таким образом, момент сил трения в опорах измерительной турбины с учетом (10) будет линейно зависеть от угловой скорости ротора

$$M_{\Pi} = k_1 \omega, \quad (11)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, соответствующий массе и размерам ротора и коэффициента трения между ротором и опорами.

Момент M_3 сопротивления, возникающий в зазоре между внутренней поверхностью турбины и ротором, равен произведению касательного напряжения и площади поверхности. В свою очередь касательное напряжение, в нашем конкретном случае, будет одинаково в любой точке поверхности цилиндра постоянного радиуса и целиком зависит от объемной скорости воздушного потока

$$M_3 = k_2 Q_{СТ}, \quad (12)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрическими размерами измерительной турбины.

Момент M_K сил трения воздуха о поверхность крыльчатки существенно зависит от режима прохождения воздушного потока через турбину и трудно поддается аналитическому описанию. В работе [5] приведена такая зависимость, полученная экспериментальным путем, которая может быть представлена в виде

$$M_K = k_C k_K Q_{CT}^2, \quad (13)$$

где k_C – коэффициент сопротивления, k_K – коэффициент, зависящий от конфигурации крыльчатки и густоты ее решетки.

Момент $M_{СИ}$ сопротивления системы съема информации можно считать близким к нулю и не учитывать при расчетах, так как фотоэлектрический тахометрический преобразователь не вносит дополнительного сопротивления в измерительную часть спирометра.

С учетом приведенных выражений (5), (7), (11)-(13), уравнение (2) может быть записано в виде

$$k_{A1} Q_{CT}^2 + k_{B1} Q_{CT} + k_{C1} Q_{CT} f + k_{D1} f = 0, \quad (14)$$

где $f = \omega / 2\pi$ – частота вращения ротора; k_{A1} , k_{B1} , k_{C1} , k_{D1} – коэффициенты, зависящие от геометрии турбины и свойств потока.

Данное выражение позволяет оценить влияние на процесс преобразования основных составляющих сил движения и сопротивления, однако не учитывает динамических свойств ИТ.

Влияние инерционности ротора измерительной турбины на результат преобразований. Динамическая составляющая передаточной функции ТПП обычно условно рассматривается в виде суммы реакции ротора с присоединенным потоком и реакции тахометрического устройства [2, 5]. В силу использования фотоэлектрического метода преобразования вторая составляющая при дальнейшем анализе учитываться не будет.

В первом приближении ротор ИТ с присоединенным воздушным потоком может быть представлен как аperiодическое инерционное звено первого порядка и описан уравнением

$$\tau \frac{df}{dt} + f = Q\varphi, \quad (15)$$

где τ – постоянная времени.

Здесь следует отметить, что данное выражение предполагает линейную зависимость между входным расходом и частотой вращения ротора при постоянных расходах, то есть наличие постоянного коэффициента передачи φ для турбины.

При изменении значения расхода воздуха в процессе вдоха/выдоха пациента передаточная функция преобразователя становится нелинейной, а текущая *постоянная времени* τ уравнения (15) будет зависеть от входного сигнала (в определенном диапазоне). Выразив из (15) входной расход, получим

$$Q = \frac{f}{\varphi} \left(\frac{\tau}{f} \cdot \frac{df}{dt} + 1 \right), \quad (16)$$

где первый множитель – это статическая составляющая передаточной функции с линейным характером, а второй множитель (в скобках) – динамическая составляющая.

Окончательно передаточная функция может быть представлена в виде

$$Q = Q_{CT}(f) \left(\frac{\tau}{f} \cdot \frac{df}{dt} + 1 \right), \quad (17)$$

где $Q_{CT}(f)$ – статическая составляющая передаточной функции ТПП с некоторой нелинейной зависимостью между входной и выходной величинами, которая может быть получена путем решения уравнения (14).

Определение передаточной функции турбинного преобразователя потока. Для практического использования в цифровом портативном спирометре передаточная функция должна быть представлена в дискретном виде $Q_i = f(T_i)$ и учитывать влияние статических и динамических свойств преобразователя.

Решим уравнение (14) относительно Q_{CT} и объединим коэффициенты при f с равными степенями. Получим выражение для определения статической составляющей расхода

$$Q_{CT} = k_{A2} + k_{B2}f + \sqrt{k_{C2} + k_{D2}f + k_{E2}f^2}, \quad (18)$$

где k_{A2} , k_{B2} , k_{C2} , k_{D2} , k_{E2} , – коэффициенты полученного уравнения

Для упрощения полученного выражения уточним пределы изменения входного сигнала. Согласно объединенных требований международных профильных организаций *Американского торакального сообщества (ATS)* и *Европейского респираторного общества (ERS)* измеряемые расходы при исследовании функции внешнего дыхания (ФВД) находятся в диапазоне (0,1 – 14 л/с.) Исследования, проведенные в пакете MathCad с использованием экспериментальных результатов, позволили преобразовать выражение (18) без существенной потери точности к виду

$$Q_{CT} = k_{A3} + k_{B3}f + \sqrt{k_{C3}f}, \quad (19)$$

где k_{A3} , k_{B3} , k_{C3} – коэффициенты упрощенного уравнения.

Сравнение выражений (18) и (19), описывающих процессы в ТПП при

постоянном расходе, показало, что в заданном диапазоне изменения расходов различия между ними в определении Q_{CT} не превышают 1 %.

Для получения передаточной функции в дискретном виде необходимо в уравнении (19) непрерывную величину f заменить ее дискретными значениями f_i и выразить последние через период T_i (то есть $f_i = 1/T_i$) при дискретных значениях расхода Q_{CTi} . Тогда

$$Q_{CTi} = a_1 + \frac{a_2}{T_i} + \frac{a_3}{\sqrt{T_i}}, \quad (20)$$

где $a_1 = k_{A3}$, $a_2 = k_{B3}$, $a_3 = \sqrt{k_{C3}}$ – расчетные коэффициенты.

Учесть влияние динамической составляющей передаточной функции возможно при подстановке выражения (20) в (17):

$$Q = \left(a_1 + \frac{a_2}{T_i} + \frac{a_3}{\sqrt{T_i}} \right) \cdot \left(\frac{\tau}{f} \cdot \frac{df}{dt} + 1 \right). \quad (21)$$

После некоторых замен, выражение (21) может быть приведено к виду

$$Q_i = \left(a_1 + \frac{a_2}{T_i} + \frac{a_3}{\sqrt{T_i}} \right) \cdot \left(\tau T_i \cdot \frac{1/T_i - 1/T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + 1 \right). \quad (22)$$

Введем обозначение $\tau = a_4$, и окончательно получим:

$$Q_i = \left(a_1 + \frac{a_2}{T_i} + \frac{a_3}{\sqrt{T_i}} \right) \cdot \left(a_4 \cdot \frac{T_i - T_{i-1}}{T_i \cdot T_{i-1}} + 1 \right). \quad (23)$$

Последнее выражение позволяет получить представление о поведении ТПП при переменных расходах и дает возможность скорректировать результаты измерений.

Экспериментальные исследования ТПП. Для проведения исследований в САД-пакете SolidWorks 2010 было выполнено проектирование турбины, аналогом для которой послужила спирометрическая измерительная турбина фирмы *Medial international Research* (MIR). Измерительная турбина MIR состоит из двух основных частей: тела турбины и ротора. Тело турбины представляет собой полый цилиндр из пластика с диаметром равным 32 мм и высотой 41 мм. Внутри цилиндра размещены две неподвижные крыльчатки, расположенные на расстоянии 10 мм друг от друга и противоположно направленные. Они в ИТ выполняют роль направляющего аппарата. Каждая крыльчатка содержит по 8 лопаток (густота решетки равна 1,5). Внешний вид и основные геометрические размеры модели тела турбины приведены на рис. 2.

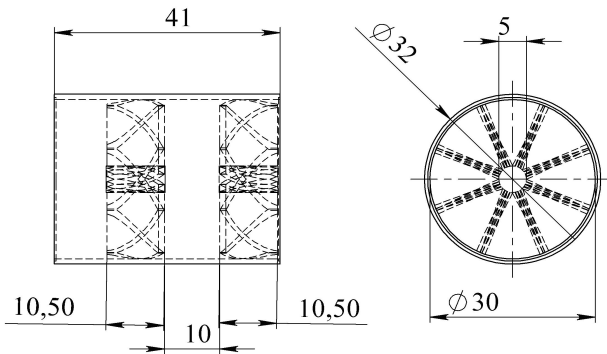


Рис. 2 – Основные размеры модели тела измерительной турбины.

Ротор ИТ представляет собой пластину толщиной 0,8 мм, по центру которой проходит ось с диаметром, равным толщине пластины. Материал оси – нержавеющая сталь, пластины ротора – полиэтилен. В качестве узлов соединения ротора и тела турбины использованы фторопластовые втулки (коэффициент трения фторопласт - нержавеющая сталь принят равным 0,04).

На основе полученной математической модели (см. выражение (23)) была разработана методика определения коэффициентов a_i передаточной функции ТПП и проведены исследования ИТ на виртуальной модели. Определение значений коэффициентов проводилось в два этапа, где условно разделялись статическая и динамическая составляющие передаточной функции.

Первый этап определения проводился путем подачи на вход виртуальной модели постоянных расходов, во всем диапазоне их измерения (0 – 14 л/с). При этом производился расчет периодов вращения ротора T_i . Таким образом задача первого этапа состояла в определении коэффициентов статической составляющей функции преобразования ТПП (см. выражение (19)). Вычисления значений коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 производились путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 / T_1 + a_3 / \sqrt{T_1} = Q_1; \\ a_1 + a_2 / T_2 + a_3 / \sqrt{T_2} = Q_2; \\ \dots \\ a_1 + a_2 / T_m + a_3 / \sqrt{T_m} = Q_m, \end{cases} \quad (24)$$

где Q_i – значение постоянного расхода, m – количество численных экспериментов.

Полученные при этом значения коэффициентов для рассмотренной модели составили: $a_1 = 0,02932$; $a_2 = 0,0844$; $a_3 = 0,0306$.

Второй этап определения значений коэффициентов передаточной функции заключался в нахождении коэффициента a_4 ее динамической составляющей. На практике этот коэффициент равен текущей *постоянной времени* τ (см. выражение (23)). В процессе экспериментальных исследований входной сигнал ТПП формировали путем подачи воздуха объемом 1 литр за секунду различными законами изменения скорости $Q(t)$ потока, что имеет место в реальных условиях при выполнении дыхательных тестов. Всего было проанализировано десять таких вариантов. Некоторые из них приведены на рис. 3.

Калибровочное уравнение для каждой модели можно составить путем интегрирования зависимости $Q(t)$ расхода воздуха от времени. Результатом интегрирования этой зависимости за время теста будет объем равный 1 л. Полученные в результате моделирования значения периодов T_i используются для определения коэффициента a_4 передаточной функции преобразователя путем решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \left(a_1 + \frac{a_2}{T_{1,i}} + \frac{a_3}{\sqrt{T_{1,i}}} \left(a_4 \cdot \frac{T_{1,i} - T_{1,i-1}}{T_{1,i} \cdot T_{1,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{1,i}} \right) = 1; \\ \sum_{i=1}^m \left(a_1 + \frac{a_2}{T_{2,i}} + \frac{a_3}{\sqrt{T_{2,i}}} \left(a_4 \cdot \frac{T_{2,i} - T_{2,i-1}}{T_{2,i} \cdot T_{2,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{2,i}} \right) = 1; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m \left(a_1 + \frac{a_2}{T_{10,i}} + \frac{a_3}{\sqrt{T_{10,i}}} \left(a_4 \cdot \frac{T_{10,i} - T_{10,i-1}}{T_{10,i} \cdot T_{10,i-1}} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{10,i}} \right) = 1. \end{array} \right. \quad (25)$$

Значение коэффициента a_4 передаточной функции (23) ТПП оказалось равным 0,3542.

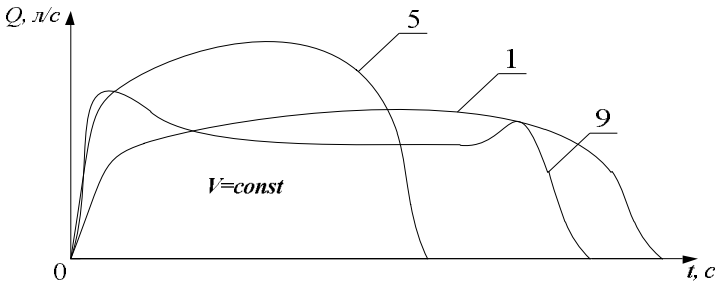


Рис. 3 – К пояснению второго этапа определения коэффициентов.

Для проверки адекватности полученной передаточной функции ТПП на

вход модели подавали стандартные формы (всего 26) входного потока, используемые для оценки динамической погрешности спирометра ATS WAVE26 [6]. В результате этого были получены значения угловой скорости ротора ω_i с присоединенным потоком воздуха, а затем и значения периодов $T_i = 2\pi / \omega_i$.

Стандартные потоки WAVE26 представляют собой серию наиболее типичных выдохов при спирометрических исследованиях, представленных в табличном виде $Q_i = f(t_i)$ с шагом t_i , равным 0,002 с. Адекватное измерение спирометром данной серии сигналов достаточно для определения основной погрешности прибора при измерении спирометрических сигналов.

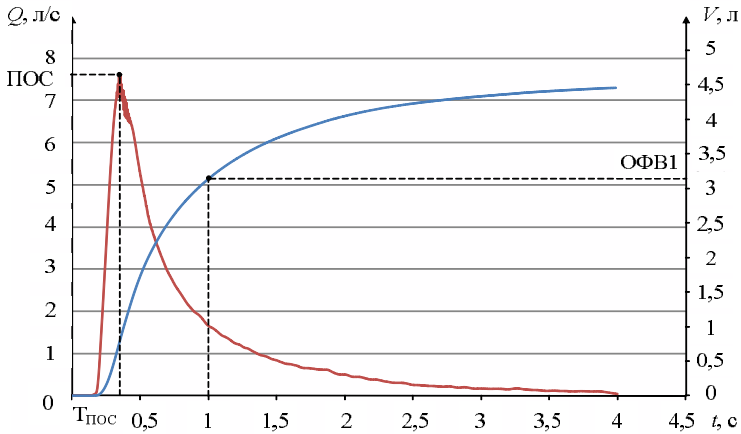


Рис. 4 – Восстановленные зависимости $Q(t)$ и $V(t)$.

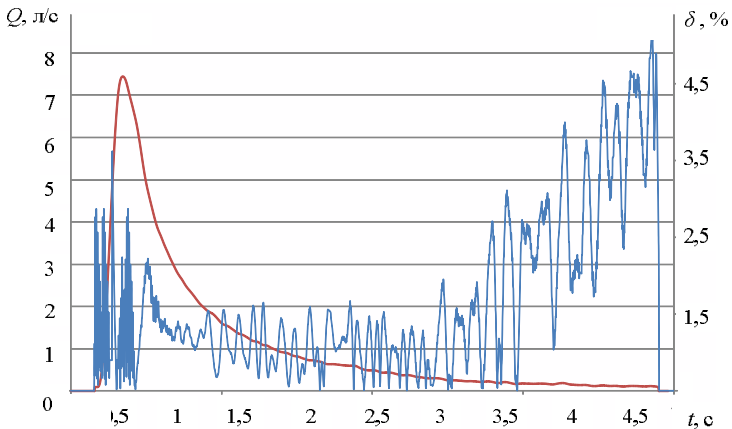


Рис. 5 – Относительная погрешность измерения расхода.

В качестве критерия оценки в данном случае, принимали показатели ФВД рекомендованные Европейским и Американским респираторными сообществами – пиковая объемная скорость (ПОС), время $T_{\text{ПОС}}$ ее достижения и объем форсированного выдоха за первую секунду (ОФВ1).

По полученным значениям периодов T_i с использованием полученной передаточной функции ТПП (23) была восстановлена входная функция $Q_i = f(t_i)$ и определены значения указанных выше показателей ФВД для каждого из 26 потоков. Определение значения объема воздуха, прошедшего через ТПП, выполнялось по выражению

$$V = \sum_{i=0}^n Q_i \cdot T_i, \quad (26)$$

где n – количество отсчетов; i – номер отсчета.

На рис. 4 показан восстановленный входной поток № 1 и изображены необходимые показатели ФВД.

Для оценки точности восстановления входного сигнала предложенным методом были вычислены погрешности преобразования входного сигнала для каждого из отсчетов входной функции. Проведенный анализ позволил определить, что наибольшие значения погрешности (до 0,05) преобразования входного сигнала появляются при значениях входного расхода менее 0,3 л/с (рис. 5).

По результатам исследования были вычислены относительные погрешности определения контрольных показателей ФВД. Анализ результатов исследования показал, что при определении объемного показателя ОФВ1 погрешность достигала почти 3 % (см. рис. 6).

При определении временного показателя $T_{\text{ПОС}}$ погрешность не превышала 1,5 % (рис. 7).

При определении скоростных показателей наибольшая погрешность (до 2,7 %, см. рис. 8) наблюдается в выдохах с большими значениями dQ/dt . К таким входным расходам могут быть отнесены сигналы с ПОС более 10 л/с. В WAVE26 это сигналы с номерами 2, 12, 15, 25, 26.

Результаты исследований. На основании исследований процессов в турбинном преобразователе потока, проведенных с помощью разработанной математической модели, были получены следующие результаты.

Анализ моментов сил, действующих на ротор измерительной турбины, позволил получить статическую составляющую передаточной функции ТПП в виде аппроксимирующего выражения с тремя коэффициентами (выражения (19), (20)).

Исследования динамических свойств ротора ИТ позволили установить, что он является аperiodическим звеном первого порядка с соответствующей динамической характеристикой, значение постоянной времени которой, зави-

сит от входного расхода.

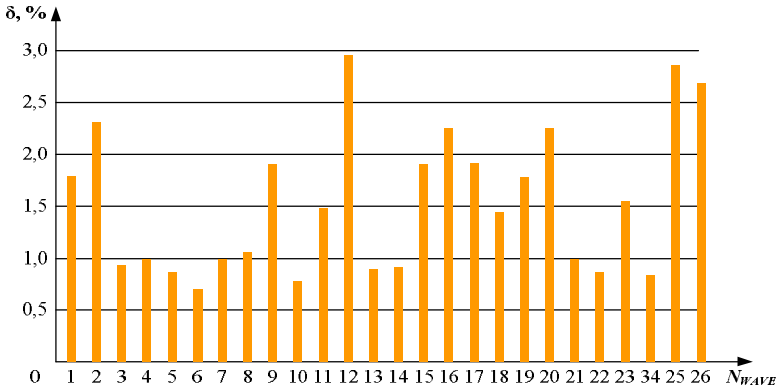


Рис. 6 – Относительная погрешность измерения ОФВ1.

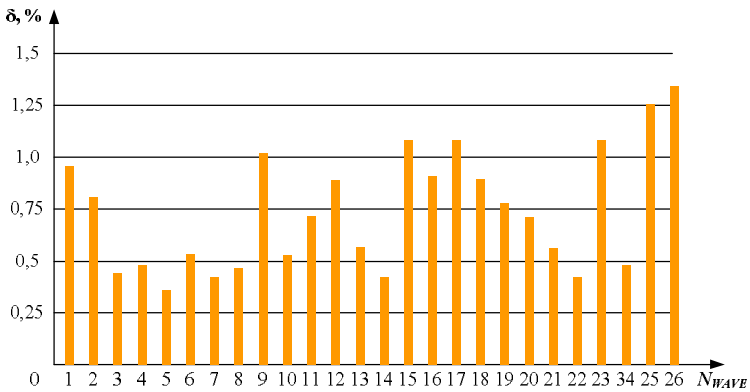


Рис. 7 – Относительная погрешность измерения $T_{\text{пос}}$.

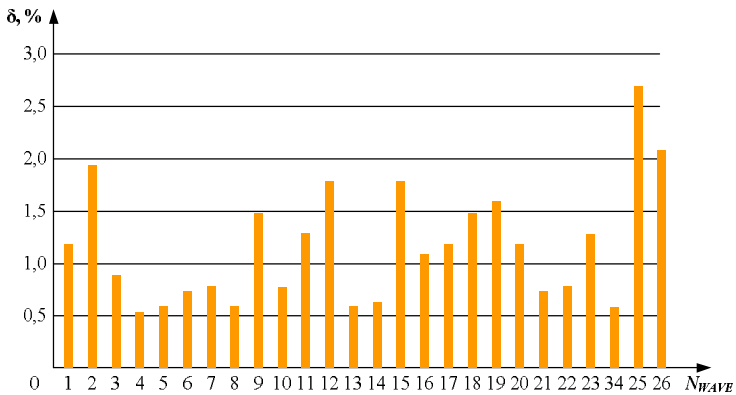


Рис. 8 – Относительная погрешность измерения ПОС.

Была предложена и обоснована передаточная функция турбины вида $Q_i = f(T_i)$ (выражение (23)), для определения коэффициентов которой была разработана оригинальная методика.

Исследования, проведенные при использовании специализированного инженерного пакета Flow Simulation, подтвердили работоспособность методики и возможность определения показателей ФВД с погрешностями, не превышающими допустимых значений.

Список литературы: 1. Сахно Ю. Ф. Исследование вентиляционной функции легких: учебно-методическое пособие – М.: Издательство РУДН, 2005. – 83 с. 2. Бошняк Л. Л. Тахометрические расходомеры – Л.: Машиностроение, 1968. – 212 с. 3. Кипенский А. В. Импульсно-цифровые и цифро-импульсные преобразователи: Учеб. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 132 с. 4. 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. 5. Бобровников Г. Н. Теория и расчет турбинных расходомеров. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 128с. 6. [http://www.thoracic.org/education/pulmonary function testing/spirometry wave forms/wave26/W500.TXT](http://www.thoracic.org/education/pulmonary%20function%20testing/spirometry%20wave%20forms/wave26/W500.TXT)

Поступила в редколлегию 25.10.2012

УДК 615.47

Математическое моделирование процессов в турбинном преобразователе потока портативного спирометра / А.В. Кипенский, Р.С. Томашевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 54(960). – С. 86–98. – Бібліогр.: 6 назв.

Проведено детальний аналіз процесу руху ротора вимірювальної спірометричної турбіни під дією повітряного потоку. В результаті досліджень отримана передатна функція вимірювальної турбіни. Проведено експериментальні дослідження на віртуальній моделі, які підтверджують можливість використання отриманої характеристики для відновлення функції вхідного витрати.

Ключові слова: вимірювальна турбіна, момент руху ротора, передавальна функція, спірометр, турбинний перетворювач потоку.

The article provides a detailed analysis of the motion of the rotor measuring spirometric turbines under the influence of air flow. The studies obtained transfer function measuring turbine. Experimental studies on the virtual model, which confirm the possibility of using the resulting data to restore function of the input flow.

Key words: measuring turbine, moment of rotor motion, transfer function, spirometry, turbine flow converter.