

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКА ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ИСКУССТВЕННЫЕ ЛЕГКИЕ»

В.А. Погонин¹, А.А. Третьяков¹, В.М. Зарипова²

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); ipu@ahp.tstu.ru;
ОАО «Казанский химический научно-исследовательский институт», г. Казань (2)*

Представлена членом редколлегии профессором В.Г. Матвейкиным

Ключевые слова и фразы: алгоритм идентификации; внешнее дыхание человека; изолирующие дыхательные аппараты; комплекс «Искусственные легкие»; математическая модель.

Аннотация: Приведена методика идентификации динамических характеристик блока потребления кислорода. Оценена точность математической модели исполнительного устройства блока потребления кислорода.

В настоящее время установки «Искусственные легкие» (ИЛ) являются основным инструментом для проведения испытаний изолирующих дыхательных аппаратов (ИДА), что не требует привлечения людей-добровольцев [1].

Изолирующие дыхательные аппараты предназначены для защиты органов дыхания, лица и глаз от любой вредной примеси в воздухе независимо от ее концентрации, при выполнении работ в условиях недостатка или отсутствия кислорода, а также при наличии вредных примесей, не задерживаемых фильтрующими противогАЗами. Принцип действия ИДА основан на изоляции органов дыхания, очистке выдыхаемого воздуха от диоксида углерода и воды и обогащении его кислородом без обмена с окружающей средой.

Установка ИЛ представляют собой испытательный программно-аппаратный комплекс, имитирующий ряд физиологических и психофизиологических процессов, протекающих в организме человека, совокупность которых носит название внешнего дыхания человека, в том числе и потребление кислорода и выделение диоксида углерода [2]. Одним из основных блоков установки ИЛ является блок потребления кислорода, имитирующий потребление кислорода путем отсоса из установки ИЛ (сброс в атмосферу) определенного объема газовой дыхательной смеси (ГДС).

Для проведения имитационных исследований функционирования блока потребления кислорода при реализации внешнего дыхания человека используется математическая модель (ММ) потребления кислорода пользователем ИДА на основе системы дифференциальных и алгебраических уравнений. Пригодность математической модели для решения задач имитационного исследования, а также задач оптимального управления во многом определяется точностью прогноза по математической модели объема ГДС, удаляемого из системы на фазе вдоха, и объемов азота и диоксида углерода, возвращаемых в систему на фазе вдоха, концентраций компонентов.

В математическую модель динамики потребления кислорода пользователем ИДА входят неизвестные параметры (динамические характеристики блока потребления кислорода), значения которых необходимо определить по результатам экспериментов.

Идентификации подлежат следующие динамические характеристики исполнительного устройства блока потребления кислорода:

- постоянная времени T линейного электропривода с поршневым дозатором;
- коэффициент передачи K_d линейного электропривода с поршневым дозатором.

Предлагается следующая методика идентификации.

В общем случае математическая модель может быть представлена в виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}, \tau), \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор входных координат; $\boldsymbol{\eta}$ – вектор идентифицируемых параметров; $\boldsymbol{\gamma}$ – вектор параметров, заданных априорно; \mathbf{y} – вектор выходных переменных; τ – время.

Считается, что идентификация ММ состоит из двух этапов: коррекции вектора $\boldsymbol{\eta}$ и проверки адекватности откорректированной модели.

Математическая модель объекта считается адекватной, если приведенная погрешность ε во всех экспериментах каждой из координат адекватности, в качестве которых выступают измеряемые выходные переменные y_j , не превышает заданного допустимого значения $\varepsilon_{\text{доп } j}$. Величина ε определяется по формуле

$$\varepsilon_j = \max_{\tau} \frac{|y_j^p(\tau) - y_j^3(\tau)|}{\overline{y_j^3} - \underline{y_j^3}}, \quad (2)$$

где y_j^p, y_j^3 – расчетное и экспериментальное значения соответствующей координаты адекватности y при одинаковых значениях входных параметров объекта, $\overline{y_j^3}, \underline{y_j^3}$ – диапазон изменения j -й координаты адекватности.

Учитывая, что при экспериментальном определении получают не $y_j^3(\tau)$, а $y_j^3(\Delta_j \zeta)$ для $\zeta = \overline{0, n_j}$, где n_j – количество измерений j -й выходной измеряемой переменной; Δ_j – шаг дискретизации по времени для j -й переменной, формула (2) переписывается в виде

$$\varepsilon_j = \max_{\zeta} \frac{|y_{j\zeta}^p - y_{j\zeta}^3|}{\overline{y_j^3} - \underline{y_j^3}}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

где J – количество измеряемых выходных переменных; ζ – номер измерения.

Все экспериментальные данные делятся на две выборки: поверочную и рабочую, и при идентификации ММ осуществляется обмен экспериментальными данными между упомянутыми выборками. Поверочная выборка используется для проверки точности математической модели, рабочая – для коррекции настроечных коэффициентов модели.

Задача коррекции ММ математически формулируется следующим образом. Из физического смысла следует, что вектор $\boldsymbol{\eta}$ принадлежит ограниченной области допустимых значений \mathbf{V} .

Пусть экспериментальным путем получены значения входных x_{wz}^3 и выходных $y_{j\zeta z}$ параметров, где $w = \overline{1, W}$; $z = \overline{1, Z}$; $j = \overline{1, J}$; $\zeta = \overline{1, n_j}$. Соответственно W, Z означают размерность вектора входных параметров и количество проведенных экспериментов. Далее находится решение ММ при подстановке в качестве входных координат вектора \mathbf{x}^3 и строится неотрицательная функция

$$F(\boldsymbol{\eta}) = \sum_{z=1}^Z \sum_{j=1}^J \sum_{\zeta=1}^{n_j} \left(\frac{y_{j\zeta z}^p - y_{j\zeta z}^3}{y_{jz}^3 - \underline{y}_{jz}^3} \right)^2, \quad (4)$$

где $\overline{y_{jz}^3}$, $\underline{y_{jz}^3}$ – верхняя и нижняя границы изменения j -й координаты адекватности в z -м эксперименте соответственно.

Коррекция ММ заключается в отыскании $\boldsymbol{\eta}^* \in \mathbf{V}$ такого, что

$$\boldsymbol{\eta}^* = \underset{\boldsymbol{\eta} \in \mathbf{V}}{\operatorname{argmin}} F(\boldsymbol{\eta}). \quad (5)$$

Блок-схема алгоритма идентификации математической модели процессов, протекающих в контактном аппарате, приведена на рис. 1.

В блоке 1 вводятся экспериментальные данные $y_{j\zeta z}^3$ ($j = \overline{1, J}$; $\zeta = \overline{1, n_j}$; $z = \overline{1, Z}$) из поверочной и рабочей выборок, а в блоке 2 присваивается начальное значение $r = 0$ счетчика числа коррекции математической модели. В блоке 3 определяются расчетные значения $y_{j\zeta z}^p$ ($j = \overline{1, J}$; $\zeta = \overline{1, n_j}$; $z = \overline{1, Z}$) выходных параметров с помощью математической модели исполнительных устройств блока потребления кислорода для условий каждого эксперимента поверочной выборки. В следующем блоке 4 сравниваются погрешности ϵ_j с предельными значениями $\epsilon_{\text{доп } j}$. Если погрешность удовлетворительная для всех экспериментов поверочной выборки, то в блоке 6 делается вывод об адекватности модели объекту. В противном случае в блоке 5 проверяется выполнение равенства $r = 0$. Если оно имеет место, то в блоке 8 решается задача коррекции модели с использованием данных эксперимента рабочей выборки. В результате определяется вектор $\boldsymbol{\eta}$ настроечных коэффициентов математической модели. Далее в блоке 9 значение r увеличивается на 1 и производится возврат к блоку 3.

Если $r \neq 0$, то в блоке 7 проверяется условие $r > r_m$, где r_m – число обращений к рабочей выборке. Если оно не выполняется, то в блоке 10 производится обмен 20 % наиболее точных экспериментов из рабочей выборки. Затем производится переход к блоку 8. Если $r > r_m$, то в блоке 11 делается вывод о том, что модель не адекватна объекту, и необходимо менять ее структуру.

Применительно к математической модели динамики блока потребления кислорода (линейного электропривода с поршневым дозатором) – вектор входных координат имеет вид

$$\mathbf{x} = \{U, n, V_d, W_{\text{CO}_2}\},$$

где U – напряжение на линейном электроприводе, В; n – частота дыхания, мин^{-1} ; V_d – глубина дыхания, дм^3 ; W_{CO_2} – поток подачи CO_2 , имитирующего выделение человеком диоксида углерода, $\text{дм}^3/\text{с}$.

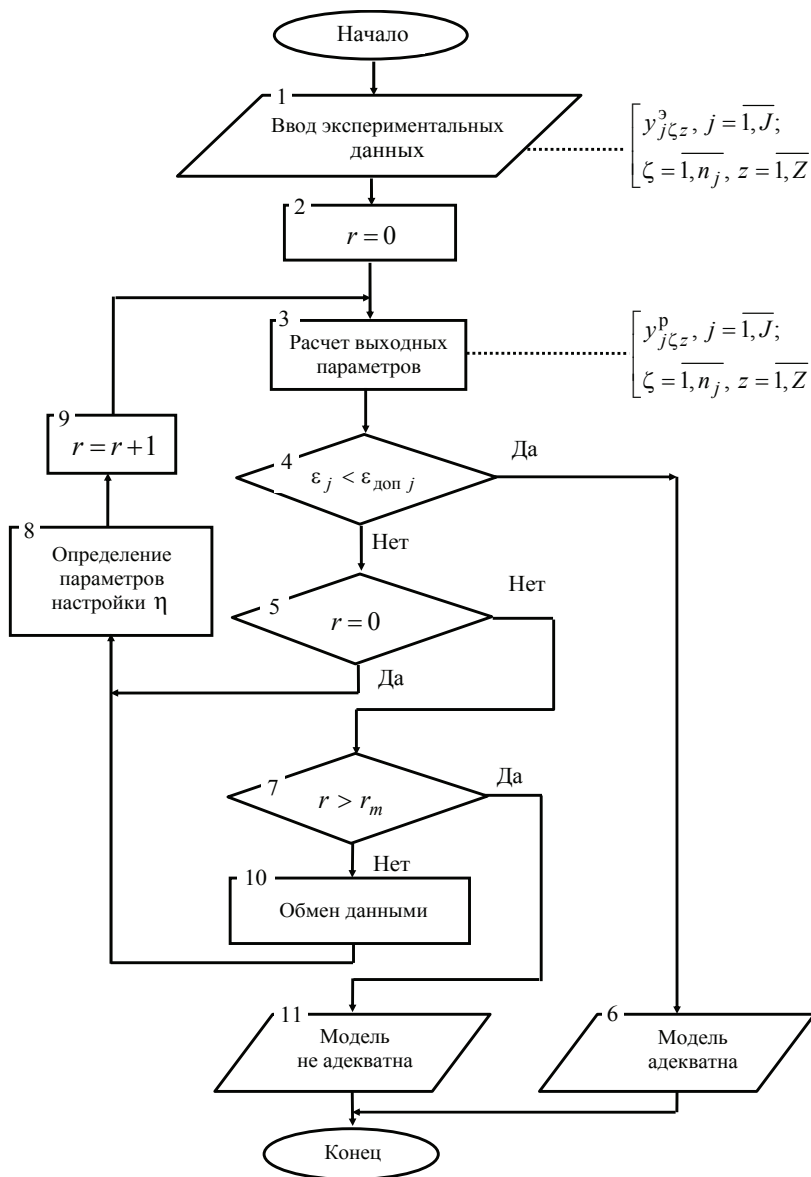


Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации динамических характеристик блока потребления кислорода

Вектор выходных переменных принимает вид

$$\mathbf{x} = \{v, X_{\Pi}\},$$

где v – скорость движения штока линейного электродвигателя, м/с; X_{Π} – положение штока линейного электродвигателя, м.

Вектор идентифицируемых параметров $\boldsymbol{\eta} = \{T, K_d\}$.

Точность математической модели оценивается по следующим величинам:

$$\varepsilon_1 = \max_{\zeta} \frac{|(v)_{\zeta}^p - (v)_{\zeta}^a|}{(v)_{\zeta}^p - (v)_{\zeta}^a}, \quad \zeta = \overline{1, n_1}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \max_{\zeta} \left| \frac{(X_{\Pi})_{\zeta}^p - (X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}{\overline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}} - \underline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}} \right|, \quad \zeta = \overline{1, n_2}, \quad (7)$$

где $(v)_{\zeta}^{\text{э}}$, $(v)_{\zeta}^p$ – экспериментальное и рассчитанное по модели значения v в ζ -й момент времени соответственно; $\overline{(v)_{\zeta}^{\text{э}}}$, $\underline{(v)_{\zeta}^{\text{э}}}$ – максимальное и минимальное значения v соответственно; $(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}$, $(X_{\Pi})_{\zeta}^p$ – экспериментальное и расчетное значения X_{Π} в ζ -й момент времени соответственно; $\overline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}$, $\underline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}$ – максимальное и минимальное значения W_{N_2} соответственно.

Определяется неотрицательная выпуклая функция

$$F(\boldsymbol{\eta}) = \sum_{z=1}^Z \sum_{\zeta=1}^{n_1} \left(\frac{(v(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta z}^p - (v)_{\zeta z}^{\text{э}}}{\overline{(v)_{\zeta z}^{\text{э}}} - \underline{(v)_{\zeta z}^{\text{э}}}} \right)^2 + \sum_{z=1}^Z \sum_{\zeta=1}^{n_2} \left(\frac{(X_{\Pi}(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta z}^p - (X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}}{\overline{(X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}} - \underline{(X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}}} \right)^2, \quad (8)$$

где $(X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}$, $(X_{\Pi}(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta z}^p$ – экспериментальное и рассчитанное по модели значения положения штока в ζ -й момент времени в z -м эксперименте; $\overline{(X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}}$; $\underline{(X_{\Pi})_{\zeta z}^{\text{э}}}$ – верхние и нижние границы изменения положения штока в z -м эксперименте соответственно; $(v)_{\zeta z}^{\text{э}}$, $(v(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta z}^p$ – экспериментальное и рассчитанное по модели значения скорости движения штока в ζ -й момент времени в z -м эксперименте соответственно; $\overline{(v)_{\zeta z}^{\text{э}}}$, $\underline{(v)_{\zeta z}^{\text{э}}}$ – верхняя и нижняя границы изменения скорости движения штока в z -м эксперименте соответственно.

Обратная задача определения параметров K_d , T таких, что функция (8) достигает на них своей нижней грани, относится к классу устойчивых конечномерных задач, которые всегда имеют решение, возможно не единственное [3]. Это решение находят тем или иным итерационным методом поиска минимума функции двух переменных.

Определение параметров K_d , T проводилось методом сканирования в возможной области изменения этих параметров.

В результате сканирования функции (8) был найден минимум $F(\boldsymbol{\eta})$, который достигался при $K_d^* = 1,012 \text{ м}/(\text{В} \cdot \text{с}^2)$; $T^* = 0,104 \text{ с}$.

На рисунке 2 изображены расчетные v^p и экспериментальные $v^{\text{э}}$ значения скорости движения штока линейного электродвигателя. На рисунке 3 представлены расчетные X_{Π}^p и экспериментальные $X_{\Pi}^{\text{э}}$ значения положения штока линейного электродвигателя.

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что модель адекватна, и ошибка модели O_M составляет 1,3 %.

$$O_M = \frac{1}{Z} \left(\sum_{\zeta=1}^{n_1} \left| \frac{(v(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta}^p - (v)_{\zeta}^{\text{э}}}{\overline{(v)_{\zeta}^{\text{э}}} - \underline{(v)_{\zeta}^{\text{э}}}} \right| + \sum_{\zeta=1}^{n_2} \left| \frac{(X_{\Pi}(\boldsymbol{\eta}))_{\zeta}^p - (X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}{\overline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}} - \underline{(X_{\Pi})_{\zeta}^{\text{э}}}} \right| \right),$$

где Z – число экспериментов в поверочной выборке.

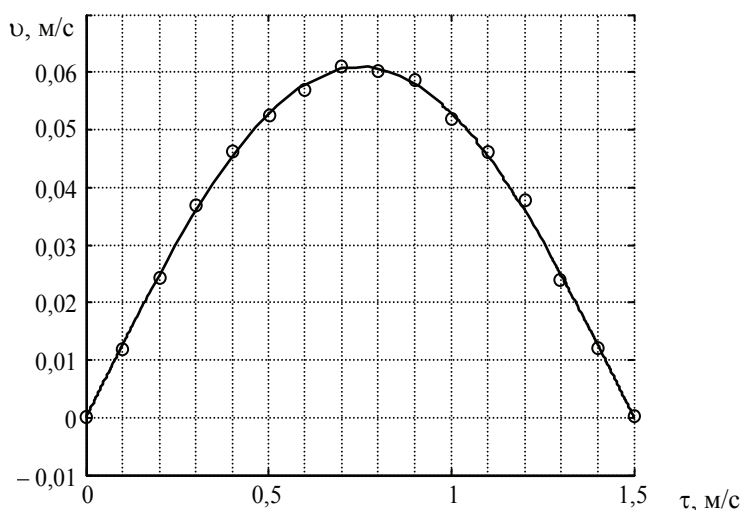


Рис. 2. Скорость движения штока линейного электродвигателя:

— $-v^p$; $\circ - v^3$

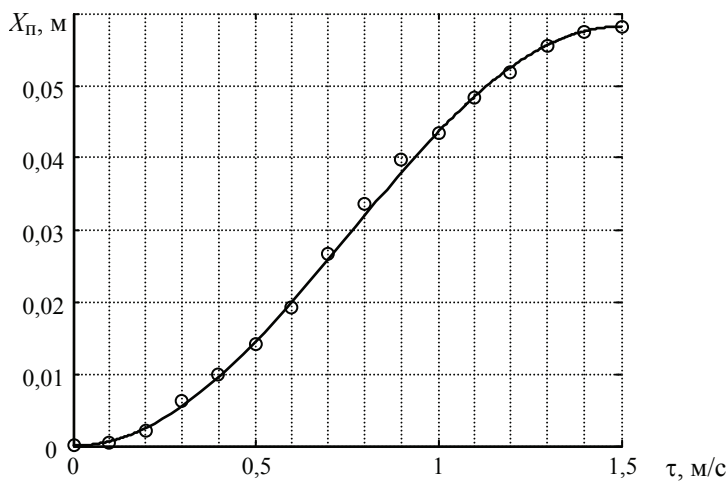


Рис. 3. Положение штока линейного электродвигателя:

— $-v^p$; $\circ - v^3$

Таким образом, анализируя рис. 2, 3 и ошибку модели, можно утверждать, что точность математической модели достаточна для принятия оптимальных проектных решений на всех этапах разработки и сопровождения комплекса ИЛ.

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.В37.21.2083 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

- ГОСТ Р 12.4.220–2001 ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Аппараты изолирующие автономные с химически связанным кислородом (самоспасатели). Общие технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2001–08–21. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 23 с.

2. Разработка автоматизированного стенда для испытаний дыхательных аппаратов, используемых для защиты человека при чрезвычайных ситуациях / С.Б. Путин [и др.] // Автоматизация в пром-сти. – 2010. – № 12. – С. 64–68.

3. Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации : учеб. пособие / А.Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – М. : Физматлит, 2003. – 304 с.

Identification of Dynamic Characteristics of Oxygen Consumption Unit in Testing Facility “Artificial Lungs”

V.A. Pogonin¹, A.A. Tretyakov¹, V.M. Zaripova²

*Department “Information Processes and Control”, TSTU (1); ipu@ahp.tstu.ru;
Kazan Chemical Research Institute, Kazan (2)*

Key words and phrases: “Artificial lungs”; human external respiration; identification algorithm; mathematical model; self-contained breathing apparatus.

Abstract: The paper describes the method for identification of dynamic characteristics of oxygen consumption unit. The accuracy of the mathematical model for oxygen consumption unit has been estimated.

Identifizierung der dynamischen Charakteristiken des Blocks des Verbrauches des Sauerstoffes des Testkomplexes «künstliche Lungen»

Zusammenfassung: Es ist die Methodik der Identifizierung der dynamischen Charakteristiken des Blocks des Verbrauches des Sauerstoffes angeführt. Es ist die Genauigkeit des mathematischen Modells der vollziehenden Einrichtung des Blocks des Verbrauches des Sauerstoffes bewertet.

Identification des caractéristiques dynamiques du groupe de la consommation de l’oxygène du complexe d’essais «Poumons artificiels»

Résumé: Est exécutée la méthode de l’identification des caractéristiques dynamiques du groupe de la consommation de l’oxygène. Est évaluée la précision du modèle mathématique du dispositif du groupe de la consommation de l’oxygène.

Авторы: *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Третьяков Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Зарипова Валерия Маратовна* – младший научный сотрудник, ОАО «Казанский химический научно-исследовательский институт», г. Казань.

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».